

# Ein Beitrag zu neuartigen Verfahren für die Erkennung und Modellierung von Messobjekten

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTORINGENIEUR

(Dr.-Ing.)

vorgelegt der Fakultät für Maschinenbau  
der  
Technischen Universität Ilmenau

von  
Dipl.-Ing.  
Christian Usbeck

geboren am 03.06.1967 in Suhl

Gutachter:     1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Linß  
                  2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Schwarz  
                  3. Dr. rer. nat. Notni

Vorgelegt am: 20.02.2003

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 31. 03. 2004

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Präzisionstechnik und Automation (IPtA) der Technischen Universität Ilmenau.

An dieser Stelle möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. G. Linß, dem Leiter des Fachgebietes Qualitätssicherung, für die wissenschaftliche Betreuung danken.

Besonderer Dank gilt auch den Herren Dr.-Ing. P. Brückner, Dipl.-Math. Thomas Ortlepp und Dipl.-Ing. Torsten Kludas, die mir in vielen Gesprächen wertvolle Hinweise gaben.

Nicht zuletzt möchte ich mich für die Anregungen bedanken, die ich durch Diskussionen im Mitarbeiterkreis des Fachgebietes Qualitätssicherung erhielt.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>I</b>	<b>Untersuchungen zum Entwicklungsstand von Tachymetermesssystemen und Bildverarbeitungsverfahren in der Landvermessung</b>	
<b>2</b>	<b>Entwicklungsstand bildverarbeitender Vermessungssysteme</b>	<b>4</b>
2.1	Übersicht zu Vermessungssystemen mit integrierter Bildverarbeitung . . .	4
2.1.1	Digitalnivelliere . . . . .	4
2.1.2	Theodolitsystem mit integrierter Kamera . . . . .	5
2.1.3	Laser-Messsystem Surveyor ALS . . . . .	6
2.1.4	Hybride Systeme . . . . .	7
2.1.5	Videogesteuertes Tachymeter der Firma SOKKIA . . . . .	8
2.1.6	Weitere gerätetechnische Lösungen und Messverfahren . . . . .	9
2.1.7	Bewertung des Entwicklungsstandes . . . . .	10
2.2	Untersuchungen zur patentrechtlichen Situation . . . . .	11
2.2.1	Schutzrechte zu Messverfahren und Geräteanordnungen . . . . .	11
2.2.2	Schutzrechte zu Bildverarbeitungsverfahren . . . . .	13
2.2.3	Weitere Patentrecherchen . . . . .	15
2.2.4	Bewertung der patentrechtlichen Situation . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Bildverarbeitungsverfahren zur Erkennung elementarer Bildmuster</b>	<b>17</b>
3.1	Beschreibung geodätischer Ziele durch elementare Bildmuster . . . . .	17
3.2	Punkt detektion . . . . .	22
3.3	Kanten- und Linienextraktion . . . . .	26
3.4	Extraktion lokaler Bildstrukturen . . . . .	29
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung und Präzisierung der Aufgabenstellung</b>	<b>32</b>
<b>II</b>	<b>Theoretische Untersuchungen zur Bestimmung der Position von signalisierten und nicht signalisierten Vermessungspunkten</b>	
<b>5</b>	<b>Kooperative Messpunkte</b>	<b>35</b>
5.1	Analytische Beschreibung der Prismenanzielung . . . . .	35
5.1.1	Beschreibung der Anzielung im Intensitätsbild . . . . .	36
5.1.2	Beschreibung der Anzielung im Binärbild . . . . .	38
5.2	Approximation des Zielmusters . . . . .	39
5.3	Modellierung einer Leuchtfleckstruktur . . . . .	44
5.4	Methoden zur Unterdrückung von Störsignalen . . . . .	49

<b>6</b>	<b>Nicht kooperative Messpunkte</b>	<b>51</b>
6.1	Lokalisierung von Zielmustern . . . . .	51
6.2	Anzielung von Fluchtstäben . . . . .	60
<b>7</b>	<b>Nicht signalisierte Messpunkte</b>	<b>66</b>
7.1	Konturpunkte und lineare Konturen . . . . .	66
7.1.1	Bestimmung der Kontur in einem Punkt . . . . .	68
7.1.2	Bestimmung gerader Konturen zwischen zwei Punkten . . . . .	76
7.1.3	Anzielung und Lokalisierung von Farbkonturen . . . . .	81
7.2	Bestimmung einer mittleren Kontur . . . . .	82
<b>8</b>	<b>Automatische Lokalisierung mehrerer kooperativer Ziele</b>	<b>90</b>
8.1	Laterale Histogrammtechnik . . . . .	91
8.2	Clusteranalyse . . . . .	95
8.3	Houghtransformation . . . . .	97
8.4	Weitere Verfahren zur Detektion mehrerer Ziele . . . . .	100
8.5	Auswertung und Vergleich der Verfahren . . . . .	103
<b>III Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Position von signalisierten und nicht signalisierten Vermessungspunkten</b>		
<b>9</b>	<b>Untersuchung der Anzielunsicherheit für kooperative Zielmarken</b>	<b>106</b>
9.1	Anzielunsicherheit im Binärbild . . . . .	108
9.2	Anzielunsicherheit im Intensitätsbild . . . . .	111
9.2.1	Schwerpunktverfahren . . . . .	111
9.2.2	Lokale Approximation der Zielmuster . . . . .	113
9.2.3	Bestimmung der Ellipsenparameter . . . . .	117
9.3	Auswertung der Simulationsergebnisse und Auswahl eines Verfahrens . . . . .	120
9.4	Bestimmung der Positionsunsicherheit für reale Messanordnungen . . . . .	121
9.4.1	Einfluss von Strukturgröße und Kamerabelichtungszeit . . . . .	121
9.4.2	Messunsicherheit eines motorisierten bildverarbeitenden Tachymetersystems . . . . .	124
<b>10</b>	<b>Einfluss von Textur- und Intensitätsänderung auf den Kantenort</b>	<b>129</b>
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>134</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>136</b>
<b>A</b>	<b>Ergebnisse theoretischer Untersuchungen</b>	<b>I</b>
A.1	Untersuchung eines Approximationsansatzes für die Modellierung signalisierter kooperativer Messpunkte . . . . .	II
A.2	Reduzierung der Rauscheinflüsse für die histogrammbasierte Lokalisierung von Objekten . . . . .	IV
A.3	Verfahren zur Konturpunktextraktion am Beispiel einer realen Messszene . . . . .	VI
A.4	Histogrammdarstellung von Texturverläufen . . . . .	VII
A.5	Einfluss der Houghparametrisierung auf die Lokalisierung von Kreisstrukturen . . . . .	VIII

A.5.1	Konturdaten und Konturparametrisierung . . . . .	VIII
A.5.2	Flächige Bildstruktur und Konturparametrisierung . . . . .	VIII
A.5.3	Flächige Bildstruktur und flächige Kreisparametrisierung . . . . .	IX
A.5.4	Flächige Bildstruktur, flächige Kreisparametrisierung und Rauschen . . . . .	IX
<b>B</b>	<b>Simulation der Prismenanzielung</b>	<b>X</b>
B.1	Unsicherheit der Anzielung im Binärbild . . . . .	XI
B.2	Anzielunsicherheit des Schwerpunktverfahrens . . . . .	XIII
B.3	Anzielunsicherheit der Polynomapproximation . . . . .	XV
B.4	Anzielunsicherheit der Ellipsenapproximation . . . . .	XVII
<b>C</b>	<b>Lokalisierung von Prismenregionen</b>	<b>XIX</b>
C.1	Testbilder für die Bestimmung von Regionen . . . . .	XX
C.2	Laterale Histogrammtechnik . . . . .	XXII
C.3	Segmentierung durch Clusterbildung . . . . .	XXIII
C.3.1	Clusterbildung mit mehreren Prismen . . . . .	XXIII
C.3.2	Clusterbildung bei überlappenden Prismen . . . . .	XXIX
C.3.3	Clusterbildung bei gestörten Prismenbildern . . . . .	XXXIII
C.3.4	Clusterbildung bei matrixförmiger Prismenanordnung . . . . .	XXXIV
C.3.5	Clusterbildung bei unterschiedlicher Prismenentfernung . . . . .	XXXV
C.3.6	Clusterbildung bei diagonaler Prismenanordnung . . . . .	XXXVI
C.3.7	Clusterbildung bei versetzter matrixförmiger Prismenanordnung . . . . .	XXXVII
C.4	Houghtransformation . . . . .	XXXVIII
C.5	Komponentenanalyse . . . . .	XXXIX
C.6	L1 Distanzanalyse . . . . .	XLI
C.7	L2 Distanzanalyse . . . . .	XLIII
C.8	Template Matching . . . . .	XLV
<b>D</b>	<b>Softwaremodule</b>	<b>XLVIII</b>
D.1	Programm zur Konvertierung einer Bitmap in multivariate Daten . . . . .	XLVIII
D.2	Lokale Eigenschaften einer Fläche zweiter Ordnung . . . . .	LI
D.3	Bestimmung des Schwerpunktes einer Intensitätsverteilung . . . . .	LV
D.4	Berechnung des Mittelwertes eines binären Musters . . . . .	LVII
D.5	Bestimmung des Maximums einer zweidimensionalen Intensitätsverteilung . . . . .	LIX
D.6	Approximation einer Ellipse . . . . .	LX
D.7	Programmmodul zur Berechnung eindimensionaler Gaußfilterkerne . . . . .	LXII
D.8	Template Matching mit „Halcon“ . . . . .	LXIV

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Prinzip der bedienergestützten optischen Informationsverarbeitung . . . . .	2
1.2	Prinzip der objektivierten elektronischen Informationsverarbeitung . . . . .	2
1.3	Prinzip der automatischen Anzielung eines Reflektors . . . . .	2
2.1	DiNi 10 Schnittbild mit CCD-Zeile . . . . .	4
2.2	DiNi 21 . . . . .	4
2.3	Videotheodolit TM3000V . . . . .	5
2.4	Surveyor ALS . . . . .	7
2.5	Geodimeter TS mit Kamera . . . . .	8
2.6	Zylindrisch deformiertes Bild des externen Zeilensensors . . . . .	8
2.7	Videogesteuertes Tachymeter SET3110MV . . . . .	8
2.8	Callidus Laser Scanner . . . . .	9
2.9	Cyrax 2500 Laser Scanner . . . . .	9
3.1	Markierung eines Messpunktes mit einem Prisma . . . . .	18
3.2	Sichtbares Prismenbild für den Vermesser . . . . .	18
3.3	Prismenbild eines CCD-Bildempfängers bei coaxialer Beleuchtung . . . . .	18
3.4	Markierung eines Messpunktes mit einer Zieltafel . . . . .	18
3.5	Anzielhilfen für die Reflektormessung . . . . .	18
3.6	Bestimmung der Kontur in einem Punkt . . . . .	19
3.7	Bestimmung eines Konturpunktes mittels Geradenschnitt . . . . .	19
3.8	Bestimmung der Konturlinie aus zwei Anzielpunkten . . . . .	20
3.9	Messung einer Linie in einem Punkt . . . . .	20
3.10	Bestimmung der mittleren Kontur . . . . .	20
3.11	Sternoperator mit Ellipsenausgleichung . . . . .	23
3.12	Zhou-Ellipsenoperator . . . . .	23
3.13	Faltungskern $G_x(x)$ . . . . .	28
3.14	Faltungskern $G_{xx}(x)$ . . . . .	28
3.15	Taylor-Reihenzerlegung $f(x, y) = 0.5x^2 - 0.1y^2$ . . . . .	30
4.1	Wissensbasierte Betrachtung geodätischer Messpunkte . . . . .	33
5.1	Sichtbare Kanten eines Prismas im Nahbereich . . . . .	35
5.2	Prinzip der Ausgleichsrechnung . . . . .	35
5.3	Modell der automatischen Prismenanzielung . . . . .	36
5.4	Lokaler Bildausschnitt einer Prismenstruktur . . . . .	39
5.5	Funktionsplot der approximierten Spotstruktur . . . . .	40
5.6	Elliptische Strukturen verschiedener Drehwinkel $\alpha$ . . . . .	42
5.7	Approximationspolynome ausgewählter elliptischer Strukturen . . . . .	42

---

5.8	Intensitätsprofil einer Zielmarke entlang einer Bildzeile . . . . .	44
5.9	Separierung von Reflektorsignalen mittels Bildsubtraktion . . . . .	50
6.1	Anzielmuster von geodätischen Zieltafeln . . . . .	51
6.2	Approximationspolynome der Zieltafel I für unterschiedliche Drehlagen . .	52
6.3	Approximationspolynome der Zieltafel II für unterschiedliche Drehlagen . .	55
6.4	Approximationspolynome der Zieltafel III für unterschiedliche Drehlagen . .	56
6.5	Weitere durch einen Sattel zweiter Ordnung beschreibbare Zielmuster . . .	58
6.6	Markierung eines Messpunktes mit einem Zielmuster höherer Ordnung . . .	59
6.7	Approximierter Funktionsverlauf . . . . .	59
6.8	Bestimmung des Boden-Durchstoßpunktes mit einem Fluchtstab . . . . .	60
6.9	Lokale Approximationen der Fläche zweiter Ordnung . . . . .	61
6.10	Funktionsverlauf einer Fläche zweiter Ordnung für $e_1 \gg e_2$ . . . . .	62
6.11	Bestimmung des Suchstrahls in Richtung des kleinsten Eigenwertes . . . .	63
6.12	Algorithmus zur Ableitung des Boden-Durchstoßpunktes . . . . .	64
6.13	Algorithmus zur Bestimmung der Lage des Fluchtstabes . . . . .	65
7.1	Sigmoidmodell für den Kantenverlauf $I_{LH}$ . . . . .	67
7.2	Intensitätsverlauf $I_{RGB}$ an einer texturierten Hauskontur . . . . .	67
7.3	Beispiele für Konturübergänge an Hausfassaden . . . . .	67
7.4	Einfluss von Textur- und Intensitätsänderungen auf den Kantenort . . . . .	69
7.5	Ansätze zur Modellierung des Kantenverlaufs . . . . .	69
7.6	Analytische Bestimmung des Kantenortes . . . . .	70
7.7	Gemittelter Intensitätsverlauf um eine vertikalen Kontur . . . . .	71
7.8	Asynchrone Antastung im gedrehten AOI . . . . .	71
7.9	Anwendung des „mean shift“ Verfahrens zur Beseitigung von Texturen . .	72
7.10	Nicht signalisierte Anzielung von Punkten an einer Hausfassade . . . . .	73
7.11	Höhenlinien der lokal approximierten Flächen in P1 bis P4 . . . . .	73
7.12	Höhenlinien der lokal approximierten Flächen in P5 bis P6 . . . . .	73
7.13	Approximierte Fläche um einen Konturpunkt . . . . .	74
7.14	Korrigierte Antastung senkrecht zur Kantenlage . . . . .	74
7.15	Konturpunktfilterung mit dem Canny-Operator . . . . .	76
7.16	Resultierendes Akkumulatorfeld transformierter Konturpunkte . . . . .	77
7.17	Ergebnis der Konturpunktverknüpfung . . . . .	77
7.18	Verknüpfung von Konturpunkten in einem Bildausschnitt . . . . .	78
7.19	Ausschnitt eines Akkumulatorfeldes nach der Houghtransformation . . . .	78
7.20	Konturbestimmung an einer texturierten Hauskante . . . . .	79
7.21	Prinzip der Punktselektion . . . . .	80
7.22	Struktogramm zur Bestimmung der Lage von ausgedehnten Kanten . . . .	80
7.23	Informationsverlust durch Grauwerttransformation . . . . .	81
7.24	Beispiele für Masten mit streifenförmiger Ausprägung . . . . .	82
7.25	Bestimmung der mittleren Mastkontur mit „Halcon“ . . . . .	83
7.26	Bildsegmentierung mit dem „mean shift“ Verfahren am Mast . . . . .	84
7.27	Intensitätsverlauf im Bereich des Mastes . . . . .	84
7.28	Konturlinienextraktion mit dem Shen-Castan Operator ( $b = 0, 6$ ) . . . . .	85
7.29	Konturlinienextraktion mit dem Shen-Castan Operator ( $b = 0, 9$ ) . . . . .	86
7.30	Optischer Strahlengang zur Bestimmung der Anzielgenauigkeit . . . . .	87

---

7.31	Bestimmung der mittleren Konturlinie mit Suchstrahlen . . . . .	88
7.32	Bestimmung der Konturlinien des Mastes . . . . .	89
8.1	Beispiele zur Anwendung der lateralen Histogrammtechnik . . . . .	91
8.2	Verwendung eines Schwellwertes zur Bestimmung der Prismenregionen . . . . .	92
8.3	Resultierende Prismenregionen der lateralen Histogrammtechnik . . . . .	92
8.4	Resultierende Region mit zwei Prismen . . . . .	93
8.5	Einschränkungen bei der Bestimmung von Prismenregionen . . . . .	93
8.6	Gaußfilterung zur Unterdrückung des Rauscheinflusses . . . . .	94
8.7	Bestimmung der Intervalle durch numerische Differentiation . . . . .	94
8.8	Prinzip der Houghtransformation am Beispiel eines Konturkreises . . . . .	97
8.9	Prinzip der Houghtransformation am Beispiel eines Vollkreises . . . . .	98
8.10	Kreisstrukturen . . . . .	98
8.11	Kreisstrukturen mit 20% Rauschanteil . . . . .	98
8.12	L2 Abstandsberechnung am Beispiel einer Kreisstruktur . . . . .	100
8.13	Bestimmung von Prismenregionen aus dem Maximum des L2 Abstandes . . . . .	101
8.14	Reale Messszene mit mehreren Prismen . . . . .	103
8.15	Anwendung der Clusteranalyse zur Lokalisierung von Prismenregionen in einer realen Prismenanordnung . . . . .	104
8.16	Anwendung der lateralen Histogrammtechnik zur Bestimmung der Prismenregionen in einer realen Prismenanordnung . . . . .	104
8.17	Anwendung der Houghtransformation zur Bestimmung der Prismenregionen in einer realen Prismenanordnung . . . . .	104
9.1	Einfluss des Schwellwertes auf die Binarisierung . . . . .	109
9.2	Positionsabweichung $\Delta P_m$ in Abhängigkeit von der Strukturgröße . . . . .	110
9.3	Maximaler Mittelwert von $\Delta P_m$ in Abhängigkeit von der Strukturgröße . . . . .	110
9.4	Maximale Standardabweichung von $\Delta P_m$ in Abhängigkeit von der Strukturgröße . . . . .	110
9.5	Positionsabweichung in Abhängigkeit von der Strukturgröße . . . . .	112
9.6	Maximaler Mittelwert von $\Delta P_m$ in Abhängigkeit von der Strukturgröße . . . . .	112
9.7	Maximale Standardabweichung von $\Delta P_m$ in Abhängigkeit von der Strukturgröße . . . . .	113
9.8	Verhalten der lokalen Approximation in Abhängigkeit der Facet-Größe . . . . .	114
9.9	Automatische Zentrierung der Facette . . . . .	115
9.10	Positionsabweichung $\Delta P_m$ für eine Facette der Ordnung $40 \times 40$ in Abhängigkeit von der Strukturgröße . . . . .	115
9.11	Maximaler Mittelwert von $\Delta P_m$ in Abhängigkeit der Strukturgröße . . . . .	116
9.12	Maximale Standardabweichung von $\Delta P_m$ in Abhängigkeit der Strukturgröße . . . . .	116
9.13	Positionsabweichung $\Delta P_m$ in Abhängigkeit von der Strukturgröße . . . . .	119
9.14	Maximaler Mittelwert von $\Delta P_m$ in Abhängigkeit von der Strukturgröße . . . . .	119
9.15	Maximale Standardabweichung von $\Delta P_m$ in Abhängigkeit von der Strukturgröße . . . . .	119
9.16	Kollimatoranordnung . . . . .	121
9.17	Histogramm einer Zielmarke mit Strukturdurchmesser von 30 Pixel . . . . .	122
9.18	Standardabweichung $S_x, S_y$ für eine Strukturbreite von 7 Pixel . . . . .	122
9.19	Standardabweichung $S_x, S_y$ für eine Strukturbreite von 9 Pixel . . . . .	123

9.20	Tachymeteraufbau . . . . .	124
9.21	Resultierende Positionsunsicherheit der Einzelmessungen für $\bar{x}_{ist} \pm 1\sigma$ . . .	126
9.22	Resultierende Positionsunsicherheit der Einzelmessungen für $\bar{x}_{ist} \pm 2\sigma$ . . .	127
9.23	Zusammenhang der ermittelten Positionsunsicherheit und der Geräteunsicherheit . . . . .	127
10.1	Diskreter Intensitätsverlauf mit überlagelter Textur . . . . .	129
10.2	Approximation texturierter Intensitätsverläufe . . . . .	130
10.3	Einfluss von Textur- und Intensitätsänderungen bei unterschiedlichem Anstieg der Kante . . . . .	131
A.1	Approximierter Verlauf der Modellfunktion $f(x) = \frac{1}{a}e^{-\frac{(x-b)^2}{c}}$ . . . . .	II
A.2	Approximierter Verlauf der Modellfunktion $f(x) = a + b\cos(cx + d)$ . . . . .	II
A.3	Approximierter Verlauf der Modellfunktion $f(x) = a + bx + cx^2 + dx^3$ . . . . .	III
A.4	Faltung des Histogrammverlaufs mit dem diskreten Gaußkern $G(x, \sigma = 1)$ . . . . .	IV
A.5	Faltung des Histogrammverlaufs mit dem diskreten Gaußkern $G(x, \sigma = 2)$ . . . . .	IV
A.6	Faltung des Histogrammverlaufs mit dem diskreten Gaußkern $G(x, \sigma = 3)$ . . . . .	V
A.7	Faltung des Histogrammverlaufs mit diskreten Gauß-Filterkernen $G(x, \sigma = 1, 2, 3)$ der Filterbreite $w = 7, 11, 15$ Pixel . . . . .	V
A.8	Eindimensionale Gaußfilterkurven mit dem Mittelwert $\mu = 0$ und Standardabweichungen $\sigma = 1, 2, 3$ . . . . .	V
A.9	Vergleich bekannter Verfahren zur Konturpunktextraktion . . . . .	VI
A.10	Histogrammdarstellung ausgewählter Texturbereiche . . . . .	VII
B.1	Positionsabweichung $\Delta P_m$ für einen Spot $\sigma_x = \sigma_y = 10$ . . . . .	XI
B.2	Mittelwert von $\Delta P_m$ für ein Spotmodell mit $\sigma_x = \sigma_y = 10$ und Rauschanteil $\beta(0, 1)$ . . . . .	XI
B.3	Standardabweichung von $\Delta P_m$ für ein Spotmodell mit $\sigma_x = \sigma_y = 10$ und Rauschanteil $\beta(0, 1)$ . . . . .	XI
B.4	Positionsabweichung für ein Spotmodell mit $\sigma_x = \sigma_y = 10$ . . . . .	XIII
B.5	Mittelwert von $\Delta P_m$ für ein Spotmodell ( $\sigma_x = \sigma_y = 10$ und $\beta(0, 1)$ ) . . . . .	XIII
B.6	Standardabweichung von $\Delta P_m$ für ein Spotmodell ( $\sigma_x = \sigma_y = 10$ und $\beta(0, 1)$ ) . . . . .	XIII
B.7	Positionsabweichung für eine Zielmarke $\sigma_x = \sigma_y = 12, V = 300$ . . . . .	XV
B.8	Mittelwert von $\Delta P_m$ für ein Spotmodell mit $\sigma_x = \sigma_y = 10$ und Rauschanteil $\beta(0, 1)$ . . . . .	XV
B.9	Standardabweichung von $\Delta P_m$ für ein Spotmodell mit $\sigma_x = \sigma_y = 10$ und Rauschanteil $\beta(0, 1)$ . . . . .	XV
B.10	Positionsabweichung eines Spotmodells $\sigma_x = \sigma_y = 10$ . . . . .	XVII
B.11	Mittelwert von $\Delta P_m$ für ein Spotmodell mit $\sigma_x = \sigma_y = 10$ und Rauschanteil $\beta(0, 1)$ . . . . .	XVII
B.12	Standardabweichung von $\Delta P_m$ für ein Spotmodell mit $\sigma_x = \sigma_y = 10$ und Rauschanteil $\beta(0, 1)$ . . . . .	XVII
C.1	Simulation von mehreren signalisierten Prismen . . . . .	XX
C.2	Simulation der Überlappung von zwei Prismen . . . . .	XX
C.3	Simulation gestörter Prismenbilder . . . . .	XX
C.4	Simulation von matrixförmig angeordneten Prismen . . . . .	XX
C.5	Simulation von Prismen unterschiedlicher Entfernung . . . . .	XX

C.6	Simulation von diagonal angeordneten Prismen . . . . .	XX
C.7	Simulation von gestörten Prismenbildern in unterschiedlicher Entfernung . . . . .	XXI
C.8	Simulation von versetzt matrixförmig angeordneten Prismen . . . . .	XXI
C.9	Simulation mehrerer signalisierter Prismen mit 10% zufälligem Rauschen . . . . .	XXI
C.10	Laterale Histogrammtechnik für überlappende Prismenbilder . . . . .	XXII
C.11	Laterale Histogrammtechnik mit mehreren Prismenbildern . . . . .	XXII
C.12	Laterale Histogrammtechnik für gestörte Prismenbilder . . . . .	XXII
C.13	Laterale Histogrammtechnik einer matrixförmigen Prismenanordnung . . . . .	XXII
C.14	Laterale Histogrammtechnik für Prismen unterschiedlicher Entfernung . . . . .	XXII
C.15	Laterale Histogrammtechnik einer diagonalen Prismenanordnung . . . . .	XXII
C.16	Clusterbildung mit Agglomerative Clustering . . . . .	XXIII
C.17	Clusterbildung mit Deterministic Annealing . . . . .	XXIII
C.18	Clusterbildung mit Distinction Sensitive Linear Vector Quantization . . . . .	XXIV
C.19	Clusterbildung mit Stochastic simulated annealing . . . . .	XXIV
C.20	Clusterbildung mit Fishers linear discriminant. . . . .	XXIV
C.21	Clusterbildung mit Fuzzy k-Means, Vorgabe 6 Cluster . . . . .	XXV
C.22	Clusterbildung mit Fuzzy k-Means, Vorgabe 7 Cluster . . . . .	XXV
C.23	Clusterbildung mit Basic Leader-Follower Clustering . . . . .	XXV
C.24	Clusterbildung mit k-Means, Vorgabe 6 Cluster . . . . .	XXVI
C.25	Clusterbildung mit Fuzzy k-Means, Vorgabe 7 Cluster . . . . .	XXVI
C.26	Clusterbildung mit Linear Vector Quantization (1 Nachbarelement), Vor- gabe 6 Cluster . . . . .	XXVI
C.27	Clusterbildung mit Linear Vector Quantization (1 Nachbarelement), Vor- gabe 7 Cluster . . . . .	XXVII
C.28	Clusterbildung mit Linear Vector Quantization (3 Nachbarelemente), Vor- gabe 6 Cluster . . . . .	XXVII
C.29	Clusterbildung mit Linear Vector Quantization (3 Nachbarelemente), Vor- gabe 7 Cluster . . . . .	XXVII
C.30	Clusterbildung mit Self-Organizing Feature Maps, Parameter (10,5) . . . . .	XXVIII
C.31	Clusterbildung mit Self-Organizing Feature Maps, Parameter (30,7) . . . . .	XXVIII
C.32	Clusterbildung mit Agglomerative Clustering . . . . .	XXIX
C.33	Clusterbildung mit Deterministic Annealing . . . . .	XXIX
C.34	Clusterbildung mit Distinction Sensitive Linear Vector Quantization . . . . .	XXX
C.35	Clusterbildung mit Fuzzy k-Means . . . . .	XXX
C.36	Clusterbildung mit k-Means . . . . .	XXX
C.37	Clusterbildung mit Leader-Follower Clustering, Parameter (0.1,0.1) . . . . .	XXXI
C.38	Clusterbildung mit Leader-Follower Clustering, Parameter (0.2,0.1) . . . . .	XXXI
C.39	Clusterbildung mit Linear Vector Quantization (1 Nachbarelement) . . . . .	XXXI
C.40	Clusterbildung mit Linear Vector Quantization (3 Nachbarelemente) . . . . .	XXXII
C.41	Clusterbildung mit Kohonen Self-Organizing Feature Maps . . . . .	XXXII
C.42	Ergebnisse des Agglomerative Clustering bei gestörten Prismenbildern . . . . .	XXXIII
C.43	Ergebnisse des Deterministic Annealing bei gestörten Prismenbildern . . . . .	XXXIII
C.44	Ergebnisse des Agglomerative Clustering bei matrixförmiger Prismenan- ordnung . . . . .	XXXIV
C.45	Ergebnisse des Deterministic Annealing bei matrixförmiger Prismenanord- nung . . . . .	XXXIV

C.46 Ergebnisse des Agglomerative Clustering bei unterschiedlicher Prismenentfernung . . . . .	XXXV
C.47 Ergebnisse des Deterministic Annealing bei unterschiedlicher Prismenentfernung . . . . .	XXXV
C.48 Ergebnisse des Agglomerative Clustering bei diagonaler Prismenanordnung	XXXVI
C.49 Ergebnisse des Deterministic Annealing bei diagonaler Prismenanordnung .	XXXVI
C.50 Ergebnisse des Agglomerative Clustering bei matrixförmiger Prismenanordnung . . . . .	XXXVII
C.51 Ergebnisse des Deterministic Annealing bei matrixförmiger Prismenanordnung . . . . .	XXXVII
C.52 Resultierendes Akkumulatorfeld für Kreise, Parameter r=10 Pixel . . . . .	XXXVIII
C.53 Resultierendes Akkumulatorfeld für Kreise, Parameter r=14 Pixel . . . . .	XXXVIII
C.54 Resultierendes Akkumulatorfeld für Kreise, Parameter r=18 Pixel . . . . .	XXXVIII
C.55 Komponentenanalyse für überlappende Prismenbilder . . . . .	XXXIX
C.56 Komponentenanalyse mehrerer Prismen . . . . .	XXXIX
C.57 Komponentenanalyse für Prismen unterschiedlicher Entfernung . . . . .	XXXIX
C.58 Komponentenanalyse für Prismenbilder mit Störungen . . . . .	XL
C.59 Komponentenanalyse für verrauschte Prismenbilder (10% zufälliges Rauschen) . . . . .	XL
C.60 Komponentenanalyse einer matrixförmigen Prismenanordnung . . . . .	XL
C.61 L1 Distanzanalyse für überlappende Prismenbilder . . . . .	XLI
C.62 L1 Distanzanalyse mehrerer Prismen . . . . .	XLI
C.63 L1 Distanzanalyse für Prismen unterschiedlicher Entfernung . . . . .	XLI
C.64 L1 Distanzanalyse für Prismenbilder mit Störungen . . . . .	XLII
C.65 L1 Distanzanalyse für verrauschte Prismenbilder (10% zufälliges Rauschen)	XLII
C.66 L1 Distanzanalyse einer matrixförmigen Prismenanordnung . . . . .	XLII
C.67 L2 Distanzanalyse für überlappende Prismenbilder . . . . .	XLIII
C.68 L2 Distanzanalyse mehrerer Prismen . . . . .	XLIII
C.69 L2 Distanzanalyse für Prismen unterschiedlicher Entfernung mit Störungen	XLIII
C.70 L2 Distanzanalyse für Prismenbilder mit Störungen . . . . .	XLIV
C.71 L2 Distanzanalyse für verrauschte Prismenbilder (10% zufälliges Rauschen)	XLIV
C.72 L2 Distanzanalyse einer matrixförmigen Prismenanordnung . . . . .	XLIV
C.73 Matching mit unvollständigem Muster . . . . .	XLV
C.74 Matching mit vollständigem Muster für kleine Strukturen . . . . .	XLV
C.75 Matching mit vollständigem Muster für große Struktur . . . . .	XLV
C.76 Matching von überlappenden Strukturen mit vollständiges Muster . . . . .	XLVI
C.77 Matching von überlappenden Strukturen mit unvollständigem Muster . . .	XLVI
C.78 Matching von mehreren Strukturen mit zufälligem Rauschen . . . . .	XLVI
C.79 Matching von gestörten Strukturen mit vollständiges Muster . . . . .	XLVII
C.80 Matching verschiedener Strukturgrößen mit vollständigem Muster . . . . .	XLVII
C.81 Matching diagonal verlaufender Strukturen mit vollständigem Muster . . .	XLVII

# Tabellenverzeichnis

2.1	Technische Parameter des TM3000 . . . . .	6
2.2	Technische Parameter des Surveyor ALS . . . . .	7
3.1	Ansätze zur Approximation der Position $\hat{\delta}$ des Intensitätsmaximums [FN96]	22
5.1	Eigenwerte und Eigenvektoren der Ellipsenstrukturen . . . . .	42
5.2	Intensitätsverlauf von synthetisch erzeugten Prismenbildern . . . . .	46
5.3	Diskrete Approximation der Spotfunktion für $\sigma_x = \sigma_y = 4$ . . . . .	48
6.1	Lokale Eigenschaften der Fläche zweiter Ordnung für die Zieltafel I . . . . .	53
6.2	Bestimmung des Anzielpunktes aus den Eigenschaften der approximierten Fläche für Zieltafel I . . . . .	53
6.3	Bestimmung des Anzielpunktes aus den Eigenschaften der approximierten Fläche für Zieltafel II . . . . .	55
6.4	Lokale Eigenschaften der Fläche zweiter Ordnung für die Zieltafel II . . . . .	56
6.5	Lokale Eigenschaften der Fläche zweiter Ordnung für die Zieltafel III . . . . .	56
6.6	Bestimmung des Anzielpunktes aus den Eigenschaften der approximierten Fläche für Zieltafel III . . . . .	57
6.7	Lokale Eigenschaften der Flächen zweiter Ordnung . . . . .	62
7.1	Lokale Eigenschaften der angezielten Konturpunkte P1-P7 . . . . .	73
8.1	Vergleich der Rechenzeit verschiedener Clusteralgorithmen . . . . .	96
8.2	Akkumulatorfeld für den Kreis (320, 270, 17) mit $\Delta r = 2$ Pixel . . . . .	99
8.3	Akkumulatorfeld für den Kreis (320, 270, 17) mit $\Delta r = 1$ Pixel . . . . .	99
8.4	Akkumulatorfeld für den Kreis (320, 270, 17) mit 20% zufälligem Rauschen . . . . .	99
8.5	Vergleich von ausgewählten Verfahren zur Regionenbildung . . . . .	105
9.1	Gegenüberstellung der maximalen Mittelwerte und Standardabweichungen . . . . .	120
9.2	Unsicherheitsbereich der Positionsbestimmung . . . . .	120
9.3	Ermittelte Bildpositionen in Abhängigkeit einer horizontalen Verdrehung des Tachymeters mit 1'' Schrittweite . . . . .	125
9.4	Bestimmung der Abweichung der mittleren Bildposition $\bar{x}_{ist}$ von der geschätzten Sollposition $\hat{x}_{soll}$ . . . . .	125
9.5	Unsicherheitsbereich der Positionswerte für verschiedene statistische Sicherheiten . . . . .	126
9.6	Unsicherheitsbereich der differentiellen Abweichung der Positionswerte . . . . .	126
10.1	Intensitätsänderungen an einer nicht texturierten Kante . . . . .	131
10.2	Einfluss von Textur- und Intensitätsänderungen auf den Kantenort . . . . .	132

---

10.3 Einfluss von Textur- und Intensitätsänderungen bei unterschiedlichem Anstieg der Kante . . . . .	132
A.1 Ermittelte Kreisstrukturen aus Konturdaten ( $2 \leq r \leq 25$ , $\Delta r = 2$ Pixel) . . .	VIII
A.2 Ermittelte Kreisstrukturen aus Konturdaten ( $2 \leq r \leq 25$ , $\Delta r = 1$ Pixel) . . .	VIII
A.3 Ermittelte Kreisstrukturen aus Kreisdaten ( $2 \leq r \leq 25$ , $\Delta r = 2$ Pixel) . . .	VIII
A.4 Ermittelte Kreisstrukturen aus Kreisdaten ( $2 \leq r \leq 25$ , $\Delta r = 1$ Pixel) . . .	VIII
A.5 Ermittelte Kreisstrukturen aus Kreisdaten ( $2 \leq r \leq 25$ , $\Delta r = 2$ Pixel) . . .	IX
A.6 Ermittelte Kreisstrukturen aus Kreisdaten ( $2 \leq r \leq 25$ , $\Delta r = 1$ Pixel) . . .	IX
A.7 Ermittelte Kreisstrukturen aus Kreisdaten ( $2 \leq r \leq 25$ , $\Delta r = 2$ Pixel) mit 10% Rauschen . . . . .	IX
A.8 Ermittelte Kreisstrukturen aus Kreisdaten ( $2 \leq r \leq 25$ , $\Delta r = 1$ Pixel) mit 20% Rauschen . . . . .	IX
B.1 Abhängigkeit des maximalen Mittelwertes über $\Delta P_m$ von der Spotgröße für Anzielungen im Binärbild . . . . .	XII
B.2 Abhängigkeit der maximalen Standardabweichung über $\Delta P_m$ von der Spotgröße für Anzielungen im Binärbild . . . . .	XII
B.3 Maximaler Mittelwert von $\Delta P_m$ in Abhängigkeit der Spotgröße . . . . .	XIV
B.4 Maximale Standardabweichung von $\Delta P_m$ in Abhängigkeit der Spotgröße . . . . .	XIV
B.5 Maximaler Mittelwert der Positionsabweichung in Abhängigkeit der Spotgröße . . . . .	XVI
B.6 Maximale Standardabweichung in Abhängigkeit der Spotgröße . . . . .	XVI
B.7 Abhängigkeit des maximalen Mittelwertes von der Spotgröße für die Approximation einer Ellipse . . . . .	XVIII
B.8 Abhängigkeit der maximalen Standardabweichung von der Spotgröße für die Approximation einer Ellipse . . . . .	XVIII

# Formelverzeichnis

$B[x, y]$	Adresse eines Bildpunktes in der Zeile $y$ und Spalte $x$
$\mathbb{D}$	Faltungskern der Differentiation
$\mathbb{G}$	Allgemeiner Faltungskern
$\hat{f}(x, y)$	Approximierter Funktionsverlauf
$f_x$	Richtungsableitung erster Ordnung nach $x$
$f_{xx}$	Richtungsableitung zweiter Ordnung nach $x$
$f_y$	Richtungsableitung erster Ordnung nach $y$
$f_{yy}$	Richtungsableitung zweiter Ordnung nach $y$
$f_{xy}$	Richtungsableitung zweiter Ordnung nach $x$ und $y$
$\nabla f(x, y)$	Vektor der Richtungsableitungen erster Ordnung (Gradient) $\nabla f(x, y) := \left( \frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right)$
$H_f$	Hesse-Matrix von $f$
$E v_i$	$i$ -ter Eigenvektor
$\lambda_i$	$i$ -ter Eigenwert
$\mathbb{E}$	Einheitsmatrix
$T_n$	Taylorpolynom $n$ -ter Ordnung
$t_B$	Belichtungszeit eines CCD-Sensors
$I(x, y)$	Intensität des Bildpunktes in der Zeile $y$ und Spalte $x$
$\hat{I}(x, y)$	Approximierter Intensitätsverlauf
$e(x, y)$	Fehlerfunktion
$I_{HL}$	Intensitätsübergang einer Kante von hoher zu niedriger Intensität
$I_{LH}$	Intensitätsübergang einer Kante von niedriger zu hoher Intensität
$sign(\dots)$	Funktion zur Bestimmung des Vorzeichen eines Wertes
$dim(\dots)$	Funktion zur Bestimmung der Dimension eines Vektors oder Matrix
$det$	Determinante einer quadratischen Matrix
$tr$	trace Funktion
$\mathbb{H}(\dots)$	Houghtransformation
$\delta(\dots)$	Akkumulatorfunktion der Houghtransformation
$\Delta P_m$	Positionsabweichung
$\max \overline{\Delta P_m}$	maximaler Mittelwert der Positionsabweichung
$\max \$ (\Delta P_m)$	maximale Standardabweichung der Positionsabweichung
$S_x$	Standardabweichung der $x$ -Koordinaten einer Bildposition
$S_y$	Standardabweichung der $y$ -Koordinaten einer Bildposition
$\hat{x}_{soll}$	Geschätzter Sollwert einer vektoriellen Komponente in $x$ -Richtung
$\bar{x}_{ist}$	Mittelwert der Istwerte einer vektoriellen Komponente in $x$ -Richtung

# Verwendete Abkürzungen

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
AOI	Area of Interest
ATR	Automated Target Recognition (automatische Zielerkennung)
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DSP	Digital Signal Processor
EDM	Electronic Distance Measurement (elektronischer Entfernungsmesser)
FM	fotometrische Mitte
GIS	geografisches Informationssystem
Hz, V	horizontale, vertikale Position der Messachse (polare Messung)
LED	Light Emitting Diode (Leuchtdiode)
MKQ	Methode der kleinsten Quadratsummen
PDA	Personal Data Assistent
PC	Personal Computer
PSD	Position Sensitive Device (Quadrantenempfänger)
PSF	Point Spread Function
PWM	Pulsweitenmodulation
SNR	Signal to Noise Ratio (Signal-/Rauschverhältnis)

# Kapitel 1

## Einleitung

Die voranschreitende Entwicklung auf dem Halbleitermarkt ist durch eine steigende Integrationsdichte gekennzeichnet und führt zu einer immer weiteren Miniaturisierung elektronischer Schaltungen. Darüber hinaus bieten neue Chip-Technologien Möglichkeiten zur Reduzierung der Verlustleistung. Im Ergebnis dieses Entwicklungsprozesses stehen heute bereits sehr leistungsfähige embedded Systeme zur Verfügung, die in batteriebetriebenen Geräten eingesetzt werden können. Unterstützt durch diese Entwicklung fanden intelligente miniaturisierte Bildverarbeitungssysteme bereits in einer Vielzahl von industriellen Mess-, Steuerungs- und Inspektionsaufgaben ihren Einsatz.

Der Einsatz der Bildverarbeitung im industriellen Umfeld wird durch das Vorhandensein einer gleichbleibenden oder einstellbaren Messumgebung [Neh01] oder die Möglichkeit der Schaffung einer künstlichen Messumgebung begünstigt. Bei der Landvermessung hingegen unterliegt das Messsystem den nicht kontrollierbaren Bedingungen der natürlichen Umgebung. Hierzu zählen insbesondere die veränderlichen Lichtverhältnisse, die sich in unterschiedlicher Intensität und Richtung des Lichteinfalls bemerkbar machen. Aufgrund von nicht konstanten und nicht steuerbaren Messbedingungen kommt der Betrachtung der Störanfälligkeit der Messverfahren eine hohe Bedeutung zu.

Die Basis elektronischer Tachymeter bilden miniaturisierte Bildverarbeitungssysteme, die als „Auge“ für die automatische Zielerfassung signalisierter Punkte dienen. Aufgrund gerätetechnischer Besonderheiten, wie beispielsweise die im Feld benötigte Batterieversorgung, ist die Leistungsfähigkeit dieser Systeme gegenüber den heutigen Personalcomputersystemen begrenzt. Daher ist bei jedem System ein Kompromiss zwischen Leistungsfähigkeit des Rechnersystems und der maximalen Betriebsdauer zu schließen. Weiterhin ist zu beachten, dass die Rechenleistung eines Systems direkten Einfluss auf mögliche Auswerteverfahren hat. Für die Akzeptanz automatischer Zielerfassungssysteme ist aus Anwendersicht die erreichbare Genauigkeit und die benötigte Auswertzeit sehr relevant. Aus diesem Grunde sind häufig Vorverarbeitungstechniken, die dem Bildverarbeitungssystem die Suche eines Objektes im Bild vereinfachen, erforderlich.

Eine bei der Integration von Bildverarbeitungssystemen in Tachymeter gestellte Aufgabe ist, den Prozess der subjektiven Erkennung und Verarbeitung von geodätischen Messpunkten durch den Bediener in der Informationskette (Abbildung 1.1) durch ein objektiviertes Bildverarbeitungssystem mit Bildsensor und Bildverarbeitungseinheit nachzubilden. Der Bediener erhält durch das bildverarbeitende System bereits Ergebnisse beziehungsweise Ergebnisvorschläge, die er im Weiteren interaktiv selektieren und verknüpfen kann. Das Entscheidungskriterium, welcher Messpunkt für die Lösung einer Messaufgabe

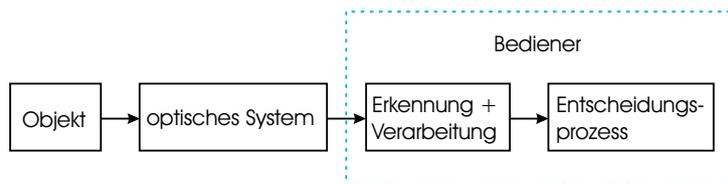


Abbildung 1.1: Prinzip der bedienergestützten optischen Informationsverarbeitung

benötigt wird, kann dabei auch teilweise oder vollständig von der Verarbeitungseinheit übernommen werden (Abbildung 1.2). Mit der Integration von Bildverarbeitungsverfahren

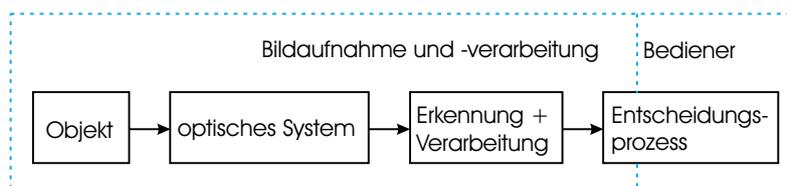


Abbildung 1.2: Prinzip der objektivierten elektronischen Informationsverarbeitung

ren in elektronische Tachymeter stehen Messgeräte zur Verfügung, mit denen sich ein automatischer Datenfluss von der Erzeugung der Messdaten im Feld bis zur Herstellung von Karten und Registern realisieren lässt.

Für geodätische Vermessungssysteme gibt es zwei wichtige Anwendungsgebiete. Dies ist zum Einen die Übertragung einer Örtlichkeit, wie zum Beispiel die Koordinaten eines Grundstückes, durch die Vermessung in eine GIS-Datenbank. Der andere Anwendungsfall, die Absteckung, ist die Projektion der digitalisierten Koordinaten auf die Örtlichkeit. Die Aufgabe der Digitalisierung und Absteckung mit Tachymetersystemen erfolgt vorwiegend durch das Anzielen von Reflektoren (Abbildung 1.3). Prinzipiell unterscheidet man

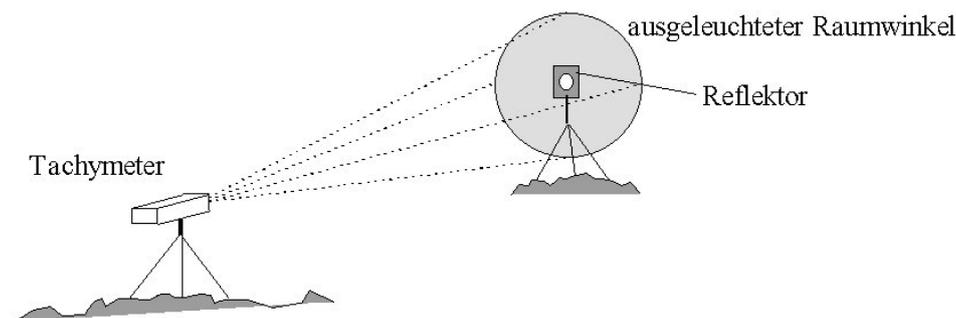


Abbildung 1.3: Prinzip der automatischen Anzielung eines Reflektors

zwei Arten geodätischer Ziele. Dies sind die signalisierten Ziele, wie Prismen und Zieltafeln beziehungsweise deren Kombination und nicht signalisierte Ziele, wie zum Beispiel Hauskonturen. Die Erfassung von markierten Messpunkten erfolgt in älteren Tachymetersystemen noch visuell durch den Bediener, der das Zielkreuz auf einen Punkt innerhalb der sichtbaren Konturen des angezielten Musters einführt. Diese Anzielung war bei den Tachymetersystemen, die keine Bildverarbeitungseinheit besitzen, sehr stark vom Bediener

abhängig. Neben der subjektiven Anzielung ist diese optisch-manuelle Anpeilung auch recht zeitaufwendig und fehlerbehaftet, da das Ziel für den Zeitraum der Messung von einer weiteren Person gehalten werden muss.

Die automatische Anzielung von signalisierten kooperativen Zielen erfolgt mittels eines vom Tachymeter ausgesandten Lichtstrahls, der zur Zielmarkierung genutzt wird. Der von der Zielmarke reflektierte Lichtstrahl wird dann von einer elektronischen Auswerteeinheit erfasst und die Zielachse mittig auf den Zielpunkt eingestellt. In dieser eingefahrenen Position wird eine Strecken- und Winkelmessung ausgelöst, aus der die Koordinaten des markierten Messpunktes ermittelt werden können.

Die vorgelegte Arbeit untersucht Möglichkeiten für die Schaffung neuartiger Messapplikationen und Einsatzgebiete von bildverarbeitenden Tachymetern - Videotachymeter - auf der Basis intelligenter Bildmess- und Erkennungsverfahren für eine schnelle automatische Zielerfassung von signalisierten und nicht signalisierten Messpunkten. Die automatische Erfassung dieser Messpunkte umfasst den Hauptanteil des geodätischen Aufgabenbereiches, so dass deren objektivierter Erfassung eine große Bedeutung zukommt.

Das Kapitel 6 dieser Arbeit beschreibt die Untersuchungen von Verfahren zur Erfassung kooperativer Messpunkte im Videobild. Für die Bestimmung eines Optimalalgorithmus wird im Abschnitt 5.3 das Reflektorbild auf eine Modellfunktion abgebildet, mit der die Unsicherheit der Verfahren bei der Zielerfassung bestimmt wird.

Weitere Anwendungsgebiete, die auf einer automatischen Erkennung von Reflektoren basieren, sind die Steuerung von Baumaschinen, eine automatische Zielverfolgung, die bei der Absteckung von Geländepunkten sehr hilfreich ist, und die Möglichkeit der Messung von mehrfach beobachteten Winkeln. Die zuletzt genannte Anwendung beruht auf dem Einlernen und der wiederholten automatischen Anzielung von Messpunkten. Mit den Untersuchungen zur Erfassung der Position mehrerer Prismen im Videobild sind automatisierte Messungen möglich, bei denen von einem Tachymeterstandpunkt aus verschiedene Prismen angezielt werden können. Im Abschnitt 8 werden daher die Untersuchungen zur Lokalisierung mehrerer signalisierter Messpunkte im Bild vorgestellt. Mögliche Messapplikationen wären beispielsweise die Bauwerksüberwachung und Tunnelmessung.

Eine wichtige Rolle für die Schaffung neuer Applikationen mit elektronischen Tachymetern spielt die Erfassung von nicht signalisierten Zielen, zu denen Hauskonturen, Fassaden und Leitungsmasten gehören. In dem Kapitel 7 werden hierzu Algorithmen und Verfahren untersucht, mit denen eine Erfassung mehrerer Vermessungspunkte im Videobild ermöglicht wird.

Mit dieser neuen Vermessungsaufgabe wird auch die Definition völlig neuer Messstrategien in der Geodäsie erforderlich. Das bisher in Tachymetersystemen verwendete optische Anvisieren von einzelnen Messpunkten durch den Bediener muss für eine interaktive Zielerfassung durch das aus der Bildverarbeitung bekannte „Antasten“ ersetzt werden. Die Messung nicht signalisierter Ziele bietet somit Möglichkeiten zur Vermessung unzugänglicher Punkte in beliebiger Höhe und mit variabler Punktdichte. Die Vermessung von Brückenbauwerken und die Fassadendigitalisierung soll hier als mögliche Applikation mit einem Tachymeter genannt werden.

# Kapitel 2

## Entwicklungsstand bildverarbeitender Vermessungssysteme

### 2.1 Übersicht zu Vermessungssystemen mit integrierter Bildverarbeitung

#### 2.1.1 Digitalnivelliere

Eindimensionale Sensoren, wie CCD-Zeilen, werden bereits seit geraumer Zeit in Digitalnivellieren eingesetzt. Die Firma ZSP Geodätische Systeme GmbH hatte mit der DiNi<sup>®</sup>-Reihe (Abbildungen 2.1, 2.2) bereits Mitte der 90-er Jahre ein ausgereiftes Instrument, welches bezüglich der hohen Robustheit der Messung und geringen Messunsicherheit bisher den vordersten Stand der Technik darstellt. Die Firma Leica brachte mit dem NA3000



Abbildung 2.1: DiNi<sup>®</sup>10 Schnittbild mit CCD-Zeile



Abbildung 2.2: DiNi<sup>®</sup>21

ebenfalls ein präzises Digitalnivellier auf den Markt. Beide Nivelliere werten online die eindimensionale Bildfunktion einer Barcode-Nivellierlatte aus und können damit Höhen mit einer Unsicherheit von  $\pm 0,3$  mm Fehler je 1 km Doppelnivellement übertragen. Da Nivelliere in der Regel nur eindimensionale Messaufgaben zu lösen haben, sind hier eindimensionale Bildsensoren ausreichend. Sollen jedoch dreidimensionale Koordinaten mit nur einem Instrument bestimmt werden, wären theoretisch „dreidimensionale Sensoren“ notwendig. Die Praxis bietet diese Art von Sensor in Form von Entfernungsbildsensoren

für militärische Bereiche, die nicht allgemein zugänglich und für geodätische Aufgaben nicht genau genug sind, so dass das Messproblem für andere Sensoren in den Dimensionen reduziert werden muss. In der Geodäsie wird dazu eine Schrägstrecke zum Zielpunkt gemessen. Die drei Raumwinkel werden um einen Winkel reduziert, indem man die Stehachse des Instruments zur Z-Richtung des Koordinatensystems ausrichtet und Restablagen über Kompensatoren korrigiert. Die damit verbleibenden zwei Raumwinkel, Azimut- und Vertikalwinkel, können mit zweidimensionalen Sensoren gemessen werden.

### 2.1.2 Theodolitsystem mit integrierter Kamera

Die Firma Wild, heute Firma Leica, brachte im Jahre 1989 den Videotheodolit TM3000V (Abbildung 2.3) und den später modifizierten TM3000V/VD auf den Markt. Beide Geräte



Abbildung 2.3: Videotheodolit TM3000V

verfügen über ein panfokales Fernrohr<sup>1</sup> mit einem Autofokussystem, das mit einer motorisch getriebenen Schiebelinse realisiert wurde. Als Strichkreuz wurde eine Art Referenzrahmen im Messbild direkt abgebildet. Das System TM3000V besitzt zwei getrennte Strahlengänge für Weitwinkel- ( $9^\circ \times 12^\circ$ ) und Schmalwinkelabbildungen, deren Umschaltung softwaregesteuert erfolgt. Das modifizierte System verfügt anstelle der Weitwinkeloptik eine Farbkamera. Die Messkamera ist eine monochrome CCD-Kamera mit  $640 \times 480$  Bildpunkten.

Der TM3000 ist ein motorisierter Theodolit mit einer Winkelmessgenauigkeit von  $0,5''$ . Hauptapplikationen für dieses System sind automatische Punktmessungen zu Laserpunkten durch Vorwärtseinschneiden an Bauwerken, wie Kühltürme und Staumauern. Die Laserpunkte wurden von einem anderen TM3000, dem TM3000L, erzeugt. Das System TM3000V ist so konzipiert, dass dieses mit der Teleoptik nur signalisierte Punkte online mit höchstmöglicher Genauigkeit messen soll. Eine Bildspeicherung zur offline Bildverarbeitung wurde beim TM3000V nicht berücksichtigt. Das wurde mit dem TM3000V/VD

---

<sup>1</sup>Automatische Zielerkennungssysteme, welche nicht über ein panfokales Fernrohr verfügen und das reflektierte Signal nicht fokussieren, bilden das Prisma beziehungsweise den reflektierten Strahlkegel in unterschiedlicher distanzabhängiger Größe ab.

geändert, indem man eine Farbkamera adaptierte, die Bilder an externe Geräte für eine Weiterverarbeitung exportiert. Damit erweitern sich die Möglichkeiten, unter anderem auch um nicht signalisierte Punkte zu messen. An der TU Wien wurden deshalb auch Messversuche mit dem TM3000V/VD zu anderen Messzielen, wie Linienschnitte und Points of Interest mit dem Förstner Operator [Mis97] durchgeführt. Das TM3000 Messsystem hat keinen elektronischen Streckenmesser integriert. Zur Erfassung räumlicher Koordinaten müssen daher immer mindestens zwei Instrumente das Ziel beobachten. Dies geschieht über den TM3000L Laserpointer mit Winkelmessung und den TM3000V mit Bildverarbeitung und Winkelmessung vollautomatisch. Das macht das System zwar hoch genau, jedoch weniger mobil und sehr aufwendig an Technik und Stromversorgung. Ein polares Messsystem auf Basis des TM3000 wurde später durch die Adaption eines externen Aufsatzentfernungsmessers geschaffen. Diese technischen Parameter, bedingt durch

Standardabweichung Winkelmessung:	0,5" (für Hz und V)
Temperaturbereich:	-10 °C .... +50 °C
Fernrohr:	panfokales Fernrohr mit Autofokus
Winkelbereiche:	Hz uneingeschränkt, V = 50 ... 333 gon
Spannungsversorgung:	12-14 V Gleichstrom
Leistungsaufnahme dynamisch:	12 W (1A bei 12 V)
Gewicht:	12,2 kg

Tabelle 2.1: Technische Parameter des TM3000

die externen Aufbauten und die interne Kameratechnik, lassen das System doch eher stationär im Feld zum Einsatz kommen. Für ein mobiles Video-Tachymeter müssten Gewicht und Stromverbrauch wesentlich reduziert und alle externen Module integriert werden, was mit dem heutigen Stand der Technik sicherlich möglich ist.

### 2.1.3 Laser-Messsystem Surveyor ALS

Die Firma Measurement Devices LTD (MDL) aus Schottland baut eine Art reflektorlos messendes Tachymeter (Abbildung 2.4) im unteren Genauigkeitsbereich. Die Winkelmessung in horizontaler und vertikaler Richtung erfolgt über optische Impulsgeber. Der modulierte Laserstreckenmesser arbeitet reflektorlos bis zu einer Entfernung von 1000 m und kann eine Genauigkeit von 2 cm erreichen. Im Abtastmodus können maximal 3600 Punkte in der Stunde gemessen werden.

Die neueste Entwicklung ist das Surveyor ALS System mit Video Option. Hier werden in Echtzeit Videobilder übertragen und mit den Laserabtastungen korreliert. Das System ist motorisiert und mit einer digitalen Videokamera mit optischer Vergrößerung ausgestattet. Die digitalen Bilder werden zum Steuerrechner übertragen, wobei auch größere Entfernungen von bis zu 15 km laut Hersteller möglich sind. Das System unterliegt der Laserschutzklasse I. Hauptapplikationen sind Geländemodellvermessungen zur Ableitung von Raummaßen und Kontrolle von Erdaufbau sowie Erdabbau (Bergbau, Mülldeponien, Hangrutschungen). Das System ist nicht sehr genau, dafür aber robust und kann unter widrigsten Witterungseinflüssen eingesetzt werden. Die Punktmessgenauigkeit wird mit 5 cm angegeben. Der Anwender sieht am Steuerrechner das Videobild und kann über eine Interaktion den Punkt festlegen, der dreidimensional im Gelände vermessen werden soll.



Abbildung 2.4: Surveyor ALS

Eine Abtastoption gestattet es, im Vorfeld einen Bereich am Monitor zu definieren, der dann vom System mit einer festgelegten Schrittweite abgerastert und vermessen wird. Die Messdaten werden online in einem Overlay über das Videobild zur Kontrolle eingespielt und können direkt in eine Ground Modelling Software eingelesen und weiterverarbeitet werden.

Standardabweichung Winkelmessung:	$\pm 0,02^\circ$
Standardabweichung Streckenmessung:	80 m: $\pm 2$ cm, 400 m: $\pm 5$ cm, 1000 m: $\pm 20$ cm
Winkelbereiche:	Hz uneingeschränkt, V = $\pm 60 \dots 85^\circ$
Spannungsversorgung:	12 V Gleichstrom (7 Ah Batterie)
Masse:	9 kg + 1 kg Dreifuß + 3,5 kg Batterie

Tabelle 2.2: Technische Parameter des Surveyor ALS

### 2.1.4 Hybride Systeme

Als hybrides System wird die Kombination eines Vermessungsinstruments mit einer extern adaptierten Videotechnik bezeichnet. Diese meist nur einem Funktionsmuster ähnlichen Systeme wurden häufig an Universitäten und Hochschulen aufgebaut und untersucht, aber nur selten vermarktet. Die Untersuchungsergebnisse sind aber dennoch sehr interessant. In [MH97] wird ein System vorgestellt, das auf einem motorisierten Geodimeter-Tachymeter (Abbildung 2.5) basiert, an dem eine Line-Scanning Kamera unter dem Fernrohrkörper angebracht wurde. Der Zeilensensor ist 35 mm lang und hat 5000 Pixel mit einer Pixelgröße von  $7 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$ . Die Kamera liefert ein bereits digitales 8 Bit Graustufenbild, welches über einen Parallelport zum Steuerrechner übertragen wird. Mit Hilfe der Tachymetermotorik kann die Zeile das Objekt abscannen und liefert ein deformiertes Bild (Abbildung 2.6), welches von der Zentralprojektion abweicht und eine zylindrische Form hat. Dies wird verursacht durch die vertikale Scanbewegung und kann über die bekannte äußere Orientierung, die Richtungen des vertikalen Winkelmesssystems beim Scannen, wieder entzerrt werden. Damit können weitwinkliger Panorambilder erzeugt werden.

Um diese Bilder für Messzwecke anwenden zu können, müssen die Kamera und das Tachymeter kalibriert werden, das heißt, die inneren Orientierungsparameter der Kamera

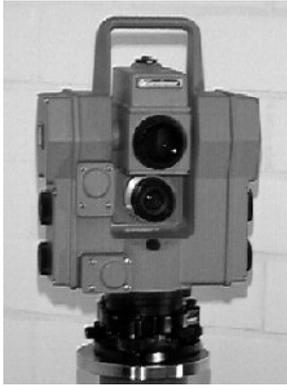


Abbildung 2.5: Geodimeter TS mit Kamera

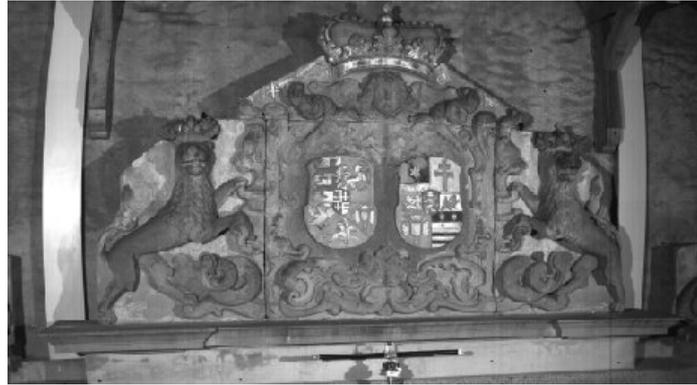


Abbildung 2.6: Zylindrisch deformiertes Bild des externen Zeilensensors

und die äußere Orientierung des Gesamtsystems (Tachymeterachsen/Kameraachsen bezogen auf das Objekt) müssen bestimmt werden. Dazu wurde eine Testfeldkalibrierung zu 150 Zielpunkten an zwei orthogonal zueinander stehenden Wänden durchgeführt. Als wichtigstes Ergebnis wurde dabei deutlich, dass Tachymeterobjektive verzeichnend sind und dieser Einfluss unbedingt korrigiert werden muss, damit Bildmessgenauigkeiten von  $\pm 3 \mu\text{m}$  zu erreichen sind. Bei einer Fernrohrbrennweite von 35 mm und einer mittleren Objektentfernung von 100 m kann man mit  $\pm 3 \mu\text{m}$  Bildmessgenauigkeit das Objekt 10 mm genau vermessen.

### 2.1.5 Videogesteuertes Tachymeter der Firma SOKKIA

Auf der Messe Intergeo 2002 wurde von der Firma SOKKIA das motorisierte, videogesteuerte Kompletttachymeter SET3110MV (Abbildung 2.7) als Prototyp vorgestellt. Das System verfügt über einen abgesetzten Pen-Computer, auf dem das Videobild der integrierten CCD-Kamera per Datenfunk übertragen wird. Mit dem Pen-PC wird die Steuerung der Motorik und eine interaktive Anzielung von kooperativen Zielen ermöglicht.



Abbildung 2.7: Videogesteuertes Tachymeter SET3110MV

### 2.1.6 Weitere gerätetechnische Lösungen und Messverfahren

In den Diplomarbeiten [See96] und [Unr00] sind weitere Vermessungssysteme aufgeführt, die den Stand von Tachymetermesssystemen beschreiben.

Neben den Tachymetermessverfahren entwickeln sich weitere Systeme und Ansätze zur Lösung geodätischer Messaufgaben. Hierzu gehören beispielsweise die photogrammetrischen Verfahren zur Auswertung von Luftbildern und Laserscanner.

Von der Firma Trimble wird der dreidimensionale Laserscanner „Callidus“ (Abbildung 2.8) der Firma Callidus Precision Systems GmbH für Anwendungen im Tunnelbau, Facility Management, Bauüberwachung und Instandhaltung von Brücken angeboten. Das System besteht aus einem servogesteuerten Vollpanorama-Laserscanner sowie einer CCD-Kamera zur Aufnahme der gemessenen Szene und ermöglicht die Erfassung dreidimensionaler Punktkoordinaten und Objektoberflächen. Der Laserscanner verfügt über einen Erfassungsbereich von 360° in der Horizontalen und 180° in der Vertikalen.

Auch die Firma Leica bietet mit dem Cyrax 2500 (Abbildung 2.9) einen Laserscanner der Firma Cyra Technologies zur Erfassung dreidimensionaler Daten an. Das Messsystem besitzt im Bereich von 1,5 m bis 50 m eine Positionsempfindlichkeit von  $\pm 6$  mm und eine Entfernungunsicherheit von  $\pm 4$  mm.



Abbildung 2.8: Callidus Laser Scanner



Abbildung 2.9: Cyrax 2500 Laser Scanner

### 2.1.7 Bewertung des Entwicklungsstandes

Aus dem vorangegangenen Abschnitt ist zu ersehen, dass die Leistungsfähigkeit der Tachymeter neben den optisch-mechanischen Geräteparametern zunehmend von den Möglichkeiten einer automatischen objektivierten Zielsuche bestimmt wird. In [See96] wurde gezeigt, dass gerätetechnische Lösungen zur Zielerkennung auf der Basis von Quadranteneempfängern (PSD) und Bildsensoren aufgebaut werden können.

Theodolitsysteme, wie das TM3000V/D von Leica, besitzen bereits seit einiger Zeit die Möglichkeit, signalisierte Punkte mit einer CCD-Matrixkamera zu vermessen und das Messgerät dem Zielpunkt mittels einer Trackingfunktion nachzuführen. Die geräteinterne Bildverarbeitungseinheit beschränkt sich bei den zur Zeit verfügbaren Geräten auf die Anzielung und Erfassung eines Prismas oder Laserpunktes (TM3000V). Die Verarbeitung der Bilder erfolgt für den Bediener transparent und eine Kontrolle der Anzielung ist nur über das Okular möglich.

Betrachtet man die Tachymeterentwicklung der letzten Jahre, so zeichnet sich eindeutig eine Tendenz zu Geräten mit einer automatischen Zielerfassung ab. Die Firma Leica Geosystems und ZSP Geodätische Systeme GmbH erweitern inzwischen die Produktpalette mit Tachymetersystemen, die über einen reflektorlos messenden Entfernungsmesser verfügen. Diese Art der Entfernungsmessung ermöglicht dem Bediener eine reflektorlose Vermessung von angezielten Punkten in beliebiger Höhe.

Mit dem Prototyp SET3110MV stellte die Firma SOKKIA erstmals auf der Intergeo 2002 ein Gerät aus, das die optische Anzielung durch eine interaktive Messung und Visualisierung der Zielerfassung am Display eines abgesetzten Pen-PC ersetzt.

## 2.2 Untersuchungen zur patentrechtlichen Situation

### 2.2.1 Schutzrechte zu Messverfahren und Geräteanordnungen

**Patentnummer:** EP 539 598

**Anmelder:** Fanuc

**Prioritätsdatum:** 15.5.1991

**Kurzbeschreibung:** Das Patent schützt das Schwerpunktverfahren zur Bildauswertung und bezieht sich auf den Anwendungsbereich Lasersensoren für Schweißroboter. Der erfindungsgemäße Sensor hat einen Optikaufbau eines Nahbereichsensors mit Entfernungsmessung durch Triangulation zu einem ausgesendeten Lichtstrahl.

**Patentnummer:** DE 196 14 108, EP 892 929

**Anmelder:** Fraunhofer Gesellschaft

**Prioritätsdatum:** 10.4.1996

**Kurzbeschreibung:** Licht einer Beleuchtungseinheit wird über einen Strahlteiler auf ein Objekt gerichtet, an dem die Position eines Reflektors bestimmt werden soll. Das zurückgeworfene Licht trifft auf eine Detektoreinheit auf, mit der die Position des Reflektors gemessen wird.

**Patentnummer:** EP 815 468

**Anmelder:** Geotronics

**Prioritätsdatum:** 13.9.1996

**Kurzbeschreibung:** Das Patent beschreibt eine Feinzielsuche mit einem Quadrantenempfänger. Geschützt ist eine Polarisationsmodulation und Polarisation. Nur Ziele, die die gleiche Modulation und Polarisation aufweisen, werden detektiert.

**Patentnummer:** EP 528 448

**Anmelder:** Hughes

**Prioritätsdatum:** 24.8.1987

**Kurzbeschreibung:** Das Patent beschreibt ein rekursives Verfahren für einen Videotracker, bei dem ein Videobild und ein Referenzbild, welches aus dem vorangegangenen Videobild erstellt wurde, subtrahiert wird. Das so erzeugte Differenzvideobild wird zur Erzeugung von Grenzpixeln verwendet. Innerhalb dieser Grenzpixel wird aus den Gewichtsfunktionen des Referenzbildes eine Gradientenfunktion zur Bestimmung der Bewegungsrichtung berechnet.

**Patentnummer:** EP 687 922

**Anmelder:** Matsushita

**Prioritätsdatum:** 17.6.1994

**Kurzbeschreibung:** Diese Erfindung beschreibt eine Bildverfolgung und Autofokus für eine Videokamera. Ziel ist die Berechnung des Autofokus nach den Bildinhalten. Die Bildinhalte können sich dabei auch bewegen. Dazu werden in zwei Zielen an mehreren Stellen

die Maxima hochfrequenter Bildinhalte erfasst und deren Bewegung im Bild ermittelt.

**Patentnummer:** DE 69617201

**Anmelder:** Raytheon

**Prioritätsdatum:** 11.10.1995

**Kurzbeschreibung:** Hier wird ein Zielverfolgungsgerät mit Bildverarbeitung beschrieben. Das Ziel der Erfindung ist die Bestimmung geeigneter Schwellwerte, mit denen das Ziel vom Hintergrund getrennt werden kann. Zusätzlich dient die Kenntnis der nahezu bekannten Zielposition dazu, eine zeitlich verschmierte Grauwertverteilung als Wahrscheinlichkeitskarte zu bestimmen. Hierzu werden verschiedene Histogramme, hier innere und äußere Histogramme genannt, erstellt. Das längste Histogrammsegment wird identifiziert und zwei Schwellwerte festgelegt.

**Patentnummer:** US 6 392 747

**Anmelder:** Raytheon

**Prioritätsdatum:** 11.6.1999

**Kurzbeschreibung:** Eine Bildmatrix mit pixelweiser Auswertung, bei der empfangene Laserpulse auf das Überschreiten einer Schwelle untersucht werden. Beim Überschreiten der Schwelle erfolgt eine Auswertung und Anzeige der Intensität sowie der Lage des Objekts auf dem Bildschirm.

**Patentnummer:** WO 00/39607, SE 514 646

**Anmelder:** Saab

**Prioritätsdatum:** 11.12.1998

**Kurzbeschreibung:** Beschreibt eine Infrarotzielsuche, bei der zwei Bilder, mit und ohne Beleuchtung, aufgenommen werden, aus denen ein Differenz- oder Quotientenbild gebildet wird.

**Patentnummer:** EP 1 089 090

**Anmelder:** Thomson CSF

**Prioritätsdatum:** 28.9.1999

**Kurzbeschreibung:** Das Patent beschreibt ein Objekt, welches durch einen Laserlichtstrahl beleuchtet wird. Der Empfangsstrahlengang wird durch einen Strahlenteiler aufgeteilt auf zwei Kameras, wobei eine dieser Kameras einen Filter besitzt, der die Laserstrahlung entfernt. Die Differenz beider Kameras wird ausgewertet.

## 2.2.2 Schutzrechte zu Bildverarbeitungsverfahren

**Offenlegungsschrift:** Publikationsnummer 10025922

**Anmelder:** Prof. Dr. Robert Massen

**Anmeldedatum:** 27.5.2000

**Titel:** Automatische photogrammetrische Digitalisierung von Körpern und Objekten

**Kurzbeschreibung:** Das Patent beschreibt ein Verfahren zur photogrammetrischen Erfassung der Raumform von Objekten, Körpern und Körperteilen, welche mit photogrammetrisch auswertbaren Marken gekennzeichnet sind. Das Verfahren ist gekennzeichnet dadurch, dass zur automatischen Referenzierung der Marken der Hintergrund zwischen den Marken regionenweise gekennzeichnet wird. Die Kennzeichnung kann durch flächenhaft unterschiedliche Farb- und/oder Textureigenschaften, unterschiedliche Regionenformen und/oder unterschiedliche Nachbarschaften erfolgen. Mittels Verfahren der zweidimensionalen Bildverarbeitung soll dann aus den sich überlappenden Kameraaufnahmen und den darin enthaltenen gemeinsamen flächenhaften Hintergrundregionen eine Zuordnung der Marken anhand der Identität oder einer ausreichenden Ähnlichkeit dieser Kennzeichnungen erfolgen.

**Offenlegungsschrift:** Publikationsnummer 980813

**Anmelder:** Delphi Systemsimulation GmbH, 80331 Muenchen

**Anmeldedatum:** 10.02.1997

**Titel:** Verfahren zum Segmentieren eines digitalen Bildes

**Kurzbeschreibung:** Das Patent beschreibt ein Verfahren zum Segmentieren eines aus einer Vielzahl einzelner Bildelemente (Pixel) bestehenden digitalen Bildes. Innerhalb dieses Bildes werden zur digitalen Bildverarbeitung und/oder zur Objekt- und/oder Mustererkennung Bildsegmente gebildet. Einzelne benachbarte Bildelemente und/oder Bildsegmente werden zusammengefasst oder bereits gebildete Bildsegmente durch Abspaltung von Bildelementen und/oder Teilbildsegmenten modifiziert. Die Modifikation hängt dabei von Homogenitätskriterien ab, die die entsprechenden Bereiche als übereinstimmend oder nicht übereinstimmend klassifizieren. Als Homogenitätskriterium wird eine Toleranz herangezogen, innerhalb der sich die Merkmalswerte der beiden betroffenen Bildelemente bzw. Bildsegmente unterscheiden dürfen. Die Segmentierung kann iterativ über alle Bildelemente erfolgen.

**Offenlegungsschrift:** Publikationsnummer 990304

**Anmelder:** Förderverein Institut für Medizintechnik Dresden e.V., 01445 Radebeul

**Anmeldedatum:** 28.08.1997

**Titel:** Verfahren zur Erkennung der Position eines Objektes mit rotationssymmetrischem Querschnitt

**Kurzbeschreibung:** In dieser Offenlegungsschrift wird ein Verfahren zur Erkennung der Position eines Objektes mit einem rotationssymmetrischen Querschnitt beschrieben. In einem mit einer Kamera aufgenommenen Bild, welches das Objekt vollständig enthält und mit Mitteln der elektronischen Bildverarbeitung ausgewertet wird, sollen die digitalisierten Bildpunkte in binäre Signale, jeweils helle oder dunkle Bildpunkte umgewandelt werden. Ausgehend von mindestens einem ersten angenommenen Mittelpunkt

werden die Abstände zu den hellen oder dunklen Bildpunkten, welche Randpunkten des Kreises entsprechen sollen, ermittelt und die Häufigkeiten gleicher Abstände erfasst. Die Häufigkeitsverteilung(en) werden mit einem Steilheitskriterium bewertet, um den tatsächlichen Mittelpunkt des Kreises mit vorgegebbarer Toleranz zu bestimmen.

**Patentnummer:** DE 04437468

**Anmelder:** Siemens AG, 80333 Muenchen

**Prioritätsdatum:** 19.10.1994

**Titel:** Verfahren zur Erkennung linienhafter Strukturen in einem digitalen Grauwertbild

**Kurzbeschreibung:** In dieser Patentschrift wird ein Verfahren zur Erkennung linienhafter Strukturen in einem digitalen Grauwertbild mit dunklen bzw. hellen Linienstrukturen auf hellem beziehungsweise dunklem Hintergrund beschrieben.

Das Verfahren umfasst die Schritte:

1. Für jeden Bildpunkt  $B[i, j]$  des Bildes, der nicht Randpunkt dieses Bildes ist, werden die vier jeweils zu einer der Richtungen  $K \in (1, 2, 3, 4)$  gehörigen Approximationen der zweiten Ableitungen  $S_K$ :

$$S_1(i, j) = I(i + 1, j) - 2I(i, j) + I(i - 1, j) \quad (2.1)$$

$$S_2(i, j) = I(i, j + 1) - 2I(i, j) + I(i, j - 1) \quad (2.2)$$

$$S_3(i, j) = I(i + 1, j + 1) - 2I(i, j) + I(i - 1, j - 1) \quad (2.3)$$

$$S_4(i, j) = I(i + 1, j - 1) - 2I(i, j) + I(i - 1, j + 1) \quad (2.4)$$

ermittelt.  $I(i, j)$  kennzeichnet dabei den Wert des Bildsignales im Bildpunkt  $B[i, j]$ . Die Bildsignale  $I(i+1, j)$ ,  $I(i-1, j)$ ,  $I(i, j+1)$ ,  $I(i, j-1)$ ,  $I(i+1, j+1)$ ,  $I(i-1, j-1)$ ,  $I(i+1, j-1)$  und  $I(i-1, j+1)$  bezeichnen die benachbarten Bildpunkte in den Richtungen  $K \in (1, 2, 3, 4)$ .

2. Ermittlung der Richtung  $K$ , deren zugehörige zweite Ableitung  $S_K(i, j)$  den maximalen positiven bzw. den minimalen negativen Wert aufweist.
3. Ein Bildpunkt  $B[i, j]$  wird als Punkt einer Mittellinie einer linienhaften Struktur klassifiziert und als solcher gespeichert, falls der Wert  $I(i, j)$  des Bildsignales dieses Bildpunktes kleiner bzw. größer ist als die Bildsignalwerte der diesem Bildpunkt in der Richtung  $K$  benachbarten Bildpunkte.

**Patentnummer:** DE 10055572 C1

**Anmelder:** Astrium GmbH AG, 88048 Friedrichshafen

**Prioritätsdatum:** 9.11.2000

**Titel:** Verfahren zur Leitungserkennung

**Kurzbeschreibung:** Das Verfahren beschreibt eine Echtzeit-Leitungserkennung aus Entfernungsbildern. Bei diesem Verfahren werden mittels der Houghtransformation Geraden im Entfernungsbild gesucht. Die konventionelle Houghtransformation kann dabei durch eine neuartige unscharfe Houghtransformation ergänzt werden. Das Verfahren beschreibt weiterhin die Möglichkeit der Eliminierung von Punkten, die den Hintergrund beschreiben.

**Offenlegungsschrift:** DE 19523885 A1

**Anmelder:** Firma Carl Zeiss, 89518 Heidenheim

**Anmeldedatum:** 28.08.1997

**Titel:** Verfahren zur Filterung von Messwertkurven

**Kurzbeschreibung:** Die Erfindung beschreibt ein Verfahren zur digitalen Filterung von nicht äquidistanten Messwerten. Bei dem genannten Verfahren werden jedoch bei der Berechnung der gefilterten Ausgangswerte die Abstände der Punkte berücksichtigt. Die Punktwolke wird mit einer Filterfunktion gefaltet und die Faltungswerte mit dem jeweiligen Abstand zu den benachbarten Punkten, vorzugsweise dem Mittelwert, gewichtet.

**Patentnummer:** DE 199 00 737 C2

**Anmelder:** Firma Carl Zeiss, 89518 Heidenheim

**Prioritätsdatum:** 12.01.1999

**Titel:** Verfahren zur Korrektur der Messergebnisse eines Koordinatenmessgerätes

**Kurzbeschreibung:** Das Patent beschreibt ein Verfahren, bei dem aus Messergebnissen eines Koordinatenmessgerätes Ausreißermesswerte bestimmt werden. Zur Bestimmung der Ausreißermesswerte werden die Messwerte einer Hochpassfilterung unterzogen. Als Ausreißer werden diejenigen Messwerte bestimmt, die eine definierte Schwellabweichung gegenüber dem Referenzwert überschreiten. Die Messwerte werden einer Ausgleichsrechnung zugeführt, durch welche ein Ausgleichselement bestimmt wird. Mit dem Ausgleichselement werden Fehlerwerte zu den gültigen Messwerten bestimmt. Zu jedem Fehlerwert wird ein tiefpassgefilterter Fehlerwert ermittelt, indem jeder Fehlerwert zusammen mit einer definierten Anzahl angrenzender Fehlerwerte gemittelt wird.

### 2.2.3 Weitere Patentrecherchen

In den Diplomarbeiten [See96] und [Unr00] sind weitere Recherchen zur patentrechtlichen Situation zu finden, die von ihrem Inhalt für Weiterentwicklungen auf dem Gebiet der Tachymeter relevant sein könnten.

### 2.2.4 Bewertung der patentrechtlichen Situation

Es kann davon ausgegangen werden, dass keines der Patente die Verwendung einer CCD-Matrix für die Zielsuche prinzipiell verbietet.

Die Differenzbildung zweier Bilder mit und ohne Lichtquelle wurde in verschiedenen Patenten erwähnt. In [Zam91] und [GW92] wurde eine solche Differenzbildung von zwei Bildern bereits zur Beseitigung von Hintergrundrauschen in der Werkstückerkennung genannt. Aus weiteren Patenten ist bekannt, dass diese ebenfalls aus zwei Belichtungen eines Detektorarrays und anschließender Differenzbildung eine Dunkelstromkompensation vornehmen. Darüber hinaus wird in [Kli92] und [Teu93] die Differenzbildung zur Entfernung störender Bildteile beschrieben.

Bei der Implementierung eines Algorithmus zur Erkennung der Position eines rotationssymmetrischen Objektes ist die Offenlegungsschrift mit der Publikationsnummer 990304 zu beachten. Eine Anwendung und weitere Untersuchung des Verfahrens wird nicht vorgenommen, da aus der Beschreibung zu entnehmen ist, dass es sich hierbei nur um ein pixelgenaues Verfahren handelt.

Das Patent DE 10055572 nutzt die Houghtransformation zur Erkennung von Leitungen in einem Entfernungsbild. Die Anwendung zur Leitungserkennung ist zur Zeit für Tachymeter nicht vorgesehen. Für die Erkennung schmaler Linien wird im Patent DE 04437468 ein Verfahren vorgestellt. Aus den Verfahrensschritten ist jedoch zu ersehen, dass es sich hierbei wiederum um eine pixelgenaue Lageerkennung der Linie handelt. Generell ist anzumerken, dass die Berechnungen der 2. Ableitungen in einem Punkt schon in verschiedenen Filterverfahren zum Einsatz kommen. Die Segmentierung von Bildern könnte für die Vermessung von nicht kooperativen Zielen für die Bildung von Segmenten mit gleicher Textur interessant werden. Das in der Offenlegungsschrift 980813 genannte Verfahren ist in der Literatur [Ste93] auch unter dem Namen „Split & Merge“ zu finden.

# Kapitel 3

## Bildverarbeitungsverfahren zur Erkennung elementarer Bildmuster

Betrachtet man eine natürliche Bildszene, so fällt auf, dass das Augenmerk des Betrachters zunächst auf ihm bekannte Strukturen im Bild gelenkt wird. Diese Strukturen sind abstrakt gesehen elementare Grundbausteine wie Punkte, Linien und Kreise, aus denen komplexere Objekte zusammengesetzt werden können. Diese Vorgehensweise ist ebenfalls Bestandteil der Bilderkennung, bei der versucht wird, elementare Bausteine aus dem Bild zu extrahieren und mit diesen komplexere Objekte zu formen. Da die bei der Bildverarbeitung zum Einsatz kommende Rechentechnik bei weitem nicht die Komplexität des menschlichen Gehirns aufweist, werden oft spezielle Anordnungen eingesetzt, mit denen der Aufwand zur Erkennung eines Musters vereinfacht wird.

Im folgendem Abschnitt werden geodätische Messpunkte gezeigt, die mit bildverarbeitenden Tachymetern - Videotachymeter - vermessen werden sollen. Durch eine abstrakte Beschreibung der Messpunkte werden elementare Bildmuster definiert, mit denen die Erfassung und Beschreibung der Messpunkte möglich ist. Aufbauend auf der Beschreibung von elementaren Grundbausteinen werden aus der Literatur bekannte Verfahren zur Lokalisierung dieser Grundformen vorgestellt.

### 3.1 Beschreibung geodätischer Ziele durch elementare Bildmuster

Das Ziel einer Vermessungsaufgabe ist unter anderem die Übertragung einer Örtlichkeit in eine Datenbank durch die Bestimmung der Koordinaten des zu vermessenden Objektes. Für die Vermessung eines Geländepunktes kann durch verschiedene Möglichkeiten ein Vorwissen in Bildverarbeitungsalgorithmen einfließen. Dieses Vorwissen kann in Form einer Objektgeometrie (Abbildung 3.1), eines Musters (Abbildung 3.4) oder einer Verknüpfung von Elementen (Abbildung 3.7) vorliegen. Die Koordinate des geodätischen Messpunktes setzt sich bei der Messung mit einem Tachymeter aus den abgelesenen Winkeln der horizontalen (Hz) und vertikalen (V) Messachsen und der Entfernung zum Messpunkt zusammen. Mit den heutigen Tachymetersystemen erfolgt die Bestimmung der Koordinate überwiegend durch eine signalisierte Messung, bei der ein Zielpunkt mit einem Tripleprisma markiert wird. Die Abbildung eines Tripleprismas im Videobild ist im Allgemeinen durch eine elliptische Struktur beschreibbar, die mittig angezielt wird. Für die signali-

sierte Messung wird das Tachymetersehfeld meist mit infrarotem Licht ausgeleuchtet, so dass für das menschliche Auge und den Bildempfänger ein unterschiedliches Prismenbild sichtbar wird. Die Abbildungen 3.2 und 3.3 zeigen die entsprechenden Prismenbilder. Die



Abbildung 3.1: Markierung eines Messpunktes mit einem Prisma

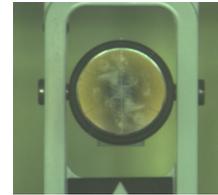


Abbildung 3.2: Sichtbares Prismenbild für den Vermesser

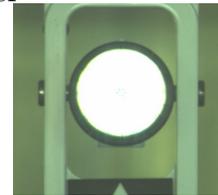


Abbildung 3.3: Prismenbild eines CCD-Bildempfängers bei koaxialer Beleuchtung

Lokalisierung der Prismenposition im Videobild kann damit auf die Suche einer elliptischen Struktur mit einer hohen Intensität zurückgeführt werden. Je nach Abstand zum Messpunkt werden sich dabei kleinere, punktförmige und größere, flächenhafte Strukturen ergeben. Im Abschnitt 3.2 werden aus der Literatur bekannte Verfahren gezeigt, die zur Erkennung ähnlicher Strukturen genutzt wurden. In der Aufnahme einer natürlichen Szene können weitere Bereiche mit einer dem Prisma ähnlichen Intensität und Struktur enthalten sein. Aus diesem Grund ist für die Anzielung von kooperativen Zielen eine geeignete Methoden zur Unterdrückung von Störsignalen zu untersuchen.



Abbildung 3.4: Markierung eines Messpunktes mit einer Zieltafel



Abbildung 3.5: Anzielhilfen für die Reflektormessung

Die Unsicherheit einer reflektorbezogenen Vermessung wird bei großen Messentfernungen durch die kleiner werdende Anzielfläche erhöht. Insbesondere macht sich bei kleinen

Prismenbildern der Einfluss von Luftflimmern in der Atmosphäre sehr stark bemerkbar. Aus diesem Grund wird das Prisma durch einen Zieltafelaufsatz (Abbildung 3.5) ergänzt, oder wie in der Abbildung 3.4 gezeigt, durch die Zieltafel ersetzt. Zieltafeln verfügen meist über definierte Muster, bei denen eine horizontale und vertikale Linienstruktur mit dem Zielkreuz in Deckung gebracht werden kann. Die Markierung von Messpunkten durch eine Zieltafel, entsprechend der Abbildung 3.4, wurde in früheren Theodolitmessungen zur präzisen Erfassung von Winkeln über größere Entfernungen eingesetzt. Mit der heute zur Verfügung stehenden reflektorlosen Entfernungsmessung kann diese Variante der Vermessung wieder an Bedeutung gewinnen. Die Anzielung passiver Zielmarken (Zieltafeln) in Verbindung mit einer reflektorlosen Streckenmessung hat einen Gewichts- und Preisvorteil gegenüber den Prismen. Im Abschnitt 3.4 werden diesbezüglich Verfahren und Methoden der Mustererkennung gezeigt, mit denen eine Lokalisierung von Zieltafeln möglich ist.

Neben der Anzielung von Reflektoren und Zieltafeln sind durch den Einsatz der Bildverarbeitung auch die aus der Koordinatenmesstechnik bekannten Verfahren zur Bestimmung von Konturpunkten und Formelementen anwendbar. Der Konturpunkt bildet in der Koordinatenmesstechnik die Basis für die Berechnung von Formelementen wie Geraden, Kreise und Ellipsen. Durch die Verknüpfung von Formelementen sind weitere Messwerte, die nicht direkt im Bild durch einen Messoperator bestimmt werden können, ableitbar. In der Abbildung 3.6 ist die Konturpunktbestimmung entlang einer Hausfassade und die Bestimmung eines Konturpunktes durch einen Geradenschnitt (Abbildung 3.7) gezeigt.

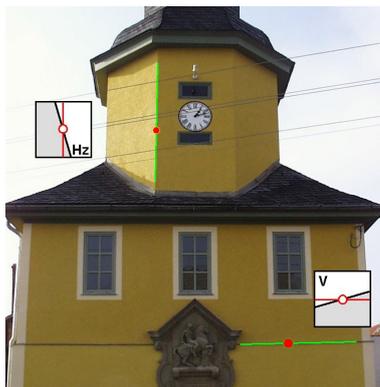


Abbildung 3.6: Bestimmung der Kontur in einem Punkt

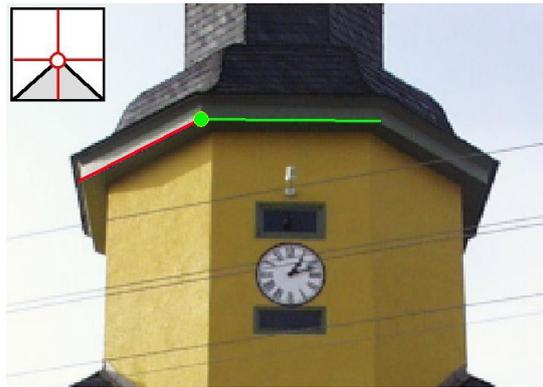


Abbildung 3.7: Bestimmung eines Konturpunktes mittels Geradenschnitt

In der geodätischen Vermessung sind jedoch nicht die stabilen Messbedingungen wie in der Koordinatenmesstechnik zu erwarten. Neben der Änderung der Beleuchtungsintensität und -richtung unterliegt die Messung zur Bestimmung eines Konturpunktes auch dem Einfluss vorhandener Texturen. Zur Sicherung des Messergebnisses sollte eine Kontur, wie in der Abbildungen 3.6 gezeigt, über einen definierten Bereich beziehungsweise mittels einer ausgleichenden Gerade approximiert werden.

Für die Bestimmung von ausgedehnten Konturen sollte generell von einer beliebigen Lage ausgegangen werden. In wenigen Ausnahmefällen und unter der Voraussetzung einer präzisen Instrumenthorizontierung ist die Annahme eines horizontalen beziehungsweise vertikalen Verlaufes im Bild möglich. Die Angabe einer Richtung oder eines Bereiches kann dennoch als Vorwissen für die Einschränkung des Arbeitsbereiches und damit zur Reduzierung der Auswertezeit sinnvoll sein. In der Abbildung 3.8 wird eine geradlinige

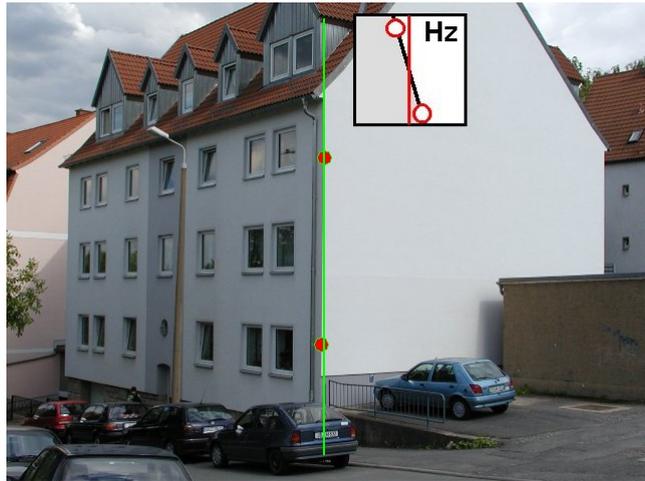


Abbildung 3.8: Bestimmung der Konturlinie aus zwei Anzielpunkten

Kontur im Videobild gezeigt, wie durch zwei Punkten definiert wird.

Für die gezeigten Vermessungsaufgaben sind Operatoren für die Bestimmung von Konturpunkten und Ausgleichsverfahren für Formelemente erforderlich. Diese Verfahren sind in [LBF<sup>+</sup>99] für die Anwendung in der Koordinatenmesstechnik beschrieben. Im Abschnitt 3.3 werden daher Verfahren beschrieben, die über den Bereich der Koordinatenmesstechnik hinaus anwendbar sind.

In den Abbildungen 3.9 und 3.10 werden zwei weitere Beispiele aus der geodätischen Vermessung gezeigt, die mit der Anwendung der Bildverarbeitung in Videotachymetern effizienter gelöst werden können. Die Erfassung der Position von Licht- und Leitungsmasten



Abbildung 3.9: Messung einer Linie in einem Punkt



Abbildung 3.10: Bestimmung der mittleren Kontur

ist beispielsweise für die Anfertigung von Spezialkarten der Energieversorger von Interesse. Die Lage der streifenförmigen Struktur des Mastes ist durch die mittlere Konturlinie bestimmt, die durch geeignete Operatoren aus dem Bild extrahiert werden sollen. Neben der Vermessung der Position hat die Absteckung und Markierung von Geländepunkten durch Pfähle oder Fluchtstangen, wie in der Abbildung 3.9 dargestellt, eine große Bedeutung. Masten und Fluchtstäbe können zwar durch das gleiche Geometrieelement beschrieben

werden, unterscheiden sich jedoch erheblich im Querschnitt der zu bestimmenden Struktur im Videobild. Die Farbe der Struktur soll zunächst für die Bestimmung des Formelementes unberücksichtigt bleiben. Aufgrund der Querschnittsunterschiede sollen mit der vorgelegten Arbeit zwei Operatoren abgeleitet werden, mit denen die mittlere Konturlinie einer geraden streifenförmigen Struktur und die Lage einer geraden linienförmigen Struktur in einem Punkt bestimmt werden können.

Im Rahmen der vorgelegten Arbeit werden Untersuchungen für die Vermessung von

1. kooperativen Zielen (Reflektoren und Tripleprismen),
2. signalisierten Punkten (Zieltafeln) und
3. nicht signalisierten Punkten (Konturen und Konturpunkten von Hausfassaden)

im Videobild gezeigt. Für die Lokalisierung und Bestimmung der Position geodätischer Ziele im Videobild werden hauptsächlich Bildverarbeitungsverfahren zur Extraktion punktförmiger Muster, Konturen und Linien benötigt. Darüber hinaus sind Verfahren zur Beschreibung der lokalen Struktur für das Auffinden von Zielmustern und für die Erkennung der Lage von Bildstrukturen von großem Interesse.

Durch ein umfassendes Literaturstudium werden in den nachfolgenden Kapiteln einzelne Bildverarbeitungsverfahren herausgearbeitet, die für die Problematik „Lokalisierung geodätischer Zielmuster“ anwendbar sind.

## 3.2 Punktdetektion

Punktmessverfahren sind in verschiedenen Anwendungsbereichen für verschiedene punktförmig ausgeprägte Strukturen zu finden. Hierzu gehören zum Beispiel die Anwendung der Punktdetektion für Sternsensoren [Wei90], die Struktur-Analyse in Bildern [Lin94a], die Bestimmung von elliptischen Strukturen mit Hilfe spezieller Operatoren [Luh00] und verschiedenen Approximationsansätzen [FN96] zur Detektion des hellsten Punktes einer Grauwertverteilung.

In [FN96] werden die Ergebnisse einer Untersuchung zum Vergleich verschiedener Approximationsansätze für die subpixelgenaue Erkennung der Maximaposition einer Grauwertverteilung beschrieben. Dabei erfolgt die Betrachtung entlang einer Bildzeile eindimensional und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. In den Untersuchungen von Fischer und Naidu [FN96] wurde der Streifenverlauf für die Simulation durch die eindimensionale Gaußfunktion  $y = \alpha e^{\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right)}$  angenähert<sup>1</sup>. Für den genannten Anwendungsfall wird angenommen, dass der subpixelgenaue Ort der höchsten Intensität  $f(x)$  an der Position  $\hat{\delta} = x + \delta$  vorliegt. Durch Einbeziehung der  $2n + 1$  Nachbarpixel  $f(x-n) \dots f(x+n)$  wird durch die Approximation eines Funktionsverlaufes eine subpixelgenaue Position  $\hat{\delta}$  des Intensitätsmaximums bestimmt. Zur Approximation dienten die in der Tabelle 3.1 gezeigten Ansätze. Es wurde gezeigt, dass, basierend auf der Annahme eines gaußförmigen

Gaußfunktion:		$\hat{\delta} = \frac{1}{2} \frac{\ln(f(x-1)) - \ln(f(x+1))}{\ln(f(x-1)) - 2\ln(f(x)) + \ln(f(x+1))}$
Schwerpunkt	3 Punkte	$\hat{\delta} = \frac{f(x+1) - f(x-1) - 2f(x-2)}{f(x-2) + f(x-1) + f(x) + f(x+1) + f(x+2)}$
Schwerpunkt	5 Punkte	$\hat{\delta} = \frac{2f(x+2) + f(x+1) - f(x-1)}{f(x-1) + f(x) + f(x+1)}$
Schwerpunkt	7 Punkte	$\hat{\delta} = \frac{3f(x+3) + 2f(x+2) + f(x+1) - f(x-1) - f(x-2) - f(x-3)}{f(x-3) + f(x-2) - f(x-1) + f(x) + f(x+1) + f(x+2) + f(x+3)}$
lineare Interpolation:		$\hat{\delta} = \begin{cases} \frac{1}{2} \frac{f(x+1) - f(x-1)}{f(x) - f(x-1)} & : f(x+1) > f(x-1) \\ \frac{1}{2} \frac{f(x+1) - f(x-1)}{f(x) - f(x+1)} & : f(x+1) \leq f(x-1) \end{cases}$
parabolischer Ansatz:		$\hat{\delta} = \frac{1}{2} \frac{f(x-1) - f(x+1)}{2f(x+1) - 2f(x) + f(x-1)}$
Blais, Rioux	2.Ordnung	$g_2(x) = f(x-1) - f(x+1)$ $\hat{\delta} = \frac{g_2(x)}{g_2(x) - g_2(x-1)}$
Blais, Rioux	4.Ordnung	$g_4(x) = f(x-2) + f(x-1) - f(x+1) + f(x+2)$ $\hat{\delta} = \frac{g_4(x)}{g_4(x) - g_4(x-1)}$
Blais, Rioux	8.Ordnung	$g_8(x) = f(x-4) + \dots + f(x-1) - f(x+1) + \dots + f(x+4)$ $\hat{\delta} = \frac{g_8(x)}{g_8(x) - g_8(x-1)}$

Tabelle 3.1: Ansätze zur Approximation der Position  $\hat{\delta}$  des Intensitätsmaximums [FN96]

<sup>1</sup> $\alpha \dots$  Vorfaktor zur Abbildung der Funktionswerte zwischen  $0 \leq f(x) \leq \alpha$

Grauwertverlaufes der Modellfunktion, die geringste Abweichung bei der Approximation durch die Gaußfunktion zu erwarten ist. Aus dem Vergleich der anderen Modelle wurde ersichtlich, dass die Bestimmung des Schwerpunktes die geringsten Abweichungen zur realen Position lieferte. Bei der Betrachtung der Approximationsgüte unter Rauschen zeigte sich, dass die Detektoren von Blais & Rioux aufgrund der Mittelung über mehrere Intensitätswerte bessere Ergebnisse aufweisen. Bei den vorgestellten Untersuchungen wurde auch das Verhalten bei Übersteuerung des Sensors untersucht. Hierbei war eine Verschlechterung des Ergebnisses zu beobachten, da die Approximation nur über wenige Punkte erfolgte, die den ursprünglichen Funktionsverlauf nicht mehr abbilden können. Dennoch wurde gezeigt, dass die Berechnung des Schwerpunktes gute Ergebnisse liefert.

Eine weitere Untersuchung, die sich speziell mit der Problematik „Sternsensor“ und der Erkennung von Lichtspots von Sternen beschäftigt, ist in [Wei90] nachzulesen. In dieser Arbeit wurde das Schwerpunktverfahren, ein Polynomansatz  $f(x)$  zweiter Ordnung zur Approximation des Intensitätsverlaufes und ein speziell auf das Problem zugeschnittener Lösungsansatz vorgestellt. Die Modellfunktionen beschränken sich in dieser Arbeit auf einen eindimensionalen Grauwertverlauf und eindimensionale Lösungsansätze. Ein Schwerpunkt dieser Arbeit besteht in der Untersuchung von Fehlereinflüssen wie systematische Fehler, Modellfehler und zufällige Fehler. Diese Untersuchungen wurden durch [See96] aufgegriffen und anhand des zweidimensionalen Spotverlaufes verifiziert.

In [Luh88] und [Luh00] wurde zur Antastung einer kreis- und ellipsenförmigen Struktur der Zhou- [Zho86] und Sternoperator angewandt. Das Prinzip des Sternoperators beruht

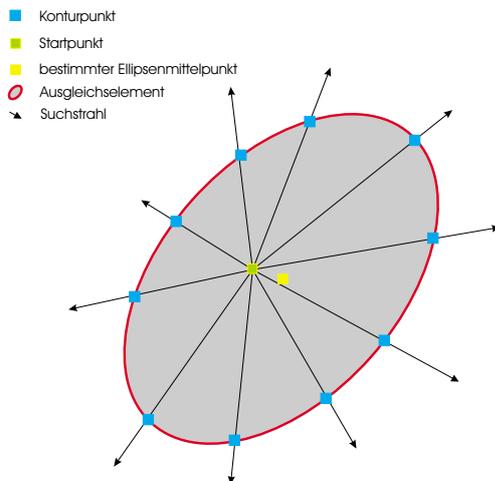


Abbildung 3.11: Sternoperator mit Ellipsenausgleichung

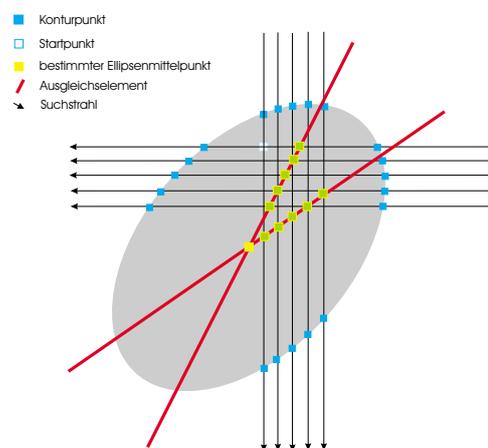


Abbildung 3.12: Zhou-Ellipsenoperator

auf der Extraktion von Konturpunkten durch eine Kantensuche entlang von Suchstrahlen. Von einem beliebigen Startpunkt innerhalb der Ellipsenstruktur werden die Suchstrahlen im Umlauf von  $360^\circ$  bestimmt und durch eine Ellipsenausgleichsrechnung aus den Konturpunkten der interessierende Parameter des Mittelpunktes ermittelt. Eine ähnliche Vorgehensweise wird durch den Zhou-Operator beschrieben. Ausgehend von einem beliebigen Startpunkt innerhalb der Ellipse werden Suchstrahlen parallel zu den Bildzeilen und -spalten gebildet. Durch Mittelwertbildung aus den in jeder Bildzeile (Bildspalte) gefundenen Konturpunkten wird eine Ausgleichsgerade ermittelt. Der Schnittpunkt der beiden Ausgleichsgeraden beschreibt den gesuchten Mittelpunkt der Ellipse. Das Verfahren von

Zhou wird in der Literatur auch durch das Modell der konjugierten Ellipsendurchmesser beschrieben. In [Luh00] wird neben dem Stern- und Zhou-Operator auch ein Verfahren zur Bestimmung des Schwerpunktes von symmetrisch verteilten Grauwertstrukturen entsprechend den Gleichungen 3.1 beschrieben.

$$x_m = \frac{\sum_{i=1}^n x_i T g(x_i)}{\sum_{i=1}^n T g(x_i)} \quad T = \begin{cases} 0 & : g(x_i) < t \\ 1 & : g(x_i) \geq t \end{cases} \quad (3.1)$$

$$y_m = \frac{\sum_{i=1}^n y_i T g(y_i)}{\sum_{i=1}^n T g(y_i)} \quad T = \begin{cases} 0 & : g(y_i) < t \\ 1 & : g(y_i) \geq t \end{cases} \quad 0 \geq t \geq 255$$

In Anlehnung an [Maa92] wurde in [Luh00] die theoretische Genauigkeit des Schwerpunktverfahrens durch Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes abgeschätzt.

$$\sigma_x = \frac{1}{\sum_{i=1}^n g_i} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2 \cdot \sigma_g} \quad (3.2)$$

$$\sigma_y = \frac{1}{\sum_{i=1}^n g_i} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2 \cdot \sigma_g} \quad (3.3)$$

Die Gleichungen 3.2 und 3.3 zeigen, dass die Genauigkeit des Schwerpunktverfahrens vom Grauwerttrauschen  $\sigma_g$  und von der Größe des Lichtspots abhängt. Die Genauigkeit für den Schwerpunkt wurde in [Luh00] mit 0,03 – 0,05 Pixel angegeben.

In der Dissertation von Alfred Mischke [Mis97] wird zur Zielpunktsuche ein angepasster Förstner-Operator [FG87] vorgestellt. Dieser Operator geht von einer Textur- bzw. Grauwertänderung in der Nähe der potentiell interessierenden Bildpunkte aus. Die Änderung des Gradienten sollte dabei in mindestens zwei unterschiedlichen Gradientenrichtungen messbar sein. Wie in [Mis97] vorgeschlagen wurde, ist bei der Wahl von  $\Delta x = \Delta y = 1$  der Gradient in beiden Richtungen symmetrisch auf einen Punkt bezogen und durch die partiellen Differenzenquotienten entsprechend 3.4 und 3.5 berechenbar.

$$\frac{\partial}{\partial x} g(x, y) \approx \frac{g(x_{i+1}, y_i) - g(x_{i-1}, y_j)}{2} \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} g(x, y) \approx \frac{g(x_i, y_{j+1}) - g(x_i, y_{j-1})}{2} \quad (3.5)$$

Durch die zusätzliche Definition der Parameter Dichte  $v$  und Rundheit  $q$  entsprechend den Gleichungen 3.6 und 3.7 in [Mis97] kann entschieden werden, ob es sich um einen markanten Punkt im ausgewählten Bildbereich  $[k, l]$  handelt.

$$v(x_i, y_j) = \frac{1}{trN(x_i, y_j)^{-1}} \quad (3.6)$$

$$q(x_i, y_j) = \frac{4detN(x_i, y_j)}{tr^2N(x_i, y_j)} \quad (3.7)$$

$$N(x_i, y_j) = \begin{pmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

$$N_{11} = \sum_{m=i-k}^{i+k} \sum_{n=j-l}^{j+l} \left( \frac{\partial}{\partial x} g(x_m, y_n) \right)^2 \quad (3.9)$$

$$N_{22} = \sum_{m=i-k}^{i+k} \sum_{n=j-l}^{j+l} \left( \frac{\partial}{\partial y} g(x_m, y_n) \right)^2 \quad (3.10)$$

$$N_{12} = N_{21} = \sum_{m=i-k}^{i+k} \sum_{n=j-l}^{j+l} \left( \frac{\partial}{\partial x} g(x_m, y_n) \quad \frac{\partial}{\partial y} g(x_m, y_n) \right) \quad (3.11)$$

Die Untersuchungen in der Dissertation [Mis97] zeigten, dass je nach vorliegenden Beleuchtungsverhältnissen der Förstner-Operator eine „Wiederholgenauigkeit der Subpixel-Lokalisierung [Mis97]“ von 0,025 – 0,05 Pixel in x-Richtung und 0,1 Pixel in y-Richtung bei Verwendung eines rechteckigen Bildsensors aufweist.

Für die Lokalisierung von Punkten entlang einer kreisförmigen Struktur wird in der Literatur auch die Houghtransformation genannt. Die Houghtransformation wurde 1962 von Paul Hough [Hou62] vorgestellt und für die Mustererkennung erstmals zu Beginn der 80-er Jahre angewandt. Das Prinzip der Houghtransformation wurde in [Par94] vorgestellt und ist für die Erkennung von Linien und Kreisen in [GW92] und [Dav97] ausführlich beschrieben. Der Vorteil dieser Transformation besteht darin, dass selbst komplexe Formen, wie zum Beispiel eine Ellipse [YIK89], mit mehreren Parametern  $\phi$  im Houghraum, auch Akkumulatorraum genannt, durch einen einzelnen Punkt beschrieben werden.

$$\mathbb{H}(\phi_1, \dots, \phi_n) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B[x, y] \delta(\phi_1, \dots, \phi_n, x, y) dx dy \quad (3.12)$$

Die Auswahl von extrahierten Bildpunkten  $B[x, y]$ , die ein gesuchtes Muster beschreiben, wird durch dieses Verfahren auf die Suche eines Maximums im Houghraum reduziert. Die bekannteste Form der Houghtransformation ist die diskrete Houghtransformation.

$$H(\phi_1, \dots, \phi_n) = \sum_y \sum_x B[x, y] \delta(\phi_1, \dots, \phi_n, x, y) \quad (3.13)$$

Abgeleitete Formen der Houghtransformation sind die:

1. hierarchical Houghtransformation [PIK89][PIK90]
2. probabilistic Houghtransformation [KEB91][BS91]
3. randomised Houghtransformation [XOK90][McL97]

Zu Beginn der 80-er Jahre wurde in [Wit83] ein Verfahren vorgestellt, dass die Strukturen eines Bildes in allen Auflösungsstufen, „Scales“, gleichzeitig betrachtet. Die Scale-Space Theory wurde seitdem für viele Anwendungen in der Bildverarbeitung eingesetzt. In [KfV01] und [Kui02] wird die Theory des Scale-Space Verfahrens für die Segmentierung und Erkennung von „kritischen Punkten“ gezeigt. Damit ist die Beschreibung eines Spots gegenüber dem Hintergrund in Form eines Maximums (heller Spot auf dunklem Hintergrund) oder Minimums (dunkler Spot auf hellem Hintergrund) möglich.

### 3.3 Kanten- und Linienextraktion

Verschiedene lokale Bildoperationen, denen die Kanten- und Linienextraktion zuzuordnen ist, können nur durch Einbeziehung der Nachbarschaft eines Bildpunktes lokalisiert werden. In der lokalen Umgebung eines Kantenpunktes wird somit eine Veränderung der Bildinformation feststellbar. Die Art der Strukturänderung wird in [Luh00] differenziert nach:

1. einer Änderung der Grauwerte  $\longrightarrow$  Kantenextraktion
2. einer Änderung der Farbwerte  $\longrightarrow$  mehrkanalige Kantenextraktion
3. einer Änderung der Oberflächenstruktur  $\longrightarrow$  Texturanalyse

Verschiedene Ansätze zur Beschreibung einer Grauwertkante werden in [Par96] und [Dav97] gezeigt. Ein sehr vereinfachtes Modell wird mit der idealen Sprungfunktion beschrieben. Durch die diskrete Abbildung der Kante auf dem Bildsensor wird diese Funktion jedoch nie ideal abgebildet. In [Par96] wird gezeigt, dass digitalisierte Kanten durch das Modell einer Rampenfunktion besser angenähert werden. Reale Grauwertübergänge an CCD-Sensoren zeigen ein Übertragungsverhalten, welches im Funktionsverlauf einer Sigmoid-Funktion  $f(x) = 1 - \frac{e^{-bx}}{1+e^{-bx}}$  entspricht<sup>2</sup>. Ein wesentlicher Einfluss auf die Kantendetektion ist das Vorhandensein von Rauschen, welches durch die in [SOS00] beschriebenen Filteroperationen verringert werden kann. Spezielle Operatoren von Marr-Hildret [MH80], Canny [Can86] und Shen-Castan [SC92] verwenden Gaußfilter zur Verringerung des Rauschinflusses auf die Kantenposition.

Für die Kantenextraktion in Grauwertbildern existieren Ansätze, die auf der ersten beziehungsweise zweiten Ableitung der Bildinformation sowie den so genannten Templates basieren. Ansätze, basierend auf den Ableitungen erster und zweiter Ordnung, liefern die bekannten Roberts- und Laplace-Faltungsoperatoren. Template basierte Ansätze verwenden nicht direkt die Ableitungen der Bildinformation, sondern berücksichtigen ein spezielles Kantenmodell. Die Operatoren von Prewitt [GW92] und Kirsch [Dav97] sind typische Templates. Ein Vergleich verschiedener Kantenoperatoren unter dem Einfluss von Rauschen ist in [Ste93] zu finden.

Die genannten Verfahren sind in der Lage, eine Kante pixelgenau im Raster des Bildempfängers zu bestimmen. Eine subpixelgenaue Lokalisierung von Kanten kann durch Interpolation oder Approximation aus den Grauwerten der Nachbarbildpunkte erfolgen. Eine Übersicht zu den Subpixelverfahren ist in [Küh97] zu finden.

Der Begriff der Linienextraktion ist in der Literatur für verschiedene Anwendungen gebräuchlich. In [Dav97] wird die Linienextraktion durch eine Verkettung von Konturpunkten mittels der Houghtransformation beschrieben. Die Extraktion der Linien erfolgt auch hier in einem zweistufigen Prozess [Abm94] [Wal02], bei dem zuerst die Konturpunkte bestimmt werden und im Anschluss daran die Verkettung der Konturpunkte erfolgt. Ein erweiterter Ansatz für die Detektion von streifenförmigen Linien ist in [Ste98] zu finden. Hierbei besitzt das Linienmodell eine definierte Streifenbreite und kann zudem noch eine unterschiedliche Ausprägung, hier mit Polarität bezeichnet, besitzen. Entsprechende Liniendefinitionen mit gleicher und unterschiedlicher Polarität werden gezeigt. Das Prinzip der vorgestellten Linienextraktion basiert auf einer Scale-Space Beschreibung eines

<sup>2</sup>  $b$  ... Parameter zur Beeinflussung der Kantensteilheit

parabolischen Linienprofils. Das Kriterium für die Lokalisierung der Streifen ist hier die Höhe der zweiten Ableitung  $z''(x)$  im Punkt  $z'(x) = 0$ . Die Differenzierung realer Bild-daten, die durch zufälliges Rauschen gekennzeichnet sind, führt bei der Ableitung mit dem Differenzenquotient  $f_x(i, j) \approx f(i + 1, j) - f(i, j)$  zu fehlerhaften Ergebnissen. Eine Lösung des Problems der Differenzierung diskreter Daten wird in der Literatur mit der „Gaußschen Ableitung“ bezeichnet. Aus der Betrachtung einer Funktion  $f$  unter einem Scale-Parameter<sup>3</sup>  $\sigma$  wird diese mit dem allgemeinen Faltungskern  $\mathbb{G}$  in  $(f * \mathbb{G})$  überführt. Eine Ableitung der Funktion  $f$  kann dann unter Betrachtung mit diesem Scale-Parameter durchgeführt werden. Da die Ableitung eine invariante Operation bezüglich einer Verschiebung ist, kann diese in Form einer Faltungsoperation geschrieben werden. In [vdBD01] wurde gezeigt, dass die Faltung assoziativ und kommutativ ist, und es gilt:

$$\partial(f * \mathbb{G}) = \mathbb{D} * (f * \mathbb{G}) = f * (\mathbb{D} * \mathbb{G}) = f * (\partial\mathbb{G}) \quad (3.14)$$

Die Faltung der diskreten Daten mit einem skalierbaren Gauß-Ableitungskern [Spo97] entsprechend Gleichung 3.15 ermöglicht eine gleichzeitige Analyse und Differenzierung der Daten.

$$\frac{\partial f}{\partial x} * \mathbb{G} = f * \frac{\partial \mathbb{G}}{\partial x} \quad (3.15)$$

Die Differentiation ist somit in eine Integration mit dem Faltungskern  $\mathbb{G}$  überführt worden. Die Richtungsableitungen erster Ordnung  $f_x(x)$  und zweiter Ordnung  $f_{xx}(x)$  einer Funktion  $f$  mit diskretem Wertevorrat unter einem bestimmten „Scale“ werden dann durch die Faltung 3.16 und 3.17 mit den eindimensionalen Faltungskernen  $G$  der Gaußfunktion (Abbildungen 3.13, 3.14) bestimmt<sup>4</sup>.

$$f_x(x) = f(x) * G_x(x) \quad (3.16)$$

$$G_x(x) = -\frac{1}{2\pi\sigma^4} e^{-\frac{x^2}{\sigma^2}}$$

$$f_{xx}(x) = f(x) * G_{xx}(x) \quad (3.17)$$

$$G_{xx}(x) = -\frac{1}{2\pi\sigma^5} e^{-\frac{x^2}{\sigma^2}} (2\sigma^2 - x^2)$$

Aufbauend auf dieser Methodik wurde die Theorie des Scale-Space eingeführt. Unter der Annahme von linearen Verhältnissen wird die lineare Scale-Space Theorie durch eine Faltung mit dem Gaußkern beschrieben. Der Parameter  $t = \sigma^2$  dient zur Beschreibung einer Folge von Bildern<sup>5</sup>  $L(\vec{x}, t)$  unter einem bestimmten Scale-Parameter  $t$ .

$$L(\vec{x}, t) = G(\vec{x}, t) * f(\vec{x}) = \int_{\vec{x}_0 \in \mathbb{R}^n} G(\vec{x}_0, t) f(x - \vec{x}_0) d\vec{x}_0 \quad (3.18)$$

---

<sup>3</sup>  $\sigma$  ... bezeichnet hier den Scale-Parameter

<sup>4</sup> Diese Aussage gilt auch für kontinuierliche Funktionen.

<sup>5</sup> in der Literatur auch als Scale-Space Stack bezeichnet

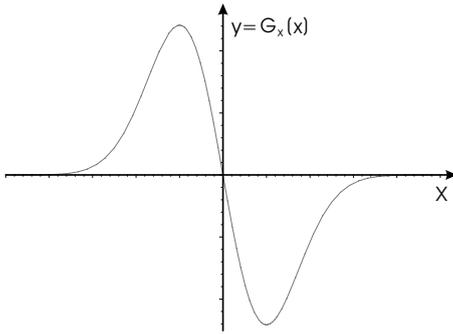


Abbildung 3.13: Faltungskern  $G_x(x)$

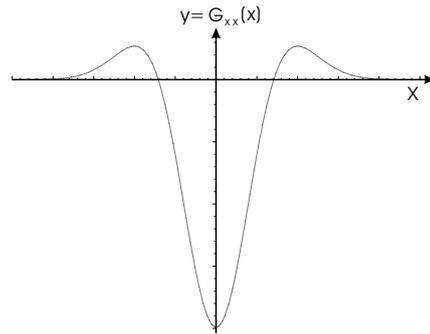


Abbildung 3.14: Faltungskern  $G_{xx}(x)$

Als Glättungsoperator wird die n-dimensionale Gaußfunktion verwendet:

$$G(\vec{x}, t) = \frac{1}{(2\pi t)^{n/2}} e^{-\frac{\vec{x}^T \vec{x}}{2t}} \quad (3.19)$$

$L(\vec{x}, t)$  beschreibt somit die Daten im Scale-Space in der Unschärfenstufe  $t$ . Durch Differenzierung mit dem Gaußschen Faltungskern erhält man somit eine Möglichkeit zur n-fachen Differenzierung der diskreten Daten im Scale-Space. Die Grundlagen des Scale-Space Verfahrens für n-dimensionale Daten werden in [Lin94b] und [Spo97] beschrieben. Durch die nichtlineare Kombination von Ableitungen im Scale-Space wird in [Ker01] gezeigt, wie Detektoren für Spots, Kanten und Ecken im Bild realisiert werden können.

### 3.4 Extraktion lokaler Bildstrukturen

Die Bestimmung und Klassifizierung lokaler Bildstrukturen basiert auf der Untersuchung von Eigenschaften, die durch die Ableitungen einer Funktion  $f$  beschrieben werden. Für die Funktion  $f$  wird dabei vorausgesetzt, dass diese in dem betrachteten Intervall  $x \in [x_0 - a, x_0 + a]$   $(n + 1)$ -mal differenzierbar ist. Unter dieser Bedingung ist der Satz von Taylor [BS00] (Gleichung 3.20) erfüllt und es kann eine Taylorreihenentwicklung im Punkt  $x_0$  bestimmt werden.

$$f(x) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!} (x - x_0)^k + R_n(x) \quad (3.20)$$

Das Polynom ohne Restglied  $R_n(x)$  wird als das  $n$ -te Taylorpolynom  $T_n$  einer Funktion  $f$  im Punkt  $x_0$  bezeichnet, das für  $(n \rightarrow \infty)$  in die Taylorreihe der Funktion  $f$  übergeht. Für die Bestimmung der lokalen Eigenschaften wie Gradient und Krümmung, aus diskreten Bilddaten ist die Bestimmung des Taylorpolynoms zweiter Ordnung  $T_2$  entsprechend Gleichung 3.21 ausreichend.

$$\begin{aligned} f(x, y) \approx T_2 = & f_0(x, y) + \\ & \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \Delta y + \\ & \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} \Delta x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} \Delta y^2 + \\ & \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x \partial y} \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (3.21)$$

Eine kompaktere Schreibweise von Gleichung 3.21 ergibt sich durch Überführung in die Vektorschreibweise 3.22, wobei  $\nabla f(x)$  den Gradientenvektor (Gleichung 3.23) und  $H_f$  die Hesse-Matrix (Gleichung 3.24) darstellt.

$$f(\vec{x}) \approx T_2 = f(\vec{x}) + \Delta \vec{x}^T \nabla f(\vec{x}) + \frac{1}{2} \Delta \vec{x}^T H_f(\vec{x}) \Delta \vec{x} \quad (3.22)$$

$$\nabla f(x, y) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

$$H_f = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y \partial x} \\ \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{xx} & f_{xy} \\ f_{yx} & f_{yy} \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

Die Ableitungen des Taylorpolynoms  $T_2$  können durch zwei Ansätze bestimmt werden.

- Analytische Bestimmung der Ableitungen eines Polynomansatzes  $f(x, y)$  zweiter Ordnung, dessen Koeffizienten  $a_i$  durch eine Approximation aus den diskreten Bilddaten hervorgegangen sind [vdBD01].
- Numerische Bestimmung der Ableitungen durch Faltung der diskreten Daten mit den Gauß-Ableitungskernen erster und zweiter Ordnung [Spo97].

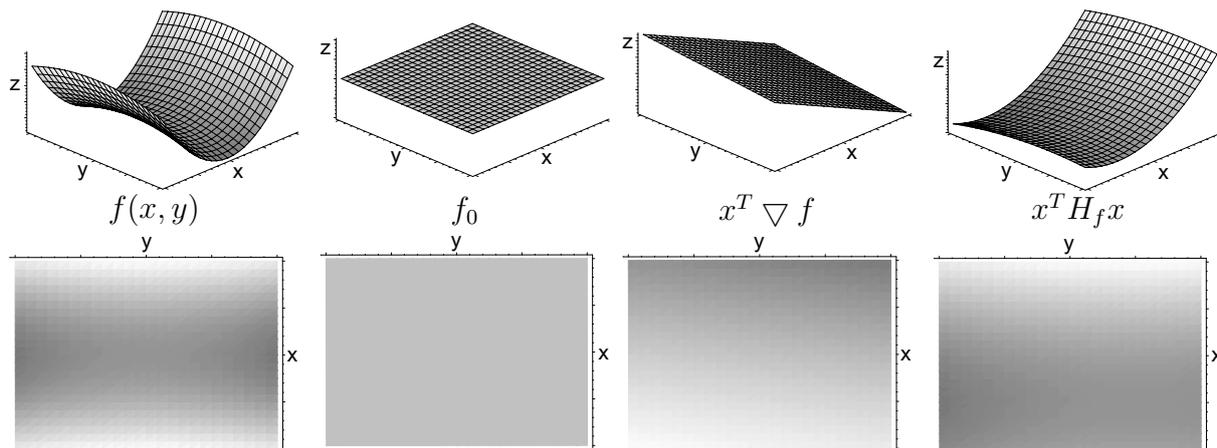


Abbildung 3.15: Taylor-Reihenzerlegung  $f(x, y) = 0.5x^2 - 0.1y^2$

In der Abbildung 3.15 ist am Beispiel der Funktion  $f(x, y) = 0.5x^2 - 0.1y^2$  eine Taylor-entwicklung zweiter Ordnung  $T_2$  gezeigt.

Aus den berechneten ersten Ableitungen (dem Gradientenvektor  $\nabla f(x, y)$ ) und den zweiten Ableitungen (Hesse-Matrix  $H_f$ ) können weitere Eigenschaften der lokalen Bildstruktur zur Klassifizierung abgeleitet werden.

Der Gradientenvektor  $\nabla f(x_0, y_0)$  ermöglicht eine Aussage über den Anstieg der Funktion im Punkt  $[x_0, y_0]$  und wird zur Bestimmung von Kanten genutzt. Aus den Eigenwerten  $\lambda_i$  der Hesse-Matrix und der Determinanten  $\det(|H_f - \lambda E|)$  kann eine Aussage über die vorliegende Struktur getroffen werden.

- $Det(H_f) > 0 \wedge h_{11} < 0$  ein Maximum,
- $Det(H_f) > 0 \wedge h_{11} > 0$  ein Minimum und für
- $Det(H_f) < 0$  ein Sattelpunkt.

Koenderink und van Doorn [KvD92] entwickelten eine Methode zur Klassifizierung von lokalen Strukturen über einen Formindex (Gleichung 3.25), für den die Eigenwerte  $\lambda_i$  der Hesse-Matrix  $H_f$  die Grundlage bildeten.

$$s = \frac{2}{\pi} \arctan \frac{\lambda_2 + \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad \lambda_1 \geq \lambda_2 \quad (3.25)$$

Weiterhin ist mit den Eigenvektoren  $\lambda_i$  eine Information über die Lage der Hauptachsen der Struktur möglich. Hierzu werden die Eigenvektoren aus der Lösung des Gleichungssystems  $(H_f - \lambda_i E) \vec{x} = \vec{0}$  bestimmt. Entsprechend der Gleichung 3.26 kann der Drehwinkel der Hauptachsen und damit die Lage der Struktur bestimmt werden.

$$\alpha' := \arctan2(y, x) = \begin{cases} \text{sign}(y) (\pi - \arctan(|\frac{y}{x}|)) & : x < 0 \\ 0 & : x = y = 0 \\ \text{sign}(y) \frac{\pi}{2} & : x = 0 \\ \arctan(\frac{y}{x}) & : x > 0 \end{cases} \quad (3.26)$$

In [vdBD01] wird eine weitere Beschreibung lokaler Eigenschaften mittels „Gauge-Koordinaten“ aufgezeigt. „Gauge-Koordinaten“ sind hierbei Koordinaten eines lokalen

Koordinatensystems, welches durch Rotation und/oder Verschiebung aus dem Bildkoordinatensystem hervorgegangen ist und eine rotationsunabhängige Beschreibung von Gradienten ermöglicht. Auf der Basis von „Gauge-Koordinaten“ ist in [vdBD01] die Bestimmung von Kanten und Ecken im Bild gezeigt.

Für die genannte analytische Bestimmung der Ableitungen einer Funktion wird vorausgesetzt, dass eine Funktion gefunden wird, mit der ein diskreter Datensatz angenähert werden kann. Zur Vereinfachung des Problems werden häufig Polynomansätze  $n$ -ter Ordnung eingesetzt. Die Approximation einer Polynombeschreibung zweiter Ordnung durch das Bild in einer Umgebung von  $x, y$  kann durch das „Image Facet Model“ entsprechend der Beschreibung in [vdBD01] erfolgen. In [MBW91] wird das in [vdBD01] angewandte Image Facet-Modell der Ordnung  $3 \times 3$  auf variable Ordnung für Bilddaten beschrieben. Die Grundlage für das Image Facet-Modell bildet ein allgemeines Polynom zweiter Ordnung entsprechend der Gleichung 3.27 beziehungsweise in der Matrixschreibweise in Gleichung 3.28.

$$F(x, y) + e(x, y) = p_1 + p_2x + p_3y + p_4x^2 + p_5y^2 + p_6xy \quad (3.27)$$

$$F(x, y) + e(x, y) = \begin{pmatrix} 1 & x & y & x^2 & y^2 & xy \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \end{pmatrix} \quad (3.28)$$

Der Ausdruck  $e(x, y)$  soll hier darauf hinweisen, dass es sich bei der Bestimmung der Parameter um eine Approximation handelt und einen Approximationsfehler darstellen. In [vdBD01] wird gezeigt, dass die Minimierung des quadratischen Approximationsfehlers (3.28) zu einer Regression mit der Lösung nach Gleichung 3.29 führt. Für jeden Bildpunkt  $B[x, y]$  liefert (3.28) eine Gleichung, die zeilenweise zu einem linearen Gleichungssystem zusammengefasst wird. Dabei bezeichnet  $A$  die Koeffizienten-Matrix. Da  $F(x, y) + e(x, y)$  einen Vektor aufspannt, soll im weiteren die Definition  $b := F(x, y) + e(x, y)$  eingeführt werden.

$$A^T A p = A^T b, \quad \text{mit } p = (p_1, \dots, p_6)^T \quad (3.29)$$

$$p = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (3.30)$$

Somit erhält man ein Gleichungssystem, das mit minimal 6 Gleichungen gelöst werden kann.

# Kapitel 4

## Zusammenfassung und Präzisierung der Aufgabenstellung

Der Stand der Vermessungstechnik zeigt, dass bereits einige Geräte auf dem Markt vorhanden sind, die über eine Möglichkeit zur automatischen Anzielung von kooperativen Zielen, den Prismen, verfügen. Dabei sind nicht immer Bildverarbeitungseinheiten, die aus einer Kombination eines CCD- oder CMOS-Flächensensors und einer Auswerteeinheit bestehen, im Einsatz. Mit dieser Generation von Vermessungssystemen wurde die bis zu diesem Zeitpunkt verbreitete optische Anzielung von Prismen durch ein Bildverarbeitungssystem zur automatischen Anzielung ersetzt.

Das Ziel der vorgelegten Dissertation ist die Untersuchung von Bildverarbeitungsverfahren zur Erkennung und Vermessung von geodätischen Messpunkten im Videobild. Die geodätischen Messpunkte werden dabei unterteilt in signalisierte und nicht signalisierte Messpunkte, wobei sich die Gruppe der signalisierten Messpunkte in die kooperativen (Reflektoren) und nicht kooperative Messpunkte (zum Beispiel Zieltafeln) unterteilt. Die genannten nicht signalisierten und nicht kooperativen Messpunkte stellen dabei eine vollkommen neue Art der automatischen Zielerfassung dar, deren Umsetzung in zukünftigen Tachymetersystemen verschiedene Vorteile mit sich bringen wird. In den Abschnitten 3.2, 3.3 und 3.4 wurden Verfahren aus der Bildverarbeitung aufgezeigt, die für die Erfassung geodätischer Anzielpunkte geeignet sind. Die gezeigten Verfahren stellen dabei bereits eine Vorauswahl bezüglich ihrer Anwendung in der Landvermessung dar.

Die Bildverarbeitung findet heute in vielen industriellen Mess-, Steuerungs- und Inspektionsaufgaben ihre Anwendung. Hierbei kommt dem Einsatz häufig eine relativ konstante Mess- und Umgebungsbedingung und somit die Möglichkeit einer festen Parametrisierung der Bildverarbeitungsaufgabe für das gegebene Problem zugute. Die Landvermessung verlangt für die Erkennung und Vermessung geodätischer Messpunkte, wie Prismen, Zieltafeln und Hauskonturen, eine höhere Robustheit der Bildverarbeitungsverfahren gegenüber schwankenden Messbedingungen, die sich in Helligkeitsänderungen, vorhandenen Texturen und bewegten Hintergrundobjekten äußern. Der Untersuchung der Störanfälligkeit der Messverfahren kommt daher eine hohe Bedeutung zu. Aufgrund der sich ständig ändernden geodätischen Messaufgaben und veränderlichen Messumgebungen wird es sehr schwierig sein, einen allgemeingültigen Messoperator zu definieren. Ausgehend von einer wissensbasierten Betrachtung der Messpunkte in einem digitalen Videobild müssen verschiedene Ansätze (Abbildung 4.1) betrachtet werden.

Im Fall „Objekt ist bekannt“ liegen Informationen zur Beschreibung des Objektes vor.

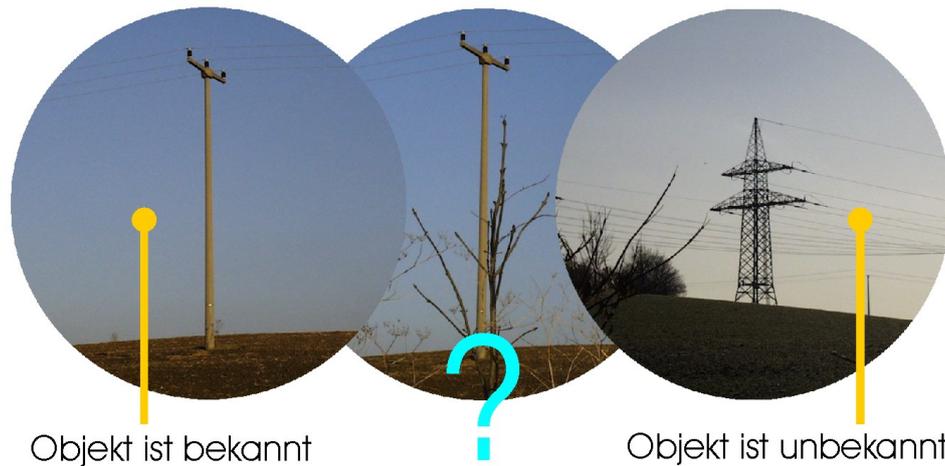


Abbildung 4.1: Wissensbasierte Betrachtung geodätischer Messpunkte

Das Objekt kann anhand seiner Geometrie und Lage im Videobild bestimmt und durch entsprechende Operatoren aus einer Wissensbasis, welche die Objektparameter Form und Lage ermitteln, aus dem Bild extrahiert werden. Zu diesen Messobjekten gehören zum Beispiel die Prismen und Zieltafeln, die in den genannten Parametern eindeutig beschrieben werden können. Aufgrund der unterschiedlichen Entfernung zum Messpunkt müssen die Operatoren auf verschiedenen Objektgrößen anwendbar sein. Aus diesem Grund sind die von Fischer und Naidu [FN96] untersuchten Verfahren (Tabelle 3.1, Abschnitt 3.2), die sich bei der Bestimmung eines Merkmals auf eine feste Punktzahl beziehen, ungeeignet. Die Ellipsenoperatoren (Abbildungen 3.11 und 3.12) besitzen keine Einschränkungen bezüglich einer sich ändernden Objektgröße. Eine Ausnahme bildet jedoch die Bestimmung von Ellipsen mit Radien kleiner zwei Bildpunkten, da hier die dem Modell zugrunde liegende flächenhafte Ausdehnung verloren geht.

Ein Verfahren, welches eine hohe Robustheit bezüglich der Größe eines Objektes besitzt, ist das Schwerpunktverfahren, welches für einen eindimensionalen Signalverlauf bereits in [Wei90] für die Anwendung an einem Sternsensor untersucht wurde. In [Wei90] wurde herausgefunden, dass das Schwerpunktverfahren anfällig ist gegenüber Rauschen und Signaloffsets in den Bereichen, in denen die Signalanteile sehr klein sind.

Ein sehr interessanter Ansatz zur Erkennung und Vermessung von Anzielpunkten ist durch die Untersuchung von lokalen Eigenschaften im Videobild entsprechend dem Ansatz in Abschnitt 3.4 gegeben. Diese Methode ermöglicht die Klassifizierung des vorliegenden Musters in einem lokalen Bildausschnitt und stellt somit einen Ansatz für verschiedene Zielmuster und -formen zur Verfügung. Für die Lokalisierung von kooperativen Zielen, signalisierten Messpunkten und zur Bestimmung der Lage einer Struktur wird dieses Verfahren untersucht werden.

Im zweiten Komplex „Objekt ist unbekannt“ ist das zu vermessende Objekt der Wissensbasis unbekannt und kann nur durch Basisoperatoren oder die Verknüpfung mehrerer Operatoren bestimmt werden. Als Basisoperatoren können zum Beispiel der Gradient oder die Eigenschaft der Fläche in einem Betrachtungspunkt dienen.

Ein weiterer Komplex, der in der geodätischen Praxis häufig vorkommt, ist, dass das Objekt als solches von dem Bediener erkennbar ist, aber aufgrund von Verdeckung oder

anderen Störungen durch einen Messoperator nicht bestimmt werden kann. In diesem Fall ist eine Grenze zu finden, in wie weit das sehr gut messende „Auge“ durch robuste Algorithmen oder durch die Kombination von Verfahren ersetzt werden kann. Eine Interaktion des Bedieners am Messgerät kann den maschinellen Suchprozess einer schwer zu erkennenden oder gestörten Struktur ergänzen.

Aus den aufgezeigten Gründen wird deutlich, dass ein Kompromiss zwischen der Automation eines Messprozesses und der Unterstützung der Messfunktion durch den Bediener zu finden ist. Im Allgemeinen soll die Strategie verfolgt werden, dass dem Bediener durch den automatischen Messablauf Ergebnisse vorgeschlagen werden. Zur Einschränkung und Unterdrückung von Fehlmessungen kann der Vermesser beispielsweise Angaben zur Anzahl der Messstellen im Videobild vornehmen.

# Kapitel 5

## Kooperative Messpunkte

### 5.1 Analytische Beschreibung der Prismenanzielung

Wie bereits anhand der Abbildungen 3.2 und 3.3 im Abschnitt 3.1 beschrieben wurde, ergibt sich aufgrund der verschiedenen Zielbilder eine unterschiedliche Methodik für die visuelle und automatische Anzielung eines Prismas. Die visuelle Anzielung durch den Bediener erfolgt im Nahbereich über den Schnittpunkt der Prismenkanten (Abbildung 5.1), auf den das Strichkreuz eingefahren wird. Auf eine größere Zielentfernung werden diese Prismenkanten jedoch visuell nicht mehr erfassbar (Abbildung 3.1). In diesem Fall erfolgt eine Anzielung über die äußere Kontur des Prismas, indem das Strichkreuz so plaziert wird, dass sich gleich große, symmetrische verteilte Segmente um den angezielten Punkt ergeben. Diese Methode der Anzielung der Prismenkantur ist durch das Prinzip der Ausgleichsrechnung (Abbildung 5.2) beschreibbar und beruht auf einer Einpassung eines Kreises oder einer Ellipse in die sichtbare (angetastete) Objektkontur. In der Ko-

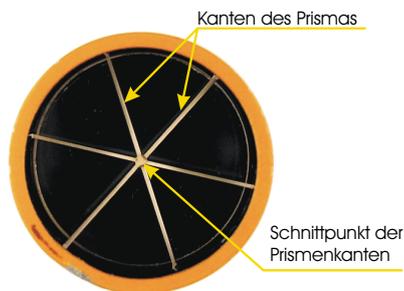


Abbildung 5.1: Sichtbare Kanten eines Prismas im Nahbereich

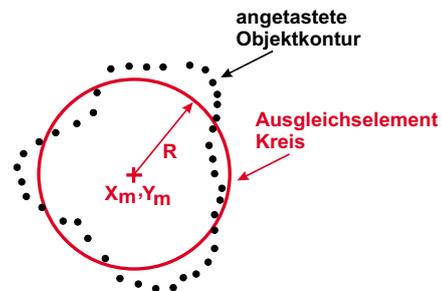


Abbildung 5.2: Prinzip der Ausgleichsrechnung

ordinatenmesstechnik [LBF<sup>+</sup>99] wird dieses Prinzip beispielsweise für die Antastung von kreisförmigen Strukturen angewandt.

Die automatische Bestimmung der Prismenposition erfolgt implizit über den Mittelpunkt der elliptischen Fläche einer hellen Bildstruktur (Abbildung 5.3), wodurch die Lokalisierung der Zielmarke auf die Suche des Mittelpunktes dieser Struktur zurückgeführt werden kann. In den folgenden Abschnitten sollen zwei mögliche Varianten der Anzielung im Videobild analytisch beschrieben werden. Für den Fall, dass ein Intensitätsbild einer digitalen Kamera zugrunde gelegt wird, kann die Verteilung der Bildintensitäten in der



Abbildung 5.3: Modell der automatischen Prismenanzielung

Struktur eine zusätzliche Information über die Prismenposition enthalten. Für diese Variante zeigt der Abschnitt 5.1.1 ein mathematisches Modell, aus dem eine Prismenposition ableitbar ist. Eine weitere Möglichkeit zur Ableitung einer Prismenposition ist aus den strukturbeschreibenden Koordinaten des binarisierten Intensitätsbildes (Abschnitt 5.1.2) bestimmbar. Die Auswahl der strukturbeschreibenden Punkte erfolgt dabei durch einen Vergleich der Intensitäten mit einem Schwellwert.

### 5.1.1 Beschreibung der Anzielung im Intensitätsbild

Das Intensitätsbild eines Prismas ist dadurch gekennzeichnet, dass jedem Bildpunkt an der Pixelposition  $x_i, y_i$  eine Intensität  $I(x_i, y_i)$  zugeordnet ist. Damit entsteht ein dreidimensionales Grauwertgebirge, welches analytisch durch eine Funktion  $f(x, y)$  beschrieben werden kann. Der Ansatz zur Anzielung im Intensitätsbild entsprechend Abbildung 5.3 beruht auf der Suche eines Punktes  $P_m = (x_m, y_m)$  aus der Menge  $M$  der strukturbeschreibenden Punkte mit der Eigenschaft, dass dieser Punkt  $P_m$  minimalen Abstand zu den anderen Punkten  $P_i = (x_i, y_i)$  des Leuchtflecks besitzt (Abbildung 5.3 rechts). Somit gilt die Summe der vektoriellen Abstände  $|P_m P_i| \quad \forall i \in M$  als die zu minimierende Zielfunktion. Der Intensitätswert eines Bildpunktes  $I(x, y)$  wird in diesem Ansatz als Wichtigkeitsfaktor  $g_i = I(x_i, y_i)$  für den Abstand des Punktes  $P(x_i, y_i)$  zum Punkt  $P(x_m, y_m)$  eingeführt. Somit ergibt sich:

$$e(x_m, y_m) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot |P_m P_i| = \sum_{i=1}^N g_i \cdot \left| \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} \right| \Rightarrow Min \quad (5.1)$$

Durch Einsetzen der Gleichung für den Betrag des Vektors  $|P_m P_i|$ , der den Abstand des Punktes  $P(x_i, y_i)$  vom gesuchten Punkt  $P(x_m, y_m)$  beschreibt, folgt aus Gleichung 5.1.

$$\sum_{i=1}^N g_i \cdot \sqrt{(x_m - x_i)^2 + (y_m - y_i)^2} \Rightarrow Min \quad (5.2)$$

Gleichung 5.2 entspricht damit der Methode der kleinsten Quadratsummen. Der Extremwert ist hier durch die partiellen Ableitungen der Gleichung 5.2 nach  $x_m$  (Gleichung 5.3) und  $y_m$  (Gleichung 5.4) bestimmt.

$$\frac{\partial e(x_m, y_m)}{\partial x_m} = \sum_{i=1}^N \frac{g_i \cdot (x_m - x_i)}{\sqrt{(x_m - x_i)^2 + (y_m - y_i)^2}} \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial e(x_m, y_m)}{\partial y_m} = \sum_{i=1}^N \frac{g_i \cdot (y_m - y_i)}{\sqrt{(x_m - x_i)^2 + (y_m - y_i)^2}} \quad (5.4)$$

Durch die Lösung des impliziten Gleichungssystems, welches durch das Nullsetzen der partiellen Ableitungen  $\frac{\partial e(x_m, y_m)}{\partial x_m} \stackrel{!}{=} 0$  und  $\frac{\partial e(x_m, y_m)}{\partial y_m} \stackrel{!}{=} 0$  entsteht, folgt für die Zielpunktkoordinaten  $x_m$  und  $y_m$ :

$$x_m = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{g_i \cdot x_i}{\sqrt{(x_m - x_i)^2 + (y_m - y_i)^2}}}{\sum_{i=1}^N \frac{g_i}{\sqrt{(x_m - x_i)^2 + (y_m - y_i)^2}}} \quad (5.5)$$

$$y_m = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{g_i \cdot y_i}{\sqrt{(x_m - x_i)^2 + (y_m - y_i)^2}}}{\sum_{i=1}^N \frac{g_i}{\sqrt{(x_m - x_i)^2 + (y_m - y_i)^2}}} \quad (5.6)$$

Die Gleichungen 5.5 und 5.6 zeigen, dass die Bestimmung der Position des Zielpunktes in dieser Form nur iterativ und mit der Vorgabe eines Startwertes für  $x_m$  und  $y_m$  zu lösen ist. Da eine iterative Lösung rechenintensiv und die Anzahl der Iterationen abhängig von der Wahl des Startwertes ist, wird der Lösungsansatz aus Gleichung 5.2 verändert, indem der Abstand  $|P_m P_i|$  der Punkte  $P(x_i, y_i)$  und  $P(x_m, y_m)$  durch das Quadrat des Abstandes ersetzt wird.

$$e(x_m, y_m) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot ((x_m - x_i)^2 + (y_m - y_i)^2) \Rightarrow \text{Min} \quad (5.7)$$

Die partiellen Ableitungen entsprechend Gleichung 5.7 nach  $x_m$  und  $y_m$  ergeben nun:

$$\frac{\partial e(x_m, y_m)}{\partial x_m} = \sum_{i=1}^N g_i \cdot (x_m - x_i) \quad (5.8)$$

$$\frac{\partial e(x_m, y_m)}{\partial y_m} = \sum_{i=1}^N g_i \cdot (y_m - y_i) \quad (5.9)$$

und es folgt die Lösung für die Zielpunktkoordinaten  $x_m$  und  $y_m$ :

$$x_m = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \cdot g_i}{\sum_{i=1}^N g_i} \quad (5.10)$$

$$y_m = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \cdot g_i}{\sum_{i=1}^N g_i} \quad (5.11)$$

Das Ergebnis entspricht dem Ansatz zur Bestimmung des Schwerpunktes einer zweidimensionalen gewichteten Punktverteilung entsprechend der Gleichungen 3.1.

### 5.1.2 Beschreibung der Anzielung im Binärbild

Ein weiterer Ansatz, der sich auf der Grundlage eines binarisierten Intensitätsbildes ableiten lässt, besteht darin, dass in dem binarisierten Bild alle Intensitäten der Bildpunkte  $P(x_i, y_i)$  aus der Struktur gleichgewichtet sind. Der Term  $g_i$  ist konstant und kann somit im Ansatz aus Gleichung 5.7 entfallen und es ergibt sich als Zielfunktion für die Minimierung

$$e(x_m, y_m) = \sum_{i=1}^N ((x_m - x_i)^2 + (y_m - y_i)^2) \Rightarrow Min \quad (5.12)$$

Mit den partiellen Ableitungen nach  $x_m$  und  $y_m$

$$\frac{\partial e(x_m, y_m)}{\partial x_m} = \sum_{i=1}^N 2(x_m - x_i) \quad (5.13)$$

$$\frac{\partial e(x_m, y_m)}{\partial y_m} = \sum_{i=1}^N 2(y_m - y_i) \quad (5.14)$$

und der Lösung des Gleichungssystems  $\frac{\partial e(x_m, y_m)}{\partial x_m} \stackrel{!}{=} 0$  und  $\frac{\partial e(x_m, y_m)}{\partial y_m} \stackrel{!}{=} 0$  folgt:

$$x_m = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (5.15)$$

$$y_m = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \quad (5.16)$$

Die Gleichungen 5.15 und 5.16 zeigen, dass der Punkt  $P_m$  mit minimalem Abstand zu den Punkten  $P_i$  den Mittelwert der Komponenten  $x_i$  und  $y_i$  beziehungsweise den Mittelpunkt einer symmetrischen Struktur darstellt.

## 5.2 Approximation des Zielmusters

Die Untersuchung der lokalen Eigenschaften eines Videobildes basiert auf der lokalen Approximation eines Funktionsverlaufes  $\hat{f}(x, y)$  aus den diskreten Bilddaten an der Position  $(x_0, y_0)$  im Videobild. In den Untersuchungen zum Entwicklungsstand der Bildverarbeitung (Abschnitt 5.2) wurden zwei Möglichkeiten zur Bestimmung der lokalen Bildeigenschaften beschrieben. Das Image Facet-Modell geht von einem Polynomansatz  $n$ -ter Ordnung aus, bei dem die unbekannt Koeffizienten  $(p_1, \dots, p_n)$  des Polynoms durch einen Regressionsansatz entsprechend der Gleichung 3.29 bestimmt werden. Für die Approximation von Prismen- und Zieltafeln wird im Folgenden ein Polynom zweiter Ordnung  $f(x, y)$  entsprechend Gleichung 3.27 zugrunde gelegt. Für die Bestimmung der Koeffizienten  $(p_1, \dots, p_6)$  des Polynoms sind somit minimal sechs Datenpunkte erforderlich, die ein Gleichungssystem mit sechs Gleichungen ergeben. Die kleinste betrachtete Umgebung für einen Bildpunkt soll hier eine  $3 \times 3$  Maske sein, aus der neun Gleichungen zur Lösung des Gleichungssystems entstehen. Für die Untersuchung des Image Facet-Modells an einem idealen Spotbild wurde das Intensitätsbild der Größe  $11 \times 11$  aus Abbildung 5.4 synthetisch erzeugt. Aus dieser  $11 \times 11$  Nachbarschaft des zentralen Punktes  $P(x_0, y_0)$  müssen

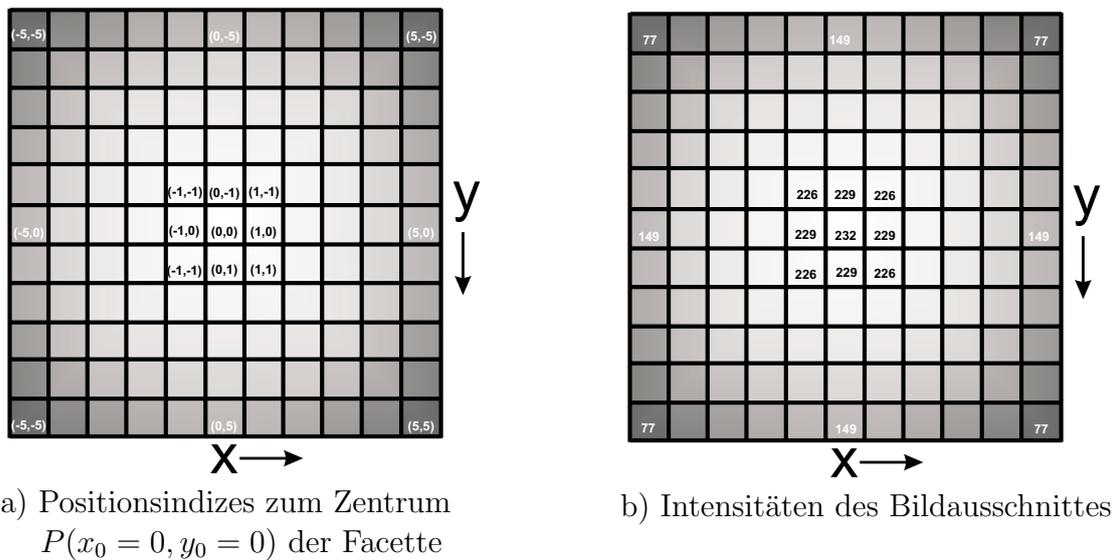


Abbildung 5.4: Lokaler Bildausschnitt einer Prismenstruktur

somit 121 Gleichungen entsprechend dem Rechenschema von Gleichung 3.28 in die Matrixschreibweise übertragen werden. Der Vektor  $b$  enthält nun die Intensitätswerte  $I(x, y)$  des Bildpunktes an der Position  $(x, y)$  ersetzt.

$$\begin{pmatrix} I(-5, -5) \\ I(-4, -5) \\ \vdots \\ I(0, 0) \\ \vdots \\ I(4, 5) \\ I(5, 5) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e(-5, -5) \\ e(-4, -5) \\ \vdots \\ e(0, 0) \\ \vdots \\ e(4, 5) \\ e(5, 5) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -5 & -5 & 25 & 25 & 25 \\ 1 & -4 & -5 & 16 & 25 & 20 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 4 & 5 & 16 & 25 & 20 \\ 1 & 5 & 5 & 25 & 25 & 25 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \end{pmatrix} \quad (5.17)$$

Die Dimensionen der Matrizen sind zu Beginn noch abhängig von der Größe der gewählten Maske. Für eine  $n \times m$  Nachbarschaftsmaske gilt  $\dim(b) = [1, n \times m]$ ,  $\dim(A) = [n \times m, 6]$  und  $\dim(p) = [6, 1]$ . Durch die Multiplikation  $A^T A$  und  $A^T F$  werden die Dimensionen auf eine  $6 \times 6$ -Matrix und eine  $6 \times 1$ -Matrix reduziert. Die Lösung des Gleichungssystems (Gleichung 3.29) ist damit unabhängig von der Dimension der gewählten Maske. Da die Bestimmung der Matrix  $A^T A$  aus einer  $n \times m$ -Maske unabhängig von der Bildstruktur ist, können somit häufig benötigte Masken konstanter Größe im Voraus bestimmt werden, wodurch eine Reduzierung der Rechenzeit erreicht wird.

Mit der Lösung des Gleichungssystems für das Beispiel der  $11 \times 11$  Maske aus Abbildung 5.4 ergaben sich die Parameter  $p_1 = 230,559$ ,  $p_2 = 0,0$ ,  $p_3 = 0,0$ ,  $p_4 = -3,242$ ,  $p_5 = 0,0$ ,  $p_6 = -3,242$  und das Polynom der Gleichung 5.18, welches den diskreten Bildbereich um den lokalen Punkt  $P(x_0, y_0)$  beschreibt. Der grafische Verlauf des Polynoms ist in der Abbildung 5.5 dargestellt.

$$\hat{f}(x, y) = 230,559 - 3,242x^2 - 3,242y^2 \quad (5.18)$$

Aus der allgemeinen Form der Gleichung 3.27 lassen sich folgende Approximationen für

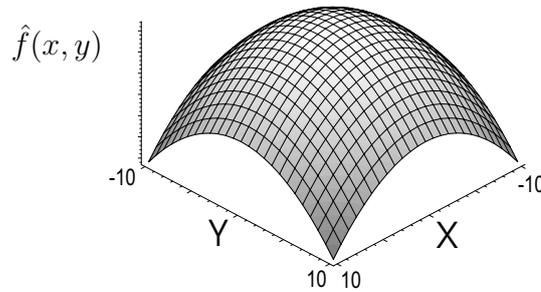


Abbildung 5.5: Funktionsplot der approximierten Spotstruktur

die Ableitungen zweiter Ordnung (Gleichungen 5.19) bestimmen.

$$\begin{aligned} \hat{f}_x(x, y) &\approx p_2 + 2p_4x + p_6y \\ \hat{f}_y(x, y) &\approx p_3 + 2p_5y + p_6x \\ \hat{f}_{xx}(x, y) &\approx 2p_4 \\ \hat{f}_{yy}(x, y) &\approx 2p_5 \\ \hat{f}_{xy}(x, y) &\approx p_6 \end{aligned} \quad (5.19)$$

Die Eigenschaften im Punkt  $P(x_0, y_0)$  lassen sich durch die Gleichungen 5.20 beschreiben.

$$\begin{aligned} \hat{f}_x(0, 0) &\approx p_2 \\ \hat{f}_y(0, 0) &\approx p_3 \\ \hat{f}_{xx}(0, 0) &\approx 2p_4 \\ \hat{f}_{yy}(0, 0) &\approx 2p_5 \\ \hat{f}_{xy}(0, 0) &\approx p_6 \end{aligned} \quad (5.20)$$

Die lokalen Eigenschaften der Umgebung um den und im zentralen Punkt  $P(x_0, y_0)$  der Maske sind somit bestimmbar. Erwartungsgemäß ist der Gradient im Punkt  $P(x_0, y_0)$ , im

Maximum der Intensität, gleich Null.

$$\nabla \hat{f}(0,0) = \begin{pmatrix} \hat{f}_x \\ \hat{f}_y \end{pmatrix} \stackrel{!}{=} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.21)$$

Aus der Hesse-Matrix  $H_f$  lassen sich die Eigenwerte  $\lambda_1, \lambda_2$  ermitteln, die weitere Aussagen über die Art der Struktur zulassen.

$$H_f = \begin{pmatrix} \hat{f}_{xx} & \hat{f}_{xy} \\ \hat{f}_{yx} & \hat{f}_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6,484 & 0,0 \\ 0,0 & 6,484 \end{pmatrix} \quad (5.22)$$

Für das Beispiel der 11x11 Maske wurden die Eigenwerte  $\lambda_1 = -6,484$  und  $\lambda_2 = -6,484$  bestimmt. Da beide Eigenwerte  $\lambda_{1,2} < 0$  sind, handelt es sich bei dem bestimmten Extrempunkt  $x_E = 5,0$  und  $y_E = 5,0$  um ein Maximum. Die Position des lokalen Extremwertes kann durch Ableitung der Gleichung 3.27 nach  $x$  und  $y$  bestimmt werden. Da im Maximum der Gradient verschwindet, werden die partiellen Ableitungen aus den Gleichungen 5.23 Null gesetzt und es ergibt sich die in der Gleichung 5.24 gezeigte Lösung.

$$\begin{aligned} \hat{f}_x(x,y) &= p_2 + 2p_4x + p_6y \stackrel{!}{=} 0 \\ \hat{f}_y(x,y) &= p_3 + 2p_5y + p_6x \stackrel{!}{=} 0 \end{aligned} \quad (5.23)$$

$$\begin{pmatrix} 2p_4 & p_6 \\ p_6 & 2p_5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_E \\ y_E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -p_2 \\ -p_3 \end{pmatrix} \quad (5.24)$$

Die Lösung des Gleichungssystems führt dann zu der Maximumposition der Leuchtstruktur. Somit wurde gezeigt, dass die Bestimmung der Prismenposition mit der Beschreibung eines Polynoms  $f(x,y)$  zweiter Ordnung möglich ist.

Bei Verdrehung und Verkippung des Prismenstabes entstehen aus den kreisförmigen Prismenbildern gedrehte Ellipsen. Das Verhalten der Approximation mit dem Polynomansatz (Gleichung 3.27) ist somit auch für gedrehte, elliptische Prismenbildern zu prüfen. Zur Untersuchung des Verhaltens wurde ein synthetisches Bild erzeugt, welches Ellipsen unter verschiedenen Drehwinkeln beinhaltet. Hierzu wurden gefüllte Ellipsen erzeugt, die durch Faltung mit einem zweidimensionalen Gaußkern mit  $\sigma_x = \sigma_y$  einen definierten Gradientenverlauf erhielten. Die Abbildung 5.6 zeigt die erzeugten Ellipsenstrukturen. Mit der Lösung des Gleichungssystems entsprechend dem Image Facet-Modell wurden die Koeffizienten  $p_1, \dots, p_6$  des Polynoms bestimmt und der grafische Verlauf der Polynome (Gleichungen 5.25) in der Abbildung 5.7 dargestellt.

$$\begin{aligned} \hat{f}(x,y) |_{\alpha=0^\circ} &= 239,762 + 0,087x + 0,033y - 0,586x^2 + 0,117y^2 - 0,0001xy \\ \hat{f}(x,y) |_{\alpha=10^\circ} &= 236,814 + 0,229x + 0,053y - 0,542x^2 - 0,124y^2 - 0,1202xy \\ \hat{f}(x,y) |_{\alpha=30^\circ} &= 221,521 + 0,166x + 0,387y - 0,302x^2 - 0,1765y^2 - 0,245xy \\ \hat{f}(x,y) |_{\alpha=90^\circ} &= 244,931 + 0,007x + 1,032y - 0,043x^2 - 0,578y^2 - 0,0001xy \end{aligned} \quad (5.25)$$

Die Funktionsverläufe aus der Abbildung 5.7 zeigen, dass die Ausgleichsmethode in der Lage ist die Ellipsenstrukturen in verschiedenen Drehlagen abzubilden. Eine exaktere Aussage zur Drehlage  $\alpha'$  kann durch die Eigenwerte und Eigenvektoren der Hesse-Matrix  $H_f$  getroffen werden. Hierzu ist das Gleichungssystem  $\det(|H_f - \lambda E|) = 0$  zu lösen. Aus den Eigenwerten  $\lambda_1, \lambda_2$  lassen sich die Eigenvektoren berechnen, die ihrerseits eine Aussage

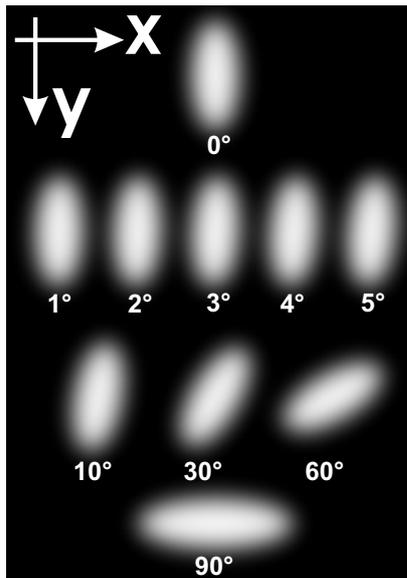
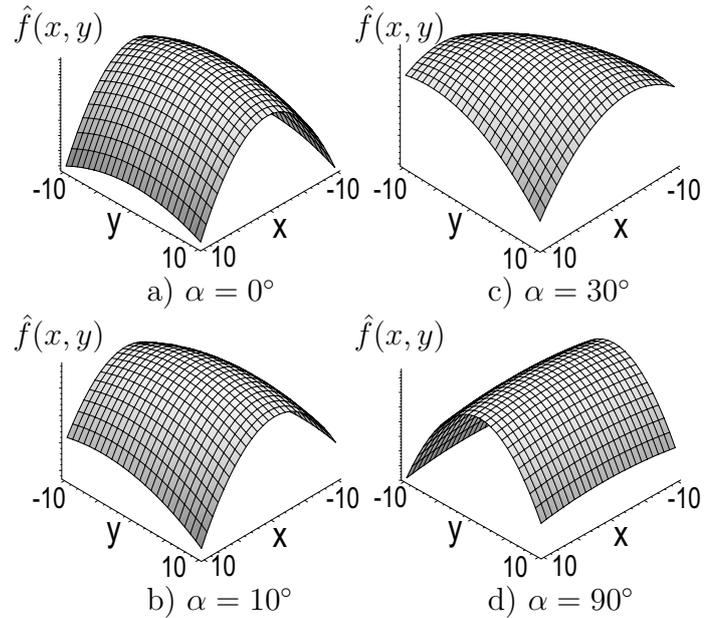
Abbildung 5.6: Elliptische Strukturen verschiedener Drehwinkel  $\alpha$ 

Abbildung 5.7: Approximationspolynome ausgewählter elliptischer Strukturen

Muster	Eigenwerte	Eigenvektoren	approx. Drehwinkel $\alpha'$
Ellipse $\alpha = 0^\circ$	$\lambda_1 = -1,173$ $\lambda_2 = -0,235$	$Ev_1 = [1,0 \ 0,00019]$ $Ev_2 = [-0,00019 \ 1,0]$	0,01
Ellipse $\alpha = 1^\circ$	$\lambda_1 = -1,167$ $\lambda_2 = -0,235$	$Ev_1 = [0,99992 \ 0,01273]$ $Ev_2 = [-0,01273 \ 0,99992]$	0,729
Ellipse $\alpha = 2^\circ$	$\lambda_1 = -1,159$ $\lambda_2 = -0,235$	$Ev_1 = [0,99966 \ 0,02603]$ $Ev_2 = [-0,02603 \ 0,99966]$	1,491
Ellipse $\alpha = 3^\circ$	$\lambda_1 = -1,162$ $\lambda_2 = -0,236$	$Ev_1 = [0,99919 \ 0,04030]$ $Ev_2 = [-0,04030 \ 0,99919]$	2,309
Ellipse $\alpha = 4^\circ$	$\lambda_1 = -1,155$ $\lambda_2 = -0,235$	$Ev_1 = [0,99854 \ 0,05396]$ $Ev_2 = [-0,05396 \ 0,99854]$	3,09
Ellipse $\alpha = 5^\circ$	$\lambda_1 = -1,149$ $\lambda_2 = -0,235$	$Ev_1 = [0,99772 \ 0,06749]$ $Ev_2 = [-0,06749 \ 0,99772]$	3,86
Ellipse $\alpha = 10^\circ$	$\lambda_1 = -1,102$ $\lambda_2 = -0,233$	$Ev_1 = [0,99018 \ 0,13977]$ $Ev_2 = [-0,13977 \ 0,99018]$	8,03
Ellipse $\alpha = 30^\circ$	$\lambda_1 = -1,224$ $\lambda_2 = -0,109$	$Ev_1 = [0,86734 \ 0,49772]$ $Ev_2 = [-0,49772 \ 0,86734]$	29,84
Ellipse $\alpha = 60^\circ$	$\lambda_1 = -0,132$ $\lambda_2 = -0,580$	$Ev_1 = [0,85941 \ -0,48279]$ $Ev_2 = [0,48279 \ 0,85941]$	-29,32
Ellipse $\alpha = 90^\circ$	$\lambda_1 = -0,060$ $\lambda_2 = -0,594$	$Ev_1 = [1,0 \ -0,00007]$ $Ev_2 = [0,00007 \ 1,0]$	-0,004

Tabelle 5.1: Eigenwerte und Eigenvektoren der Ellipsenstrukturen

über die Lage der Hauptachsen der lokalen Struktur zulassen. Die Tabelle 5.1 zeigt die Eigenwerte, Eigenvektoren und ermittelten Drehwinkel  $\alpha'$ , die für die Ellipsen aus der

Abbildung 5.6 bestimmt wurden. Das Vorzeichen der beiden Eigenwerte  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  zeigt, dass es sich bei dieser Struktur wieder um ein Maximum handelt. Die Position des Maximums kann wieder mit der Gleichung 5.24 bestimmt werden. Die aus der Approximation berechneten Drehwinkel  $\alpha'$  der Strukturen stimmen in etwa mit den vorgegebenen Werten überein. Die genaue Ursache der Abweichungen können hier nicht exakt geklärt werden, da für die Generierung der Spotbilder eine Konvertierung zwischen verschiedenen Bildformaten und Anwendungsprogrammen erfolgte. Eine genauere Aussage hierzu wird erst durch eine experimentelle Untersuchung möglich sein, bei der ein definiertes Spotmodell im Bild berechnet wird.

### 5.3 Modellierung einer Leuchtfleckstruktur

In diesem Abschnitt wurden verschiedene Verfahren vorgestellt, die eine Bestimmung der Position eines Leuchtflecks im Videobild ermöglichen. Um eine Auswahl des Verfahrens mit der geringsten Messabweichung vornehmen zu können, ist es erforderlich, die verfügbaren Algorithmen an einem einheitlichen Datensatz oder mehreren Datensätzen, die unterschiedliche Simulationsbedingungen widerspiegeln, zu verifizieren. Für diesen Zweck sollte ein mathematisches Modell erstellt werden, das reproduzierbare Eingangsdaten liefert und mit beliebigen Rauschfunktionen überlagert werden kann. Die Abbil-

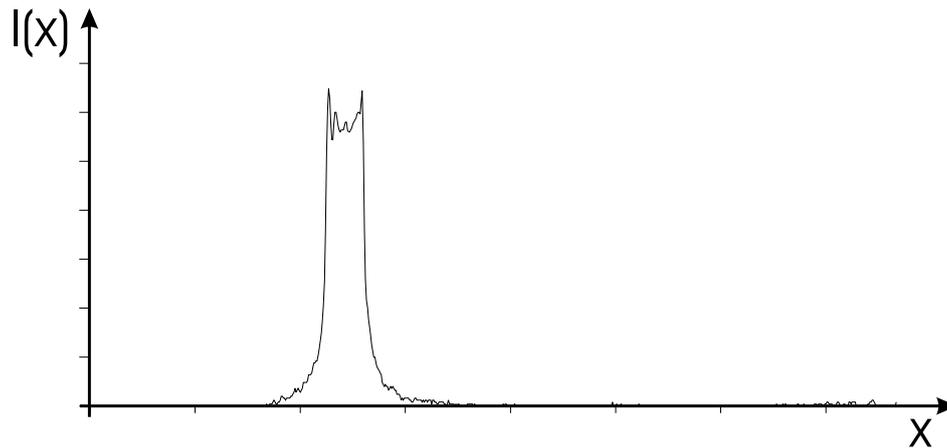


Abbildung 5.8: Intensitätsprofil einer Zielmarke entlang einer Bildzeile

Abbildung 5.8 zeigt das Intensitätsprofil einer kooperativen Zielmarke entlang einer Bildzeile. Das Intensitätsbild ist durch eine Bildsubtraktion von zwei aufeinanderfolgenden Bildern im Gelände mit und ohne Lichtquelle entstanden. Die Schwankungen im Maximum der Intensität und speziell an den Rändern ist auf thermische Luftverwirbelungen zurückzuführen. Der gezeigte Intensitätsverlauf kann gut durch den Verlauf der Exponentialfunktion  $f(x) = e^{-x^2}$  angenähert werden. Im Anhang A.1 sind entsprechende Ansätze zur Approximation der Modellfunktion mit dem Programm „Curve Finder“ zu finden. Die Verwendung der Normalverteilungsfunktion  $f(x) = \frac{1}{2\pi\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$  für das Spotmodell ermöglicht über den Parameter  $\sigma$  eine Vergrößerung der Verteilungsbreite und dient hier der Veränderung der Leuchtfleckbreite. Die Funktionswerte der Normalverteilungsfunktion können durch Einführung eines Faktors  $V$  auf einen beliebigen Wertebereich  $0 \leq f(x) \leq V$  erweitert werden. Der Verstärkungsfaktor  $V$  entspricht einer einstellbaren Belichtungszeit, die bei realen Kamerasystemen in verschiedenen Stufen variiert werden kann. Somit ergibt sich für das Spotmodell der funktionelle Zusammenhang entsprechend Gleichung 5.26.

$$f(x) = \frac{V}{2\pi\sigma} e^{-\frac{(x-x_v)^2}{2\sigma^2}} \quad (5.26)$$

Die Variable  $x_v$  wurde eingeführt, um eine definierte Verschiebung des Modells entlang der x-Achse zu ermöglichen. Das zweidimensionale Bild der Zielmarke kann äquivalent zur zweidimensionalen Normalverteilungsfunktion [hGL02] mit den Variablen  $x$  und  $y$

bestimmt werden.

$$f(x, y) = \frac{V}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{(x-x_v)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_v)^2}{2\sigma_y^2}} \quad (5.27)$$

Ein Spezialfall der multivariaten Normalverteilung, die bivariate Normalverteilung, verfügt über einen zusätzlichen Parameter  $\rho$ , der einen Korrelationskoeffizienten für die beiden Variablen  $x$  und  $y$  darstellt. Die Beschreibung einer gedrehten Verteilungsfunktion soll hier jedoch nicht betrachtet werden. Mit diesem Modell (Gleichung 5.27) für den Lichtspot besteht die Möglichkeit

- der definierten Verschiebung entlang der  $x$ - und/oder  $y$ - Koordinatenachse,
- die Abbildung einer nicht gedrehten elliptischen Struktur variabler Größe,
- und die Beeinflussung des maximalen Funktionswertes  $f_{max}(x, y)$  und damit die Intensität des Leuchtflecks.

Die Steuerung der Intensität des Spots ermöglicht eine Betrachtung des Verhaltens der Algorithmen bei unterschiedlicher Kameraaussteuerung.

- Übersteuerung  $f_{max}(x, y) > 255$
- Untersteuerung  $f_{max}(x, y) < 255$
- Aussteuerung  $f_{max}(x, y) = 255$

Für Grauwertbilder mit einer acht Bit Digitalisierung ist der maximale Intensitätswert  $I_{max}(x, y) = 255$ . Somit muss für die Funktionswerte von  $f(x, y)$  eine Begrenzung auf den Wertebereich der darstellbaren Intensitäten vorgenommen werden.

$$I(x, y) = \begin{cases} f(x, y) & : f(x, y) \leq 255 \\ 255 & : f(x, y) > 255 \end{cases} \quad (5.28)$$

In der Tabelle 5.2 sind einige Verteilungsfunktionen für  $\sigma_x = \sigma_y = 10$  und die Verstärkungsfaktoren  $V = 150, 255, 300, 400, 500$  als Funktionsverlauf  $I(x, y)$  und das resultierende Spotbild dargestellt. Der nachfolgende Quelltextauszug zeigt die diskrete Approximation der Gleichung 5.27 in der Programmiersprache C. Für die Berechnung des diskreten Spotbildes wird ein  $n \times n$ -Pixelarray, „kernel“, angelegt, in dem jeder „Pixelwert“ die Rastergröße „1“ besitzt und über den Subpixelbereich  $[-0,5 \leq x \leq 0,5)$  und  $[-0,5 \leq y \leq 0,5)$  mit der Schrittweite  $\Delta x$  und  $\Delta y$  die Funktionswerte von Gleichung 5.27 integriert. Somit erhält man eine diskrete  $n \times n$ -Maske, die in einem Bitmap an eine gewählte Rasterposition gesetzt werden kann. Die Tabelle 5.3 zeigt eine diskretisierte  $15 \times 15$ -Maske für die Parameter  $\sigma_x = \sigma_y = 4$ ,  $V = 255$  und  $x_v = y_v = 0$ .

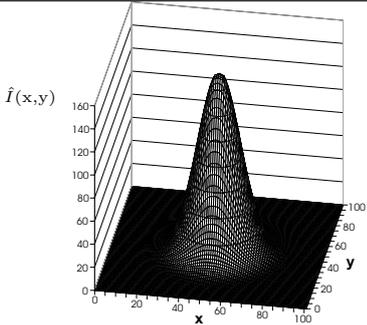
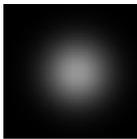
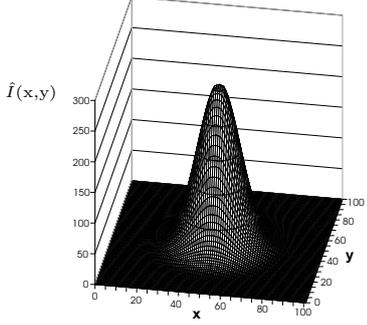
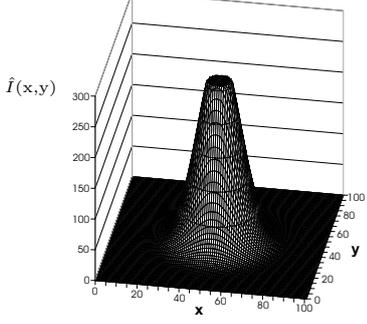
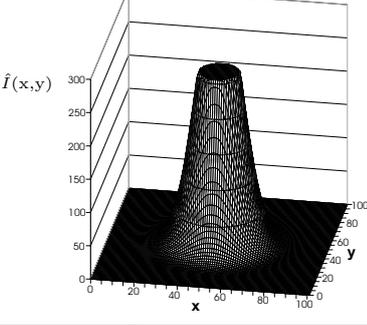
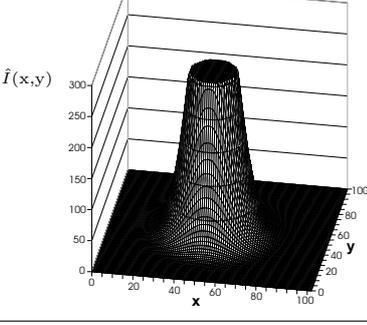
Parameter	Intensitätsverlauf $I(x,y)$	resultierendes Zielmuster
$V=150, \sigma_x=\sigma_y=10$		
$V=255, \sigma_x=\sigma_y=10$		
$V=300, \sigma_x=\sigma_y=10$		
$V=400, \sigma_x=\sigma_y=10$		
$V=500, \sigma_x=\sigma_y=10$		

Tabelle 5.2: Intensitätsverlauf von synthetisch erzeugten Prismenbildern

## Programmmodul zur Berechnung zweidimensionaler Gaußkerne

```

double GaussianDiscrete2D(double sigma, int x, int y, double dx,
                          double dy, double stepX, double stepY)
{
    double norm,
           g = 0;

    norm = 1.0/(2.0*M_PI*sigma*sigma);
    for(double ySubPixel = (double)y - 0.5 + dy;
        ySubPixel < (double)y + 0.5 + dy; ySubPixel += stepY)
    {
        for(double xSubPixel = (double)x - 0.5 + dx;
            xSubPixel < (double)x + 0.5 + dx; xSubPixel += stepX)
        {
            g += (norm*exp(-(xSubPixel*xSubPixel+ySubPixel*ySubPixel)/
                (2.0*sigma*sigma)));
        }
    }

    /* Normierung auf [0,...,1] */
    norm /= stepX*stepY;
    g /= norm;

    return g;
}

double* Gaussian2D(double sigma, int size)
{
    int i,j;
    double* kernel = new double[size*size];

    for(j=0; j<size; j++)
        for(i=0; i<size; i++)
            kernel[j*size+i] = GaussianDiscrete2D(sigma,
                i-(size/2),j-(size/2),
                0, 0, 0.01, 0.01);

    return kernel;
}

```

12	18	25	34	42	49	54	55	54	49	42	34	25	18	12
18	27	38	51	63	74	81	83	81	74	63	51	38	27	18
25	38	54	72	89	105	114	117	114	105	89	72	54	38	25
34	51	72	95	118	138	150	155	151	138	118	95	72	51	34
42	63	89	118	147	172	187	193	187	172	147	118	89	63	42
49	74	105	138	172	201	219	226	219	201	172	138	105	74	49
54	81	114	150	187	219	238	<b>246</b>	238	219	187	150	114	81	54
55	83	117	155	193	226	<b>246</b>	<b>255</b>	<b>246</b>	226	193	155	117	83	55
54	81	114	151	187	219	238	<b>246</b>	238	219	187	151	114	81	54
49	74	105	138	172	201	219	226	219	201	172	138	105	74	49
42	63	89	118	147	172	187	193	187	172	147	118	89	63	42
34	51	72	95	118	138	150	155	151	138	118	95	72	51	34
25	38	54	72	89	105	114	117	114	105	89	72	54	38	25
18	27	38	51	63	74	81	83	81	74	63	51	38	27	18
12	18	25	34	42	49	54	55	54	49	42	34	25	18	12

Tabelle 5.3: Diskrete Approximation der Spotfunktion für  $\sigma_x = \sigma_y = 4$

## 5.4 Methoden zur Unterdrückung von Störsignalen

Im Abschnitt 5.1 wurde der automatische Anzielvorgang eines Geländepunktes, der mit einem Prisma markiert wurde, erläutert. Das gezeigte Prinzip der Vermessung mit einem kooperativen Ziel beruht darauf, dass der vom Prisma reflektierte Lichtstrahl auf dem Bildempfänger als hell leuchtende Struktur abgebildet wird. Die Aufgabe einer automatischen Zielpunktbestimmung besteht somit in der Lokalisierung der Prismenstruktur und der Ableitung einer Bildkoordinate, die die Position der Struktur beschreibt. Da die abgebildete Umgebung eines Messpunktes mit weiteren störenden Lichtreflexen überlagert sein kann, gilt es, das Messsignal vom Hintergrundbild zu trennen. Dabei ist zu beachten, dass das auszuwertende Prismenbild durch Luftflimmern oder eine teilweise Verdeckung von dem erwarteten Muster abweicht.

Ein intelligentes Bildverarbeitungssystem, welches den Prozess der automatischen Erkennung und Anzielung von kooperativen Zielen nachbilden soll, muss somit die

- Reflexionen anderer Objekte in der Umgebung des Reflektors,
- unterschiedliche Hintergrundmuster und
- partielle Verdeckung

bei der Entscheidungsfindung berücksichtigen.

Tachymetersysteme, wie zum Beispiel das Systemtachymeter Elta<sup>®</sup>S der Firma ZSP Geodätische Systeme GmbH, nutzen eine optische Vorverarbeitung zur Trennung des Reflektorsignals von der Umgebung. Eine einfache Variante der optischen Signalvorverarbeitung kann durch die Verwendung eines kohärenten Infrarot-Sendelichtstrahls erfolgen, der durch eine Bandpassfilterung das reflektierte Messsignal vom Umgebungslicht trennt. Die Verwendung von polarisiertem Licht [Haf84] ermöglicht darüber hinaus die Trennung des Messsignals von anderen möglichen Infrarotsignalquellen, wie Wärmequellen. Im Allgemeinen ist das infrarote Licht von Wärmestrahlern vorwiegend unipolar und wird somit in mehreren Ausbreitungsebenen abgestrahlt. Durch entsprechende Polarisationsfilter können Signalanteile anderer Ausbreitungsebenen herausgefiltert und somit die Intensität der Strahlung reduziert werden. Durch die Filterung der Szene ist das Videobild weitestgehend von Hintergrundobjekten befreit und enthält nur noch die Messsignale der Prismen.

Für ein Videotachymeter, das dem Bediener ein Bild der zu messenden Szene zur Verfügung stellen soll, ist diese Form der optischen Vorverarbeitung jedoch ein Nachteil. Aus diesem Grund wurde zur Trennung nicht relevanter Lichtspots die Anwendung des Differenzbildverfahrens untersucht. In [Zam91] und [GW92] wurde zur Beseitigung von Hintergrundrauschen in der Werkstückerkennung eine Bildsubtraktion von zwei Bildern vorgeschlagen. „Die Vorteile der Segmentierung durch Bildsubtraktion liegen in der Unabhängigkeit von starken globalen Grauwertschwankungen und zusätzlich in dem Erhalt von Objektstrukturen, die bei einer Schwellwertsegmentierung verloren gehen.[Kow99]“ Die Bildsubtraktion ist eine Matrixoperation, bei der jeder Bildpunkt  $P_{off}(x, y)$  des Hintergrundbildes vom Bildpunkt  $P_{on}(x, y)$  des Reflektorbildes subtrahiert wird. Die Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Bildsubtraktion ist jedoch, dass der Hintergrund als eigenes Bild vorliegt. Eine Bildsubtraktion von zwei aufeinanderfolgenden Bildern mit eingeschalteter (Abbildung 5.9a) und ausgeschalteter (Abbildung 5.9b) Lichtquelle ist somit in der Lage, eine Trennung der Reflektorsignale von statischen Störsignalen und Hintergrundmustern vorzunehmen. Die Untersuchungen [UBL97] zur Erkennung der

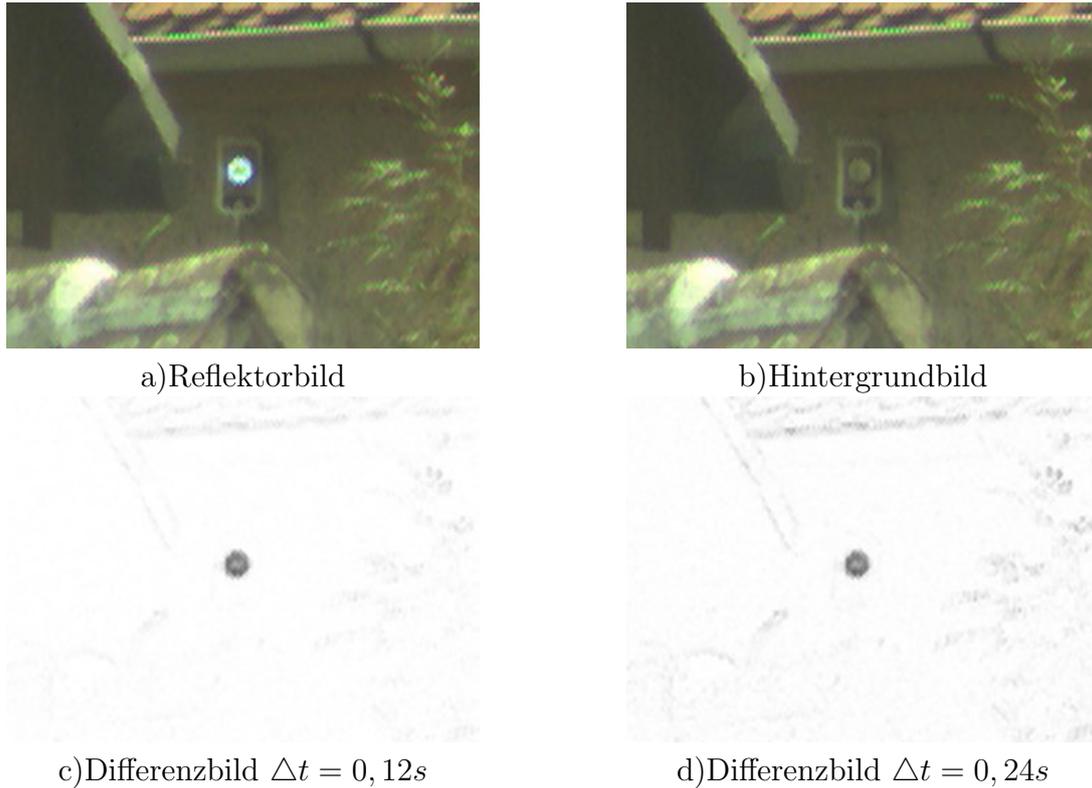


Abbildung 5.9: Separierung von Reflektorsignalen mittels Bildsubtraktion

Prismenposition zeigten, dass der zeitliche Abstand der Bildaufnahmen einen wesentlichen Einfluss auf die Güte der Bildsegmentierung (Abbildung 5.9c,d) darstellte. Bei größeren Zeitabständen zwischen den beiden Bildaufnahmen werden Konturen sichtbar, die durch eine Bewegung der Objekte oder Änderung der Beleuchtungsintensität im Bild entstanden sind. Diese Anteile können jedoch durch die Erhöhung der Bildfrequenz und Modulation des Sendelichtstrahls im Takt der Bildaufnahme auf ein Minimum reduziert werden. In der Abbildung 5.9c ist das durch die Bildsubtraktion verbleibende Hintergrundrauschen bei einer zeitlichen Differenz von  $\Delta t = 0,12s$  dargestellt. Bedingt durch die Gerätehardware waren hier kürzere Bildaufnahmezeiten nicht erreichbar, so dass eine Schwellwertsegmentierung zur Beseitigung des Hintergrundrauschens eingesetzt werden musste. In [See96] konnte durch Messungen festgestellt werden, dass der minimale Signal-Rauschabstand  $\frac{2}{3} : \frac{1}{3}$  beträgt.

Für die weiteren Untersuchungen zur automatischen Anzielung und Lokalisierung von kooperativen Zielen wurde die Bildsubtraktion und Schwellwertsegmentierung zur Trennung des Messsignals von Hintergrundobjekten vorausgesetzt.

# Kapitel 6

## Nicht kooperative Messpunkte

### 6.1 Lokalisierung von Zielmustern

Zieltafeln sind in der geodätischen Vermessung aus einigen speziellen Applikationen bekannt, bei denen zum Beispiel eine Anzielung von Messpunkten in großer Entfernung zum Tachymeterstandpunkt erfolgen muss. Die Anzielung erfolgt dabei meistens visuell durch den Vermesser unter Zuhilfenahme des Strickkreuzes, welches symmetrisch über den hervorgehobenen Flächen der Zieltafel positioniert wird. Eine weitere Anwendung der Zieltafel ist der Einsatz als visuelle Anzielhilfe in Verbindung mit einem kooperativen Ziel. In der Abbildung 3.5 sind verschiedene Zieltafeln, die als Anzielhilfe für die Reflektormessung dienen, gezeigt worden.

Durch die Integration intelligenter Bildverarbeitungsverfahren in Tachymetersysteme ist neben dem Einsatz von Prismen auch die Markierung von geodätischen Vermessungspunkten mit einer Zieltafel möglich. Außer dem bereits genannten Vorteil der Anzielung von Messpunkten in großer Entfernung zum Tachymeterstandort stellen Zieltafeln auch eine kostengünstigere Alternative zu den Prismen dar. Die Möglichkeit einer variablen Form- und Farbgebung für das Zielmuster ermöglicht weiterhin die Kodierung von Messpunkten. Ein weiterer Vorteil, der die Zieltafel für zukünftige Tachymetermessungen sehr interessant macht, besteht darin, dass mit einer Steigerung der Reichweite von reflektorlosen Entfernungsmessern die Anzielung für verschiedene Zielmuster auch auf größere Entfernungen erfolgen kann. Die Untersuchungen in diesem Abschnitt zeigen Möglichkeiten zur Bestimmung des Anzielpunktes für verschiedene Muster von Zieltafeln. Die Abbildung 6.1 zeigt die in dieser Arbeit untersuchten Zielmuster.



Abbildung 6.1: Anzielmuster von geodätischen Zieltafeln

Die Suche von Mustern im Videobild erfolgt in der Bildverarbeitung häufig durch Korrelation oder Mustererkennungsverfahren (template matching). Die Anwendung dieser Verfahren für die Erkennung von Objekten beruht auf dem Vergleich eines Bildausschnittes mit verschiedenen Mustern einer Datenbank. Dabei ist zu beachten, dass für mögliche

Drehlagen und unterschiedliche Größen eines Zielmusters ein entsprechend großer Vorrat an Mustern in der Datenbank hinterlegt werden muss.

Die in der Abbildung 6.1 gezeigten Muster haben jedoch den Vorteil, dass diese mathematisch durch einen Polynomansatz beschrieben werden können. Somit ist die Bestimmung der subpixelgenauen Bildposition für die Zielmuster durch das im Abschnitt 3.4 beschriebene Verfahren der lokalen Approximation einsetzbar. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt weiterhin in einer rotationsunabhängigen Beschreibung des Anzielpunktes aus den vorliegenden Bilddaten. Anhand einer Betrachtung der Zielmuster kann für die Abbildung 6.1a abgeschätzt werden, dass die lokale Approximation mit einem Polynom  $f(x, y)$  zweiten Grades die Form eines Sattels bildet, dessen Sattelpunkt sich an dem Kreuzungspunkt der vier Dreiecke ausbilden wird. Für die Untersuchung der lokalen Eigenschaften von approximierten Funktionsverläufen  $f(x, y)$  wurde das Muster unter verschiedenen Drehlagen  $\alpha$  erzeugt. Durch die Approximation der Polynomparameter  $p_i$  und Bestimmung der Eigenwerte und Eigenvektoren der Hesse-Matrix  $H_f$  kann die Drehlage  $\alpha'$  des Objekts im Videobild ermittelt werden.

Die Abbildung 6.2 zeigt das Ergebnis der Approximation des Musters aus Abbildung 6.1a für verschiedene Drehlagen  $\alpha$ . Die approximierten Polynome  $\hat{f}(x, y)$  sind in den Gleichungen 6.1 dargestellt.

$$\begin{aligned} \hat{f}(x, y) |_{\alpha=0^\circ} &= 168,6 - 0,357x + 0,391y + 0,653x^2 + 0,005xy - 0,486y^2 \quad (6.1) \\ \hat{f}(x, y) |_{\alpha=20^\circ} &= 174,533 - 0,59x + 0,379y + 0,372x^2 + 0,556xy - 0,456y^2 \\ \hat{f}(x, y) |_{\alpha=60^\circ} &= 176,445 - 0,015x - 0,262y - 0,346x^2 + 0,709xy + 0,175y^2 \\ \hat{f}(x, y) |_{\alpha=90^\circ} &= 168,6 + 0,391x - 0,357y - 0,486x^2 + 0,005xy + 0,653y^2 \end{aligned}$$

Aus den Eigenvektoren, die aus dem Gleichungssystem  $\det(|H_f - \lambda I|) = 0$  bestimmt werden, erfolgt die Berechnung der Drehwinkel  $\alpha'$  entsprechend Gleichung 3.26. Die Ergebnisse aus der Abbildung 6.2 und den Tabellen 6.1 und 6.2 zeigen, dass unter den verschiedenen Drehwinkeln  $\alpha$  der Sattelpunkt sowie die Drehlage  $\alpha'$  des Zielmusters bestimmt werden kann. Die Drehlage der Struktur wird bei der Approximation für die Lage

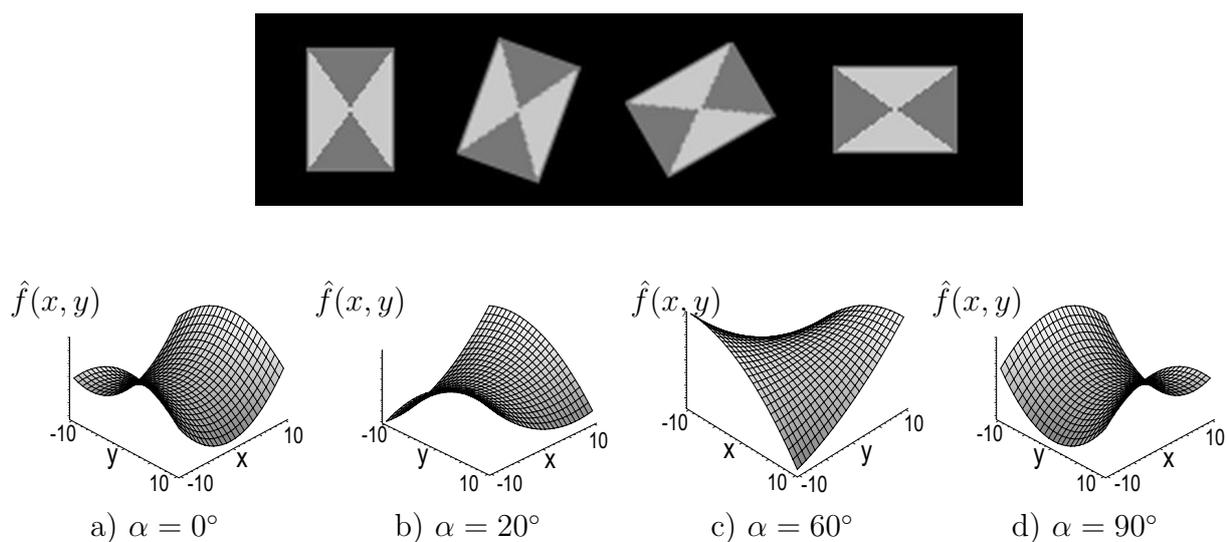


Abbildung 6.2: Approximationspolynome der Zieltafel I für unterschiedliche Drehlagen

0° und 90° mit 0,2° Abweichung sehr gut angenähert<sup>1</sup>. Die Abweichungen für die Winkel 20° und 60° sind hier noch nicht eindeutig bestimmbar, da die Bilddaten mit Hilfe verschiedener Zeichentools erzeugt und in verschiedene Bildformate konvertiert worden sind.

Drehlage $\alpha$ in °	Eigenwerte	Eigenvektoren	approx. Drehlage $\alpha'$ in °
0	$\lambda_1 = 1,307$ $\lambda_2 = -0,972$	$Ev_1 = [1,0 \ 0,00234]$ $Ev_2 = [-0,00234 \ 1,0]$	0,134
20	$\lambda_1 = 0,956$ $\lambda_2 = -1,083$	$Ev_1 = [0,95664 \ 0,29126]$ $Ev_2 = [-0,29126 \ 0,95664]$	16,933
60	$\lambda_1 = -1,051$ $\lambda_2 = 0,71$	$Ev_1 = [0,89233 \ -0,45138]$ $Ev_2 = [0,45138 \ 0,89233]$	63,167
90	$\lambda_1 = -0,972$ $\lambda_2 = 1,307$	$Ev_1 = [1,0 \ -0,00234]$ $Ev_2 = [0,00234 \ 1,0]$	89,865

Tabelle 6.1: Lokale Eigenschaften der Fläche zweiter Ordnung für die Zieltafel I

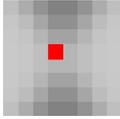
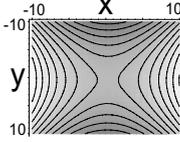
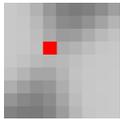
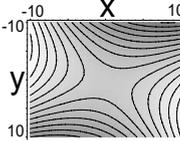
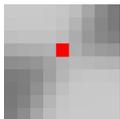
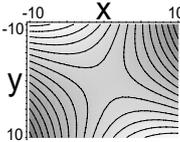
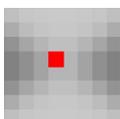
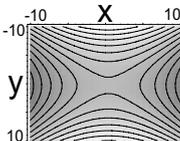
Drehlage $\alpha$ in °	Bildausschnitt	theor. Sattelpunkt in Pixel	approx. Fläche 2. Ordnung	approx. Sattelpunkt in Pixel
0		x=36 y=68		x=36,271 y=68,404
20		x=101 y=68		x=101,33 y=68,617
60		x=171 y=68		x=171,242 y=68,257
90		x=246 y=68		x=246,404 y=68,271

Tabelle 6.2: Bestimmung des Anzielpunktes aus den Eigenschaften der approximierten Fläche für Zieltafel I

Die Ergebnisse der Approximation zur Bestimmung des Sattelpunktes nach Gleichung 5.23 sind in der Tabelle 6.2 wiedergegeben. Die Untersuchung der lokalen Approximationen für das Muster der Abbildung 6.1a zeigte, dass der Anzielpunkt unter verschiedenen

<sup>1</sup>Die Angabe der Winkelabweichung bezieht sich auf die Lage des ursprünglich generierten Musters im Vektorformat.

Drehwinkeln  $\alpha$  durch die Sattelpunktcoordinate eindeutig bestimmbar ist. Die Stabilität des approximierten Musters ermöglicht somit eine Erkennung unabhängig von der Drehlage. Dies gilt jedoch nur für eine Rotation des abgebildeten Musters in der Bildebene. Aufgrund der rotationsunabhängigen Bestimmung des Anzielpunktes ist für eine automatische Lokalisierung des Zielmusters nur eine Verschiebung der Facette in horizontaler und vertikaler Richtung erforderlich. Anhand der Gleichungen 6.1 ist zu erkennen, dass die Drehlage einen Einfluss auf die bestimmten Parameter  $p_i$  des Polynoms besitzt. Aus diesem Grund empfiehlt sich für die automatische Suche des Zielmusters die Anwendung einer positionsunabhängigen Beschreibung des Musters in einem lokalen Koordinatensystem [vdBD01].

Obwohl der gewählte Polynomansatz zweiter Ordnung nicht für die Beschreibung der Muster aus den Abbildungen 6.1b und 6.1c ausreichend ist, ist zu untersuchen, ob gegebenenfalls ein stabiles Approximationsverhalten zu beobachten ist.

In den Gleichungen 6.2, den dargestellten Funktionsverläufen der Abbildung 6.3 und den Tabellen 6.3 und 6.4 sind die Ergebnisse der Approximation für die Zieltafel aus Abbildung 6.1b zu sehen. Das lokale Verhalten für das Zielmuster der Abbildung 6.1c ist in den Gleichungen 6.3, der Abbildung 6.4 und den Tabellen 6.5 und 6.6 zu sehen.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass keine stabile Beschreibung der Fläche zweiter Ordnung unter verschiedenen Drehlagen  $\alpha$  des Musters beobachtet werden kann. Je nach Drehlage des Musters wechselt der approximierte Funktionsverlauf zwischen einem Paraboloid und einem Sattel. Für ein horizontal oder vertikal ausgerichtetes Zielmuster ist dennoch eine angenäherte Lage des approximierten Anzielpunktes im Maximum des Funktionsverlaufes bestimmbar. Im Fall  $\alpha = 0^\circ$  und  $\alpha = 90^\circ$  ist das Zielmuster symmetrisch um den Schnittpunkt der beiden Hauptachsen verteilt. Bei einer Drehlage  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$  des Musters geht diese Symmetrie verloren. In den lokalen Bildausschnitten der Abbildung 6.4 ist dieses Verhalten zu erkennen. Der Anzielpunkt dieses Zielmusters kann somit nicht mit einem Polynom  $f(x, y)$  zweiten Grades unter verschiedenen Beobachtungswinkeln stabil beschrieben werden. Eine lokale Beschreibung des Muster im Anzielpunkt, um welchen sich vier Maxima und Minima befinden, erfordert ein Polynom  $f(x, y)$  vierten Grades. Der Funktionsverlauf approximiert mit diesem Ansatz einen Sattel vierter Ordnung, für den 15 Parameter des Polynoms approximiert werden müssen.

$$\begin{aligned}
 \hat{f}(x, y) |_{0^\circ} &= 208,321 + 4,537y - 3,765x^2 - 5,087y^2 & (6.2) \\
 \hat{f}(x, y) |_{10^\circ} &= 196,323 - 0,309x + 6,786y - 3,16x^2 + 0,555xy - 4,609y^2 \\
 \hat{f}(x, y) |_{30^\circ} &= 163,38 + 2,18x + 0,987y - 0,513x^2 + 4,487xy - 2,686y^2 \\
 \hat{f}(x, y) |_{60^\circ} &= 160,749 + 5,36x - 5,704y - 0,495x^2 + 3,108xy - 2,205y^2 \\
 \hat{f}(x, y) |_{90^\circ} &= 208,175 + 1,258x - 4,157x^2 - 4,17843y^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \hat{f}(x, y) |_{0^\circ} &= 167,896 + 0,53x + 1,188y - 1,018x^2 + 0,031xy - 0,72y^2 & (6.3) \\
 \hat{f}(x, y) |_{20^\circ} &= 143,039 + 0,394x - 2,807y - 1,121x^2 + 0,393xy + 0,569y^2 \\
 \hat{f}(x, y) |_{60^\circ} &= 132,724 - 6,112x + 0,766y - 1,1x^2 + 2,731xy + 0,463y^2 \\
 \hat{f}(x, y) |_{90^\circ} &= 169,212 - 1,076x + 0,573y - 0,687x^2 - 0,09xy - 1,043y^2
 \end{aligned}$$

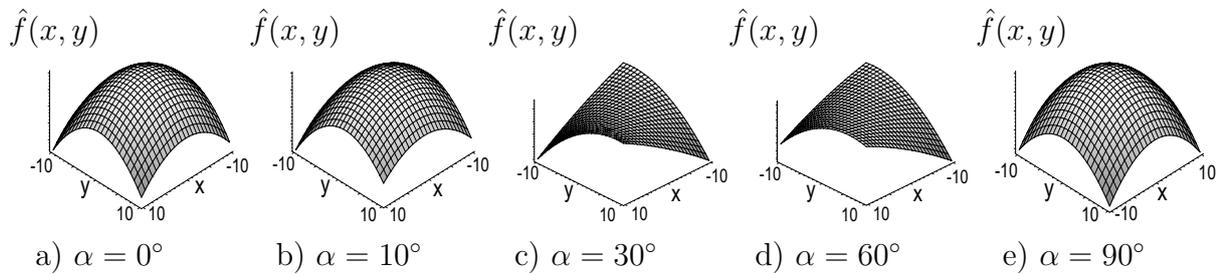


Abbildung 6.3: Approximationspolynome der Zieltafel II für unterschiedliche Drehlagen

Drehlage $\alpha$ in $^\circ$	Bildausschnitt	theor. Sattelpunkt in Pixel	Höhenlinien	approx. Sattelpunkt in Pixel
0		x=30 y=84		x=30,0 y=84,398
10		x=86 y=85		x=86,015 y=84,737
30		x=148 y=85		x=144,894 y=83,26
60		x=208 y=88		x=206,882 y=88,919
90		x=262 y=92		x=261,151 y=92,0

Tabelle 6.3: Bestimmung des Anzielpunktes aus den Eigenschaften der approximierten Fläche für Zieltafel II

Drehlage $\alpha$ in $^\circ$	Eigenwerte	Eigenvektoren	approx. Drehlage $\alpha'$ in $^\circ$
0	$\lambda_1 = -7,53$ $\lambda_2 = -10,174$	$Ev_1 = [1,0 \ 0,0]$ $Ev_2 = [0,0 \ 1,0]$	0
10	$\lambda_1 = -6,218$ $\lambda_2 = -9,32$	$Ev_1 = [0,983 \ 0,182]$ $Ev_2 = [-0,182 \ 0,983]$	10,48
30	$\lambda_1 = 1,784$ $\lambda_2 = -8,186$	$Ev_1 = [0,8473 \ 0,531]$ $Ev_2 = [-0,531, \ 0,847]$	32,07
60	$\lambda_1 = 0,846$ $\lambda_2 = -6,249$	$Ev_1 = [0,860 \ 0,508]$ $Ev_2 = [-0,508 \ 0,860]$	30,57
90	$\lambda_1 = -8,314$ $\lambda_2 = -8,356$	$Ev_1 = [1,0 \ 0,0]$ $Ev_2 = [0,0 \ 1,0]$	0

Tabelle 6.4: Lokale Eigenschaften der Fläche zweiter Ordnung für die Zieltafel II

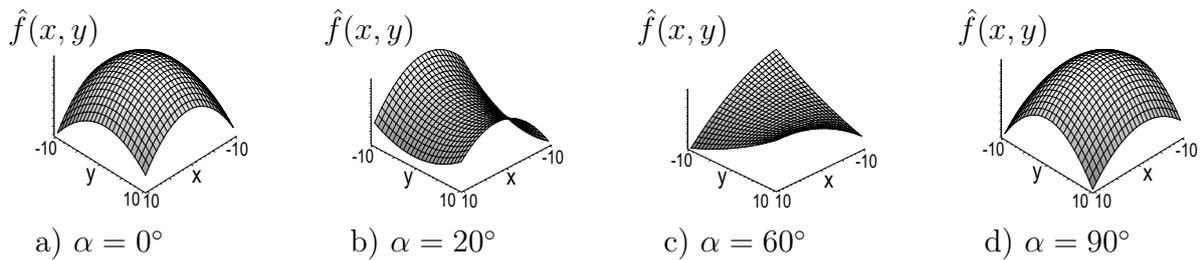
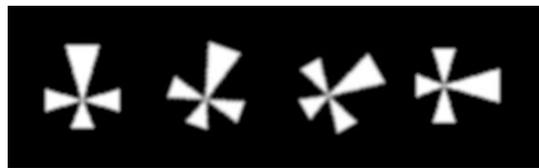


Abbildung 6.4: Approximationspolynome der Zieltafel III für unterschiedliche Drehlagen

Drehwinkel $\alpha$ in $^\circ$	Eigenwerte	Eigenvektoren	approx. Drehwinkel $\alpha'$ in $^\circ$
0	$\lambda_1 = 1,307$ $\lambda_2 = -0,972$	$Ev_1 = [1,0 \ 0,00234]$ $Ev_2 = [-0,00234 \ 1,0]$	0,134
20	$\lambda_1 = 0,956$ $\lambda_2 = -1,083$	$Ev_1 = [0,95664 \ 0,29126]$ $Ev_2 = [-0,29126 \ 0,95664]$	16,933
60	$\lambda_1 = -1,051$ $\lambda_2 = 0,71$	$Ev_1 = [0,89233 \ -0,45138]$ $Ev_2 = [0,45138 \ 0,89233]$	63,167
90	$\lambda_1 = -0,972$ $\lambda_2 = 1,307$	$Ev_1 = [1,0 \ -0,00234]$ $Ev_2 = [0,00234 \ 1,0]$	89,865

Tabelle 6.5: Lokale Eigenschaften der Fläche zweiter Ordnung für die Zieltafel III

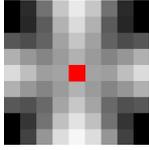
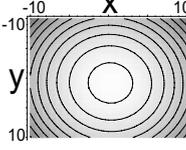
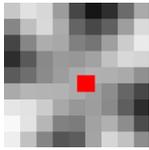
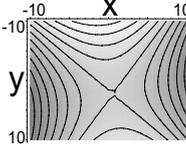
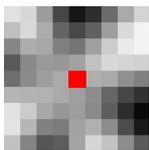
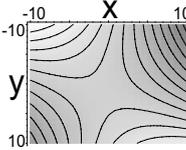
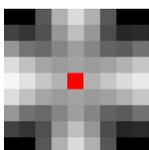
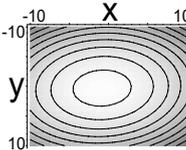
Drehlage $\alpha$ in $^\circ$	Bildausschnitt	theor. Sattelpunkt in Pixel	Höhenlinien	approx. Sattelpunkt in Pixel
0		x=36 y=68		x=36,271 y=68,404
20		x=101 y=68		x=101,33 y=68,617
60		x=171 y=68		x=171,242 y=68,257
90		x=246 y=68		x=246,404 y=68,271

Tabelle 6.6: Bestimmung des Anzielpunktes aus den Eigenschaften der approximierten Fläche für Zieltafel III

Die Untersuchungen dieses Abschnittes zeigen, dass die Approximation des Zielmusters durch ein Polynom  $f(x, y)$  zweiter Ordnung für das in der Abbildung 6.1a gezeigte Muster einer Zieltafel anwendbar ist. Anhand des Vergleichs der bestimmten Sattelpunktkoordinaten (Tabelle 6.2, 6.3 und 6.6) wird ersichtlich, dass für eine Struktur der Abbildung 6.1a die theoretische Position des Zielpunktes im Bild am Besten angenähert wird. Dies liegt darin begründet, dass ein Sattel zweiter Ordnung durch den gewählten Polynomansatz (Gleichung 3.27) beschreibbar ist. Die Bestimmung des Sattelpunktes erfolgte daher stabil für verschiedene Drehlagen der Zieltafel I.

In der Abbildung 6.5 sind äquivalente Muster für Zieltafeln gezeigt, die aus der Struktur der Abbildung 6.1a ableitbar sind. Durch die Einbeziehung anderer Farbkombinationen

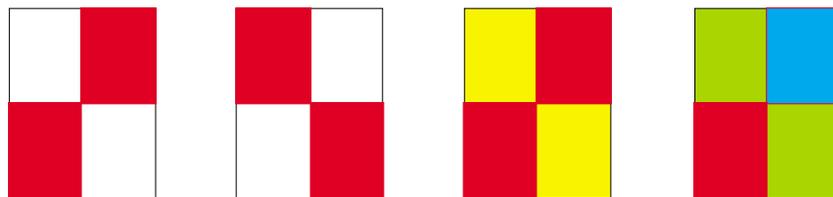


Abbildung 6.5: Weitere durch einen Sattel zweiter Ordnung beschreibbare Zielmuster

kann die Palette der verfügbaren Muster noch erweitert werden. Dabei ist darauf zu achten, dass nicht jede beliebige Farbkombination eingesetzt werden kann. Entscheidenden Einfluss auf die Approximation der Bildstruktur hat dabei die Art und Weise der Verrechnung der einzelnen Farbanteile. Für die hier verwendete Berechnung der Farbintensität  $I_{RGB} = \frac{R+G+B}{3}$  wurde bereits in [Unr00] gezeigt, dass durch die Farbraumtransformation  $T : \mathbb{R}^3 \mapsto \mathbb{R}$  verschiedene Farbkombinationen auf den gleichen Farbintensitätswert  $I_{RGB}$  abgebildet werden können.

Für die Muster der Zieltafeln der Abbildungen 6.1b und 6.1c konnte in den Untersuchungen kein stabiles Verhalten der Approximation mit dem Polynomansatz  $f(x, y)$  zweiter Ordnung bei Verdrehung des Musters beobachtet werden. Dies äußert sich in dem Wechsel der Eigenschaften der lokal approximierten Fläche (Tabellen 6.3 und 6.6) zwischen einem lokalen Maximum und einem Sattel. Für die Beschreibung dieses Zielmuster ist ein Polynomansatz  $f(x, y)$  vierter Ordnung entsprechend der Gleichung 6.4 zu verwenden, für den hier der Lösungsansatz beschrieben werden soll.

$$f(x, y) = p_1 + p_2x + p_3y + p_4x^2 + p_5xy + p_6y^2 + p_7x^3 + p_8x^2y + p_9xy^2 + p_{10}y^3 + p_{11}x^4 + p_{12}x^3y + p_{13}x^2y^2 + p_{14}xy^3 + p_{15}y^4 \quad (6.4)$$

In der Abbildung 6.7 ist ein approximierter Polynomverlauf  $\hat{f}(x, y)$  vierter Ordnung für die Zieltafel im Bild 6.6 dargestellt. Die Bestimmung des Anzielpunktes erfolgt wiederum durch die Lösung des Gleichungssystems  $\frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \stackrel{!}{=} 0, \frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \stackrel{!}{=} 0$ .

In den Gleichungen 6.5 und 6.6 werden die partiellen Ableitungen erster und zweiter Ordnung des Polynoms  $f(x, y)$  vierter Ordnung gezeigt. Wie anhand der Gleichungen 6.5 zu sehen ist, bilden die partiellen Ableitungen  $f_x(x, y)$  und  $f_y(x, y)$  Polynome dritten Grades, so dass die Lösung des Gleichungssystems mehrerer Extremwerte liefert. Die Klassifizierung des Extremwertes (Maximum, Minimum, Sattel) erfolgt durch Einsetzen der einzelnen Lösungen in die Hesse-Matrix  $H_f$  und die Berechnung der Determinante von

$H_f$ . Für das in der Abbildung 6.7 gezeigte Beispiel beschreibt die Lösung  $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,2522 \\ 0,1299 \end{pmatrix}$  ein Maximum im Anzielpunkt (optischer Schnittpunkt der Dreiecke) der Zieltafel.



Abbildung 6.6: Markierung eines Messpunktes mit einem Zielmuster höherer Ordnung

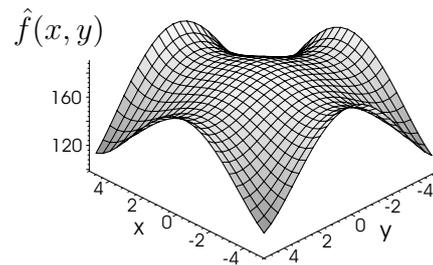
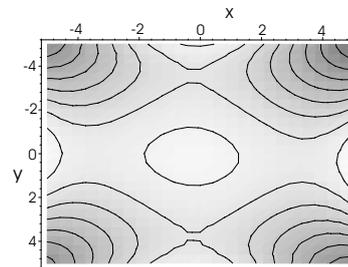


Abbildung 6.7: Approximierter Funktionsverlauf

$$\begin{aligned}
 f_x(x, y) &= p_2 + 2p_4x + p_5y + 3p_7x^2 + 2p_8xy + p_9y^2 + 4p_{11}x^3 + 3p_{12}x^2y + 2p_{13}xy^2 + p_{14}y^3 \\
 f_y(x, y) &= p_3 + p_5x + 2p_6y + p_8x^2 + 2p_9xy + 3p_{10}y^2 + p_{12}x^3 + 2p_{13}x^2y + 3p_{14}xy^2 + 4p_{15}y^3
 \end{aligned}
 \tag{6.5}$$

$$\begin{aligned}
 f_{xx}(x, y) &= 2p_4 + 6p_7x + 2p_8y + 12p_{11}x^2 + 6p_{12}xy + 2p_{13}y^2 \\
 f_{xy}(x, y) = f_{yx}(x, y) &= p_5 + 2p_8x + 2p_9y + 3p_{12}x^2 + 4p_{13}xy + 3p_{14}y^2 \\
 f_{yy}(x, y) &= 2p_6 + 2p_9x + 6p_{10}y + 2p_{13}x^2 + 6p_{14}xy + 12p_{15}y^2
 \end{aligned}
 \tag{6.6}$$

Durch den beschriebenen Lösungsweg mit dem Polynomansatz  $f(x, y)$  vierter Ordnung (Gleichung 6.4) ist somit ein stabiles Verfahren für die Anzielung von Zieltafeln entsprechend den Abbildungen 6.1b und 6.1c möglich.

## 6.2 Anzielung von Fluchtstäben

Der Einsatz von Fluchtstäben hatte in der geodätischen Messtechnik durch die zunehmende reflektorbezogene Markierung von Messpunkten an Bedeutung verloren. Mit der Entwicklung farbbildverarbeitender Tachymeter in Verbindung mit einem reflektorlos arbeitenden Streckenmesser kann jedoch diese Art der Zielpunktmarkierung wieder an Bedeutung gewinnen<sup>2</sup>. Der Vorteil der Markierung eines Messpunktes mit einem Fluchtstab besteht darin, dass beispielsweise der Boden-Durchstoßpunkt über den definierten Abstand der roten und weißen Flächen und die Lage des Fluchtstabes bestimmbar ist. In der Abbildung 6.8 ist das Prinzip der Markierung eines Messpunktes mit einem Fluchtstab gezeigt.

Im Gegensatz zur reflektorbezogenen Markierung ist somit die zusätzliche und zeitaufwendige Bestimmung der Reflektorhöhe nicht notwendig. Neben der Ableitung des Boden-Durchstoßpunktes ist die Bestimmung der Winkellage des Fluchtstabes aus einer Ansicht des Videobildes eine weitere mögliche Anwendung. Die Anzielung eines Fluchtstabes als

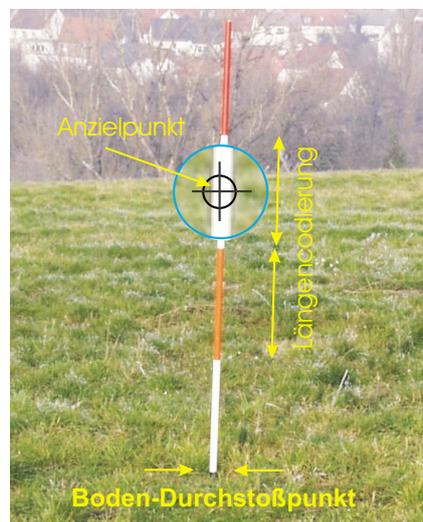


Abbildung 6.8: Bestimmung des Boden-Durchstoßpunktes mit einem Fluchtstab

signalisiertes geodätisches Ziel ist prinzipiell mit dem nicht signalisierten Ziel eines Lichtmastes hinsichtlich der Ausprägung des Messobjektes im Videobild vergleichbar. Diese Art von Zielen lassen sich in der Bildverarbeitung unter dem Punkt Linien mit streifenartiger Ausprägung zusammenfassen. Aus der Farbcodierung des Fluchtstabes lassen sich jedoch weitere Ansätze ableiten, die für die Markierung von Messpunkten und deren messtechnische Bestimmung spezielle Verfahrensweisen ermöglichen.

Zur Vereinfachung des Modells „Anzielung von Fluchtstäben“ wird hier vorausgesetzt, dass keine partielle Verdeckung des Ziels vorliegt und somit jeder Punkt des Objektes zur Anzielung genutzt werden kann. Unter dieser Voraussetzung kann die Beschreibung der lokalen Struktur um einen Anzielpunkt zur Anwendung kommen. Ausgehend von dem

<sup>2</sup>Dies gilt nach dem heutigen Stand der Technik nur für Messungen im Nahbereich, da durch die Strahldivergenz des Entfernungsmessers auf größere Distanzen auch Hintergrundobjekte erfasst würden. Die Messung einer Mischstrecke wäre die Konsequenz.

in [Ste98] beschriebenen eindimensionalen Linienmodell mit gleicher Polarität wird angenommen, dass die zweidimensionale Ausprägung einer streifenförmigen Linie eine parabolische Fläche beschreiben sollte. Durch Festlegung des Anzielpunktes in der Nähe der Stabmitte (Abbildung 6.8) und anschließender Approximation eines Polynoms  $\hat{f}(x, y)$  zweiter Ordnung über den lokalen Bildausschnitt kann aus den Eigenwerten  $\lambda_i$  und den ermittelten Eigenvektoren  $Ev_i$  der Hesse-Matrix  $H_f$  die polare Lage des Objektes im Videobild bestimmt werden. Die lokale Approximation an ausgewählten Punkten des Fluchstabes ist in der Abbildung 6.9 zu sehen.

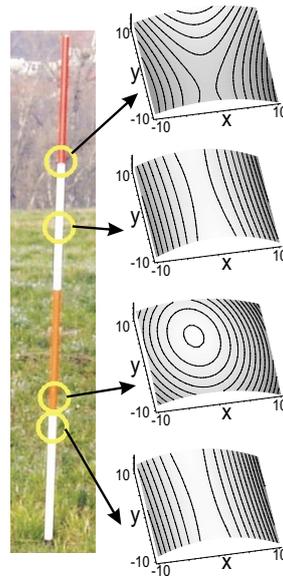


Abbildung 6.9: Lokale Approximationen der Fläche zweiter Ordnung

Die Funktionsverläufe der lokalen Approximation in Abbildung 6.9 zeigen einen Einfluss des Farbverlaufes um den Anzielpunkt. Ein größerer Einfluss des Bildhintergrundes auf die Approximation sollte durch die Wahl der Facet-Größe vermieden werden. Für die in der Abbildung 6.9 gezeigten Approximationen wurde durch die Wahl der Facette der Hintergrund mit ca. drei Bildpunkten erfasst.

In der Tabelle 6.7 sind die aus der Hesse-Matrix  $H_f$  bestimmten Eigenwerte und Eigenvektoren zusammengefasst. Der Vergleich der Eigenwerte zeigt, dass im Bereich des Farbübergangs von Weiß nach Rot die approximierte Fläche durch einen stark ausgeprägten Sattel beschrieben wird. Diese Eigenschaft kann für die zu Beginn des Abschnittes erwähnte Lokalisierung der Farbübergänge (Sattelpunkt) an dem Fluchstab ausgenutzt werden. Über die Bestimmung der Sattelpunktkoordinate und der Lage  $\alpha'$  des Stabes kann bei bekannter Maßverkörperung die Bestimmung des Boden-Durchstoßpunktes erfolgen. Im Bereich der roten Markierung zeigt die Approximation teilweise einen komplett anderen Funktionsverlauf. In diesem Bereich wird durch die lokale Approximation des Bildes die Fläche eines Ellipsoids beschrieben, welche in der Nähe des Anzielpunktes ein Maximum besitzt.

Eine weitere Abhängigkeit des Approximationsverhaltens konnte durch die Ordnung  $n \times m$  der Facette, über welche die Approximation durchgeführt wurde, festgestellt werden. Die Gleichungen 6.7 und 6.8 zeigen die Approximation über ein Fenster von  $10 \times 10$  und

Anzielpunkt	Eigenwerte	Eigenvektoren	Winkellage $\alpha'$
x=404, y=347	$\lambda_1=-6,184$ $\lambda_2= 1,425$	$Ev_1 = [0,999 -0,043]$ $Ev_2 = [0,043 0,999]$	2,4°
x=402, y=418	$\lambda_1=-7,421$ $\lambda_2= 0,289$	$Ev_1 = [0,999 -0,044]$ $Ev_2 = [0,044 0,999]$	2,55°
x=397, y=607	$\lambda_1=-1,356$ $\lambda_2=-0,567$	$Ev_1 = [0,996 -0,082]$ $Ev_2 = [0,082 0,996]$	4,7°
x=395, y=640	$\lambda_1=-8,088$ $\lambda_2= 0,243$	$Ev_1 = [0,998 -0,058]$ $Ev_2 = [0,058 0,998]$	3,3°

Tabelle 6.7: Lokale Eigenschaften der Flächen zweiter Ordnung

10 × 15 Bildpunkten.

$$\hat{f}(x, y) |_{10 \times 10} = 263,82 - 4,566x - 0,94y - 3,703x^2 - 0,343xy + 0,136y^2 \quad (6.7)$$

$$\hat{f}(x, y) |_{10 \times 15} = 296,002 - 3,809x + 0,005y - 4,368x^2 - 0,319xy - 0,055y^2 \quad (6.8)$$

Ein einfacher Koeffizientenvergleich der Polynomparameter  $p_i$  zeigt, dass für das 10 × 15 Fenster der Sattel fast durch eine Zylinderfläche angenähert werden kann. Für diesen Sonderfall ist über die Gleichung 5.23 nicht mehr die Position des Maximums beziehungsweise des Sattelpunktes bestimmbar. Die Abbildung 6.10 zeigt diesen Fall, bei dem der

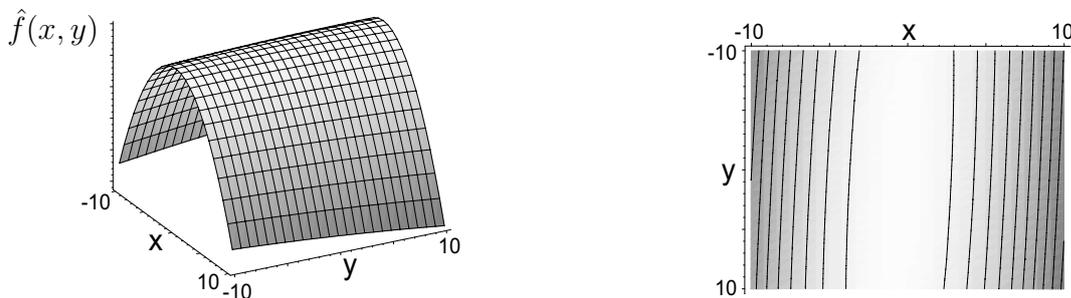


Abbildung 6.10: Funktionsverlauf einer Fläche zweiter Ordnung für  $e_1 \gg e_2$

Eigenwert  $\lambda_1$  sehr große Werte gegenüber  $\lambda_2$  annimmt ( $\lambda_1 \gg \lambda_2$ ). Für die Bestimmung der Stabmitte sollte daher eine zweite Approximation eines Kurvenverlaufes  $\hat{f}(x)$  zweiter Ordnung (Abbildung 6.11) in Richtung des kleinsten Eigenwertes  $\lambda_2$  angesetzt werden. Der Eigenvektor  $Ev_2 = \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \end{pmatrix}$  bestimmt damit die Richtung eines Suchstrahls, welcher zur Adressierung der auszulesenden Intensitätswerte  $B[x, y]$  im Videobildes verwendet wird. Der Startpunkt  $\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix}$  des Suchstrahls entspricht den Bildkoordinaten des Anzielpunktes<sup>3</sup>, so dass über den Suchweg  $\pm l$  der Suchstrahl bestimmt ist.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \end{pmatrix} \quad -l \leq t \leq l \quad (6.9)$$

<sup>3</sup>Es wird vorausgesetzt, dass eine Anzielung in der Mitte des Fluchtstabes erfolgt.

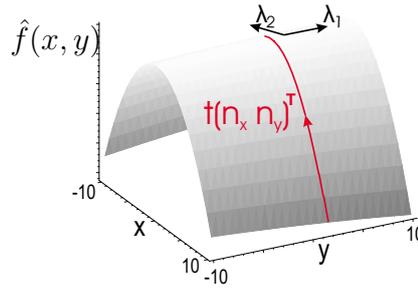


Abbildung 6.11: Bestimmung des Suchstrahls in Richtung des kleinsten Eigenwertes

Der Suchstrahl kann durch einen Schnitt durch das Intensitätsprofil entlang der Ebene, die durch die Vektoren  $(Ev_2, Ev_1 \times Ev_2)$  aufgespannt wird, beschrieben werden. Bei konstanter Schrittweite  $dy$  entlang dem Suchstrahl kann die Approximation auf einen eindimensionalen Funktionsverlauf einer Parabel entsprechend Gleichung 6.10 zurückgeführt werden.

$$\hat{f}(x) = p_1 + p_2x + p_3x^2 \quad (6.10)$$

Die Ableitung der Gleichung 6.10 nach  $x$  und Lösung der Gleichung  $\frac{\partial \hat{f}(x)}{\partial x} \stackrel{!}{=} 0$  liefert den Punkt  $x_{max}$ , an dem die Funktion  $f(x)$  das Maximum besitzt.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{f}(x)}{\partial x} &= p_2 + 2p_3x \stackrel{!}{=} 0 \\ x_{max} &= -\frac{p_2}{2p_3} \end{aligned} \quad (6.11)$$

Die Parameter des Polynoms  $\hat{f}(x)$  können wieder aus dem Ansatz des Image Facet-Modells (Gleichung 6.12) abgeleitet werden.

$$\hat{f}(x) = \begin{pmatrix} 1 & x & x^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix} \quad (6.12)$$

Die Lösung des Gleichungssystems erfolgt entsprechend Gleichung 3.29. Der Wert  $y_{max}$  kann über die Gleichung 6.9 bestimmt werden, womit sich letztendlich die polare Lage des Fluchstabes  $\alpha'$  aus dem Maximum  $(x_{max}, y_{max})$  zweier Suchstrahlen nach Gleichung 3.26 ermitteln lässt.

Zur Absicherung der zu bestimmenden Lage empfiehlt sich die Einbeziehung mehrerer Messpunkte, die entlang des Fluchtstabes durch Verschiebung der Facette in Richtung des Eigenvektors  $Ev_1$  bestimmt werden. In den Struktogrammen 6.12 und 6.13 sind die grundlegenden Algorithmen zum Auffinden der Farbübergänge (Maßverkörperung) und zur Bestimmung der polaren Lage des Fluchtstabes im Videobild beschrieben. Aufgrund einer möglichen Schiefelage des Fluchtstabes im Raum sind für die Ableitung des Bodendurchstoßpunktes beide Algorithmen zu verknüpfen und mit der Entfernung zum Messpunkt zu erweitern. Die Bestimmung der Lage aus  $n > 3$  Messpunkten kann durch eine Geradenregression erfolgen.

Festlegung des Anzielpunktes $B[x_s, y_s]$
Polynomapproximation und Bestimmung der lokalen Eigenschaften
Verschiebung der Facette in $-dy$ entlang von $Ev_1$
Polynomapproximation und Bestimmung der lokalen Eigenschaften
Vergleich der Eigenwerte
unterer Übergang $B_u[x_i, y_i]$ gefunden
Verschiebung der Facette in $dy$ entlang von $Ev_1$
Polynomapproximation und Bestimmung der lokalen Eigenschaften
Vergleich der Eigenwerte
oberer Übergang $B_o[x_i, y_i]$ gefunden

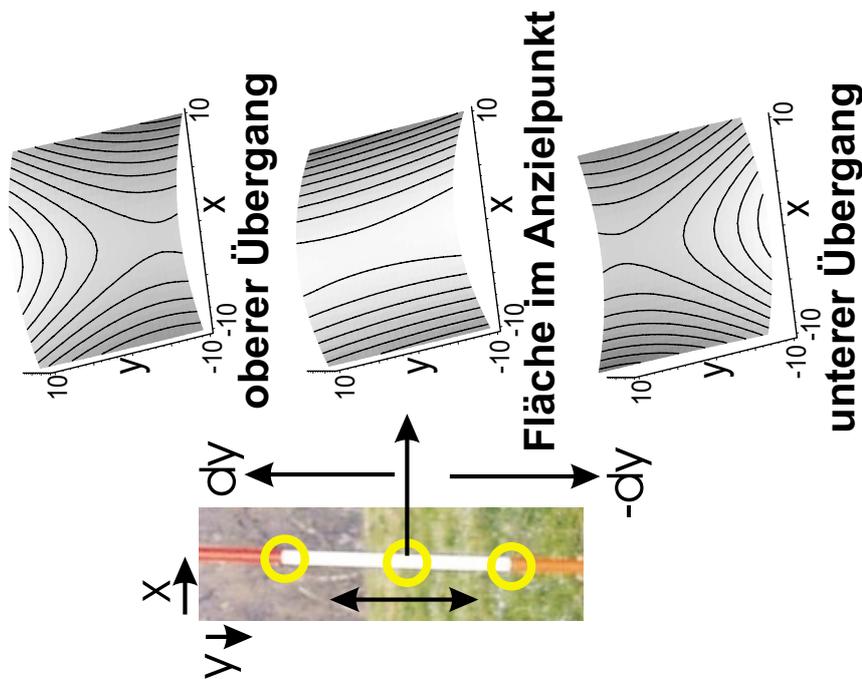


Abbildung 6.12: Algorithmus zur Ableitung des Boden-Durchstoßpunktes

Festlegung des Anzielpunktes $B[x_s, y_s]$
Polynomapproximation und Bestimmung der lokalen Eigenschaften
Verschiebung der Facette in $-dy$ entlang von $Ev_1$
Polynomapproximation und Bestimmung des Maximums $n > \text{Anzahl Verschiebungen ?}$
Verschiebung der Facette in $dy$ entlang von $Ev_1$
Polynomapproximation und Bestimmung des Maximums $n > \text{Anzahl Verschiebungen ?}$
Bestimmung der Gerade aus $n$ Maxima

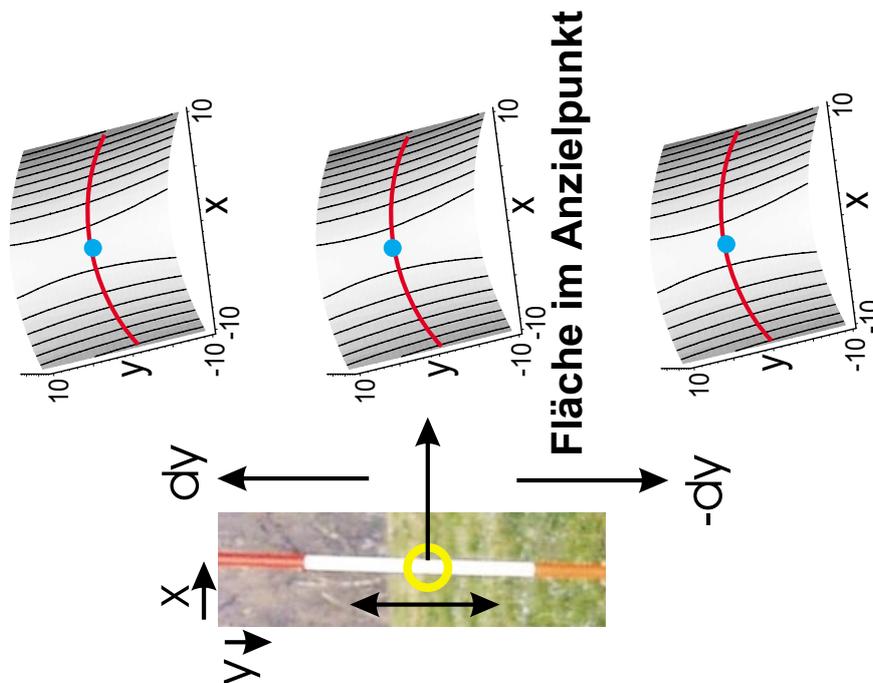


Abbildung 6.13: Algorithmus zur Bestimmung der Lage des Fluchtstabes

# Kapitel 7

## Nicht signalisierte Messpunkte

### 7.1 Konturpunkte und lineare Konturen

In der Bildverarbeitung und speziell in der Koordinatenmesstechnik ist eine Kante definiert durch einen eindimensionalen Intensitätsübergang, welcher sich entlang eines Suchstrahls als Intensitätssprung  $I_{LH}(x) = \begin{cases} 0 & : x < 0 \\ h & : x \geq 0 \end{cases}$  mit der Sprunghöhe  $h$  beschreiben lässt. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen einem ansteigenden  $I_{LH}$  und abfallenden  $I_{HL}$  Intensitätsverlauf. Inwieweit sich eine reale Kante an diese Modellfunktionen annähert, kann durch die Richtung und Intensität der Beleuchtung entscheidend beeinflusst werden. In der Koordinatenmesstechnik werden zur Qualitätskontrolle von Werkstücken häufig Durchlichtquellen eingesetzt, mit denen ein nahezu idealer Kantenübergang eingestellt werden kann. Reale Aufnahmen von Kantenübergängen zeigen dennoch aufgrund systemtechnischer Gegebenheiten nicht den sprunghaften Wechsel der Intensität und können durch einen Modellverlauf der Sigmoidfunktionen 7.1, 7.2 beschrieben werden.

$$I_{LH}(x) = h \left( 1 - \frac{e^{-bx}}{1 + e^{-bx}} \right) \quad (7.1)$$

$$I_{HL}(x) = h \left( \frac{e^{-bx}}{1 + e^{-bx}} \right) \quad (7.2)$$

In der Abbildung 7.1 ist der Verlauf der Sigmoidfunktion von Gleichung 7.1 bei unterschiedlicher Parametrisierung gezeigt. Die Ermittlung der Position der Kante erfolgt durch die Anwendung eines Kantenortskriteriums auf den Intensitätsverlauf. Mit diesem Kriterium wird im Intensitätsverlauf  $I(x)$  eine Position  $x$  bestimmt, aus welcher im Bildkoordinatensystem bei bekannter Lage des Suchstrahls ein Konturpunkt  $P(x, y)$  ermittelt werden kann. Mittels Approximations- oder Interpolationsfunktionen über den diskreten Bildpunkten des Bildempfängers ist die Position des Konturpunktes mit einer Subpixelauflösung bestimmbar.

Infolge von Rauscheinflüssen im Bildaufnahmekanal sowie durch unbekannte systematische Abweichungen [Küh97] und der Abweichungen zwischen tatsächlicher und erwarteter Körperform, weicht die Position der einzelnen Kantenorte von idealen geometrischen Elementen, wie zum Beispiel Geraden und Kreisen, ab. Aus diesem Grund werden bei

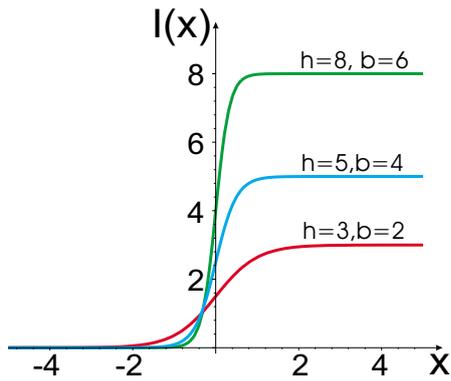


Abbildung 7.1: Sigmoidmodell für den Kantenverlauf  $I_{LH}$

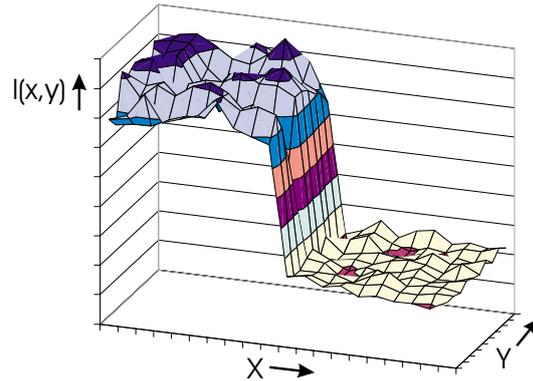


Abbildung 7.2: Intensitätsverlauf  $I_{RGB}$  an einer texturierten Hauskontur

der weiteren Verarbeitung der Konturpunkte Ausgleichsverfahren zur Minimierung der Antastabweichungen bei der Bestimmung ausgedehnter Körperkanten eingesetzt. In der Koordinatenmesstechnik erfolgt die Antastung ausgedehnter Konturen durch ein Messfenster, in dem durch mehrere Suchstrahlen die Konturpunkte des Messobjektes angetastet werden.

In der Praxis der geodätischen Messtechnik erfolgt die Aufnahme einer Hauskante in einer vom Kataster vorgeschriebenen Höhe durch exzentrisches Anhalten des Reflektors. Hierfür ist vor der Messung die Angabe des Exzentrums erforderlich. Dieser Umstand kann durch die Verbindung der reflektorlosen Entfernungsmessung mit den hier beschriebenen Bildverarbeitungsverfahren zur Bestimmung der Hauskontur vereinfacht werden, indem die Entfernung zur Kontur mit dem EDM und die Hz-Lage der Kontur im Bild bestimmt wird. Eine Bestimmung der Höhe des angemessenen Punktes kann bei Bedarf ebenfalls aus dem Videobild abgeleitet werden. Für die Vermessung bietet diese Vari-



a)



b)

Abbildung 7.3: Beispiele für Konturübergänge an Hausfassaden

ante weiterhin den Vorteil, dass die Anzielung der Kontur in beliebiger Höhe und mit beliebiger Messpunktanzahl erfolgen kann. Mit den hier untersuchten Verfahren kann die geodätische Vermessung mit neuartigen Methoden zur Aufnahme von Konturen durch nicht signalisierte Messpunkte erweitert werden. In den Abbildungen 3.6 und 3.8 sind mögliche Messstrategien veranschaulicht worden. Anhand der gezeigten Messstrategien sind in den nachfolgenden Untersuchungen die Bestimmung

- der Kontur in einem Punkt und
- die Bestimmung der Kontur zwischen zwei Punkten

unterschieden worden. In der Abbildung 7.3 sind zwei reale Szenen aus der geodätischen Vermessungspraxis abgebildet. Die rot markierten Bereiche zeigen Hauskonturen, deren Umgebung dem Intensitätsverlauf der Abbildung 7.2 entspricht und von dem Vermesser eindeutig angezielt werden können. Der gelb markierte Bereich zeigt hingegen, dass mehrere Konturen in unmittelbarer Nähe vorhanden sind. Bei einer interaktiven Anzielung mit dieser optischen Auflösung ist nicht eindeutig bestimmbar, welche Kontur angezielt werden soll. Das Ergebnis der Antastung ist daher nicht eindeutig bestimmt.

### 7.1.1 Bestimmung der Kontur in einem Punkt

Durch die Analyse von Konturen an realen Fassaden (Abbildung 7.3) konnte der in der Abbildung 7.2 gezeigte typische Intensitätsverlauf für Hauskonturen ermittelt werden. Gegenüber idealen Kantenverläufen ist hier zu erkennen, dass die Bereiche beiderseits der Kante mit den Texturen der Hausfassade überlagert sind. Ein zeitlicher Einfluss der Textur auf den Kantenort ist bei konstanter Sonneneinstrahlung nicht vorhanden. Somit ist der Kantenort im Intensitätsverlauf abhängig von

- der Intensitätsänderung der Sonneneinstrahlung,
- den unbekannt systematischen Abweichungen,
- zufälligem Rauschen und
- den Abweichungen zwischen tatsächlicher und erwarteter Körperform.

In der Abbildung A.10 im Anhang A.4 sind ausgewählte Texturen an einer Hausfassade gezeigt. Eine Betrachtung der Texturen im Histogramm zeigt, dass sich diese in einem bestimmten Intensitätsbereich abbilden und eine Änderung des Intensitätsverlaufes bewirken. Bei der Antastung einer ausgedehnten Kontur über mehrere Suchstrahlen ist jeweils ein unterschiedlicher Intensitätsverlauf durch die Textur zu erwarten. In der Abbildung 7.2 ist dies durch die Darstellung eines flächenhaften Bereiches entlang der Kontur gezeigt worden.

Bei der Anzielung nicht signalisierter Punkte ist neben dem örtlichen Einfluss der Textur auch eine Intensitätsschwankung durch die wechselnde Sonneneinstrahlung zu erwarten. In [Unr00] wurde der Einfluss der Intensität experimentell an einer Maststruktur gezeigt. Für die Bestimmung des Einflusses einer örtlichen Textur- und Intensitätsänderung auf einen angenommenen Konturpunkt wurde der Kantenverlauf (Gleichung 7.1) mit einem zufälligen Anteil überlagert. Der zufällige Anteil entspricht damit einer nicht vorhersagbaren Texturänderung. Der Texturanteil wurde so gewählt, dass dieser den Grauwertänderungen im Histogramm entspricht. Die Simulationen zum Einfluss der Textur- und Intensitätsänderung wurden mit dem Programm „Maple“ [Inc02] durchgeführt. Der ideale Kantenverlauf aus Gleichung 7.1, überlagert mit dem zufälligen Anteil der Textur, wurde in diskreten Punkten berechnet. Mit einer Approximationsfunktion  $\hat{I}(x)$  wurden die Intensitäten ausgeglichen und durch zweimalige Ableitung der Kantenort  $x$  bestimmt. Weitere Informationen zum Ablauf und der Vorgehensweise bei der Simulation sind im

Abschnitt 10 zu finden. In der Abbildung 7.4 ist der Einfluss der Texturänderung bei unterschiedlichen Kontrasten an den Kanten zusammengefasst. Aus dem Verlauf der Kurven ist ersichtlich, dass mit steigendem Kontrast der Einfluss der Textur geringer wird. Weiterhin wird an dieser Grafik deutlich, dass sich durch die Änderung der Intensität der Sonneneinstrahlung der Kantenort im Subpixelbereich verschiebt.

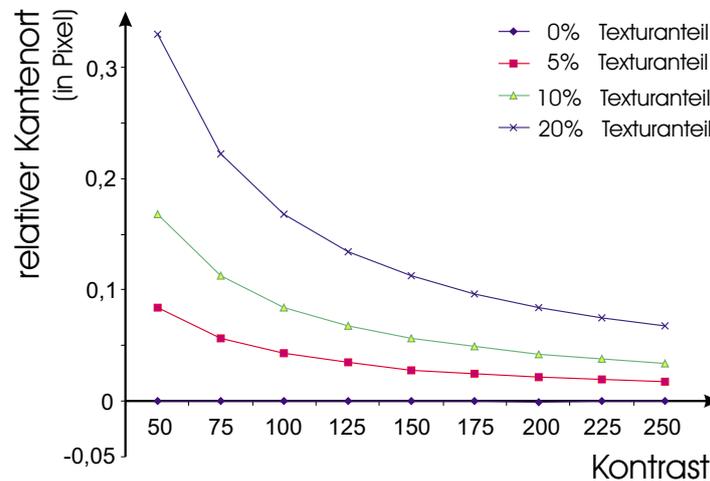


Abbildung 7.4: Einfluss von Textur- und Intensitätsänderungen auf den Kantenort

Für die Bestimmung der Approximationsfunktion wurden reale Kantenverläufe von Bildern herangezogen und mit dem Programm „CurveExpert“ [Hya02] ein Funktionsansatz  $\hat{I}(x)$  mit minimaler Abweichung zu dem Intensitätsverlauf der Kante bestimmt. Die Bestimmung des Kantenortes, welcher aus der Nullstelle der zweiten Ableitung  $\frac{\partial^2 \hat{I}(x)}{\partial x^2} \stackrel{!}{=} 0$  bestimmt werden kann, erfordert einen Funktionsansatz, der mindestens zweimal stetig differenzierbar ist. Die Abbildung 7.5 zeigt zwei mit dem Programm „CurveExpert“ bestimmte Funktionsverläufe, die die Forderung der zweimaligen Differenzierbarkeit erfüllen. Die Approximationsansätze aus Abbildung 7.5 zeigten annähernd gleiche Approximati-

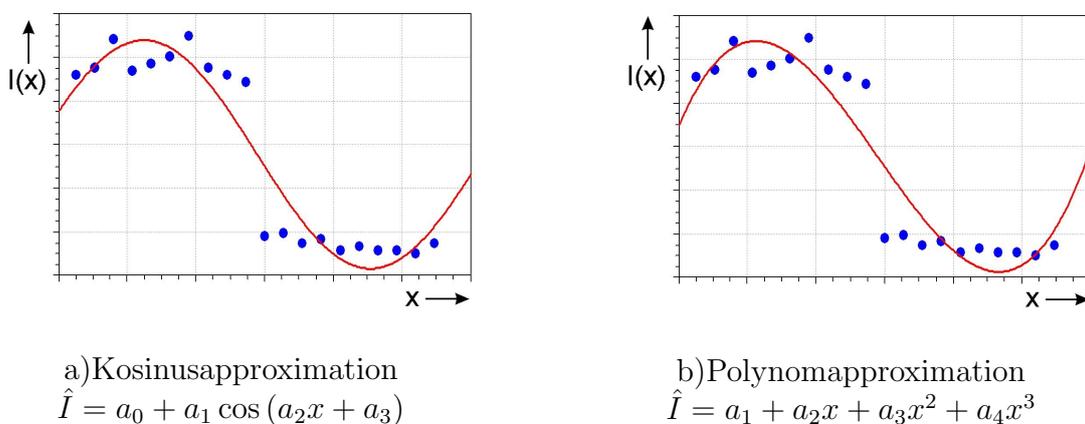


Abbildung 7.5: Ansätze zur Modellierung des Kantenverlaufs

onsfehler, so dass für die weiteren Untersuchungen der einfachere Polynomansatz dritter

Ordnung (Gleichung 7.3) gewählt wurde.

$$\hat{I}(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (7.3)$$

Aus der zweiten Ableitung des Polynoms  $\frac{\partial^2 \hat{I}(x)}{\partial x^2}$  kann der Kantenort durch die Lösung der Gleichung 7.4 bestimmt werden.

$$\frac{\partial^2 \hat{I}(x)}{\partial x^2} = 2a_2 + 6a_3x \stackrel{!}{=} 0 \quad (7.4)$$

Das Verhalten der in Gleichung 7.3 beschriebenen Funktion sowie das Verhalten der ersten und zweiten Ableitung wird in der Abbildung 7.6 gezeigt. Mittels experimenteller

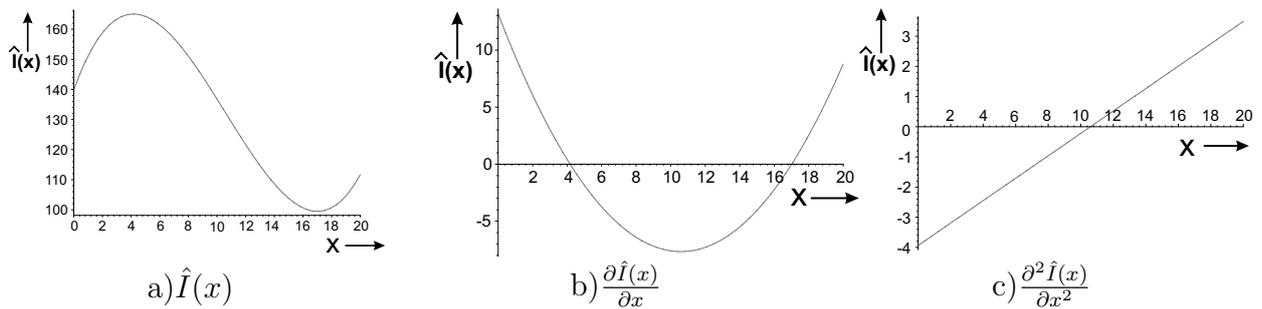


Abbildung 7.6: Analytische Bestimmung des Kantenortes

Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Bestimmung des Kantenortes mit dem Polynomansatz  $\hat{I}(x)$  auch bei starker Texturänderung im Subpixelbereich möglich ist. Bereits in [Küh97] wurde gezeigt, dass zur Kantenortsbestimmung auf der Basis der Polynomapproximation dritten Grades gegenüber interpolierenden und integrierenden Verfahren eine bessere Unterdrückung von zufälligen Ortsabweichungen erreicht wird.

Bei der Anzielung einer Kontur in einem Punkt kann nicht vorherbestimmt werden, welchen Einfluss die Textur auf diesen Konturpunkt hat. Aus diesem Grunde ist die Bestimmung der Kontur im angezielten Messpunkt aus mehreren Konturpunkten der Umgebung dieses Punktes zu empfehlen. Eine einfache Variante zur Reduzierung der Fehlerinflüsse an einer texturierten Hauskante ist die Mittelwertbildung von Intensitätswerten benachbarter Bildzeilen eines flächenhaften AOI. In der Abbildung 7.7 ist dies am Beispiel der Mittelung über zehn Bildzeilen einer vertikalen Kontur dargestellt. Für horizontale und vertikale Konturen ist die gemittelte Intensität aus den Spalten beziehungsweise Zeilen des Bildempfängers berechenbar. Der Ort des Intensitätsüberganges kann jedoch bei gedrehten Konturen von Zeile zu Zeile variieren und führt zu einem Versatz. Für Konturen in allgemeiner Drehlage sind daher die Bildpunkte im Bildraster mittels einer Koordinatentransformation in die Lage der anzutastenden Struktur zu drehen. Die Drehung der Bildkoordinaten führt dazu, dass die gedrehten Bildkoordinaten nicht mehr auf das Bildraster abgebildet werden können. Die Abbildung 7.8 verdeutlicht dies anhand eines Bildpunktes. Durch eine Subinterpolation der gedrehten Koordinaten in dem Bildraster sind diesen Punkten Intensitätswerte zuzuordnen. Zur Supapixelinterpolation kann beispielsweise die Bilineartransformation [PTVF97] eingesetzt werden. Für die Approximation der Polynomkurve  $\hat{I}_n(x)$  durch die Bildpunkte eines flächenhaft ausgedehnten AOI empfiehlt sich die im Abschnitt 3.4 vorgestellte Methode des Image Facet-Modells (Gleichung 3.29).

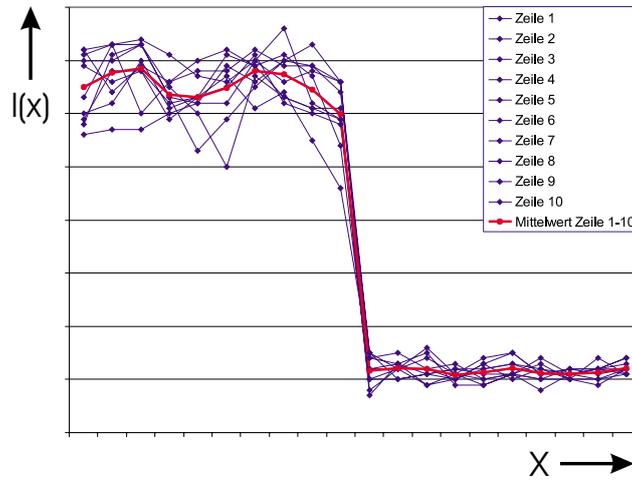


Abbildung 7.7: Gemittelter Intensitätsverlauf um eine vertikalen Kontur

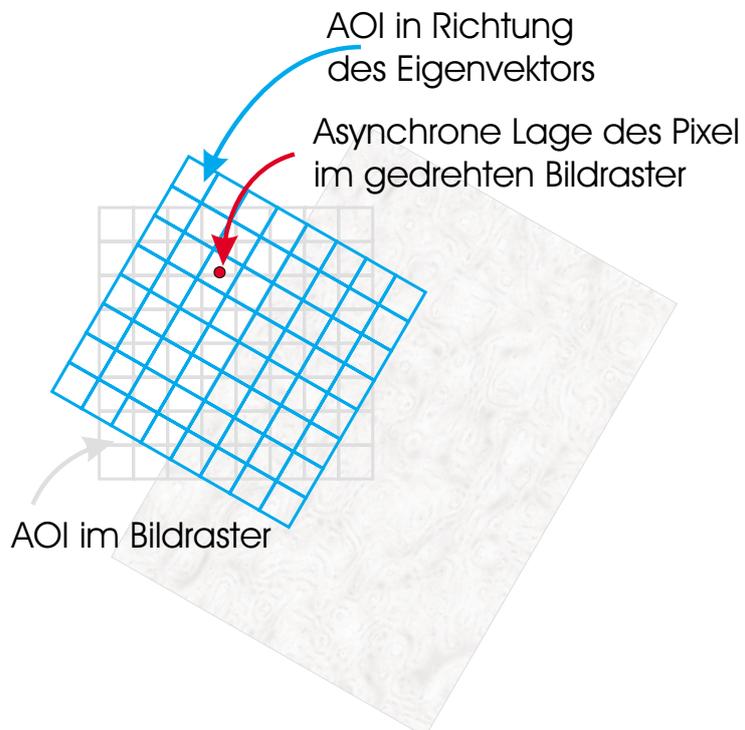


Abbildung 7.8: Asynchrone Antastung im gedrehten AOI

Der Vorteil dieses Verfahrens beruht auf dem Regressionsansatz mit einem linearen Gleichungssystem, bei dem einzelne Gleichungen, Zeilen des Gleichungssystems, vertauschbar sind. Somit ist es nicht notwendig, die auszugleichenden Punkte in eine Reihenfolge zu bringen. Der Polynomansatz aus Gleichung 7.3 kann somit durch das Gleichungssystem 7.5 bestimmt werden.

$$\hat{I}_n = \begin{pmatrix} 1 & x & x^2 & x^3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{pmatrix} \quad (7.5)$$

Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung des Einflusses von Texturen konnte auch durch die Anwendung des „mean shift“ Verfahrens [CM02] erreicht werden. In der Abbildung 7.9 ist das Ergebnis der „mean shift“ basierten Filterung des Bildausschnittes aus Abbildung 7.3b zu sehen. Das „mean shift“ Verfahren ist jedoch mit einem hohen Rechen-

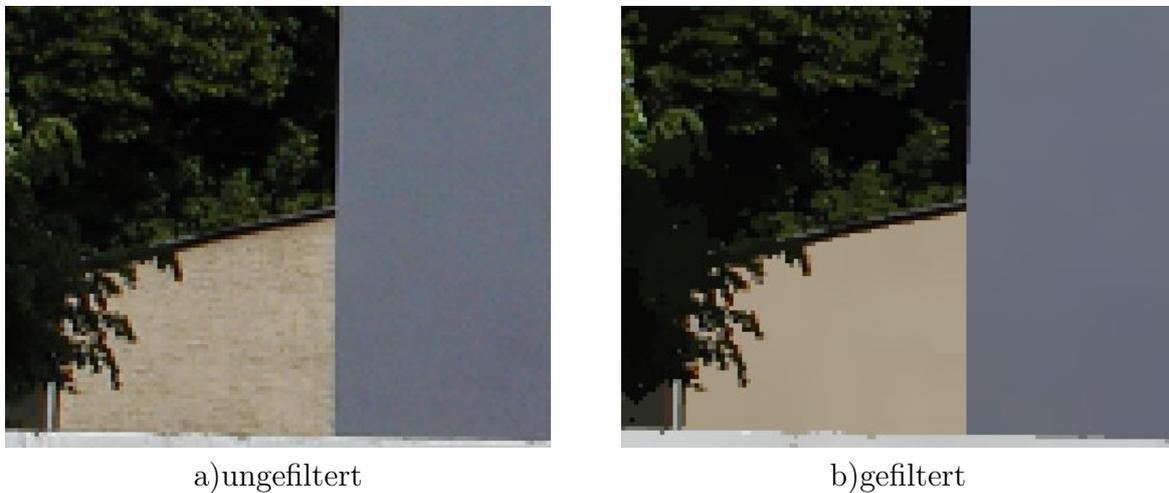


Abbildung 7.9: Anwendung des „mean shift“ Verfahrens zur Beseitigung von Texturen

aufwand verbunden und benötigt für Bilder im Format  $640 \times 480$  Bildpunkten und 24 Bit Farbtiefe bereits sechs Sekunden auf einem 1 GHz Pentium III PC. Für die Bestimmung von Kantenorten mit Subpixelgenauigkeit wird daher die genannte Approximation einer Modellfunktion für ein kleines AOI um den Anzielpunkt verwendet.

Bereits in den Untersuchungen der vorangegangenen Abschnitte konnte gezeigt werden, dass durch die Untersuchung der lokalen Eigenschaften eine Information über die Orientierung und Lage des Kantenverlaufs aus den Eigenwerten und Eigenvektoren ableitbar ist. In der Abbildungen 7.11 und 7.12 sowie der Tabelle 7.1 ist das lokale Verhalten der approximierten Funktionsverläufe um die markierten Kantenpunkte (Abbildung 7.10) zu sehen. Die approximierten Winkelangaben  $\alpha'$  sind für den Eigenvektor  $Ev_1$ , die Richtung des größten Eigenwertes, berechnet worden. Aus dem Vergleich der Winkelwerte in den Kantenpunkten P3, P4 und P5 wird der Einfluss von der Textur der Bäume deutlich. Dennoch konnte aus den Untersuchungen der lokalen Eigenschaften festgestellt werden, dass durch die Eigenwerte und Eigenvektoren der approximierten Fläche die Richtung für einen Suchstrahl der Kantenantastung festgelegt werden kann. Der Suchstrahl ist, wie in der Abbildung 7.13 gezeigt, in Richtung des Eigenvektors  $Ev_2$  festzulegen. Das anfangs am Bildraster orientierte AOI wird durch die ermittelte Orientierung des Eigenvektors



Abbildung 7.10: Nicht signalisierte Anzielung von Punkten an einer Hausfassade

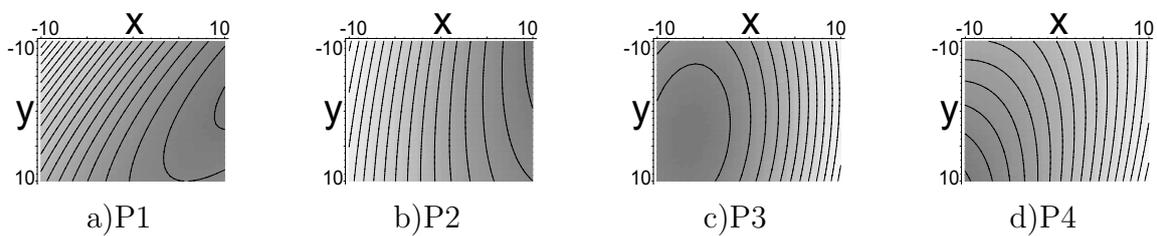


Abbildung 7.11: Höhenlinien der lokal approximierten Flächen in P1 bis P4

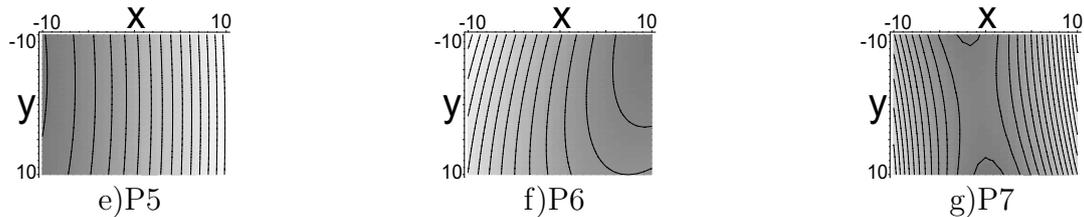


Abbildung 7.12: Höhenlinien der lokal approximierten Flächen in P5 bis P6

Anzielpunkt (x,y)	Eigenwerte	Eigenvektoren	approx. Drehwinkel $\alpha'$
P1 (257,32)	$\lambda_1 = 1,478$ $\lambda_2 = 0,144$	$Ev_1 = [0,820 \ 0,571]$ $Ev_2 = [-0,571 \ 0,820]$	$34,8^\circ$
P2 (243,90)	$\lambda_1 = 0,458$ $\lambda_2 = 0,033$	$Ev_1 = [0,969 \ 0,246]$ $Ev_2 = [-0,246 \ 0,969]$	$14,2^\circ$
P3 (240,170)	$\lambda_1 = 1,666$ $\lambda_2 = 0,312$	$Ev_1 = [0,996 \ 0,081]$ $Ev_2 = [-0,081 \ 0,996]$	$4,6^\circ$
P4 (240,180)	$\lambda_1 = 1,172$ $\lambda_2 = 0,086$	$Ev_1 = [0,927 \ 0,375]$ $Ev_2 = [-0,375 \ 0,927]$	$22,0^\circ$
P5 (240,190)	$\lambda_1 = 0,975$ $\lambda_2 = -0,028$	$Ev_1 = [0,999 \ 0,028]$ $Ev_2 = [-0,028 \ 0,999]$	$1,6^\circ$
P6 (240,260)	$\lambda_1 = 0,569$ $\lambda_2 = 0,051$	$Ev_1 = [0,957 \ 0,287]$ $Ev_2 = [-0,287 \ 0,957]$	$16,6^\circ$
P7 (425,85)	$\lambda_1 = 4,483$ $\lambda_2 = -0,269$	$Ev_1 = [0,994 \ -0,105]$ $Ev_2 = [0,105 \ 0,994]$	$173,9^\circ$

Tabelle 7.1: Lokale Eigenschaften der angezielten Konturpunkte P1-P7

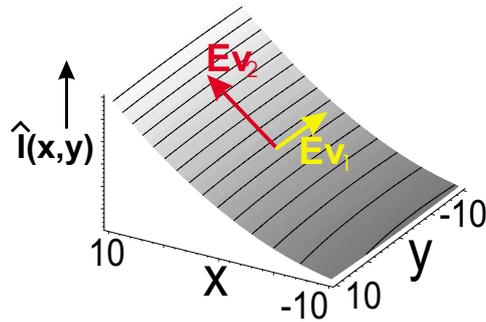


Abbildung 7.13: Approximierte Fläche um einen Konturpunkt

$Ev_2$  in die Orientierung der anzutastenden Struktur gedreht. Die Suchstrahlen verlaufen somit senkrecht zur Kante, wodurch die systematischen Abweichungen bei der Antastung einer gedrehten Struktur mit mehreren parallelen Suchstrahlen minimiert werden. In der Abbildung 7.14 ist das Prinzip zur Korrektur der Antastrichtung zusammengefasst. Die

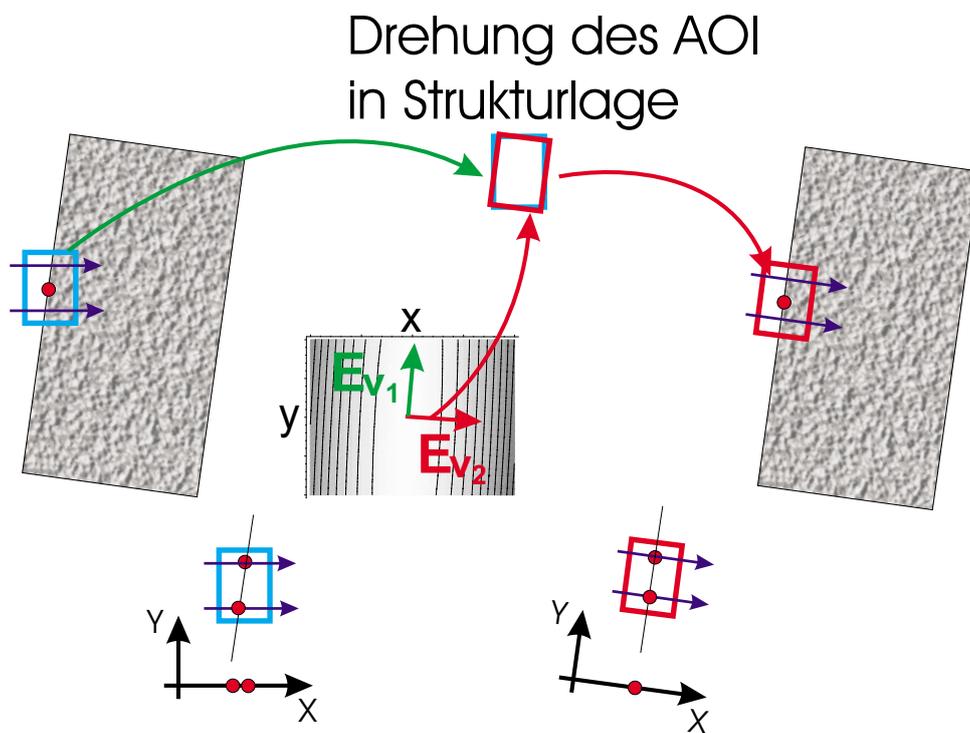


Abbildung 7.14: Korrigierte Antastung senkrecht zur Kantenlage

approximierten Winkelwerte aus Tabelle 7.1 sind mit einem  $10 \times 10$  AOI an den Kantenpunkten  $P1$  bis  $P7$  bestimmt worden. Die Ergebnisse zeigen, dass durch Textureinflüsse die approximierten Drehlagen  $\alpha'$  der Kante stark beeinflusst werden. Durch Versuche mit variierten Suchfenstergrößen konnte festgestellt werden, dass für die vertikale Struktur ( $\alpha = 0^\circ$ ) im Punkt  $P2$  bei einem Suchfenster der Größe  $5 \times 10$  die Lage der Struktur mit  $\alpha' = 3,26^\circ$  angenähert werden konnte. Die horizontale Abweichung des Kantenortes  $\Delta x_K$  in Abhängigkeit des Winkels  $\alpha'$  ist über die Gleichung 7.6 bestimmbar. Die Ab-

weichung des Kantenortes, welche sich aus der ungenau bestimmten Lage der Struktur ergibt, beträgt somit  $\Delta x_K(\alpha' = 3,26^\circ)|_{P_2} = 0,0569$  Pixel.

$$\Delta x_K(\alpha') = \tan(90^\circ - \alpha') = \frac{dy}{dx} \quad (7.6)$$

Die Abweichung liegt somit unter der Antastunsicherheit des Kantenortes selbst. In verschiedenen Versuchsreihen konnte festgestellt werden, dass die lokale Approximation und damit die Bestimmung der Struktur Lage von dem Seitenverhältnis  $cx \times cy$  des AOI abhängt. Für vertikale Konturen ist das Verhältnis  $cx > cy$  und für horizontale Konturen das Verhältnis der Seitenlängen  $cx < cy$  zu wählen. Schräg liegende Kanten sind gut durch ein Fenster  $cx = cy$  zu bestimmen. Der Grobalgorithmus zur Bestimmung einer Kante in einem Punkt lautet somit:

1. interaktive Vorauswahl der Struktur Lage (horizontal, vertikal, schräg) in einem Kantenpunkt,
2. interaktive Anzielung des Messpunktes,
3. Bestimmung der Drehlage  $\alpha'$  aus den lokalen Eigenschaften der approximierten Fläche um den Anzielpunkt,
4. Korrektur der Lage des AOI in Richtung des Kantenverlaufs,
5. Bestimmung des Kantenortes im Anzielpunkt durch Mittelung von benachbarten Suchstrahlen.

Das beschriebene Verfahren eignet sich gut für eine interaktive Lagebestimmung einzelner Konturpunkte durch eine pixelgenaue Anzielung im Videobild.

### 7.1.2 Bestimmung gerader Konturen zwischen zwei Punkten

Im vorangegangenen Abschnitt 7.1.1 wurde ein Verfahren zur Umsetzung der Messstrategie „Anzielung einer Kante in einem Punkt“ gezeigt. Die Bestimmung der mittleren Kontur aus zwei Punkten (Abbildung 3.8) ist auch mit diesem Verfahren umsetzbar. Hierzu werden die gezeigten Verfahrensschritte 1-5 in jedem angezielten Messpunkt  $P_1, P_2$  angewandt und liefern die Bildkoordinaten  $(x_i, y_i)$  eines Konturpunktes. Die mittlere Gerade  $G_m$  ist dann aus den beiden Konturpunkten entsprechend Gleichung 7.7 im Bildkoordinatensystem bestimmt.

$$G_m = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \end{pmatrix} \quad (7.7)$$

Die Unsicherheit der Geradenbestimmung aus zwei Antastungen, die von der Textur der Umgebung des Anzielpunktes abhängt, kann durch Einbeziehung weiterer Punkte entlang der Kontur verringert werden. Zwischen den beiden interaktiv anvisierten Bildkanten wird eine Gerade bestimmt werden, zu der senkrecht mit einer vorgegebenen Raster-schrittweite eine Bestimmung der Kante erfolgt. Die Anzahl der Antastungen ergibt sich beispielsweise aus dem Abstand der beiden Anzielpunkte und der gewählten Schrittweite entlang der Kontur. Eine Konturverfolgung entlang dem größten Gradienten im lokalen Bereich um den Anzielpunkt hätte den Nachteil, dass an Kantenpunkten, die durch andere Objekte im Vordergrund verdeckt sind, die Richtung des größten Gradienten in eine andere Richtung läuft. Das gleiche Verhalten ist an Gebäuden, die aus mehreren Platten oder Ziegeln aufgebaut sind, zu beobachten. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Konturpunkte als singuläre Punkte, die von einem Messfenster begrenzt werden, zu betrachten. Durch die Anwendung eines Linien-Operators erfolgt dann die Verknüpfung dieser Punkte zu einer Kontur. Gute Ergebnisse für die Konturpunktverknüpfung sind in den Untersuchungen [Hof02] mit der Houghtransformation erreicht worden. Die Unter-



Abbildung 7.15: Konturpunktfilterung mit dem Canny-Operator

suchungen zeigen die Anwendung der Houghtransformation für Geraden auf extrahierte Konturpunkte eines Bildes. In der Abbildung 7.15 ist das Ergebnis einer Kantenfilterung

mit dem Canny-Operator dargestellt. Die Houghtransformation der Konturpunkte erfolgt entsprechend der Rechenvorschrift aus Gleichung 7.8.

$$\begin{aligned}
 H(r, \phi) &= \sum_y \sum_x B[x, y] \delta(r, \phi, x, y) \\
 \delta(r, \phi, x, y) &= \begin{cases} 1 & : r = x \cos \phi + y \sin \phi \\ 0 & : \text{sonst} \end{cases} \quad 0^\circ \leq \phi \leq 180^\circ
 \end{aligned}
 \tag{7.8}$$

Die Summation läuft über die Indizes  $y$  und  $x$ , so dass jeder Konturpunkt  $B[x, y]$  des gefilterten Bildes mit den Transformationsschritten  $0^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$  eine Kurve im Parameterfeld  $[\phi, r]$  beschreibt. In jedem Transformationsschritt wird das Akkumulatorfeld an der berechneten Position  $[\phi, r]$  inkrementiert. Beschreiben mehrere Punkte eine Gerade im Konturbild, so entsteht im Akkumulatorfeld ein Schnittpunkt der Kurven, wodurch der Akkumulator dieses Feldes ein lokales Maximum bildet. Die Houghtransformation einer Geraden im Konturbild wird somit im Akkumulatorfeld durch einen Punkt  $[\phi, r]$  mit der Häufigkeit der abgebildeten Konturpunkte dargestellt. Liegt keine eindeutige Beschreibung einer Geraden im Bild vor oder sind in dem Bildausschnitt mehrere Geraden bestimmbar (Abbildung 7.17), dann bilden sich im Akkumulatorfeld mehrere lokale Maxima (Abbildung 7.16) aus. Aus diesem Grund ist die Einschränkung des Transfor-

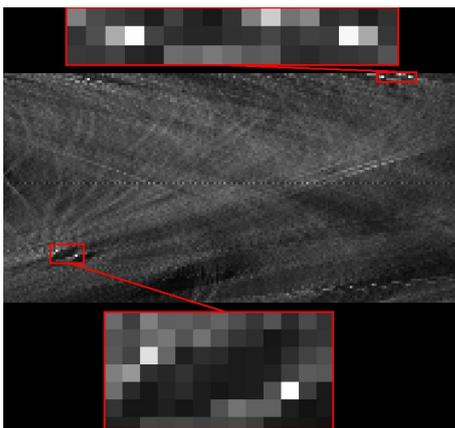


Abbildung 7.16: Resultierendes Akkumulatorfeld transformierter Konturpunkte

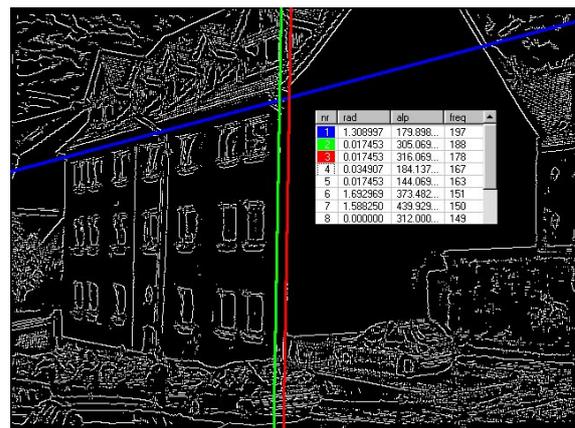


Abbildung 7.17: Ergebnis der Konturpunktverknüpfung

mationsbereiches zu empfehlen, wodurch die Anzahl der lokalen Maxima reduziert wird. In der Abbildung 7.18 ist die Konturpunktextraktion mit einem  $2 \times 2$  Sobel-Operator und anschließender Houghtransformation für den markierten Bereich gezeigt. Das globale Maximum im Akkumulatorfeld ist in diesem Fall auch die Lage der gesuchten Kontur. Die Abbildung 7.19 zeigt einen Ausschnitt aus einem Akkumulatorfeld. Der gezeigte Ausschnitt des Akkumulatorfeldes besitzt an der Position  $\phi = 90^\circ, r = 33$  ein Maximum. Die Untersuchung der Houghtransformation an verschiedenen Bildern zeigt, dass die Suche von Geraden auf die Suche eines lokalen Maximums im Parameterraum nach Gleichung 7.9 zurückgeführt werden kann. Für die Bestimmung des lokalen Maximums wurde eine  $3 \times 3$  Suchmaske gewählt, die entlang des  $[\phi, r]$  Rasters im Akkumulatorfeld verschoben wird. Ein lokales Maximum liegt genau dann vor, wenn entsprechend Gleichung 7.9 die

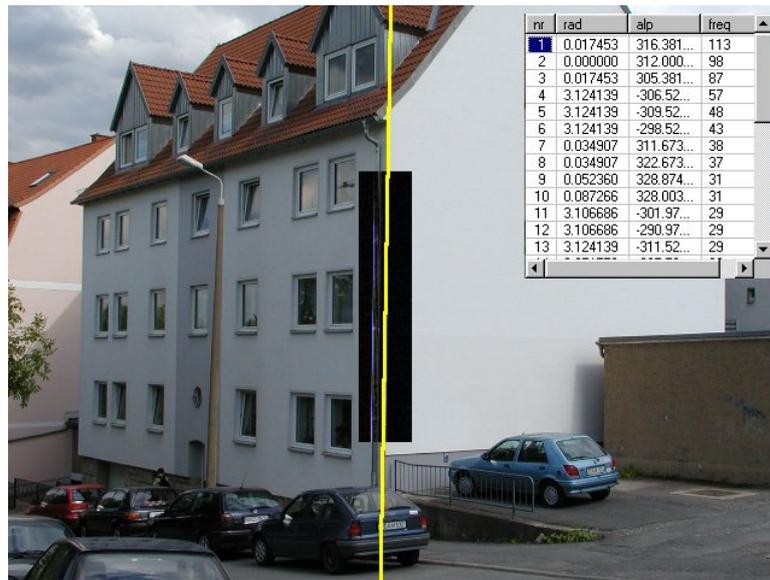


Abbildung 7.18: Verknüpfung von Konturpunkten in einem Bildausschnitt

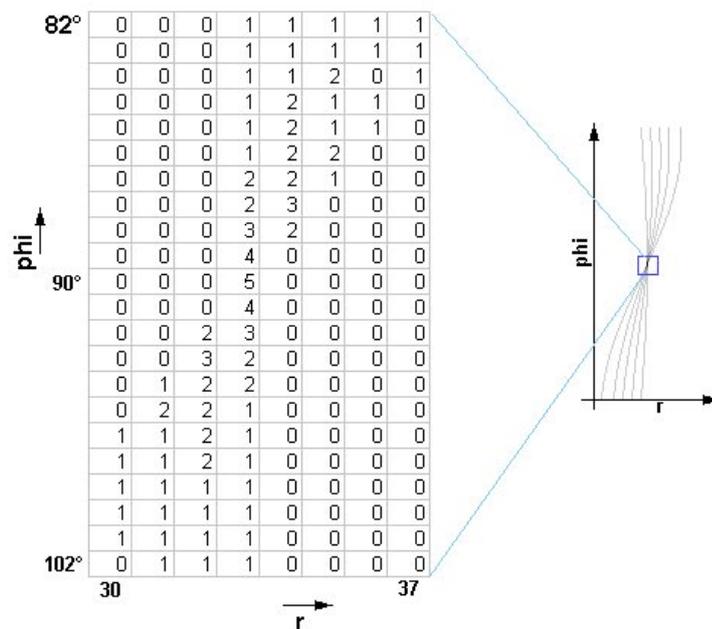


Abbildung 7.19: Ausschnitt eines Akkumulatorfeldes nach der Houghtransformation

Bedingung  $Val(r, \phi) = 8$  erfüllt wird.

$$Val(r, \phi) = \sum_y \sum_x \delta(r, \phi, i, j) \quad \forall i, j = -1, 0, 1 \quad (7.9)$$

$$\delta(r, \phi, i, j) = \begin{cases} -1 & : \mathbb{H}(r, \phi) - \mathbb{H}(r + i, \phi + j) < 0 \\ 0 & : \mathbb{H}(r, \phi) - \mathbb{H}(r + i, \phi + j) = 0 \\ +1 & : \mathbb{H}(r, \phi) - \mathbb{H}(r + i, \phi + j) > 0 \end{cases}$$

Eine zusätzliche Sortierung der lokalen Maxima nach ihrem Akkumulatorwert liefert das globale Maximum. Die automatische Separierung einer geraden Kontur im Bild kann somit durch das folgende mehrstufige Verfahren erfolgen, das durch die folgenden Verfahrensschritte gekennzeichnet ist.

1. Konturpunktfilterung im selektierten Bildausschnitt
2. Verknüpfung der Konturpunkte mittels Houghtransformation
3. Ausgabe einer Liste mit lokalen Maxima, die entsprechend der Punkthäufigkeit geordnet ist

Die Breite des genannten Bildbereiches kann entweder verfahrensbedingt vorgegeben oder durch einen dritten Interaktionspunkt im Bild festgelegt werden. Für die Untersuchung des genannten Verfahrens wurden die Kantendetektionsverfahren aus der Softwarebibliothek [LBF<sup>+</sup>99] angewandt, die aufgrund der zugrunde liegenden Verfahren einen vorgegebenen Suchbereich benötigen.

Die Kombination der Houghtransformation mit den in der Softwarebibliothek [LBF<sup>+</sup>99] verfügbaren Antastverfahren und Verfahren zur Ausgleichsrechnung ist ein robustes Verfahren zur Minimierung des Einflusses von Störungen bei der Formelementeberechnung aus Koordinatenpunkten [UBKL02]. Die Anwendung des Verfahren ermöglicht eine sub-



Abbildung 7.20: Konturbestimmung an einer texturierten Hauskante

pixelgenaue Bestimmung der Lage einer Geraden entlang einer texturierten Kontur (Abbildung 7.20). Aufgrund der Textur auf der Hausfassade und durch die Objekte im Hintergrund werden Konturpunkte gefunden, die nicht auf der gesuchten Hauskontur liegen. In diesem Fall hilft die Houghtransformation Konturpunkte zu finden, die auf einer Geraden angeordnet sind. Dabei wird die Gerade mit maximaler Häufigkeit als die Gerade

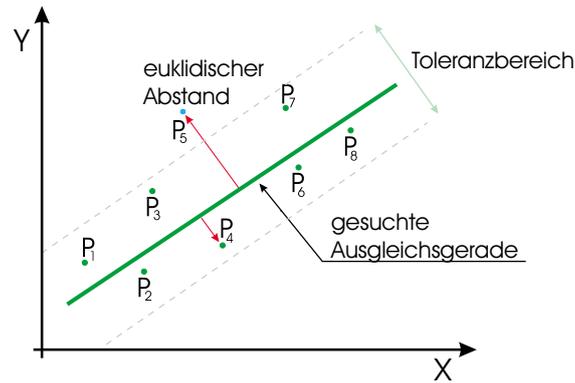


Abbildung 7.21: Prinzip der Punktselektion

mit minimaler Abweichung zur Kontur angenommen. In der Abbildung 7.21 ist der Prozess der Punktselektion verdeutlicht. Aus der Houghtransformation (Gleichung 7.8) und der Bestimmung des Minimums (Gleichung 7.9) wird eine pixelgenaue Gerade bestimmt. Über den euklidischen Abstand eines Punktes zur Geraden wird entschieden, ob der Punkt innerhalb des Toleranzbandes liegt. Für die Punkte innerhalb der Toleranz wird dann eine Ausgleichsgerade nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate berechnet, wodurch eine subpixelgenaue Lage der Kante bestimmt werden kann.

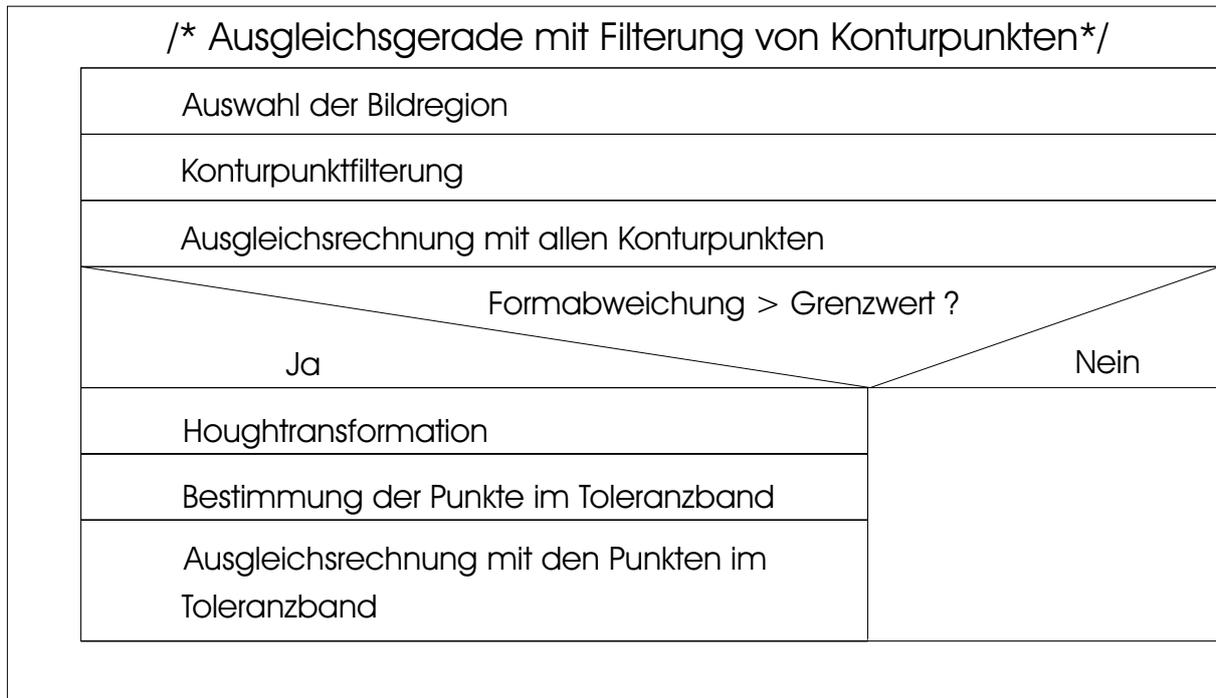


Abbildung 7.22: Struktogramm zur Bestimmung der Lage von ausgedehnten Kanten

### 7.1.3 Anzielung und Lokalisierung von Farbkonturen

In den Ergebnissen der Untersuchungen in [LBU00] und [BUE02] konnte festgestellt werden, dass für Kantenübergänge in natürlicher Umgebung die Auswertung von Grauwertbildern nicht zu empfehlen ist. Durch die Transformation  $T : \mathbb{R}^3 \mapsto \mathbb{R}$  der *RGB*-Farbdaten in ein Intensitätsbild und dem damit verbundenen Informationsverlust gehen Bilddetails verloren, die im resultierenden Intensitätsbild nicht mehr zu detektieren sind. In der Abbildung 7.23 ist am Beispiel der Fluchtstange zu sehen, wie durch die Grauwerttransformation die rote Markierung der Fluchtstange in dem Grün des Hintergrundes verschwindet.

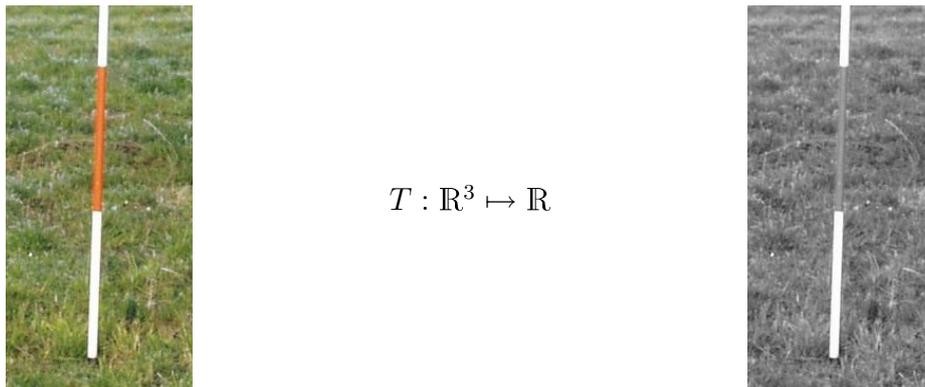


Abbildung 7.23: Informationsverlust durch Grauwerttransformation

Eine einfache Methode für die Bestimmung von Farbkanten ist das in [Dav97] beschriebene Verfahren der „Addition der Farbintensitäten“ und das in [BUE02] aufgezeigte Verfahren der „Vektordifferenzen“. Die Antastung von Konturpunkten sollte daher auf der Bestimmung von Farbsignalen beruhen.

## 7.2 Bestimmung einer mittleren Kontur

Die Bestimmung der mittleren Kontur aus zwei begrenzenden Konturen ist insbesondere für streifenförmige Objekte wie Leitungsmasten und Straßen von Interesse. Diese Objekte sind in der Vermessungstechnik für die Anfertigung von Spezialkarten, wie zum Beispiel Karten von Energieversorgern, in denen die Position der Strommasten erfasst beziehungsweise abgesteckt wird, interessant. Die Mastposition ist durch den Fußpunkt am Erdboden bestimmt, welcher sich aus der mittleren Konturlinie des Mastes und einem zweiten horizontalen Geradenschnitt ergibt. Die Katastermessung trennt die Lage und die Höhe eines Punktes voneinander. Für die Bestimmung der Mastposition ist es somit ausreichend, wenn die Lage polar bestimmt wird und in einer zweidimensionalen Beschreibung in das Kataster eingetragen wird. Ist die Höhe eines Punktes von Interesse, dann wird diese bisher mit einem Nivellier bestimmt.

Die folgende Untersuchung beschränkt sich auf die Erkennung der Lage von Maststrukturen (Abbildung 7.24), die durch ein streifenförmiges Linienmuster beschrieben werden können.

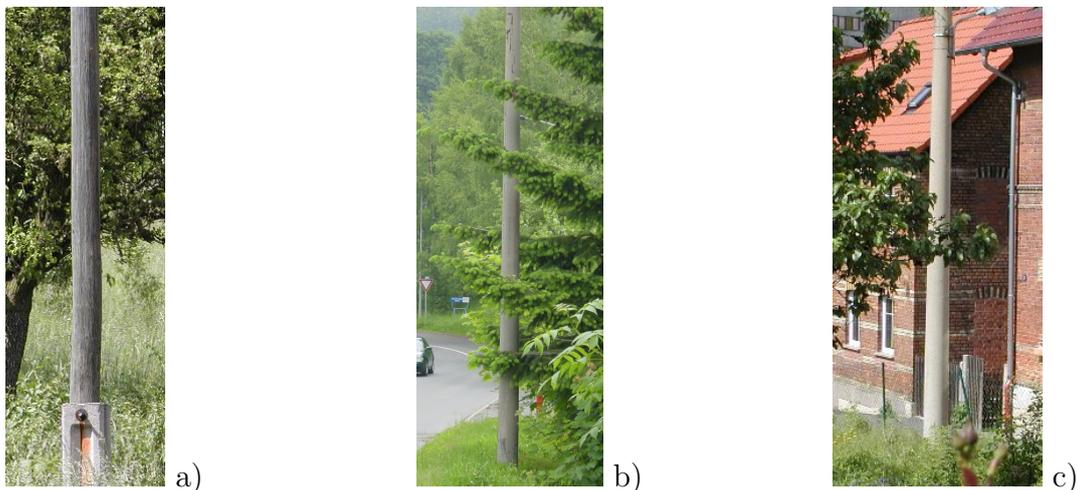


Abbildung 7.24: Beispiele für Masten mit streifenförmiger Ausprägung

Im Abschnitt 3.3 wurden aus der Literatur bekannte Verfahren, die zur Linienextraktion anwendbar sind, aufgezeigt. Durch verschiedene Einflussfaktoren, wie die

- wechselnde Intensität und Richtung der Sonneneinstrahlung,
- unterschiedliche Entfernung zum Messobjekt,
- partielle Verdeckung

sind keine eindeutigen Muster für Matching-Verfahren definierbar. Aus diesem Grunde wurde eine Vorauswahl möglicher Verfahren getroffen, die im Folgenden zur Bestimmung der mittleren Kontur eines Mastes untersucht werden sollen.

In [Ste00] wurde am Beispiel der Fernerkundung von Straßen gezeigt, dass die mittlere Kontur einer gekrümmten kurvenförmigen Struktur mit einer Streifenbreite  $w$  und Sprunghöhe  $h$  mit einem Modellansatz entsprechend Gleichung 7.10 gefunden werden kann.

$$I(x) = \begin{cases} 0 & : x < -w \\ h & : |x| \leq w \\ a & : x > w \end{cases} \quad a, h \in [0, 1] \quad (7.10)$$

Die Untersuchung in [Ste00] zeigt die Konturfindung in einem zweistufigen Prozess der Konturpunktbestimmung und Verknüpfung. Mit einem Taylorreihen-Ansatz (Gleichung 3.21), deren Ableitungen durch Faltung des Bildes mit den Ableitungen der Gaußfunktion (Gleichung 3.15) bestimmt werden, erfolgt die Extraktion einzelner Konturpunkte, welche über die lokalen Eigenschaften der Approximation verknüpft werden. Dieser Algorithmus zur Bestimmung der mittleren Kontur ist im Programmpaket „Halcon“ [MVT00] integriert. Mit diesem Programmpaket wurde untersucht, ob das Verfahren für die Bestimmung der mittleren Kontur von Masten geeignet ist. Die Anwendung des Linienalgo-



Abbildung 7.25: Bestimmung der mittleren Mastkontur mit „Halcon“

rithmus aus [Ste00] auf Aufnahmen von Leitungsmasten (Abbildungen 7.25) zeigte, dass durch den seitlichen Lichteinfall und den kreisrunden Mastquerschnitt Schattierungen entstehen, welche die Lage der gefundenen Kontur von der mittleren Kontur abweichen lassen<sup>1</sup>. Die Lage der Konturlinie ist bei Vorhandensein einer Schattierung in Richtung des größten Gradienten am Mast verschoben. Die Ursache für die verschobene mittlere Konturlinie ist dadurch bedingt, dass der Intensitätsverlauf an einem Mast bei seitlichem Lichteinfall (Abbildung 7.27) nicht auf den gewählten Modellansatz (Gleichung 7.10) passt. Der Intensitätsverlauf  $I_{RGB} = \frac{I_R + I_G + I_B}{3}$  innerhalb der Maststruktur kann in den untersuchten Bildern durch einen linearen  $I(x) = a_0 + a_1x$  oder cosinusförmigen  $I(x) = a_0 + a_1 \cos(a_2x + a_3)$  Verlauf beschrieben werden. Weiterhin war in der Analyse der Bilder erkennbar, dass die Sonneneinstrahlung im Wesentlichen eine Änderung der Intensität und keine Farbänderung bewirkt. Auf der Grundlage dieser Erkenntnis ist ein Verfahren der Bildsegmentierung untersucht worden, welches die Bilddaten gleicher Farbe oder Intensität zu einem Cluster zusammenfasst. Das „mean shift“ Verfahren wurde bereits im Abschnitt 7.1.1 zur Beseitigung von Texturen mit geringer Intensitätsschwankung eingesetzt. Wie in der Abbildung 7.26 zu sehen ist, kann durch die Anwendung der Bildsegmentierung die erwartete Angleichung der Intensitäten nicht erreicht werden. Die Größe der einzelnen hellen und dunklen Flächen ist für dieses Verfahren zu markant, so dass

<sup>1</sup>Vielen Dank an Herrn Dr. Carsten Steger, der das Bildmaterial aufgrund der Problematik „Schatten“ parallel evaluierte.

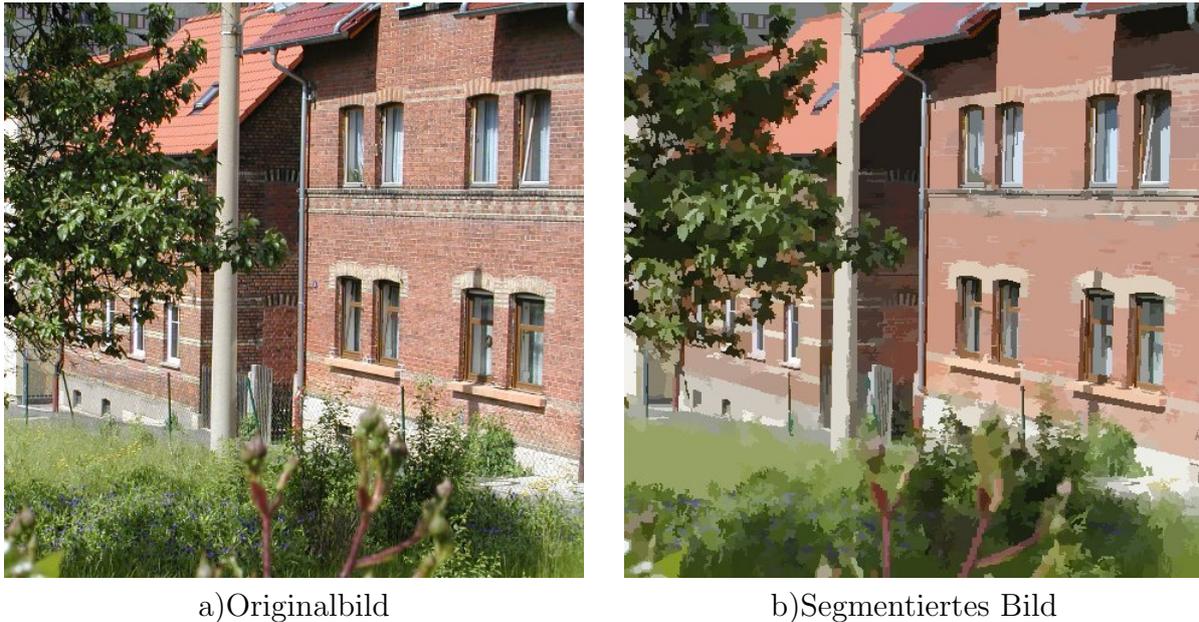


Abbildung 7.26: Bildsegmentierung mit dem „mean shift“ Verfahren am Mast

im Mast eine Segmentierungsgrenze zwischen der hellen und dunklen Mastseite gefunden wurde. Diese Segmentierungsgrenze entspricht dem Verlauf der Linie, die mit dem Verfahren in [Ste00] extrahiert wird.

Anhand des typischen Intensitätsverlaufes der Abbildung 7.27 ist zu sehen, dass der Intensitätssprung beim Übergang vom Mast zum Hintergrund größer ist als solche Intensitätssprünge, die durch die Texturen erzeugt werden. Das Merkmal der größten Inten-

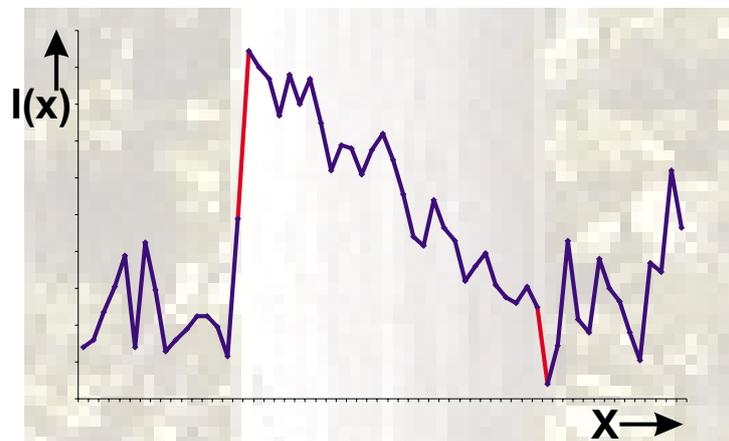
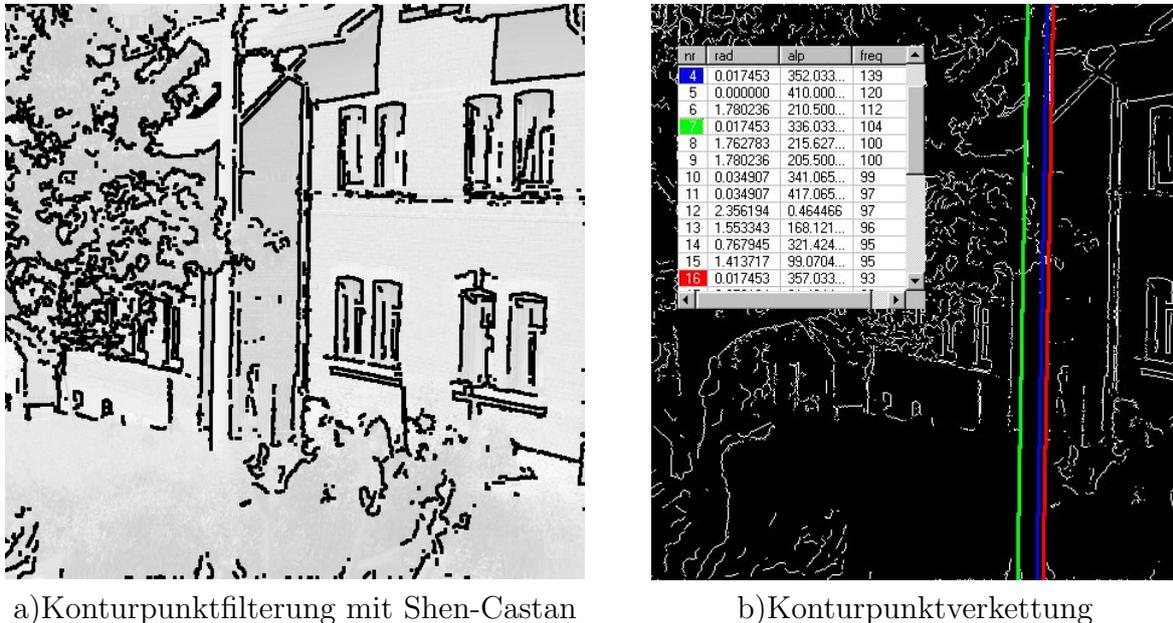


Abbildung 7.27: Intensitätsverlauf im Bereich des Mastes

sitätsänderung kann durch die Ableitung erster Ordnung  $\frac{\partial I(x)}{\partial x}$  beschrieben werden. In der Literatur [Par96] werden oft auch die Nullstellen der zweiten Ableitung  $\frac{\partial^2 I(x)}{\partial x^2} \stackrel{!}{=} 0$  zur Bestimmung von Konturpunkten herangezogen. Durch die Anwendung der Verfahren zur Bestimmung des größten Gradienten sowie die Bestimmung der Nullstellen der zweiten Ableitung wurde untersucht, ob die Konturpunkte des Mastes lokalisiert werden können. Die Bestimmung der mittleren Konturlinie soll somit aus den beiden äußeren Kontur-

linien des Lichtmastes berechnet werden. Durch die Einschränkung des Filterbereiches mit einem AOI, welches den Mast von der Umgebung trennt, kann davon ausgegangen werden, dass die gefundenen Konturpunkte mit hoher Wahrscheinlichkeit die Konturen des Mastes beschreiben. Unter dieser Voraussetzung ist zur Konturpunktverkettung die Houghtransformation für Geraden (Gleichung 7.8) anwendbar. Der Vergleich der Ergeb-



a) Konturpunktfilterung mit Shen-Castan

b) Konturpunktverkettung

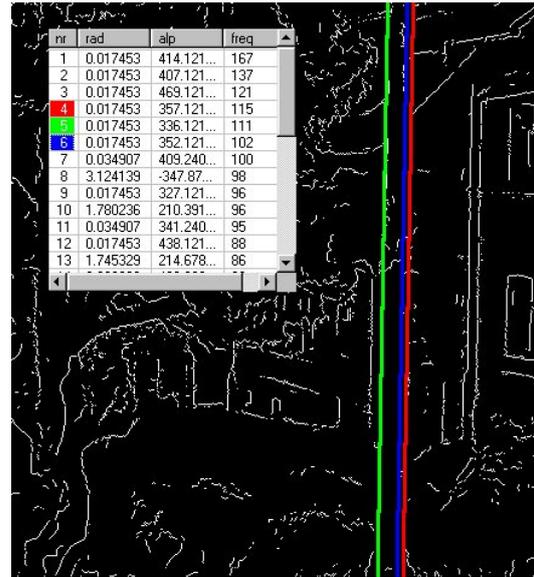
Abbildung 7.28: Konturlinienextraktion mit dem Shen-Castan Operator ( $b = 0,6$ )

nisse aus der Konturpunktbestimmung (Abbildung A.9) ergab, dass durch die Verfahren, die auf der Bestimmung der Nullstellen der zweiten Ableitung beruhen (Abbildung A.9e), die Konturpunkte am Lichtmast besser lokalisiert wurden. Weiterhin ist anhand der Untersuchungen zu erkennen, dass die „einfachen“ Gradientenverfahren (Abbildung A.9a-d) nur die Konturpunkte einer Konturlinie detektierten. Die Analyse der implementierten Algorithmen ergab, dass diese Ergebnisse auf den festen (Abbildung A.9a,b) beziehungsweise adaptiven, histogrammbasierten Schwellwert [Dav97] zurückzuführen sind. Durch diese Parametrisierung kann, wie in der Abbildung A.9a-d gezeigt, nur die Konturlinie mit dem größten Gradienten detektiert werden. Für die Untersuchungen wurden aus diesem Grund die Algorithmen aus der Abbildung A.9a-d nicht weiter betrachtet.

Die Verfahren von Marr-Hildret, Canny und Shen-Castan wurden bereits im Abschnitt 3.3 zur Konturpunktextraktion genannt. In [Par96] ist das Verhalten der genannten Operatoren bei verschiedenen Signal-/Rauschverhältnissen beschrieben worden. Zur Evaluierung der Operatoren wurden die dem Buch beiliegenden Programme für die Operatoren genutzt. Somit konnte an verschiedenen Bilddaten die Eignung der Operatoren zur Konturpunktbestimmung untersucht werden. Die Abbildungen 7.28 und 7.29 zeigen das Ergebnis der Konturpunktsuche mit dem Shen-Castan Operator. Die Konturpunkte sind hierbei mit einer Overlaytechnik in die Bilder eingetragen worden. Erkennbar ist, dass neben der linken und rechten Kontur des Lichtmastes auch eine Kontur, die den Wechsel von der hellen zur dunklen Fläche beschreibt, gefunden wurde. Durch Veränderungen des Glättungsparameters konnte der Einfluss zwar reduziert, jedoch nicht ganz beseitigt werden. In der Abbildung 7.28a ist das Ergebnis der Anwendung des Shen-Castan-Operators mit dem Glättungsparameter  $b = 0,6$  gezeigt. Die Konturpunktverkettung (Abbildung



a) Konturpunktfilterung mit Shen-Castan



b) Konturpunktverketzung

Abbildung 7.29: Konturlinienextraktion mit dem Shen-Castan Operator ( $b = 0,9$ )

7.28b) zeigt, dass die Kontur, die durch den Hell-/Dunkel-Übergang gebildet wird, durch die meisten Konturpunkte beschrieben wird. Die häufigkeitsbasierte Konturpunktverketzung mit der Houghtransformation findet deshalb diese Konturlinie in der Ergebnisliste vor den beiden gesuchten Konturlinien. In der Abbildung 7.29a ist der gleiche Bildausschnitt mit einem Glättungsparameter  $b = 0,9$  gefiltert worden. Es ist deutlich zu sehen, dass die Anzahl der Konturpunkte auf den Hell-/Dunkel-Übergang reduziert werden konnten. Das Ergebnis der Houghtransformation (Abbildung 7.29b) zeigt nun auch, dass die beiden äußeren Mastkonturen besser gefunden werden konnten. In jedem Fall wird eine Einschränkung der Konturpunktsuche auf einen kleineren Bereich um den Mast die Lokalisierung der beiden äußeren Konturlinien verbessern. Des Weiteren kann die Lösungsvielfalt bei der Bestimmung lokaler Maxima im Houghraum durch eine Vorinformation über die vertikale Lage des gesuchten Linienpaares reduziert werden.

Die Berechnung der mittleren Konturlinie ist dann durch die folgenden Schritte bestimmt.

1. Selektion eines Bildbereiches(AOI) um den Mast
2. Bestimmung der Konturpunkte im gewählten AOI
3. Konturpunktverknüpfung
4. Berechnung der mittleren Konturlinie (Gleichung 7.12)

Mit der Konturpunktverknüpfung durch die Houghtransformation und anschließender Rücktransformation der beiden lokalen Maxima ergeben sich zwei Geraden  $G_1, G_2$ , die beispielsweise in Punkttrichtungsform (Gleichung 7.11) geschrieben werden können.

$$G_1 = P_1 + t \begin{pmatrix} n_{x1} \\ n_{y1} \end{pmatrix} \quad (7.11)$$

$$G_2 = P_2 + t \begin{pmatrix} n_{x2} \\ n_{y2} \end{pmatrix}$$

Da die Bestimmung der beiden Konturlinien im gleichen Bildkoordinatensystem mit  $x \geq 0, y \geq 0$  erfolgt, gibt es nur den Sonderfall, dass die Richtung der beiden Geraden entgegengesetzt bestimmt wird. Für Geraden mit überwiegend vertikaler Ausprägung kann dieser Fall durch einen Vorzeichenvergleich von  $n_{y1}$  und  $n_{y2}$  festgestellt werden. Bei unterschiedlichen Vorzeichen ist einer der Vektoren um  $180^\circ$  zu drehen.

$$G_m = \frac{P_1 + P_2}{2} + t \begin{pmatrix} \frac{n_{x1} + n_{x2}}{2} \\ \frac{n_{y1} + n_{y2}}{2} \end{pmatrix} \quad (7.12)$$

Nach der Korrektur der Richtungen beider Vektoren ist die mittlere Gerade durch die Gleichung 7.12 bestimmbar.

Mit dem gezeigten Verfahren ist es somit möglich, aus der pixelgenauen Position der Konturpunkte die Lage der mittleren Linie zu bestimmen. Für Messapplikationen mit hoher Genauigkeitsforderung ist sicherzustellen, dass die Unsicherheiten der Winkelmessung konform zur Unsicherheit der Entfernungsmessung sind. Durch eine Betrachtung der optischen Abbildungsverhältnisse am Tachymeterfernrohr wurde untersucht, ob die Unsicherheit der Winkellage bei der Anwendung der pixelgenauen Konturpunktsuche mit dem Canny-Operator mit der Unsicherheit des Entfernungsmessers übereinstimmt. Die Bestimmung der erforderlichen Messunsicherheit einer polaren Aufnahme linienförmiger Objekte soll anhand des nachfolgenden Applikationsbeispiels gezeigt werden.

Ein reflektorlos messendes Tachymeter hat eine Unsicherheit der Entfernungsmessung von  $\Delta z = 3$  mm in einem Messbereich bis maximal 200 m. In der Abbildung 7.30 ist der

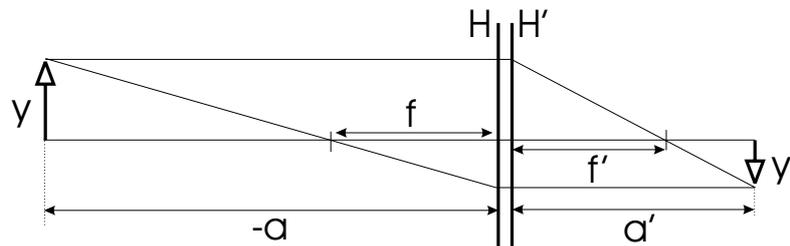


Abbildung 7.30: Optischer Strahlengang zur Bestimmung der Anzielgenauigkeit

optische Strahlengang zur Abbildung eines Objektes  $y$  auf eine Bildebene  $y'$  gezeigt. Für die Abschätzung der erforderlichen Unsicherheit soll ein Videotachymeter einer Brennweite von  $f' = 300$  mm und einer Pixelgröße von  $y' = 7 \mu\text{m}$  vorgegeben sein. Aus der Abbildungsgleichung 7.13

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{a} - \frac{1}{a'} \quad (7.13)$$

und dem Abbildungsmaßstab 7.14

$$\beta' = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a} \quad (7.14)$$

erhält man die Gleichung 7.15, die eine Berechnung der lateralen Auflösung eines Objektes bei gegebener Pixelgröße  $y'$  und bekannter Entfernung  $a$  zum Objekt ermöglicht.

$$y = y' \left( \frac{a}{f'} + 1 \right) \quad (7.15)$$

Geht man nun von der longitudinalen Unsicherheit des Entfernungsmessers von  $\Delta z = 3$  mm aus und setzt diese als aufzulösende Objektgröße  $y = \Delta z = 3$  mm in Gleichung 7.15 ein, dann ergibt sich die maximale Entfernung, bis zu welcher diese Auflösung möglich ist. Mit den gegebenen Parametern der optischen Abbildung ist die Entfernung zum Objekt mit  $a = 128$  m bestimmbar. Die Lage der mittleren Geraden sollte in diesem Beispiel besser subpixelgenau aufgelöst oder ein Bildsensor mit kleineren Pixelgrößen eingesetzt werden. Bei einer Pixelgröße von  $y' = 4\mu\text{m}$  ergibt sich bereits eine maximale Entfernung von  $a = 225$  m. Die Auflösung der Winkelmessung sollte dennoch durch eine subpixelgenaue Konturpunktbestimmung erhöht werden.

Aus der berührungslosen Koordinatenmesstechnik sind Verfahren bekannt, die eine subpixelgenaue Bestimmung der Konturlinie über einen Bildausschnitt (AOI), in dem mit mehreren parallelen Suchstrahlen die Kontur des Messobjektes angetastet wird, ermöglichen. Dies erfolgt durch die Einpassung des Formelementes „Gerade“ in die Konturpunkte. In [Küh97] wurde gezeigt, dass mit den untersuchten Subpixelverfahren Standardabweichungen bis  $\frac{1}{50}$  Subpixel möglich sind. Einige dieser untersuchten Algorithmen zur Kantenortsbestimmung sind in [LBF<sup>+</sup>99] implementiert und wurden in einem speziellen Messfenster für die Bestimmung der mittleren Konturgeraden angewandt. In der Abbildung 7.31 ist das Antastprinzip gezeigt. Durch die interaktive Bestimmung von zwei Antastpunkten

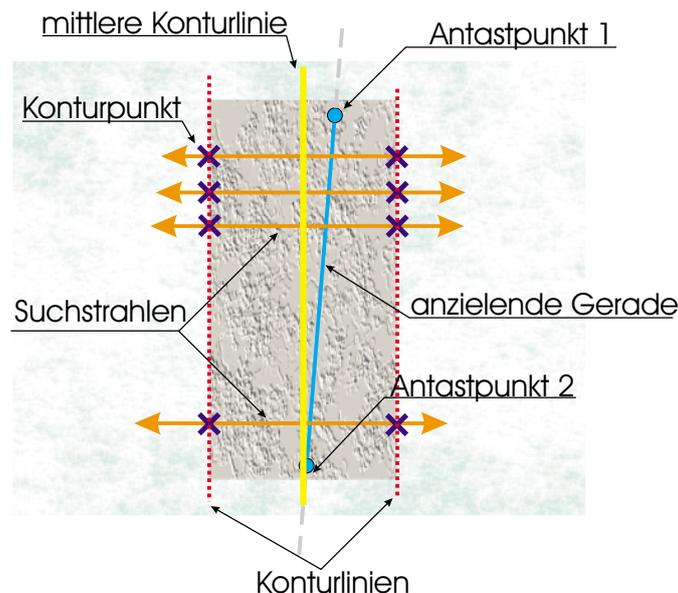


Abbildung 7.31: Bestimmung der mittleren Konturlinie mit Suchstrahlen

innerhalb des Objektes wird eine anzielende Linie bestimmt. Die Linie ist dabei der Ausgangspunkt von Suchstrahlen, mit denen auf beiden Seiten des Objektes Konturpunkte gesucht werden. Dabei ist bei der Implementierung zu entscheiden, ob die Suchstrahlen im Bildraster oder senkrecht zur anzielenden Geraden verlaufen. Die gefundenen Konturpunkte werden mittels einer Kombination der Houghtransformation und der Ausgleichsrechnung entsprechend dem in [UBKL02] beschriebenen Verfahren zu einer Gerade mit subpixelgenauer Lage ausgeglichen. Die mittlere Konturlinie ergibt sich dann wiederum aus der Gleichung 7.11. In der Abbildung 7.32 ist die Umsetzung dieses Algorithmus am Beispiel der Lagebestimmung eines Leitungsmastes gezeigt. Mit diesem neuen Messprinzip

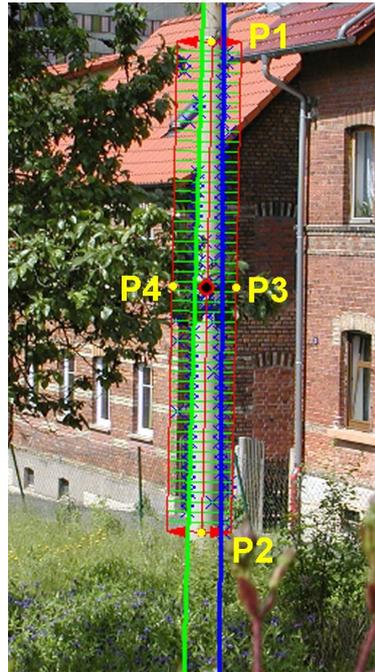


Abbildung 7.32: Bestimmung der Konturlinien des Mastes

ist die Bestimmung der dreidimensionalen Lage des Mastes möglich. Die Verfahrensschritte 1-4 sind dabei die Grundlage zur Bestimmung der mittleren Linie, die zu einer Lagebestimmung des Mastes führt. Durch eine Projektion der beiden Antastpunkte (Abbildung 7.31) auf die mittlere Linie ist es mit motorisierten Tachymetern und einer reflektorlosen Entfernungsmessung möglich, die räumliche Position des Mastes zu bestimmen. Aus den beiden Koordinatentripel  $(x, y, z)^T$  der Anzielpunkte  $P_1, P_2$  ist die dreidimensionale Lage der mittleren Geraden  $G_m$  auf der Mastoberfläche durch die Gleichung 7.16 bestimmbar.

$$G_m = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \\ z_2 - z_1 \end{pmatrix} \quad (7.16)$$

In der Vermessung muss jedoch die Mitte des Objektes bestimmt werden, so dass die dreidimensionale Lage der Zylinderachse durch den Mast bestimmt werden muss. Die Punkte  $P_1$  und  $P_2$  sind somit mit dem Radius des Mastes, der sich aus dem Abstand der beiden Konturlinien bestimmen lässt, zu korrigieren.

Die zur Bestimmung des Fußpunktes benötigte horizontale Schnittgerade kann durch eine Kantenbestimmung in einem Punkt, wie bereits im Abschnitt 7.1.1 beschrieben, bestimmt werden. Dies ist jedoch nur möglich, wenn der Fußpunkt des Lichtmastes nicht durch ein natürliches Hindernis verdeckt ist. Bei einer Verdeckung des Punktes kann mittels einer speziellen „Messlatte“, die über eine Längenmaßverkörperung verfügt, ein Punkt in definierter Höhe über dem Boden angezielt werden.

# Kapitel 8

## Automatische Lokalisierung mehrerer kooperativer Ziele

In verschiedenen Bereichen der Ingenieurvermessung treten Messsituationen ein, in denen das Tachymetersehfeld mehrere signalisierte Prismen enthält. Mit den zur Zeit am Markt verfügbaren Tachymetersystemen ist die Erfassung eines signalisierten Punktes spezifiziert, so dass die Wahl des Tachymeterstandortes einen wesentlichen Einfluss auf die Messdurchführung hat. In der Bauwerksüberwachung wird daher versucht, den Tachymeterstandort zu den Prismen so zu wählen, dass mehrfach signalisierte Punkte weitestgehend vermieden werden. Teilweise gibt es auch speziell angepasste Software- und Hardwarelösungen für die Monitoringaufgaben.

In diesem Abschnitt sollen Methoden untersucht werden, die ein automatisches Auffinden mehrerer signalisierter Prismen im Tachymetersehfeld ermöglichen. Damit für die Anzielung verschiedener Prismenanordnungen die gleichen Unsicherheiten des Messwertes gelten, sollen weiterhin die im Abschnitt 5.1 untersuchten Verfahren zur Bestimmung der Prismenposition zum Einsatz kommen. Aus diesem Grund wird durch einen weiteren Vorverarbeitungsprozess eine Unterteilung des Bildes in verschiedene Regionen mit einem Prisma vorgenommen. Für die Unterteilung des Bildes gibt es in der Literatur verschiedene Ansätze, zu denen die statistischen Analyseverfahren der

- lateralen Histogrammtechnik [Dav97] und
- Clusteranalyse [Mir96],[Bac96],[Bac95] gehören.

Neben diesen Verfahren sind auch Verfahren aus der Mustererkennung und Formanalyse (BLOB-Analyse) von Objekten, wie die

- Houghtransformation [GW92],[Dav97],
- Komponentenanalyse (Analyse zusammen hängender Bildpunkte) [Dav97],
- L1, L2 Abstandsanalyse von Objekten zum Hintergrund [Dav97] und
- Template Matching [Dav97]

anwendbar, aus denen Merkmale zur Regionenbildung ableitbar sind. In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Verfahren zur Ableitung von Bildregionen gezeigt, die

das Problem der Lokalisierung von mehreren Prismen im Bild auf das Problem der Lokalisierung eines Prismas in einem Bildausschnitt zurückführt. Durch synthetisch erzeugte Bilder sind verschiedene praxisrelevante Prismenanordnungen simuliert worden, an denen das Verhalten der Algorithmen nachgewiesen werden sollte. Die generierten Bilddaten basieren hier bereits auf einer Vorverarbeitung der realen Szenen durch die Unterdrückung von Störsignalen (Abschnitt 5.4) durch das Bildsubtraktionsverfahren und anschließender Schwellwertbinarisierung [Dav97].

## 8.1 Laterale Histogrammtechnik

Das Prinzip der lateralen Histogrammtechnik beruht auf der Projektion des Intensitätsprofils eines zweidimensionalen Bildes auf eine oder mehrere Achsen. Durch die Projektion  $P : \mathbb{R}^3 \mapsto \mathbb{R}^2$  der Intensitäten eines Bildes  $I(x, y)$  mit der Dimension  $N \times M$  auf eine Bildachse allgemeiner Lage  $\phi$  wird die Dimension auf  $(N \cos(\phi) + M \sin(\phi)) \times 1$  Intensitäten  $I(x)$  entlang der Achse reduziert. Die Anzahl und Lage der Achsen ist frei wählbar und abhängig von den Informationen, die durch das resultierende Intensitätsprofil extrahiert werden sollen. Eine Voraussetzung für die Erkennung von Objekten aus den entstehenden Histogrammen ist ein hoher Kontrast zwischen den Objekten und dem Hintergrund, so dass die resultierenden Intensitätsprofile vorwiegend durch die zu erkennenden Objekte bestimmt werden.

In vielen Fällen ist die Projektion der Intensität auf zwei Achsen in horizontaler  $I(x)$  und vertikaler  $I(y)$  Lage ausreichend für die Erkennung symmetrischer Objekte. In [Dav97] wurde diese Technik für das Beispiel der Erkennung von Löchern in Objekten beschrieben. Das Intensitätsprofil wurde hier auf zwei Achsen in horizontaler  $\phi = 0^\circ$  und vertikaler  $\phi = 90^\circ$  Lage projiziert. Für diesen Fall kann die Bestimmung der Histogramme durch die Gleichungen 8.1 und 8.2 beschrieben werden.

$$\forall y : I(y) = \sum_{x=1}^N I(x, y) \quad (8.1)$$

$$\forall x : I(x) = \sum_{y=1}^M I(x, y) \quad (8.2)$$

In den Abbildungen 8.1a-e ist die Anwendung der lateralen Histogrammtechnik an einfachen Objekten gezeigt. Die gezeigten Objektstrukturen wurden mit 10% zufälligem Rauschen überlagert. Die Abbildungen 8.1a-e zeigen, dass eine zweidimensionale Struktur

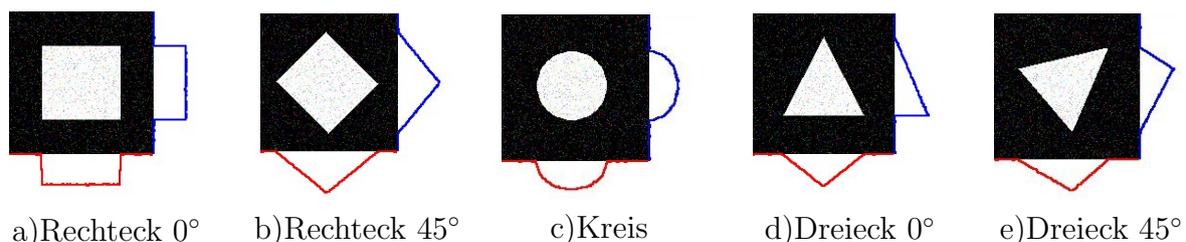


Abbildung 8.1: Beispiele zur Anwendung der lateralen Histogrammtechnik

in zwei eindimensionale Profile mit markantem Muster zerlegt werden kann. In [Dav97] wurde daher für die Lokalisierung bekannter Muster die Definition von Profil-Templates vorgeschlagen, mit denen die Regionen und die Form der Objekte bestimmt werden. Für Objekte variabler Größe ist die Definition von Templates schwieriger und müsste mit einer vektoriellen Beschreibung erfolgen. In [Hof02] wurde daher für die Bestimmung der Regionen elliptischer Prismenbilder eine Schwellwertgerade herangezogen, mit der die Schnittpunkte der Intensitätsverteilung berechnet wurden. In der Abbildung 8.2 ist das angewendete Prinzip zu sehen. Durch die Bestimmung der Punkte  $x_i$ , in welchen die

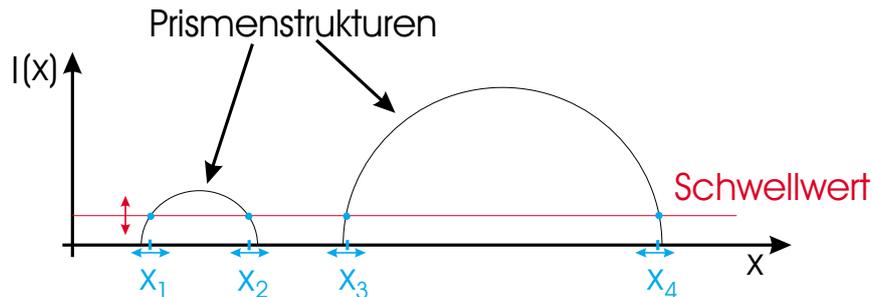


Abbildung 8.2: Verwendung eines Schwellwertes zur Bestimmung der Prismenregionen

Intensität  $I(x)$  den Schwellwert überschreitet, ist ein Prismenintervall  $[x_i, x_{i+1}]$  in einer Projektionsrichtung bestimmt. Mit den Intervallen der horizontalen  $H_i$  und vertikalen  $V_j$  Projektionsrichtung ergibt sich ein rechteckiger Bereich  $B_{i,j}$

$$B_{i,j} = H_i(x_i, x_{i+1}) \cup V_j(y_j, y_{j+1}) \quad \forall i, j = (1, 3, 5, \dots) \quad (8.3)$$

mit dem ein Prisma abgegrenzt werden kann. In der Abbildung 8.3 ist das Ergebnis einer

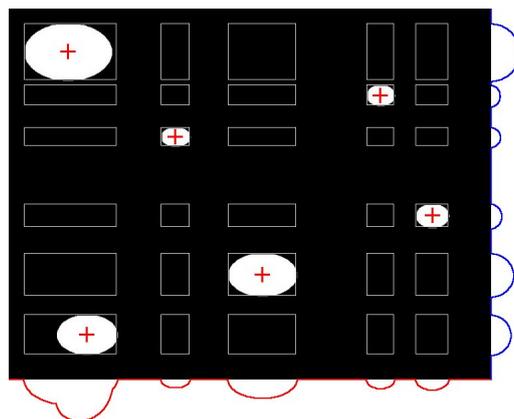


Abbildung 8.3: Resultierende Prismenregionen der lateralen Histogrammtechnik

Regionenbestimmung mit der lateralen Histogrammtechnik dargestellt. Es ist erkennbar, dass durch die Kombination der Intervalle  $H_i$  und  $V_i$  Regionen entstehen, die kein Prisma enthalten. Das Problem mehrdeutiger Abbildungen muss bei der Weiterverarbeitung der Regionen mit den Algorithmen aus dem Abschnitt 5.1 berücksichtigt werden. Eine einfache Variante zur Ausblendung dieser Bereiche wird durch die wiederholte Berechnung

der Intensitätsverteilung  $I(x)$  und  $I(y)$  in den ermittelten Regionen möglich. Regionen, die ein Prisma enthalten, müssen dann Häufigkeitswerte aufweisen, die größer als der Schwellwert sind. Im Beispiel (Abbildung 8.4) wird gezeigt, dass der Algorithmus nicht immer sicher stellt, dass die resultierende Region auch nur ein Prisma enthält. Mit den Untersuchungen [Hof02] konnte gezeigt werden, dass durch die rekursive Anwendung des Algorithmus auf die gefundenen Bereiche  $B_{i,j}$  der gezeigte Sonderfall (Abbildung 8.4) und die Beseitigung von Mehrdeutigkeiten möglich wird. In den Abbildungen C.10-C.15

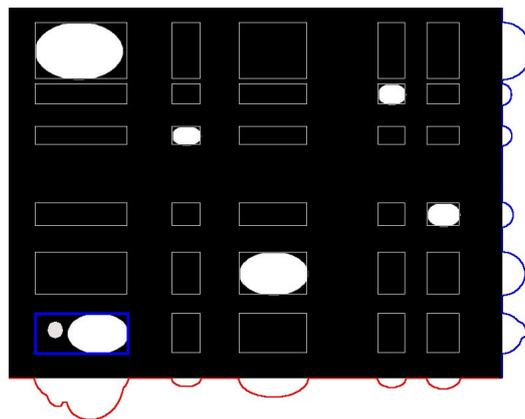
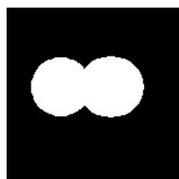
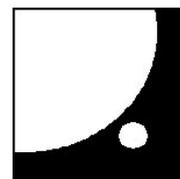


Abbildung 8.4: Resultierende Region mit zwei Prismen

sind weitere Untersuchungen zur Anwendung der lateralen Histogrammtechnik auf ausgewählte Testmuster gezeigt. Die Untersuchungen zeigten, dass dieses Verfahren geeignet ist, um Prismenregionen aus dem Bild zu extrahieren. Die Anwendung des Verfahrens unterliegt dabei den in der Abbildung 8.5 gezeigten Einschränkungen. Das in [Hof02] vor-



a) Überlappung von Prismen

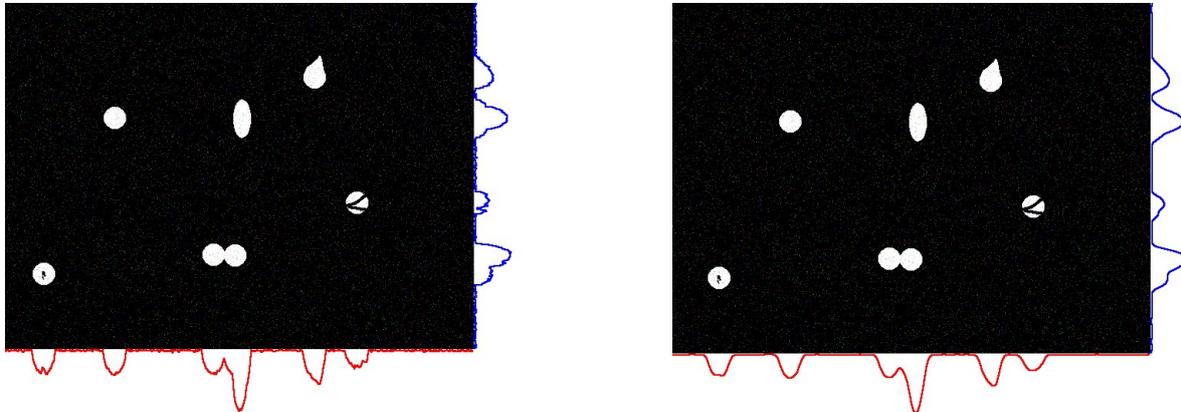


b) Überdeckung eines Prismas

Abbildung 8.5: Einschränkungen bei der Bestimmung von Prismenregionen

geschlagene Verfahren zur Erkennung von Prismenregionen benötigt zur Trennung der Prismensignale von Hintergrundrauschen einen Schwellwert. Der Wert der Schwelle ist dabei experimentell ermittelt worden und als fester Wert in der Software implementiert. Eine adaptive Anpassung an wechselnde Messbedingungen ist somit nicht möglich. Weiterhin zeigten die Untersuchungen, dass die Grenzen der gefundenen Regionen von dem Rauschen beeinflusst werden. Aus diesem Grund wurden Möglichkeiten zur Verbesserung des Verfahrens untersucht. Die Abbildung 8.6a zeigt das Bild einer Prismenanordnung, welches mit einem zufälligen Rauschanteil von 20% überlagert wurde. Der Einfluss des Bildrauschens auf die bestimmten Histogramme der Abbildung 8.6a ist deutlich erkennbar. Zur Unterdrückung des Rauschens wurden Gaußfilter (Abbildung A.8) mit verschiedenen Filterkernen untersucht. Im Anhang A.4-A.7 sind die Ergebnisse der Untersuchung

zur Rauschunterdrückung mit dem Gaußfilter für  $\sigma = 1, 2, 3$  und Filterkernen der Größe  $w = 7, 11, 15$  gezeigt. Die Untersuchungen zeigten, dass eine gute Rauschunterdrückung mit Filterkernen der Größe  $w = 11$  und  $\sigma = 2$  erreicht werden konnte. Die Abbildung 8.6b zeigt das Ergebnis der gefilterten Histogramme für das gezeigte Beispiel. Der gefilterte



a) Verrauschter Histogrammverlauf

b) Gefilterter Histogrammverlauf

Abbildung 8.6: Gaußfilterung zur Unterdrückung des Rauscheinflusses

te Histogrammverlauf der Abbildung 8.6b zeigt, dass durch die Gaußfilterung ein stetiger und glatter Kurvenverlauf erzeugt wird, der stetig differenzierbar ist. Im Abschnitt 3.3 wurde gezeigt, dass die Faltung einer diskreten Funktion mit der diskretisierten Ableitung des Gaußkerns  $G_x$  einer numerischen Differentiation entspricht. Durch die numerische Ableitung des Kurvenverlaufes im Histogramm wird die Bestimmung der Prismenregionen über

- den Anstieg der ersten Ableitung beziehungsweise
- über die Nullstelle der zweiten Ableitung möglich.

Die Abbildung 8.7 zeigt den Kurvenverlauf und die bestimmten Ableitungen durch die Faltung mit dem Gaußkern  $f(x) * G_x(x)$  und dem Differenzenquotienten  $\frac{\Delta f(x)}{\Delta x}$ .

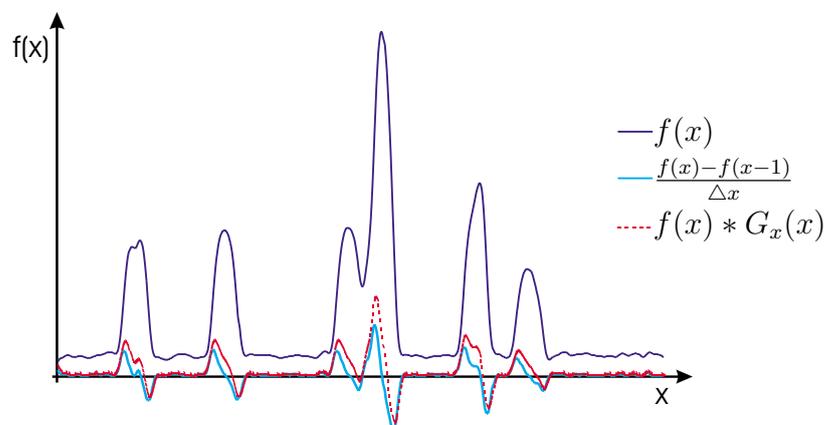


Abbildung 8.7: Bestimmung der Intervalle durch numerische Differentiation

## 8.2 Clusteranalyse

Die Clusteranalyse gehört zu den wichtigsten Methoden der Datenanalyse und Mustererkennung mit dem Ziel, Strukturen in Daten zu erkennen. Die Anwendungen reichen von der Klassifikation und Approximation bis hin zur Wissensextraktion und zur Erkennung geometrischer Muster in der Bild- und Datenverarbeitung. Neben den Algorithmen zur Clusterbildung spielen auch Methoden zur Vor- und Nachverarbeitung aus dem Kontext des Data Mining eine Rolle. Mit einer Clusteranalyse wird versucht, Merkmale in Clustern so zu gruppieren, dass die Unterschiede der Merkmale innerhalb eines Clusters möglichst gering sind. Dazu werden Ähnlichkeitskriterien eingeführt, um die Ähnlichkeit oder Distanz einzelner Merkmale berechnen zu können. Die Definition der Ähnlichkeit ist somit für die Entscheidung, welche Cluster zusammengefügt werden, von entscheidender Bedeutung und führt dazu, dass die Resultate einer Clusteranalyse stark variieren können.

Die Clusteranalyse ist auf die Problematik „Separierung von Prismenregionen“ übertragbar, indem jeder Bildpunkt als Variable  $X_i$  mit dem Merkmal der Zeilen- und Spaltenposition  $X_i = (x, y)^T$  betrachtet wird. Die Menge der Bildpunkte, die der Bedingung  $I(x, y) > T$  genügen, werden zu dem Variablenvektor  $X$  zusammengefasst.  $I(x, y)$  beschreibt die Intensität eines Bildpunktes in der Zeile  $x$  und Spalte  $y$ . Durch den Schwellwert  $T$  wird entschieden, ob der Bildpunkt zur Clusterbildung herangezogen wird. Für die Clusterbildung ist damit ein Abstandskriterium sinnvoll, welches Punkte, die dicht beieinander liegen, zu einem Cluster zusammenfasst.

Für die Untersuchung des Verhaltens von Clusteralgorithmen steht mit der „Classification Toolbox“ [GYT02] eine umfangreiche MATLAB®-Bibliothek zur Verfügung, mit der verschiedene Clusterverfahren und -kriterien untersucht werden können. Im Anhang D.1 ist die entwickelte MATLAB®-Konvertierungsroutine abgedruckt, die für die Umwandlung der Bilddaten in multivariate Daten der Clustertoolbox benötigt wird. Aus der Classification Toolbox sind die Algorithmen

- Agglomerative Clustering [GLW99]
- Distinction Sensitive Linear Vector Quantization [PFP95]
- Deterministic Annealing [Ros98]
- Linear Vector Quantization (1 Nachbarelement) [VHS02]
- Linear Vector Quantization (3 Nachbarelemente) [VHS02]
- Basic Leader-Follower Clustering [Osu02]
- Fuzzy k-Means [HKK97]
- k-Means [Bac96]
- Kohonen Self-Organizing Feature Maps [Kas97]

zur Bestimmung von Clustern herangezogen worden. Andere Algorithmen aus der Toolbox wurden hier nicht weiter betrachtet, da diese zu keinem Ergebnis oder erst nach sehr langer Zeit zu einem Ergebnis kamen. In der Tabelle 8.1 ist ein Vergleich der Rechenzeit verschiedener Clusteralgorithmen in MATLAB® dargestellt, die auf einem Pentium III

Clusterverfahren	Rechenzeit
Agglomerative clustering method	2,213 s
Deterministic annealing	1,352 s
Distinction sensitive linear vector quantization	18,036 s
Fuzzy k-means	3,53 s
k-means	1,39 s
Kohonen self-organizing feature maps	1,51 s
Basic leader-follower clustering	4,056 s
Linear vector quantization (1 Nachbar)	1,863 s
Linear vector quantization (3 Nachbarn)	2,844 s
Stepwise optimal hierarchical clustering	>10 min

Tabelle 8.1: Vergleich der Rechenzeit verschiedener Clusteralgorithmen

PC mit 1.0 GHz für das Testmuster der Abbildung C.3 ermittelt wurden.

Im Anhang C.3 sind die Ergebnisse der Untersuchung zur Anwendung der Clusteralgorithmen auf verschiedene Testmuster abgebildet. Mit dem Testbild der Abbildung C.1 konnte herausgefunden werden, dass mit den Algorithmen

- Agglomerative Clustering
- Deterministic Annealing

eine gute Näherung für die Bestimmung von Clustern aus elliptischen Mustern erreicht wird. Anhand des Testbildes der Abbildung C.2 wird eine Prismenanordnung, die im Tunnelbau oder bei der Bauswerksüberwachung auftritt, simuliert. Bei diesen Applikationen sind Situationen vorhanden, bei denen es zur Überlappung von Prismenbildern kommt. Die Abbildungen C.32 und C.33 zeigen hierbei, dass die Häufigkeit und die Verteilung der Punkte einen wesentlichen Einfluss auf die Zuordnung zu den Clustern hat. Bei sich überschneidenden Prismenbildern mit unterschiedlicher Messentfernung ist die Clusterbildung ungeeignet, da die gebildeten Cluster nicht die Strukturen abbilden. Der Einfluss von Störungen auf das Prismenbild wurde mit dem Testmuster der Abbildung C.9 untersucht. An diesem Bild konnte gezeigt werden, dass das Verfahren „Deterministic Annealing“ (Abbildung C.43) das Testmuster am Besten beschreibt. Die Testmuster der Abbildungen C.4, C.5 und C.6 dienen zur Untersuchung der Clusterbildung bei speziellen Prismenanordnungen. In den Abbildungen C.44-C.51 sind die Ergebnisse zu sehen.

Nach der Clusterbildung sind alle Variablen des Variablenvektors entsprechend dem Ähnlichkeitskriterium zusammengefasst. Durch eine spezielle Markierung, die den Punkten während des Clusterprozesses zugeordnet werden, ist festzustellen, welche Bildpunkte zu einem Cluster gehören. Die Merkmale  $(x, y)$  einer Variablen  $X_i$  eines Clusters entsprechen, abgesehen von einigen Sonderfällen (Abbildung C.20), einem Bildpunkt an der Position  $(x, y)$  im Reflektorbild. Die Verfahren aus dem Abschnitt 5.1 sind somit auf die bestimmten Cluster anwendbar.

### 8.3 Houghtransformation

Die Houghtransformation wurde 1962 von Paul Hough [Hou62] vorgestellt und für die Mustererkennung zu Beginn der 80er Jahre in Form der diskreten Houghtransformation angewandt. Seit dem hat sich die Houghtransformation in einer Vielzahl von Anwendungen in der Bildverarbeitung etabliert und stellt eine robuste Methode zur Erkennung von Objekten dar, die mit einer Parameterform beschrieben werden können.

Für die Bestimmung der Parameter von elliptischen Regionen ist in [Dav97] die Methode der konjugierten Tangenten vorgestellt worden. Aufgrund der Komplexität dieser Methode, die zur Bestimmung der Ellipsenparameter ein sechs-dimensionales Parameterfeld benötigt, wurden die Untersuchungen zunächst an kreisförmigen Strukturen mit der allgemeinen Houghtransformation durchgeführt. Eine Anwendung der Houghtransformation für die Erkennung von Münzen mit einer kreisförmigen Kontur ist in [Rho02] zu finden. Die Beschreibung eines Kreises erfolgt hier in parametrischer Form über den Mittelpunkt  $(x_m, y_m)$  und den Radius  $r$  durch die Gleichung 8.4.

$$\begin{aligned} x &= x_m + r \cos(\phi) \\ y &= y_m + r \sin(\phi) \quad 0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ \end{aligned} \quad (8.4)$$

Für die Bestimmung eines Kreises  $(x_m, y_m, r)$  einer gegebenen Punktmenge  $P$  aus dem Umfang des Kreises wird hier die Eigenschaft ausgenutzt, dass durch die Punkte  $p_i \in P$  ein Kreis  $(x_i, y_i, r)$  gezeichnet werden kann, der durch den Mittelpunkt  $(x_m, y_m)$  des Ursprungskreises verläuft.

$$\begin{aligned} x_m &= x_i - r \cos(\phi) \\ y_m &= y_i - r \sin(\phi) \quad 0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ \quad r_{min} \leq r \leq r_{max} \end{aligned} \quad (8.5)$$

In der Abbildung 8.8 wird der Zusammenhang zwischen den Gleichungen 8.4 und 8.5 verdeutlicht. Entsprechend der Gleichung 8.5 beschreibt die Houghtransformation für

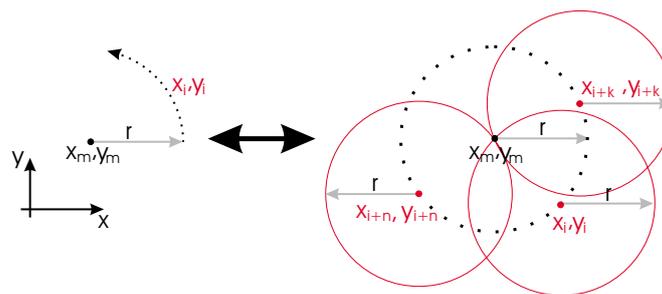


Abbildung 8.8: Prinzip der Houghtransformation am Beispiel eines Konturkreises

einen Kreis einen dreidimensionalen Parameterraum  $(x, y, r)$ . Für jeden Punkt  $p_i \in P$  wird nun der Radius im Bereich  $r_{min} \leq r \leq r_{max}$  variiert und im Akkumulatorfeld für jeden Punkt des Kreises der Wert inkrementiert. Die Suche nach einem Kreis wird entsprechend Gleichung 7.9 auf die Suche eines Maximums im Akkumulatorfeld zurückgeführt. Die Erkennung mehrerer Kreise im Akkumulatorfeld erfolgt, wie im Abschnitt 7.1.2 beschrieben, durch die Suche mehrerer lokaler Maxima. Bei der Anwendung der allgemeinen Houghtransformation kann neben dem Konturpunktumfeld für Kreise auch ein gefülltes

Kreismuster angewendet werden. Diese spezielle Musterform hat den Vorteil, dass mehrere Punkte zur Beschreibung des Kreises zur Verfügung stehen und damit die Erkennungseigenschaften des Algorithmus gegenüber Störungen verbessert werden. In der Abbildung 8.9 ist das Verfahren der Houghtransformation für ein gefülltes Kreismuster dargestellt.

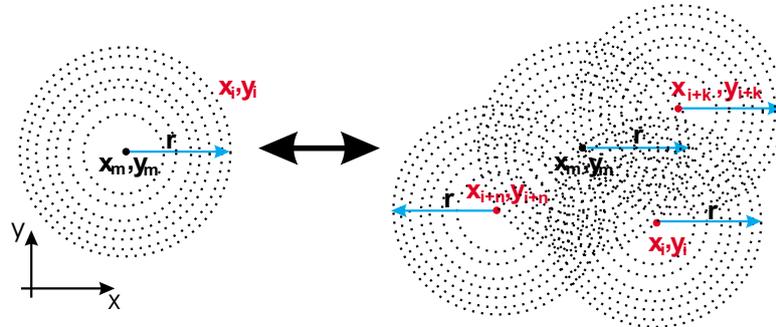


Abbildung 8.9: Prinzip der Houghtransformation am Beispiel eines Vollkreises

In [Ski02] wurden für die Anwendung der Houghtransformation für Geraden bereits einige Einschränkungen genannt, die durch die Untersuchungen für die Erkennung von kreisförmigen Prismenstrukturen in ähnlicher Form bestimmt werden konnten. „Die Quantisierung des Houghraumes hängt sehr mit der Qualität der Houghtransformation zusammen. Ist diese zu fein, ist das Verfahren fehleranfällig für Störungen. [Ski02]“ Aus diesem Grund wurde für die Houghtransformation eines Kreises der Pixelabstand  $\Delta x = \Delta y = 1$  als kleinste Schrittweite für den Radius  $r = 1$  gewählt. Dieses Rastermaß wurde bei der Implementierung der Kreistransformation durch den Algorithmus von Bresenham [MK02] berücksichtigt. Für die Untersuchungen zur Extraktion kreisförmiger Regionen wurden Teststrukturen (Abbildung 8.10) mit Radien  $r = 7, 10, 12, 17, 22$  generiert, denen verschiedene zufällige Rauschanteile (Abbildung 8.11) zugefügt wurden.

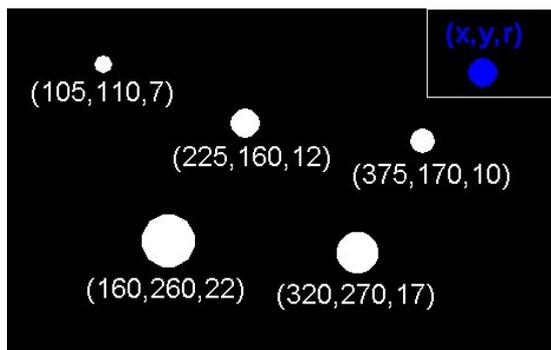


Abbildung 8.10: Kreisstrukturen

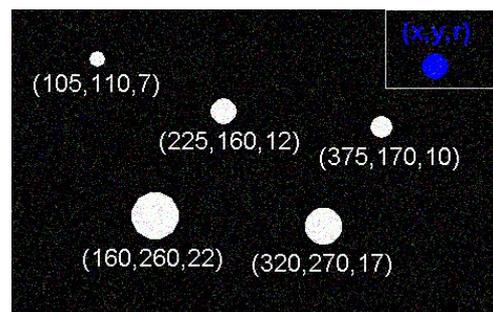


Abbildung 8.11: Kreisstrukturen mit 20% Rauschanteil

Die Ergebnisse der Suche von kreisförmigen Mustern mit der Houghtransformation entsprechend der Abbildung 8.8 sind in den Tabellen A.1 und A.2 für Randpunkte kreisförmiger Strukturen und für alle Punkte der Kreisstrukturen in den Tabellen A.3 und A.4 abgebildet. Die Anwendung des Prinzips aus der Abbildung 8.9 zeigen die Tabellen A.5 und A.6. Die gezeigten Ergebnisse verdeutlichen, dass die Suche von kreisförmigen Strukturen mit dem Vollkreismuster auch bei dem Vorhandensein von Rauschen am Besten

gelingt. Durch die Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass nur für Schrittweiten von  $\Delta r = 1$  Pixel die Lokalisierung eines Maximums mit der Bedingung  $Val(x, y, r) = 8$  im Akkumulatorraum für verschiedene Radienwerte sicher gelingt. Die Tabelle A.5 zeigt die gefundenen Kreise für die Parametrisierung mit einer Radienschrittweite  $\Delta r = 2$  Pixel. Aus den rücktransformierten Maxima wird ersichtlich, dass der Kreis mit den Parametern  $(x_m = 320, y_m = 270, r = 17)$  nicht gefunden wurde. Die Ursache hierfür liegt in der Quantisierung des Akkumulatorfeldes, welches für die Radien  $r = 14, 16, 18$  kein eindeutiges Maximum abbildet. In den Tabellen 8.2a-c sind die Ausschnitte des Akkumulatorfeldes für die entsprechenden Radienwerte dargestellt. Die Akkumulatorwerte bilden eine typische plateauartige Struktur, die bei zu großen Schrittweiten und verrauschten Konturen zu beobachten ist. Die Tabellen 8.3a-c zeigen die Akkumulatorfelder für den Parameter  $r$  im

241	246	249	251	249	246	241
248	253	255	255	255	253	248
253	255	255	255	255	255	253
255	255	<b>255</b>	<b>255</b>	<b>255</b>	255	255
255	255	<b>255</b>	<b>255</b>	<b>255</b>	255	255
255	255	<b>255</b>	<b>255</b>	<b>255</b>	255	255
253	255	255	255	255	255	253
248	253	255	255	255	253	248
241	246	249	250	249	246	241

a) Radius  $r = 14$

242	248	250	248	242
248	254	<b>255</b>	254	248
250	<b>255</b>	<b>255</b>	<b>255</b>	250
248	254	<b>255</b>	254	248
242	248	249	248	242
235	239	241	239	235

b) Radius  $r = 16$

223	224	223
229	<b>232</b>	229
231	<b>232</b>	231
229	231	229
223	224	223

c) Radius  $r = 18$

Tabelle 8.2: Akkumulatorfeld für den Kreis  $(320, 270, 17)$  mit  $\Delta r = 2$  Pixel

Intervall  $2 \leq r \leq 25$  und einer Schrittweite von  $\Delta r = 1$  Pixel. Für diese Parametrisierung kann das Maximum bei  $r = 17$  Pixel eindeutig bestimmt werden (Tabelle 8.3b). Das Ver-

254	248	240
<b>255</b>	<b>255</b>	250
254	<b>255</b>	254
242	248	249

a) Radius  $r = 16$

244	248	244
248	<b>255</b>	248
244	248	244

b) Radius  $r = 17$

223	224	223
229	<b>232</b>	229
231	<b>232</b>	231
229	231	229

c) Radius  $r = 18$

Tabelle 8.3: Akkumulatorfeld für den Kreis  $(320, 270, 17)$  mit  $\Delta r = 1$  Pixel

halten der Houghtransformation unter dem Einfluss von zufälligem Rauschen zeigen die Tabellen A.7 und A.8. Die Untersuchungen zeigen, dass durch die zufällige Verteilung der Punkte die Struktur weitestgehend unbeeinflusst bleibt und somit das Akkumulatorfeld nur geringe Änderungen (Tabelle 8.4) aufweist. In [Hof02] sind weiterführende Untersuchungen zum Einfluss von zufälligem Rauschen bei variabler Kreispunkanzahl zu finden.

254	<b>255</b>	254
<b>255</b>	<b>255</b>	<b>255</b>
254	<b>255</b>	254
248	249	248

a) Radius  $r = 16$

244	248	244
248	<b>255</b>	248
244	248	244

b) Radius  $r = 17$

223	224	223
229	<b>232</b>	229
231	<b>232</b>	231
229	231	229

c) Radius  $r = 18$

Tabelle 8.4: Akkumulatorfeld für den Kreis  $(320, 270, 17)$  mit 20% zufälligem Rauschen

Die Untersuchungen zur Anwendung der allgemeinen Houghtransformation für kreisförmige Muster zeigen, dass eine Lokalisierung der Bildstrukturen mit dem gefüllten Kreis-

muster eine höhere Sicherheit der Erkennung gewährleistet. Dies gilt insbesondere für die Erkennung von Bildstrukturen mit verschiedenen Radien. Für elliptische Strukturen wird das Verfahren der konjugierten Tangenten [Dav97] vergleichbare Ergebnisse zeigen, wie die Houghtransformation mit einem Konturkreismuster.

In den Abbildungen C.52-C.54 wird gezeigt, dass die Houghtransformation eine Erkennung überlappender und gestörter Kreisstrukturen ermöglicht. Für Anwendungen im Tunnelbau ist diese Form der Separierung von Prismengebieten am Besten geeignet.

## 8.4 Weitere Verfahren zur Detektion mehrerer Ziele

### Compound components

In [Dav97] ist zur Aufzählung und Klassifizierung von Bildpunkten einer zusammenhängenden Bildstruktur die Komponentenanalyse (engl. compound components) beschrieben. Die Anwendung dieses Verfahrens für die Lokalisierung und Zählung von Prismenregionen ist im Anhang (Abbildungen C.55-C.60) gezeigt. Das Verfahren ist für die Klassifizierung zusammenhängender Pixel im Binärbild gut geeignet. Untersuchungen an Testbildern mit zufälligen Rauschteilen und gestörten Strukturen zeigten jedoch, dass dieser Algorithmus nur in Kombination mit anderen Verfahren zur Bestimmung von Prismenregionen eingesetzt werden könnte.

### Distance analysis

In der Formanalyse von Objekten wird häufig die Methode der Abstandsbestimmung von Pixeln eines Objektes zum Hintergrund [Dav97] angewandt. Bei der Abstandsbestimmung wird zunächst den Bildpunkten, deren Intensität einer festgelegten Hintergrundintensität entspricht, der Wert „0“ zugewiesen. Bildpunkte, deren Intensität nicht der Hintergrundintensität entsprechen und an einen Hintergrundpixel grenzen, erhalten den Wert „1“. Weiter im Strukturinneren liegende Bildpunkte bekommen dann die Werte „2“, „3“ und so weiter zugewiesen. Im Gegensatz zu der L1 Abstandsfunktion wird der L2 Abstand durch den euklidischen Abstand bestimmt. Die Abbildung 8.12 zeigt die L2 Abstandsberechnung am Beispiel einer Kreisfläche. Durch die Abstandsbestimmung wird eine Bildstruktur mit

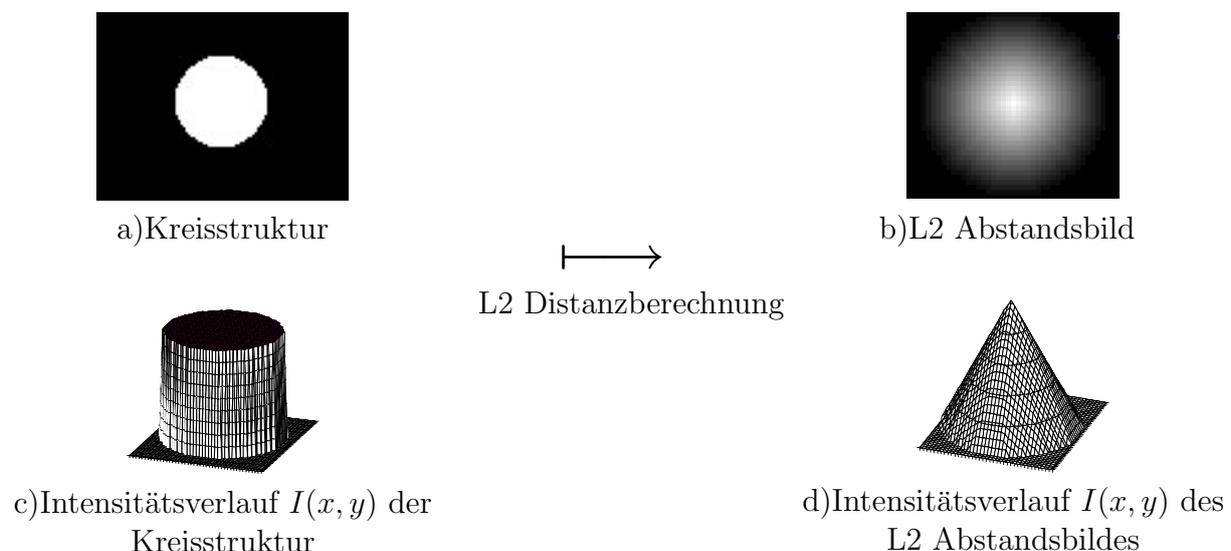


Abbildung 8.12: L2 Abstandsberechnung am Beispiel einer Kreisstruktur

gleicher Intensität durch die Anwendung der L2 Abstandsfunktion zu einem kegelförmigen Intensitätsverlauf umgewandelt. Sind mehrere Prismenstrukturen im Bild enthalten, dann ist mit dem Kriterium des kleinsten Abstandes  $d_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$  zwischen zwei Intensitätsmaxima ( $p_i = (x_i, y_i), p_j = (x_j, y_j)$ ) eine Kreisregion mit dem Radius  $r = \frac{d}{2}$  bestimmbar. Die Abbildungen C.61-C.72 zeigen weitere Ergebnisse für die Anwendung der

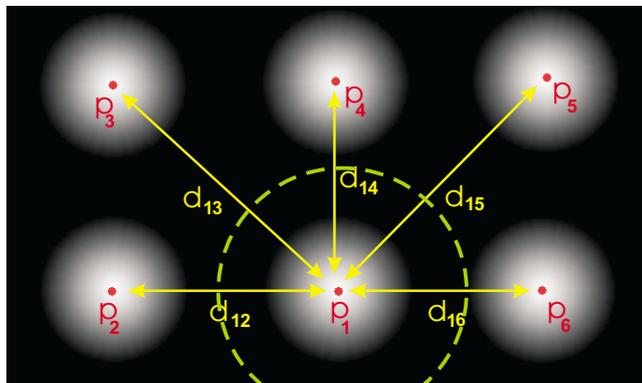


Abbildung 8.13: Bestimmung von Prismenregionen aus dem Maximum des L2 Abstandes

Abstandsbestimmung. Die Anwendung des Verfahrens ist für überlappende (Abbildung C.67), gestörte (Abbildung C.69) und stark elliptisch verformte Strukturen nicht geeignet. Anhand der Abbildung C.71 ist zu erkennen, dass durch den L2 Algorithmus zufälliges Rauschen unterdrückt werden kann.

## Template matching

Eine weitere Möglichkeit zur Lokalisierung von Mustern in einem Videobild ist durch die Methode des Template Matching gegeben. Die Grundlage dieses Verfahrens ist der Vergleich eines Musters auf Übereinstimmung mit allen anderen Bilddetails. Der Grad der Übereinstimmung ist mit einem benutzerdefinierten Schwellwert beeinflussbar. Ist das Vergleichsergebnis größer als die festgelegte Schwelle, so wird der überprüfte Bildbereich als Kopie der Vorlage definiert. Das Programmpaket „HALCON [MVT00]“ ermöglicht die Anwendung einer Template Matching Routine auf der Basis der mittleren quadratischen Abweichung zwischen der Vorlage und dem zu untersuchenden Bild. Das im Abschnitt D.8 gezeigte Programm kann dazu verwendet werden, ein Bild auf das Vorhandensein eines definierten Templates zu testen. Die Untersuchungen zur Lokalisierung von Prismenstrukturen mit dem zugrunde liegenden normierten Kreuzkorrelationsverfahren sind in den Abbildungen C.73-C.81 gezeigt.

Die Performance von Matching-Verfahren ist im Gegensatz zur Houghtransformation von der Größe der Vorlage und des Bildes abhängig. Die Anzahl der im Muster enthaltenden strukturbeschreibenden Bildpunkte ist für das Matching-Verfahren nicht ausschlaggebend. Aus diesem Grund ist eine hohe Zahl von Probiervorgängen notwendig, um ein Muster auf Übereinstimmung zu überprüfen. In der Abbildung C.73 ist das Ergebnis eines Mustervergleiches mit unterschiedlich großen Strukturen zu sehen. Das Muster ist in der Abbildung durch die blaue Markierung gekennzeichnet und wurde so gewählt, dass nur ein Teil der vorhandenen Struktur beschrieben wird. Aufgrund der unvollständigen Beschreibung des Musters sind mehrere Übereinstimmungen an verschiedenen Bildstrukturen gefunden worden. Die Auswahl eines größeren Bereiches (Abbildung

C.74), welcher die Struktur und Teile des Hintergrundes umfasst, reduzierte die Anzahl der Übereinstimmungen bei gleichem Schwellwert. Das Beispiel zeigt, dass die Auswahl der Muster und des Schwellwertes die Qualität des Matching-Prozesses stark beeinflussen können. Die Untersuchungen zeigten weiterhin, dass die Erkennung von Objekten mit variabler Größe und Abweichungen vom Muster nur mit einem niedrigeren Toleranzwert möglich war. Dies hatte jedoch zur Folge, dass zusätzliche Übereinstimmungen gefunden wurden.

## 8.5 Auswertung und Vergleich der Verfahren

Die Untersuchung von Bildverarbeitungsverfahren und -methoden zur automatischen Lokalisierung kooperativer Zielregionen zeigte, dass keines dieser Verfahren unter allen denkbaren Situationen geodätischer Messungen anwendbar ist. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, die Anwendung der Verfahren für bestimmte Messapplikationen zu betrachten. Für eine Anwendung in der Ingenieurvermessung, wie zum Beispiel der Bauwerksüberwachung, bei der die Entfernungen einzelner Messpunkte untereinander nicht so stark differieren, wird die optische Abbildung der Zielmarken keine wesentlichen Unterschiede in der Größe der abgebildeten Struktur zeigen. Die Abbildung 8.14a zeigt hierzu eine Prismenanordnung, die mit einer am Fernrohrsehfeld des Tachymeters adaptierten analogen Kamera aufgenommen wurde. Die Bildaufnahme erfolgte mit einem Tachymeter der Elta<sup>®</sup>S10-Serie der Firma ZSP Geodätische Systeme GmbH, bei dem der Infrarot-Laser durch einen sichtbaren Laser ersetzt wurde. Für eine worst-case-Simulation wurde weiterhin die Bildrate auf 12 Bilder pro Sekunde reduziert. Es ist erkennbar, dass durch

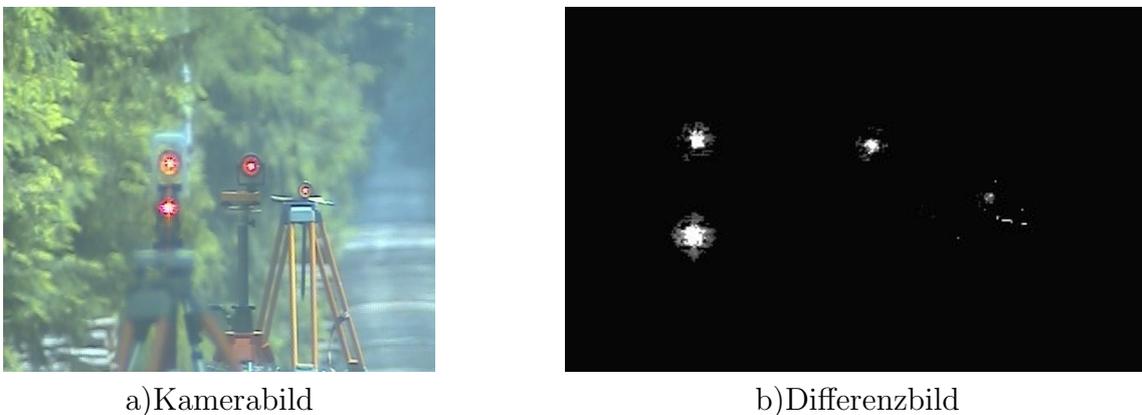


Abbildung 8.14: Reale Messszene mit mehreren Prismen

die unscharfe Abbildung der Objekte in unterschiedlicher Entfernung zum Messgerät und durch die Luftverwirbelungen der Atmosphäre eine Verzerrung des Prismenbildes zu beobachten ist. Durch die Untersuchung des Verhaltens der Algorithmen (Tabelle 8.5) bei der Simulation verschiedener Messsituationen konnte gezeigt werden, dass die Verfahren

- laterale Histogrammtechnik,
- Clusteranalyse und
- Houghtransformation

zur Bestimmung der Prismenregion bei verzerrten und gestörten Prismenstrukturen (Abbildung 8.14b) anwendbar sind. Die Abbildungen 8.15-8.17 zeigen die gefundenen Regionen der Algorithmen. Die laterale Histogrammtechnik und die Clusteranalyse konnten drei der vier Prismenregionen bestimmen. Die vierte Struktur hat nur eine geringe Ausprägung im Histogramm und wird durch eine implementierte Rauschunterdrückung in den beiden Histogrammen ausgeblendet. Die Houghtransformation zeigt aufgrund des unregelmäßigen Musters erwartungsgemäß mehrere Lösungen für eine Prismenregion.

Die worst-case-Betrachtung der genannten Verfahren für die Anwendung in der Ingenieurvermessung und Bauwerksüberwachung zeigte, dass unter „normalen“ geodätischen Messbedingungen die laterale Histogrammtechnik ein Verfahren darstellt, das eine sehr hohe Messfrequenz und automatische Zielpunktfindung ermöglicht.

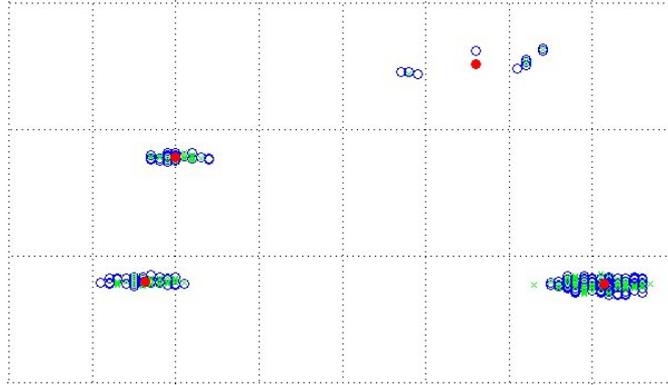


Abbildung 8.15: Anwendung der Clusteranalyse zur Lokalisierung von Prismenregionen in einer realen Prismenanordnung

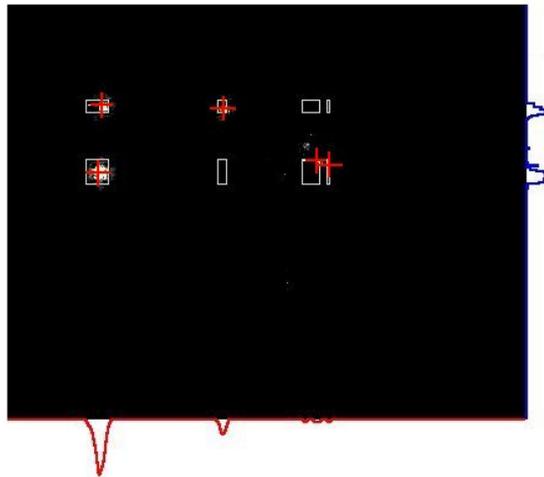


Abbildung 8.16: Anwendung der lateralen Histogrammtechnik zur Bestimmung der Prismenregionen in einer realen Prismenanordnung

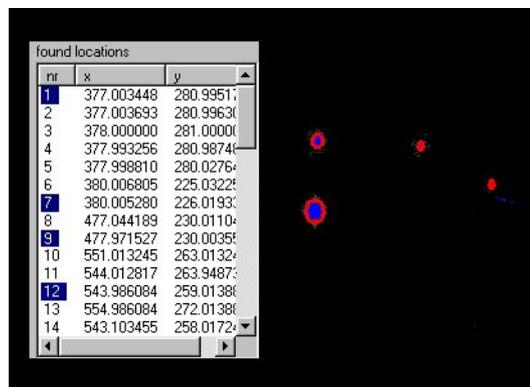


Abbildung 8.17: Anwendung der Houghtransformation zur Bestimmung der Prismenregionen in einer realen Prismenanordnung

Verfahren	Vorteile	Nachteile	Verbesserungen
laterale Histogrammtechnik	sehr geringe Rechenzeit	rauschempfindlich, keine Überlappung	Rauschunterdrückung, Gaußsche-Ableitung
Clusteranalyse	geringe Rechenzeit, unabhängig von Spotgröße	rauschempfindlich, keine Überlappung	Rauschunterdrückung
Komponentenanalyse	geringe Rechenzeit, unabhängig von Spotgröße	rauschempfindlich, keine Überlappung, zusammenhängende Blöcke	Rauschunterdrückung, Erosion/Dilatation
L1 Abstand	geringe Rechenzeit, geringe Rauschempfindlichkeit, Spotgröße bestimmbar	mehrdeutige Zielmuster	
L2 Abstand	geringe Rechenzeit, geringe Rauschempfindlichkeit, Spotgröße bestimmbar, Reduzierung der Zielparаметer	kein eindeutiges Maximum	
Houghtransformation	geringe Rauschempfindlichkeit, Spotgröße bestimmbar, sehr robust, Reduzierung der Zielparаметer	sehr lange Rechenzeit, sehr hoher Speicherbedarf	Reduzierung der Punkanzahl
Korrelation	Spotgröße bestimmbar	Mehrdeutigkeiten bei unterschiedlichen Spotgrößen, große Rauschempfindlichkeit, großer Mustervorrat, hoher Rechenaufwand, hoher Speicherbedarf, keine Überlappung	

Tabelle 8.5: Vergleich von ausgewählten Verfahren zur Regionenbildung

# Kapitel 9

## Untersuchung der Anzielunsicherheit für kooperative Zielmarken

Für die Lokalisierung und Bestimmung des Anzielpunktes einer signalisierten kooperativen Zielmarke, deren abgebildete Strukturgröße variabel ist, wurde in dieser Arbeit ein kombiniertes Verfahren vorgeschlagen, welches in der Lage ist, den Ausdehnungsbereich und die Position einer Zielmarke im Videobild durch Analyse des vorliegenden Intensitätsverlaufes automatisch zu bestimmen. Durch das im Abschnitt 8 ausgewählte Verfahren der lateralen Histogrammtechnik werden zunächst Bildbereiche (AOI) mit nur einer enthaltenen Prismenstruktur<sup>1</sup> vom Hintergrund des Bildes separiert. In diesen ermittelten AOI's sollen weitere hier untersuchte Verfahren zur Bestimmung der subpixelgenauen Position einer Zielmarke zum Einsatz kommen.

In den Abschnitten 3.2 und 5.1 wurden aus der Literatur bekannte Bildverarbeitungsverfahren ausgewählt, die für die Bestimmung der subpixelgenauen Position eines signalisierten kooperativen Messpunktes einsetzbar sind. Die Vorauswahl der Verfahren erfolgte zunächst anhand der in der Literatur beschriebenen Eigenschaften und der abgeschätzten Komplexität des Algorithmus. Im Folgenden wird für die Auswahl eines Verfahrens, das in Verbindung mit der automatischen Lokalisierung des Messfensters eingesetzt werden soll, die Unsicherheit der zu bestimmenden Position der Zielmarke untersucht.

Das Schwerpunktverfahren wurde bereits in [FN96] und [Wei90] zur subpixelgenauen Bestimmung von speziellen eindimensionalen Intensitätsverteilungen untersucht. Die Betrachtungen in [FN96] zeigten für den eindimensionalen Intensitätsverlauf, dass mit größer werdender Stützstellenanzahl die Bestimmung des Intensitätsmaximums mit dem Schwerpunktverfahren eine geringere Anfälligkeit gegenüber Störungen aufweist. Dies wurde in experimentellen Untersuchungen an einem exponentiellen Intensitätsverlauf für kleine Strukturen mit den Verfahren „CoM3, CoM5 und CoM7 [FN96]“ nachgewiesen. Für zu große Integrationsgrenzen ist in [Wei90] gezeigt worden, dass die Randpixel aufgrund kleiner Signalwerte die Rauschempfindlichkeit des Verfahrens erhöhen. Eine weitere Anwendung des Schwerpunktverfahrens ist in [Luh00] für die Auswertung photogrammetrischer Zielmarken beschrieben und eine Möglichkeit zur Ermittlung der theoretischen Genauigkeit des Schwerpunktverfahrens für eine zweidimensionale Punkteverteilung vorgestellt. Auf der Grundlage der Gleichungen 3.2 und 3.3, die auf der Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes [Maa92] beruhen, ist die theoretische Standardabweichung für das Schwerpunktverfahren bei gegebenem Pixelrauschen, Punktdurchmesser und Grau-

---

<sup>1</sup>Dies gilt für die im Abschnitt 8.5 getroffenen Einschränkungen für eine reale Prismenanordnung.

wertverlauf bestimmbar. In der Praxis erreichbare Unsicherheiten wurden in [Luh00] mit 0,03-0,05 Pixel für das Schwerpunktverfahren angegeben.

Mit der analytischen Beschreibung der automatischen Anzielung kooperativer Zielmarken wurde im Abschnitt 5.1 gezeigt, dass diese auf den Schwerpunkt beziehungsweise auf die Bestimmung des Mittelwertes einer Struktur zurückgeführt werden kann. Somit zeigt sich, dass das Schwerpunktverfahren und die Bestimmung des Mittelwertes einer Struktur für die objektivierte Anzielung einer geodätischen Zielmarke anwendbar ist.

Für die Bestimmung der Parameter von Ellipsen werden in der Koordinatenmesstechnik Approximationsverfahren eingesetzt, mit denen der Mittelpunkt und die Halbachsen aus angetasteten Konturpunkten berechnet werden können. Die Bestimmung der Konturdaten erfolgt anwendungsbedingt auf verschiedene Weise, wie zum Beispiel mit den in [Luh00] gezeigten Operatoren oder mit Verfahren der Konturverfolgung.

Ein weiterer sehr interessanter Ansatz wird durch die Betrachtung der lokalen Eigenschaften einer Fläche, die durch ein Polynom  $f(x, y)$  zweiter Ordnung beziehungsweise durch einen Tayloransatz  $T_2$  beschrieben wird, ermöglicht. In [Ste98] und [vdBD01] wurde gezeigt, dass dieses Verfahren gleichermaßen für die Suche und die Positionsbestimmung von Mustern im Videobild genutzt werden kann. Die Verfahren zur Bestimmung

- des Mittelwertes einer Struktur (Gleichungen 5.15, 5.16),
- des Schwerpunktes (Gleichungen 5.10, 5.11),
- der lokalen Eigenschaften (Gleichung 5.23) und
- der Approximation von Ellipsen ([LBF<sup>+</sup>99], [Lud95], Abbildung 3.11)

sind somit für die Anzielung von signalisierten Punkten anwendbar. In den weiteren Betrachtungen wird anhand von Simulationen und Experimenten die erreichbare Anzielunsicherheit dieser Verfahren quantisiert und eine Entscheidung für ein optimales Verfahren getroffen. Aufgrund der Abhängigkeit des lokalisierten AOI und der bestimmten subpixelgenauen Anzielposition vom Intensitätsverlauf der abgebildeten Struktur werden die nachfolgenden Untersuchungen zur Unsicherheit der Lokalisierung und Bestimmung der Prismenposition für das kombinierte Verfahren durchgeführt.

In [Küh97] sind die Ursachen für Messabweichungen optischer Koordinatenmesssysteme sowie die für die Definition von Kenngrößen und Verfahren zur Überwachung von Genauigkeitsangaben gültigen Normen und Richtlinien zusammengefasst. Unter der Voraussetzung, dass grobe Messabweichungen ausgeschlossen werden können, ist die Messunsicherheit eines Messsystems auf systematische und zufällige Messabweichungen zurückzuführen. Die Unsicherheit der Positionsbestimmung setzt sich zusammen aus der Summe der systematischen und zufälligen Komponenten eines Systems. In [Küh97] ist weiterhin der Wirkungsort für systematische und zufällige Messabweichungen bei optischen Koordinatenmesssystemen gezeigt. Für die Auswahl eines optimalen Verfahrens beschränken sich die Untersuchungen in der vorgelegten Arbeit auf Unsicherheiten, die durch das Bildaufnahme- und Bildverarbeitungssystem bei der Messwerterfassung entstehen. Die systematische Abweichung in der Messwerterfassung wird in erster Linie durch Ungenauigkeiten des Auswertalgorithmus bei verschiedenen Größen und Positionen des Zielmusters beschrieben. Die bei der numerischen Lösung durch Vereinfachung entstehenden Abweichungen zwischen dem Original und dem Modell bezeichnet man als systematischen Verfahrensfehler. Es ist nicht möglich, die Einhaltung einer vorgegebenen Fehlertoleranz garantieren zu können, ohne den Verfahrensfehler (Modellfehler) zu kennen. Zur Quantisierung der Abweichungen, die durch den Auswertalgorithmus entstehen, wurde ein

definiertes Spotmodell (Abschnitt 5.3) erstellt, durch das eine Zielmarke mit definierter Größe und Intensität an einer vorgegebenen Position im Videobild erzeugt werden kann. Damit sind für die verschiedenen Auswerteverfahren die gleichen Bedingungen geschaffen, wodurch ein Algorithmenvergleich bei vorgegebener Sollposition und ermittelter Istposition möglich wird.

Für die Untersuchung praxisnaher Verhältnisse wurde das Intensitätssignal der Zielmarke mit Rauschen überlagert. Diese zufälligen Einflüsse auf das Intensitätssignal, die das Rauschen des Sensorsignals und Signalinstabilitäten simulieren sollen, sind im erweiterten Spotmodell (Gleichung 9.1) durch die normalverteilte Rauschkomponente [Sch90]  $\beta(\mu, \sigma)$  berücksichtigt.

$$f(x, y) = \frac{V}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{(x-x_v)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_v)^2}{2\sigma_y^2}} + \beta(\mu_R, \sigma_R) \quad (9.1)$$

Der normalverteilte Rauschanteil  $\beta(\mu_R, \sigma_R)$  kann durch den Mittelwert  $\mu_R$  und die Standardabweichung  $\sigma_R$  beeinflusst werden. Für die Untersuchungen wurde  $\mu_R = 0$  und  $\sigma_R = 1$  gewählt, wodurch eine Intensitätsänderung von  $\pm 3\sigma$  bezogen auf die Maximalamplitude von 255 Intensitätswerten<sup>2</sup> erreicht wurde. Die maximale vektorielle Positionsabweichung  $\Delta P_m$  (Gleichung 9.2) eines idealen Messsignals sowie der maximale Mittelwert und die maximale Standardabweichung von  $\Delta P_m$ , einer mit Rauschen überlagerten Signalquelle sollen zur Quantisierung der systematischen und zufälligen Fehleranteile verwendet werden und bilden somit die Kriterien für die Auswahl eines optimalen Verfahrens.

$$\Delta P_m = \max |P_{mIst} - P_{mSoll}| = \max \left| \begin{pmatrix} x_{mIst} \\ y_{mIst} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_{mSoll} \\ y_{mSoll} \end{pmatrix} \right| \quad (9.2)$$

## 9.1 Anzielunsicherheit im Binärbild

Die Bestimmung des Anzielpunktes im Binärbild erfolgt auf der Grundlage des im Abschnitt 5.1.2 beschriebenen Ansatzes. Im Anhang D.4 ist die Umsetzung der Gleichungen 5.15 und 5.16 durch den abgedruckten Programmauszug in der Programmiersprache C++ gezeigt. Die Binärmustererzeugung aus dem Intensitätsbild eines signalisierten Punktes erfolgt durch den Schwellwert  $S$ , der im Quelltext mit „Threshold“ bezeichnet wurde. Die Binarisierung erfolgt, indem nur die Bildpunkte  $B[x, y]$  mit einer Intensität  $I(x, y) > S$  in die Berechnung des Mittelwertes einbezogen werden. Der Intensitätswert  $I(x, y)$  hat für die weitere Berechnung keine Bedeutung. Im Gegensatz zu realen Spotbildern, bei denen, wie im Abschnitt 5.4 beschrieben wurde, das Intensitätsbild durch Hintergrundrauschen und Bewegungsunschärfen beeinflusst ist, wurde für das synthetisch erzeugte Prismenbild ein Schwellwert  $S = 0$  angesetzt. Damit ist für die Bestimmung der systematischen Abweichungen bei einem symmetrischen Spotbild die gleiche Punktanzahl bei verschiedenen Verschiebungen  $x_v$  verfügbar. Die Abbildung 9.1 zeigt, wie sich die Punktanzahl zur Bestimmung des Mittelwertes bei einem Schwellwert von  $S = 0,45$  für  $x_v = 0,0$  und  $x_v = 0,3$  ändert. In dem gezeigten Beispiel wird durch die Änderung der Strukturbreite in dem diskreten Bildraster mit der Rasterschrittweite  $\Delta x = 1$  eine Abweichung der Strukturlage von 0,5 Pixel hervorgerufen<sup>3</sup>. Für die Auswertung realer Bilddaten mit

---

<sup>2</sup>entspricht einer 8 Bit Analog-/Digitalumsetzung des Videosignals

<sup>3</sup>Im Allgemeinen gilt für geschlossene Strukturen:  $\frac{1}{2} \Delta x$

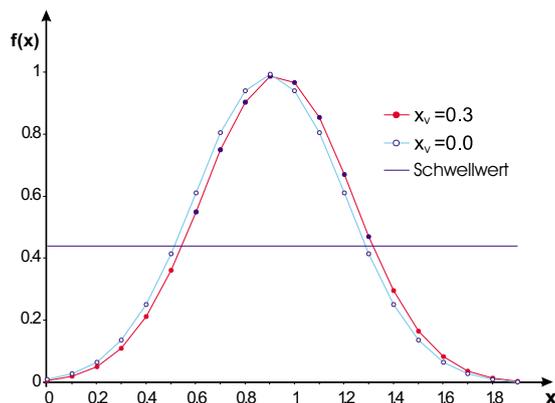


Abbildung 9.1: Einfluss des Schwellwertes auf die Binarisierung

einem Schwellwert  $S > 0$  ist diese systematische Abweichung zu berücksichtigen. Für die Ermittlung der systematischen Abweichungen durch den Auswertalgorithmus und zur Untersuchung des Rauscheinflusses auf die Anzielunsicherheit wurden verschiedene Spotgrößen mit  $\sigma_x = \sigma_y = 4, 6, 8, 10, 20$  untersucht. Die berechnete Leuchtstruktur wurde hierzu mit einer Subpixelverschiebung  $x_v = 0, 0,1, \dots, 1,9$  Pixel berechnet und die resultierende Bildmaske (Tabelle 5.3) an der Position  $x = 400, y = 300$  im Bild plazierte. Mit dem im Abschnitt 8 ausgewählten Verfahren der lateralen Histogrammtechnik zur Lokalisierung des Bildbereiches eines Spots wird zunächst ein rechteckiger Bildbereich  $B[x_e - x_s, y_e - y_s]$  bestimmt, in welchem die Berechnung des Mittelpunktes der Struktur aus den Bildpunkten  $B[x, y] > S$  erfolgt. Die Abbildung B.1 zeigt die Positionsabweichung  $\Delta x$  für ein Spotmodell der Größe  $\sigma_x = \sigma_y = 10$  bei verschiedenen Aussteuerungen  $V$  des Bildsensors. Es ist erkennbar, dass mit größerem Verstärkungsfaktor  $V$  in Gleichung 5.27 der systematische Fehler verringert wird. Dies ist darin begründet, dass die Struktur bei steigenden Werten  $V$  größer wird und somit mehr Pixel in die Berechnung einfließen. Eine Ausnahme bildet jedoch der Spot bei einer Verstärkung  $V = 300$ . Die Positionsabweichung zeigt hier deutlich Sprünge in der Höhe einer halben Rasterschrittweite von 0,05 Pixel. Die Sprünge im gezeigten Verlauf sind auf die beschriebene Problematik einer nicht konstanten Punktzahl zurückzuführen, die hier durch Rundungsfehler in der Berechnung der Bildmaske des Spots entstanden sind. Die Abbildung 9.2 zeigt zusammenfassend die Maximalwerte des systematischen Fehlers in Abhängigkeit der Spotgröße für verschiedene Verstärkungsfaktoren  $V$ . Aus dieser Darstellung der Positionsabweichung  $\Delta P_m$  in Abhängigkeit der Strukturgröße in den ermittelten Stützstellen ist zu erkennen, dass der systematische Fehler erwartungsgemäß mit zunehmender Strukturgröße (Punktzahl) kleiner wird. Mit den Abbildungen B.3 und B.2 wird der Einfluss der Rauschenkomponente  $\beta(\mu_R, \sigma_R)$  für einen Spot der Breite  $\sigma_x = \sigma_y = 10$  gezeigt. Die Werte wurden aus einer Messreihe mit einem Umfang von jeweils 50 Messwerten an einer Position ermittelt, aus denen die abgebildeten Werte der Standardabweichung und des Mittelwertes bestimmt wurden. Anhand der Abbildung B.2 ist erkennbar, dass der Anteil des zufälligen Fehlers, der durch das Rauschen verursacht wird, größer ist als der systematische Fehleranteil. Dies spiegelt sich im Verlauf des Mittelwertes wieder, der keinen alternierenden Verlauf ähnlich der Abbildung B.1 zeigt. Weiterhin konnte durch die Ergebnisse der Simulationen festgestellt werden, dass mit größer werdendem Verstärkungsfaktor  $V$  kein wesentlicher

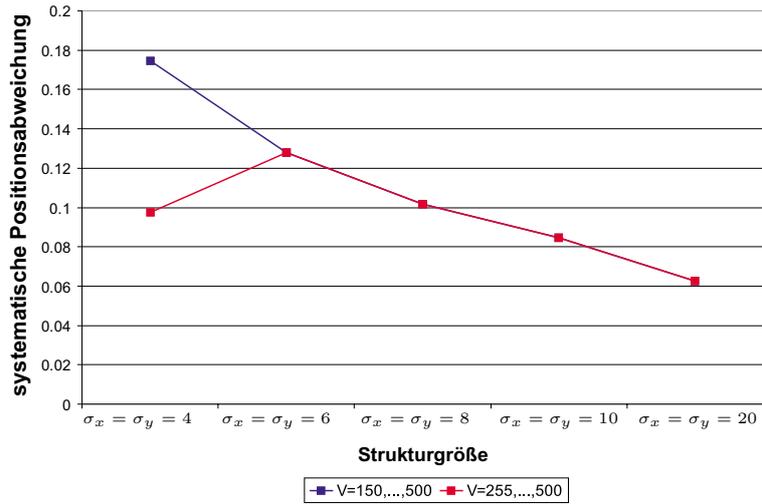


Abbildung 9.2: Positionsabweichung  $\Delta P_m$  in Abhängigkeit von der Strukturgröße

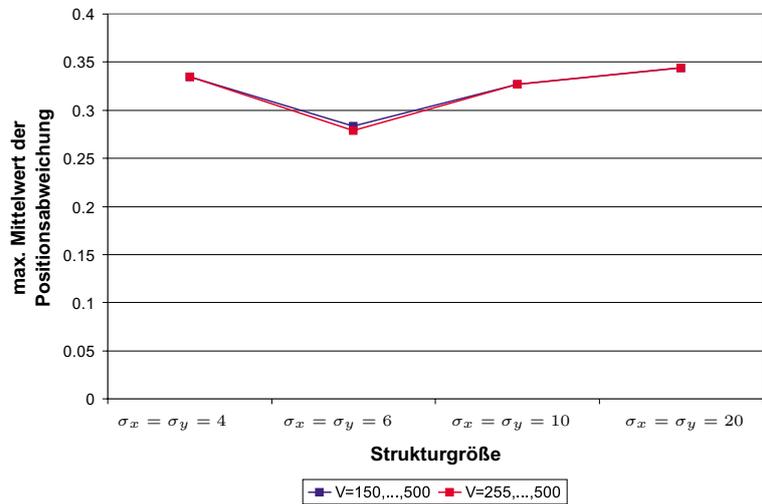


Abbildung 9.3: Maximaler Mittelwert von  $\Delta P_m$  in Abhängigkeit von der Strukturgröße

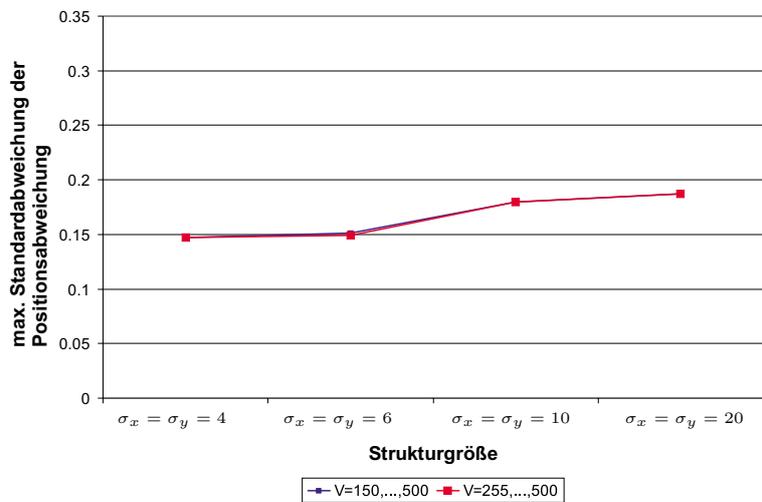


Abbildung 9.4: Maximale Standardabweichung von  $\Delta P_m$  in Abhängigkeit von der Strukturgröße

Einfluss auf den Mittelwert beziehungsweise die Standardabweichung nachgewiesen werden konnte. Für die betrachteten Spotstrukturen ist in den Abbildungen 9.3 und 9.4 der Zusammenhang zwischen der Spotgröße und dem maximalen Mittelwert und der maximalen Standardabweichung von  $\Delta P_m$  dargestellt. Die Untersuchungen der Spotgrößen im Bereich von  $\sigma_x = \sigma_y = 4, 6, 8, 10, 20$  ergaben eine zunehmende Positionsunsicherheit für größere Spotstrukturen. Weiterhin ist anhand der linear interpolierten Kurvenverläufe der Abbildungen 9.3, 9.4 sowie der Tabellen B.1 und B.2 ersichtlich, dass für unterschiedliche Aussteuerungsverhältnisse des Bildsensors keine wesentlichen Änderungen der Positionsunsicherheiten zu beobachten waren.

## 9.2 Anzielunsicherheit im Intensitätsbild

### 9.2.1 Schwerpunktverfahren

Die Untersuchungen in diesem Abschnitt zeigen Simulationen zur Bestimmung der Unsicherheit einer automatischen Anzielung für den im Abschnitt 5.1.1 beschriebenen Ansatz. Durch das Zusammenspiel der Lokalisierung eines adaptiven AOI und der Bestimmung des Anzielpunktes, die beide von der Struktur und dem Intensitätsverlauf der Zielmarke abhängen, sollen hier die systematischen und zufälligen Positionsabweichungen für das kombinierte Verfahren bestimmt werden. Im Anhang D.4 ist die Umsetzung der Gleichungen 5.10 und 5.11 in der Programmiersprache C++ gezeigt. Die Umsetzung des Schwerpunktverfahrens zeigt, dass hier analog zum Verfahren der automatischen Anzielung im Binärbild (Abschnitt 9.1) die Variable „Threshold“ im Quelltext enthalten ist. Die Variable dient hier der Beseitigung von Bewegungsunschärfen, welche im Differenzbild einer realen Messung enthalten sein können. Mit diesem Schwellwertparameter  $S$  wird erreicht, dass nur Bildpunkte  $B[x, y]$  mit einer Intensität  $I(x, y) > S$  in die Berechnung des Anzielpunktes einfließen. Für die hier betrachtete Simulation unter „idealen Verhältnissen“ wurde dieser Parameter  $S = 0$  gesetzt. Der Algorithmus zur Simulation von subpixelgenauen Zielpositionen betrachtet wiederum Subpixelverschiebungen mit einer Schrittweite von 0,1 Pixel über einen Bereich von 2 Pixel in horizontaler Bildrichtung. Die Abbildung B.4 zeigt die ermittelte Positionsabweichung für eine Spotgröße  $\sigma_x = \sigma_y = 10$  mit verschiedenen Verstärkungsfaktoren (Aussteuerung des Bildempfängers). Durch die Simulation der Anzielung mit verschiedenen Spotgrößen  $\sigma_x = \sigma_y = 4, 6, 8, 10, 12, 14, 20$  konnte die maximale Abweichung  $\Delta P_m$  in Abhängigkeit der Spotgröße bestimmt werden. In der Abbildung 9.5 ist das ermittelte Verhalten für das Schwerpunktverfahren dargestellt. Wie anhand des interpolierten Verlaufes der Abbildung 9.5 zu sehen ist, besitzt das Schwerpunktverfahren eine Schwankungsbreite von 0,03 Pixel für die betrachteten Verstärkungen  $V = 150 \dots 500$  bei dem die Intensitätswerte des Spotbildes unterhalb des maximal erfassbaren Intensitätswertes ( $I_{max} < 255$ ) liegen. In einem zweiten linear interpolierten Kurvenverlauf ( $V=255 \dots 500$ ) der Abbildung 9.5, bei dem von einer Aussteuerung ( $I_{max} = 255$ ) beziehungsweise Übersteuerung ( $I_{max} > 255$ ) des Bildsensors durch den Lichtspot ausgegangen wird, ist zu erkennen, dass für kleine Spotgrößen eine geringere Positionsabweichung erreicht werden kann. Der Verfahrensfehler für Zielmarken in großer Entfernung kann somit durch Übersteuerung der Signalintensität über den maximal abbildbaren Intensitätswert  $I_{max} > 255$  verringert werden. Die Betrachtung des Schwerpunktverfahrens an einem generierten Spot mit überlagertem Rauschen zeigte

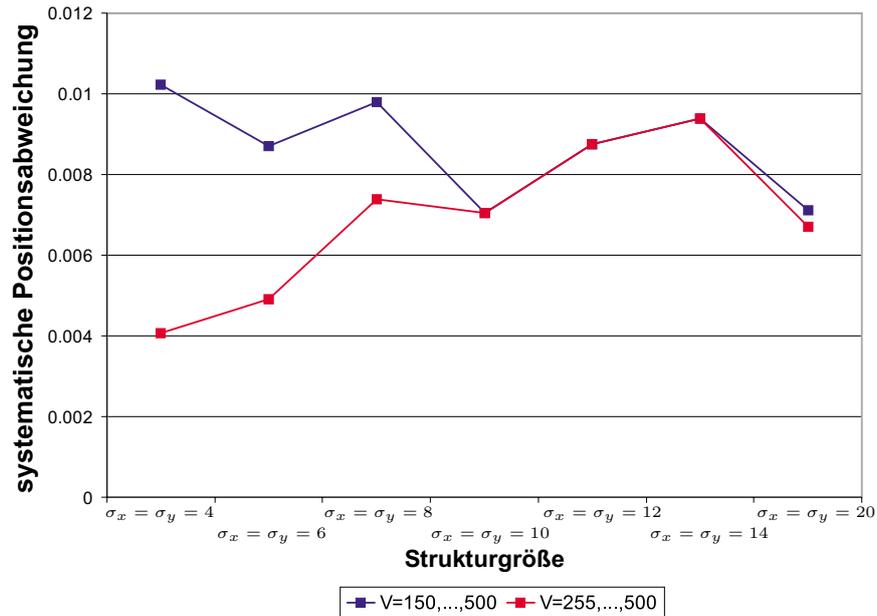


Abbildung 9.5: Positionsabweichung in Abhängigkeit von der Strukturgröße

ebenfalls eine Verringerung des Mittelwertes und der Standardabweichung von  $\Delta P_m$  bei Übersteuerung des Digitalisierungsbereiches des Bildsensors. In den Abbildungen B.5 und

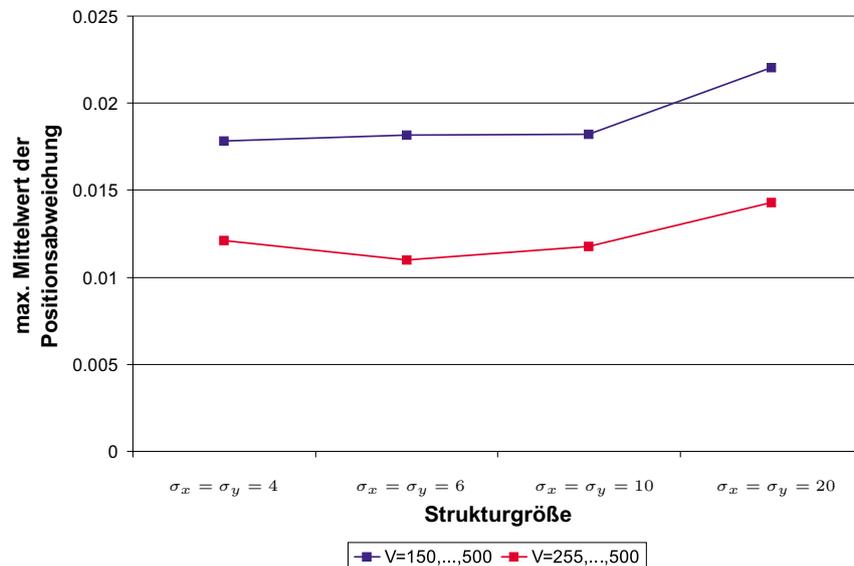


Abbildung 9.6: Maximaler Mittelwert von  $\Delta P_m$  in Abhängigkeit von der Strukturgröße

B.6 ist dies am Beispiel der Spotgröße  $\sigma_x = \sigma_y = 10$  gezeigt. Weitere Simulationen mit unterschiedlichen Spotgrößen bestätigten den in den Abbildungen B.5 und B.6 gezeigten Trend von kleiner werdenden Mittelwerten und Standardabweichungen bei Übersteuerung des Bildempfängers. Die Ursache für dieses Verhalten liegt darin, dass bei einem starken Übersteuern des Bildempfängers der Rauschanteil im Signal nicht mehr im Digitalisierungsbereich abgebildet werden kann. Desweiteren ist bei steigenden Verstärkungsfaktoren

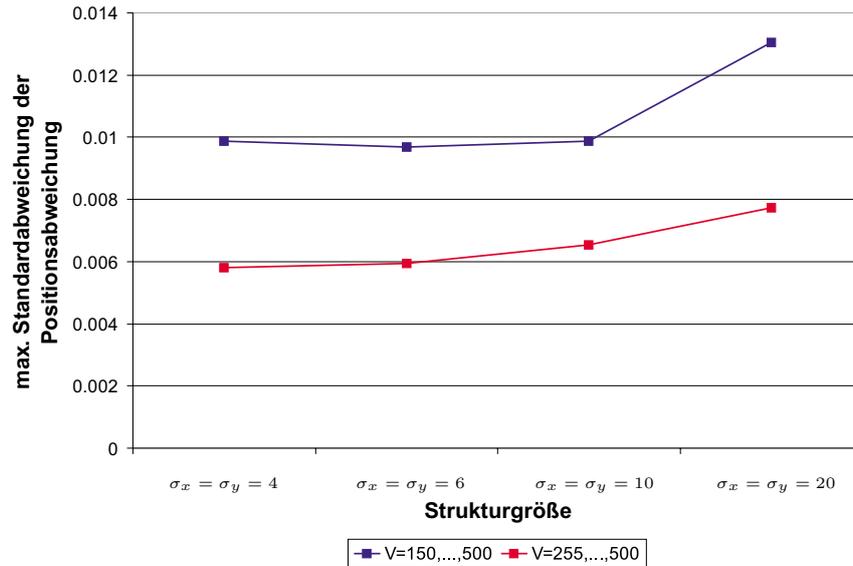


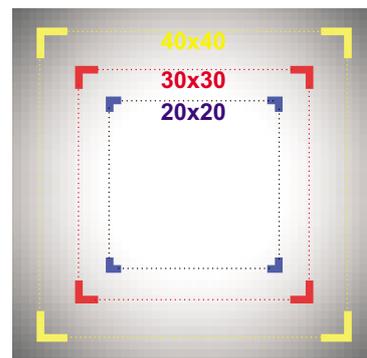
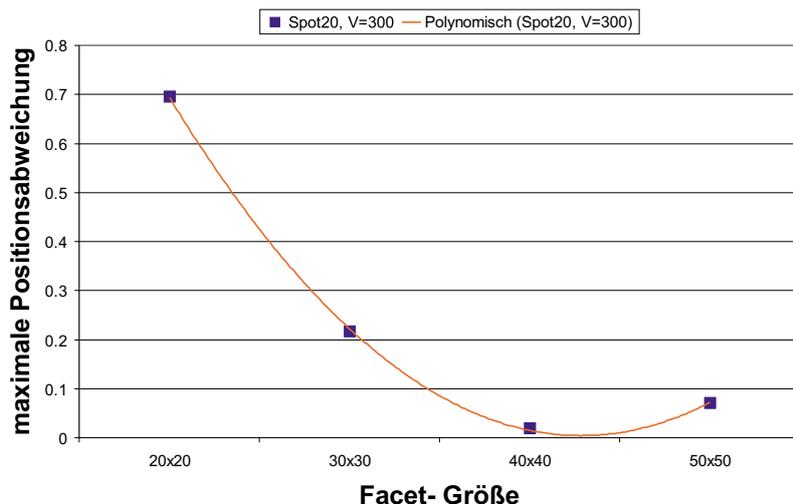
Abbildung 9.7: Maximale Standardabweichung von  $\Delta P_m$  in Abhängigkeit von der Strukturgröße

ein steilerer Intensitätsabfall zum Rand des Spots beobachtbar, so dass die Pixelanzahl, die durch das Rauschen beeinflussbar wäre, verringert wird. Die Abbildungen 9.6 und 9.7 zeigen den maximalen Mittelwert und die maximale Standardabweichung der Positionsabweichung  $\Delta P_m$  in Abhängigkeit der Größe des Leuchtflecks. Auch hier ist anhand der linear interpolierten Kurve für  $V = 255 \dots 500$  eine Verringerung der Anzielunsicherheit zu beobachten.

## 9.2.2 Lokale Approximation der Zielmuster

In den Abschnitten 3.4 und 5.2 wurde das Verfahren zur Bestimmung von lokalen Eigenschaften in Videobildern beschrieben. Es konnte gezeigt werden, dass dieses Verfahren zur Bestimmung der Position signalisierter Zielmarken mit einem Polynomansatz  $f(x, y)$  zweiter Ordnung verwendet werden kann. Durch die optische Abbildung der Zielmarken in unterschiedlicher Entfernung können verschieden große Bildmuster entstehen, die durch das im Abschnitt 5.3 gezeigte Spotmodell modelliert werden. Durch Simulation des Spotmusters soll in diesem Abschnitt die Anzielunsicherheit der Polynomapproximation untersucht werden. Die Unsicherheit der Position des angezielten Messpunktes wird erwartungsgemäß von der Größe der Facette<sup>4</sup> und damit durch die approximierten Koeffizienten  $p_i$  des Polynoms beeinflusst. Daher wurde für die Quantisierung der Anzielunsicherheit eines Spots dessen Größe  $\sigma_x, \sigma_y$ , verschiedene Verstärkungsfaktoren  $V$  und unterschiedliche Facet-Größen der Ordnung  $n \times n$  betrachtet. Die Abbildung 9.8a zeigt die ermittelte maximale Positionsabweichung für eine Zielmarke der Größe  $\sigma_x = \sigma_y = 20$  und einer Aussteuerung  $V = 300$  in Abhängigkeit der gewählten Facet-Größe. Der umfasste Intensitätsverlauf einer Zielmarke mit Facetten unterschiedlicher Größe ist in der Abbildung 9.8b dargestellt. Der gezeigte Intensitätsverlauf des Spotmusters besitzt je

<sup>4</sup>Die hier verwendete Bezeichnung „Größe der Facette“ beziehungsweise „Facet-Größe“ entspricht der im Abschnitt 3.4 genannten Ordnung ( $n \times m$ ) eines Image Facet-Modells



a) Positionsabweichung in Abhängigkeit der Facet-Größe

 b) Bild einer Zielmarke mit verschiedenen Facetten der Ordnung  $n \times n$ 

Abbildung 9.8: Verhalten der lokalen Approximation in Abhängigkeit der Facet-Größe

nach Übersteuerung des Bildsensors einen Bereich mit gleicher Intensität, für den bei zu kleinen Facetten kein Extremwert bestimmbar ist. Das Polynom des approximierten Intensitätsverlaufes (Gleichung 3.27) beschreibt in diesem Bereich eine Ebene, für die die Parameter  $p_2, \dots, p_6$  Null sind und  $p_1$  dem maximalen Intensitätswert entspricht. Polynomapproximationen für die Facetten der Ordnung  $20 \times 20$ ,  $30 \times 30$ ,  $40 \times 40$  und  $50 \times 50$  zeigen die Gleichungen 9.3.

$$\begin{aligned}
 \hat{f}(x, y) |_{Facet:20 \times 20} &= 256.453 - 0.027x^2 - 0.027y^2 \\
 \hat{f}(x, y) |_{Facet:30 \times 30} &= 269.039 - 0.179x^2 - 0.179y^2 \\
 \hat{f}(x, y) |_{Facet:40 \times 40} &= 273.341 - 0.216x^2 - 0.216y^2 \\
 \hat{f}(x, y) |_{Facet:50 \times 50} &= 266.937 - 0.195x^2 - 0.195y^2
 \end{aligned} \tag{9.3}$$

Ein Vergleich der Polynomkoeffizienten  $p_4$  und  $p_5$  zeigt ein verändertes Krümmungsverhalten bei der Annäherung an die optimale Größe und Lage einer Facette. Auch für reale Bilddaten, bei denen die Approximation des Polynoms verschiedene Formen annehmen kann, sind in erster Linie die Krümmungsparameter  $p_4$  und  $p_5$  des approximierten Intensitätsverlaufes für die Beurteilung der Facet-Größe entscheidend. Durch das mehrmalige Verschieben von Facetten unterschiedlicher Größe über das gesamte Videobild und der Beobachtung der Parameter  $p_4$  und  $p_5$  ist somit auch eine Lokalisierung des Zielmusters möglich. Die Untersuchung zur Bestimmung einer optimalen Facette ergab, dass ein unsymmetrisch bestimmter Ausschnitt und eine ungenaue Lage der Facette, welche durch die Anwendung der lateralen Histogrammtechnik vorbestimmt wurde, durch eine iterative Anwendung der Approximation und Bestimmung des Intensitätsmaximums ausgeglichen werden kann. Die Abbildung 9.9 zeigt den Prozess der automatischen Zentrierung der Facette bei iterativer Anwendung des Verfahrens. Dem rechentechnischen Mehraufwand zur Bestimmung einer optimalen Größe und Position der Facette steht, wie in der Abbildung B.7 zu sehen ist, eine wesentlich geringere Positionsabweichung gegenüber. Aufgrund der Vorverarbeitung des Videobildes und Lokalisierung von Prismenregionen durch das Verfahren der lateralen Histogrammtechnik [Dav97] wird der Aufwand zur Suche einer optimalen Facette wesentlich verringert. Die Anwendung der lateralen Histogrammtechnik

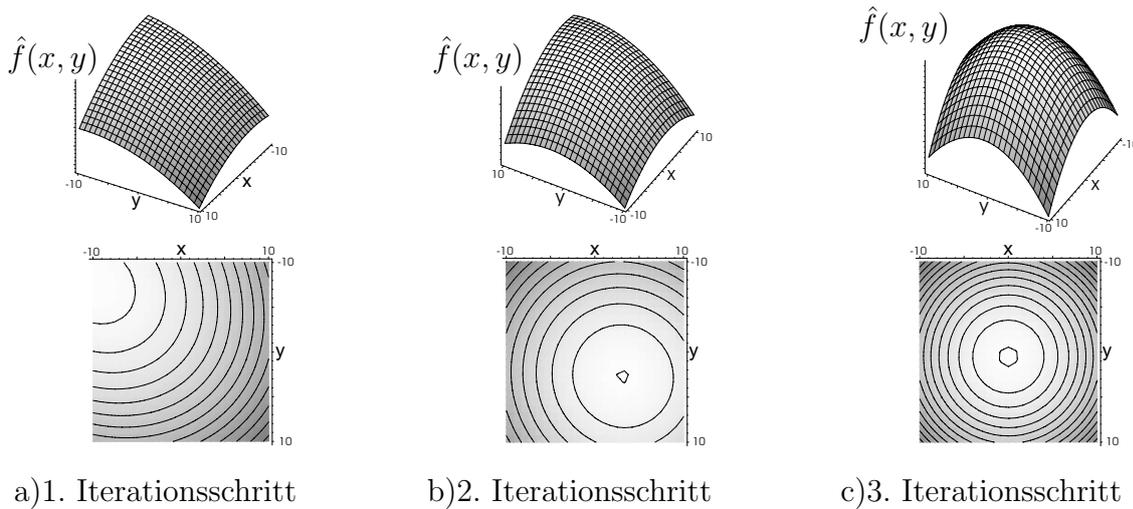


Abbildung 9.9: Automatische Zentrierung der Facette

[Hof02] unter realen Messbedingungen bestätigte, dass gute Näherungswerte für die Lage und Größe einer Facette aus dem bestimmten AOI ableitbar sind. Im Anhang D.5 und D.2 ist die Umsetzung des Image Facet-Modells zur Ermittlung der Polynomkoeffizienten aus Gleichung 3.27 sowie die Bestimmung des Intensitätsmaximums in der Programmiersprache C++ gezeigt. Durch wiederholte Subpixelverschiebung von 0,1 Pixel über einen horizontalen Bereich von 2 Pixel wurde die in der Abbildung B.7 gezeigte Positionsabweichung  $\Delta P_m$  für ein berechnetes Spotmodell mit  $\sigma_x = \sigma_y = 12$  und  $V = 300$  bestimmt. Die Größe der Positionsabweichung wird, wie in der Abbildung B.7 verdeutlicht, sehr stark von der Facet-Größe beeinflusst. Die Auswahl der Facet-Größe wurde in den Simulationen

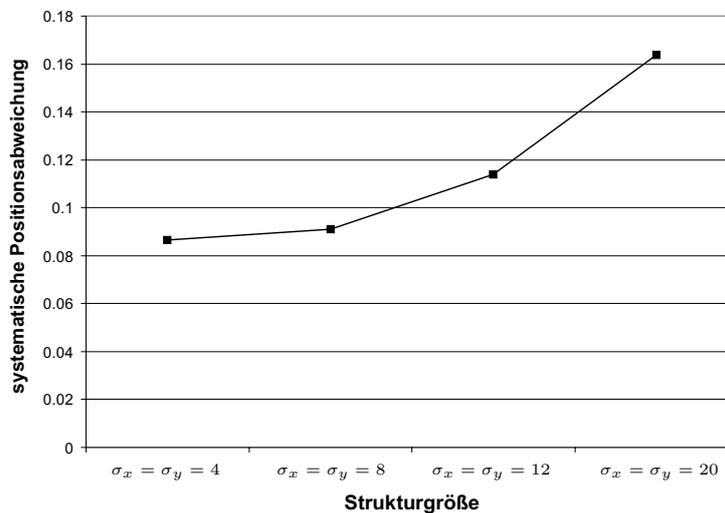


Abbildung 9.10: Positionsabweichung  $\Delta P_m$  für eine Facette der Ordnung  $40 \times 40$  in Abhängigkeit von der Strukturgröße

mit einer Schrittweite von 5 Pixel im Bereich von  $10 \times 10$  bis  $50 \times 50$  variiert und die Größe der Positionsabweichung ausgewertet. Die Facette mit der geringsten Positionsabweichung wurde dann für die weiteren Untersuchungen verwendet. Durch die Simulation mit ver-

schiedenen Spotgrößen  $\sigma_x = \sigma_y = 4, 8, 12, 20$  wurde der maximale systematische Fehler in Abhängigkeit der jeweiligen Spotgröße ermittelt und in der Abbildung 9.10 dargestellt. Ein Vergleich der Positionsabweichung für Spotmodelle unterschiedlicher Größe zeigt, dass die Approximation von Zielmarken im Nahbereich (große Struktur) eine deutlich größere Positionsabweichung aufweist. Das Verfahren eignet sich jedoch gut für die Anzielung von Messpunkten in großer Entfernung (kleine Strukturen). Für die Betrachtung des Verfahrens unter dem Einfluss von Rauschen konnte erwartungsgemäß ein sehr stabiles Approximationsverhalten festgestellt werden. Der Vergleich der Abbildungen 9.10 und 9.11 zeigt

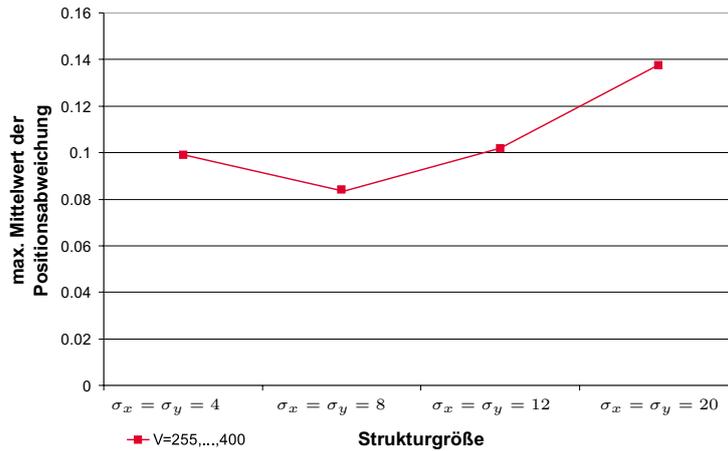


Abbildung 9.11: Maximaler Mittelwert von  $\Delta P_m$  in Abhängigkeit der Strukturgröße



Abbildung 9.12: Maximale Standardabweichung von  $\Delta P_m$  in Abhängigkeit der Strukturgröße

nahezu identische Ergebnisse der Reflektoranzielung mit einem Rauschanteil von  $\beta(0, 1)$ . Durch den Vergleich des Mittelwertes und der Standardabweichung aus den Tabellen B.5 und B.6 wird erkennbar, dass die Polynomapproximation der Intensitätsverläufe mit einem Verstärkungsfaktor von  $V = 300$  die geringste Positionsunsicherheit aufweist. Für Zielmarken, die ein ausgeprägtes Plateau aufweisen, ist für die Polynomapproximation eine größere Positionsabweichung festzustellen.

### 9.2.3 Bestimmung der Ellipsenparameter

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung eines Anzielpunktes für signalisierte Messpunkte ist aus der manuellen Anzielung über die Kontur des Prismas ableitbar. Diese Methode kann durch die Bestimmung der Konturpunkte der angezielten Bildstruktur und anschließender Approximation des Formelementes „Ellipse“ beschrieben werden. Das Prinzip der Ausgleichsrechnung ist für signalisierte Punkte im Abschnitt 5.1 und in [ULB02] vorgestellt worden. Die Bestimmung der Suchstrahlen wurde hier auf die in [Luh00] vorgestellte Methode des „Sternoperator“ (Abbildung 3.11) zurückgeführt. Den Startpunkt des Strahlenbündels bildet dabei der Mittelpunkt des Bildbereiches, welcher mit dem Verfahren der lateralen Histogrammtechnik ermittelt wurde.

Neben dieser hier verwendeten Antaststrategie für Konturpunkte ist auch das aus der Koordinatenmesstechnik bekannte Verfahren der Konturpunktverfolgung einsetzbar. Die Konturpunktverfolgung wurde zum Beispiel in den Untersuchungen [Hof02] zur Bestimmung überlappender Spotbilder mit der Houghtransformation genutzt.

Die Umsetzung der Konturpunktantastung in der Programmiersprache C++ ist im Anhang D.6 abgedruckt. Aus dem durch die laterale Histogrammtechnik bestimmten AOI wird zunächst der Startpunkt (Mittelpunkt des AOI) für die zu berechnenden Suchstrahlen bestimmt. Mit den Untersuchungen [Hof02] zum Verfahren der lateralen Histogrammtechnik konnte bereits eine gute Annäherung bezüglich der Lage und der Größe des ermittelten Bildbereiches an die Struktur gezeigt werden. Somit kann die Länge der Suchstrahlen auf die Breite des horizontalen  $[x_e - x_s]$  beziehungsweise Höhe des vertikalen  $[y_e - y_s]$  AOI's beschränkt werden. Der Endpunkt  $P_2$  des Suchstrahls ergibt sich damit aus dem Startpunkt  $P_1 = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix}$  und der gewählten Breite oder Höhe des AOI.

Für elliptische Strukturen empfiehlt sich die Verwendung des Maximums aus der Breite beziehungsweise Höhe des AOI.

Der Umlauf des Punktes  $P_2$  um die Struktur wird durch Rotation bestimmt. Mit der Beschreibung der Suchstrahlen über einen Anfangs- und Endpunkt konnte die Konturpunkt detektion und der Ellipsenausgleich aus der Softwarebibliothek „Quick Image Development [LBF<sup>+</sup>99]“ angewendet werden.

Die Untersuchungen [Küh97] von Kantenortsabweichungen verschiedener Subpixelverfahren an steilen Kantenübergängen zeigten, dass das Subpixelverfahren mit Approximationspolynom dritten Grades die geringsten Standardabweichungen des Kantenortes aufweist. Für die Erfassung kleiner Prismenstrukturen mit einem Strukturdurchmesser von 2-3 Bildpunkten ist dieses Verfahren jedoch nicht einsetzbar. Aus diesem Grund wurde zur Kantenantastung das Schwellwertverfahren mit linearer Subpixelinterpolation gewählt, mit dem ebenfalls eine geringe Standardabweichung erreichbar ist.

Für die Anwendung des Schwellwertverfahrens wurde der in [See96] ermittelte maximale Schwellwert  $S = 85$  zur Trennung von Signal und Hintergrundrauschen eingesetzt. Die Abbildung B.10 zeigt die bestimmten Positionsabweichungen für einen Spot mit  $\sigma_x = \sigma_y = 10$ . Aus den Ergebnissen weiterer Simulationen für Spotgrößen von  $\sigma = 8, 10, 12, 14, 20$  konnte die Abhängigkeit des systematischen Fehlers von der Spotgröße (Abbildung 9.13) bestimmt werden. Anhand des linear interpolierten Kurvenverlaufes in Abbildung 9.5 ist zu sehen, dass die Bestimmung der Ellipsenparameter einen nahezu konstanten systematischen Fehler für Aussteuerungen im Bereich von  $V = 255 \dots 500$  des Bildempfängers aufweist. Der Einfluss von normalverteiltem Rauschen auf die Bestimmung des Anzielpunktes ist in den Abbildungen B.11 und B.12 durch die Darstellung des

Mittelwertes und der Standardabweichung der Positionsabweichung gezeigt. Aus dem interpolierten Verlauf der Abbildungen B.11 und B.12 wird ersichtlich, dass mit steigender Konturpunktanzahl (Größe der Struktur) die Anzielunsicherheit steigt. Die Maximalwerte der mittleren Positionsabweichung (Tabelle B.7 und B.8) und der Standardabweichung für unterschiedliche Aussteuerungen des Bildempfängers zeigen, dass für den Aussteuerungsbereich  $V = 255 \dots 500$  eine geringere Unsicherheit der Anzielung erreicht werden kann. In den Abbildungen 9.14 und 9.15 ist dieser Sachverhalt über die untersuchten Spotgrößen dargestellt.

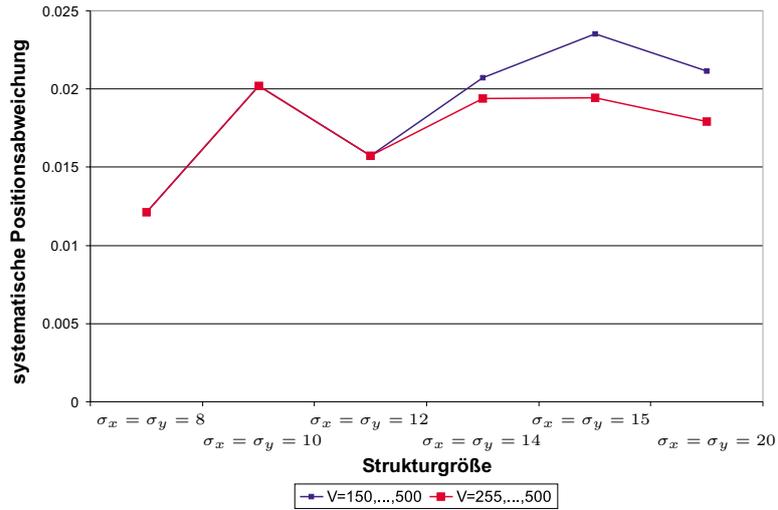


Abbildung 9.13: Positionsabweichung  $\Delta P_m$  in Abhängigkeit von der Strukturgröße

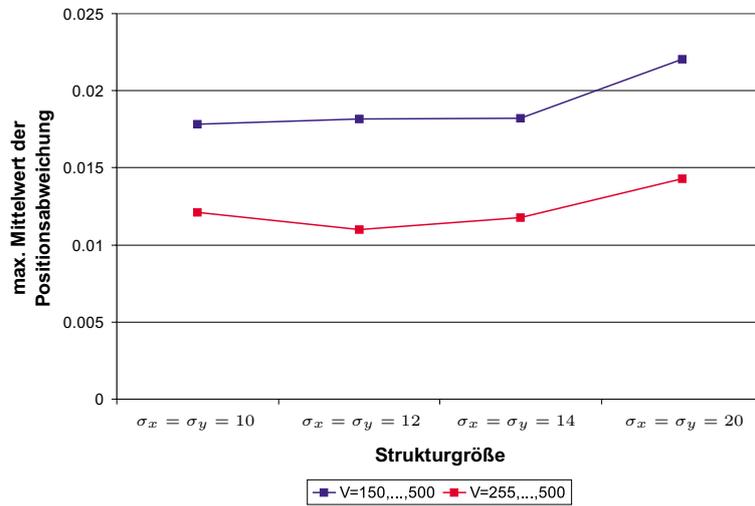


Abbildung 9.14: Maximaler Mittelwert von  $\Delta P_m$  in Abhängigkeit von der Strukturgröße

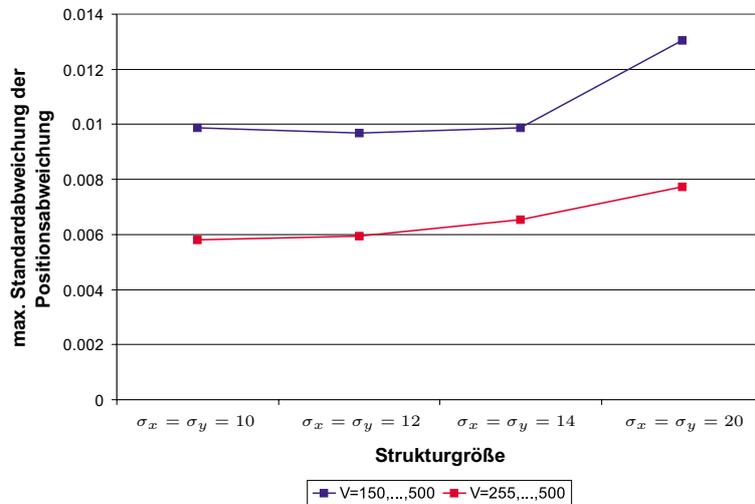


Abbildung 9.15: Maximale Standardabweichung von  $\Delta P_m$  in Abhängigkeit von der Strukturgröße

### 9.3 Auswertung der Simulationsergebnisse und Auswahl eines Verfahrens

Anhand der Simulation des Anzielvorgangs wurde in den Abschnitten 9.1 und 9.2 für verschiedene Bildformate und Verfahren die Unsicherheit einer objektivierten Anzielung für signalisierte Messpunkte bestimmt. In einem fiktiv betrachteten Messbereich, der sich in der Größe der angezielten Bildstruktur  $\sigma_x, \sigma_y$  widerspiegelt, konnte gezeigt werden, dass das Schwerpunktverfahren den kleinsten Mittelwert der Positionsabweichung  $\max \overline{\Delta P_m}$  und die kleinste Standardabweichung  $\max \$ (\Delta P_m)$  aufweist. In der Tabelle 9.1 sind die ermittelten Maximalwerte für die einzelnen Verfahren gegenübergestellt. Die in der Si-

Detektionsverfahren	$\max \overline{\Delta P_m}$ (in Pixel)	$\max \$ (\Delta P_m)$ (in Pixel)
Anzielung im Binärbild	0,344	0,187
Schwerpunktverfahren	0,022	0,0131
Polynomapproximation	0,137	0,076
Ellipsenausgleich	0,030	0,017

Tabelle 9.1: Gegenüberstellung der maximalen Mittelwerte und Standardabweichungen

simulation des Anzielvorgangs untersuchten Verfahren zeigten, dass bei einer horizontalen Verschiebung  $x_v > 0, y_v = 0$  des Spots auch sehr kleine Positionsabweichungen in vertikaler Richtung feststellbar waren. Für die Berechnung der Positionsabweichung wurde daher der vektorielle Positionsfehler  $\Delta P_m$  verwendet. Für die Angabe der Positionsunsicherheit ist weiterhin zu beachten, dass sowohl positive als auch negative Positionsabweichungen bei einer Verschiebung  $x_v$  bestimmt wurden. Der ermittelte Mittelwert der Positionsabweichung kann somit im Vorzeichen variieren und umfasst einen weiteren Unsicherheitsbereich, der durch die Standardabweichung  $\max \$ (\Delta P_m)$  bestimmt wurde. Die Tabelle 9.2 zeigt den nach DIN2257 Blatt 2 [fNe95] berechneten Unsicherheitsbereich  $\bar{X} \pm 3\sigma$  für eine statistische Sicherheit von 99,7%. Anhand der Tabelle 9.2 ist zu erkennen, dass für die

Verfahren	$-\bar{X} - 3\sigma$	$+\bar{X} + 3\sigma$	Unsicherheitsbereich (in Pixel)
Anzielung im Binärbild	-0,905	0,905	1,81
Schwerpunktverfahren	-0,0613	0,0613	0,1226
Polynomapproximation	-0,365	0,365	0,73
Ellipsenausgleich	-0,081	0,081	0,162

Tabelle 9.2: Unsicherheitsbereich der Positionsbestimmung

Kombination der lateralen Histogrammtechnik mit dem Schwerpunktverfahren der kleinste Unsicherheitsbereich für die Position eines signalisierten Messpunktes im Videobild zu erwarten ist. Die experimentelle Untersuchung der Anzielung im Abschnitt 9 basiert auf der Anwendung dieser Verfahrenskombination.

## 9.4 Bestimmung der Positionsunsicherheit für reale Messanordnungen

### 9.4.1 Einfluss von Strukturgröße und Kamerabelichtungszeit

Durch die Simulationen im Abschnitt 9.1 und 9.2 konnte gezeigt werden, dass die Positionsunsicherheit von der Größe des signalisierten Punktes und der Aussteuerung des Bildsensors abhängig ist. Die in der Simulation untersuchten idealen Zusammenhänge sollen für das Schwerpunktverfahren an einer realen Messanordnung verifiziert werden. In der Abbildung 9.16 ist der dazu verwendete Versuchsaufbau gezeigt. Der im Versuchsaufbau verwendete Kollimator ermöglicht eine optische Abbildung verschiedener kreisförmiger Strukturen, die durch die Auswahl verschiedener Lochblenden in ihrer Größe veränderbar sind. Die Schärfentiefe der Kollimatorabbildung wurde auf „unendlich“ eingestellt. Eine an

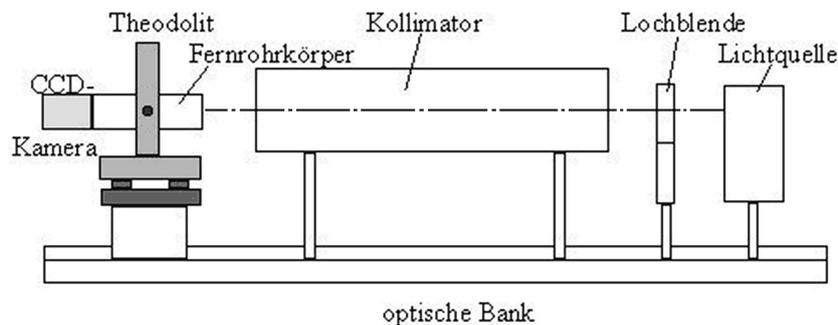


Abbildung 9.16: Kollimatoranordnung

dem Theodolit angebrachte CCD-Matrixkamera empfängt das Bild der angezielten Marke und ermöglicht so die Auswertung der Strukturgröße in dem digitalisierten Videobild. Für die Untersuchung des Einflusses der Strukturgröße und der Signalaussteuerung wurden unterschiedliche Größen einer Zielmarke unter verschiedenen Kamerabelichtungszeiten  $t_B$  an einer konstant gehaltenen Position im Bild beobachtet. Die Versuchsbedingungen wurden der Simulation angenähert, indem der Messraum abgedunkelt wurde und somit keine weiteren Lichtquellen das Bild der Zielmarke überlagern konnten. Dennoch konnte für größere Strukturen bei einer Belichtungszeit von  $t_B = 20$  ms festgestellt werden, dass die gefundene Position der Zielmarke nicht ganz der erwarteten Position entsprach. Die Darstellung der Intensitätsverteilung im Histogramm (Abbildung 9.17) zeigt, dass bedingt durch das Rauschen der Kamera und die eingesetzte niederfrequente Beleuchtung<sup>5</sup> verschiedene störende Anteile das Messsignal im Videobild überlagern. Für untersuchte Strukturen bis 9 Pixel Strukturdurchmesser war dieser Einfluss wesentlich geringer, so dass sich die Bestimmung der durch das Rauschen hervorgerufenen Messunsicherheit auf Spotgrößen mit einem Strukturdurchmesser von 7 und 9 Bildpunkten beschränkte<sup>6</sup>. Für die aufgenommene Messreihe sind 50 Anzielungen der Position des Lichtspots bestimmt

<sup>5</sup>Durch die „schlechten“ Eigenschaften der Lichtquelle kann eine zeitliche Änderung der Beleuchtungsintensität, ähnlich dem Luftflimmern, erreicht werden.

<sup>6</sup>Die Angabe des Strukturdurchmessers bezieht sich auf eine Kamerabelichtungszeit von 1ms.

und in Abhängigkeit der Kamerabelichtungszeit  $t_B$  protokolliert worden. Die Abbildun-

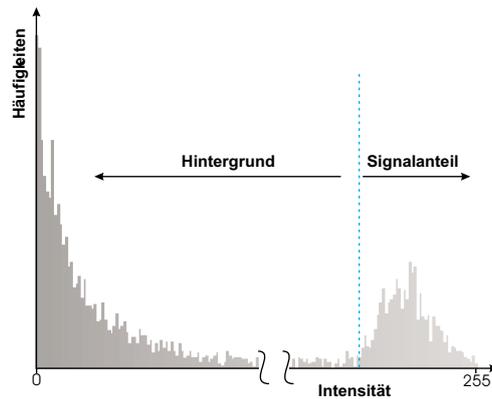


Abbildung 9.17: Histogramm einer Zielmarke mit Strukturdurchmesser von 30 Pixel

gen 9.18 und 9.19 zeigen die beobachteten Zusammenhänge für Belichtungszeiten  $t_B = \frac{1}{10}$  ms, 1 ms, 10 ms, 20 ms und Spotgrößen von 7 und 9 Bildpunkten. Die Standardabweichung in Abhängigkeit der Anzahl von Messungen zeigt erwartungsgemäß, dass mit zunehmender Messinformation der theoretische Wert angenähert wird. Der zu Beginn der Messungen schwankende Wert der Standardabweichung ist in der anfangs noch unsicheren Bestimmung der Standardabweichung selbst begründet, die jedoch mit steigender Messinformation besser bestimmbar ist und asymptotisch gegen den theoretisch erwarteten Wert strebt. Anhand der Abbildungen 9.18 und 9.19 ist zu erkennen, dass zunächst mit stei-

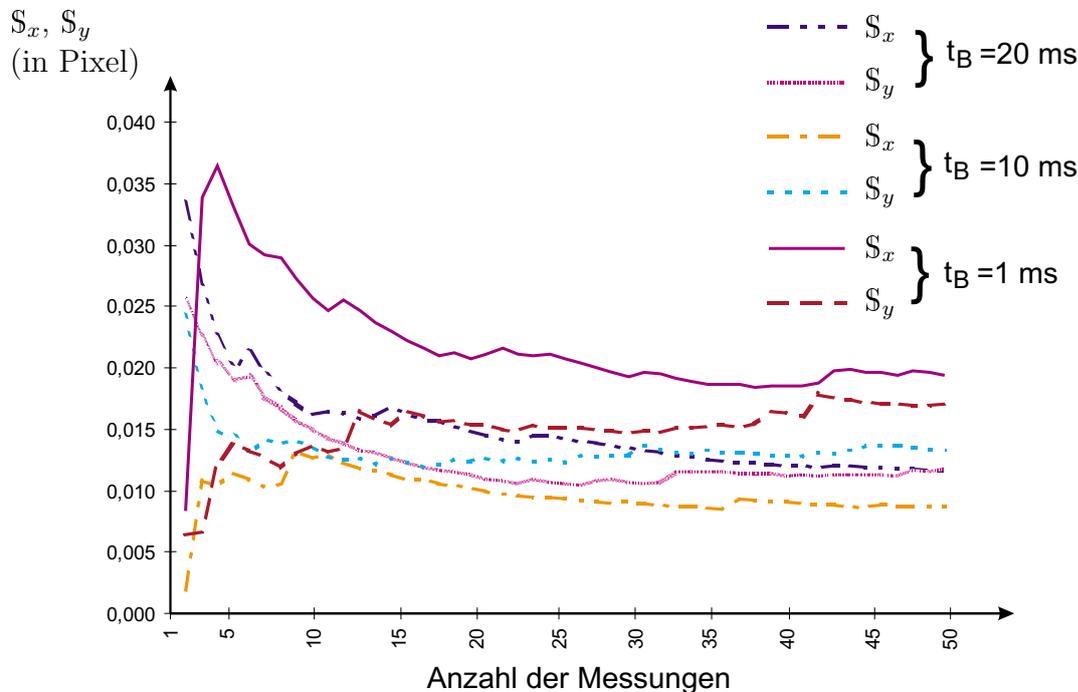
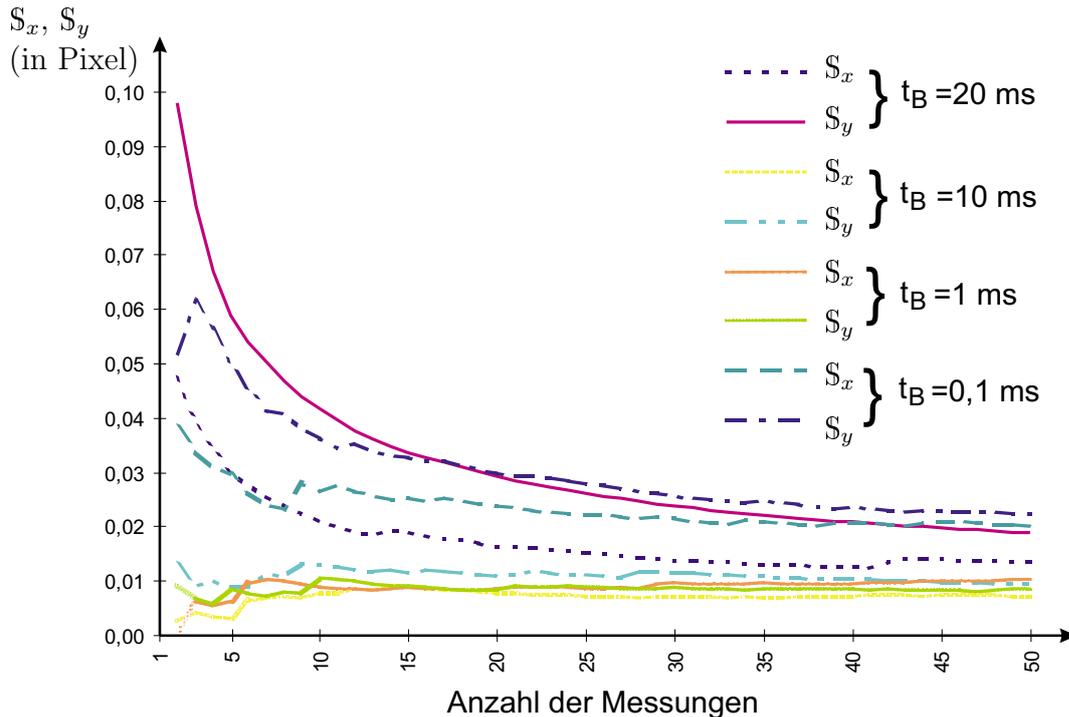


Abbildung 9.18: Standardabweichung  $S_x, S_y$  für eine Strukturbreite von 7 Pixel

genden Belichtungszeiten von 0,1 ms bis 10 ms eine Abnahme der Standardabweichung


 Abbildung 9.19: Standardabweichung  $S_x$ ,  $S_y$  für eine Strukturbreite von 9 Pixel

für die ermittelte Strukturgröße zu erkennen ist. Mit zunehmendem Übersteuerungsgrad (Belichtungszeit) ist eine Vergrößerung der Strukturgröße zu verzeichnen, wodurch der Einfluss von Rauschen vergrößert wird. Anhand der ermittelten Funktionsverläufe für die Standardabweichungen ist somit erkennbar, dass es bezüglich der Strukturgröße und dem Übersteuerungsgrad ein Optimum gibt.

Die Unsicherheit in der Anzielung eines signalisierten Messpunktes, dessen abgebildete Strukturgröße abhängig von der Entfernung zum Messgerät ist, kann somit durch eine Regelung der Kamerabelichtungszeit beeinflusst werden. Ein Vergleich der in der Simulation sowie der am Kollimator experimentell ermittelten Standardabweichungen weist annähernd die gleiche Größenordnung auf. Somit konnte gezeigt werden, dass die in der Simulation ermittelten Ergebnisse für das Schwerpunktverfahren auch mit einer Messanordnungen unter Laborbedingungen erreichbar sind.

Für eine reale Messanordnung im Feld gibt es weitere Einflussfaktoren, die sich auf die Unsicherheit einer Messung auswirken und in diesem Laborversuch nicht berücksichtigt sind. Hierzu gehören

- das Luftflimmern (thermische Luftverwirbelungen),
- die mechanische Schwingungen und
- die Temperaturschwankungen in natürlicher Umgebung.

## 9.4.2 Messunsicherheit eines motorisierten bildverarbeitenden Tachymetersystems

In den bisherigen Abschnitten wurde zunächst nur die erreichbare Anzielunsicherheit der Bildverarbeitungseinheit untersucht. Die Anzielunsicherheit des Gesamtsystems „Tachymeter“ setzt sich jedoch aus den Unsicherheiten der einzelnen Komponenten und dem Zusammenspiel verschiedener Komponenten zusammen. Aus den Messungen im Abschnitt 9.4.1 wurde die Unsicherheit der detektierten Position einer Zielmarke im digitalen Videobild durch die Kollimatormessung bestimmt. Mit den Untersuchungen in diesem Abschnitt soll eine Abschätzung der erreichbaren Messunsicherheit für das Gesamtsystem erfolgen. Hierzu wurde das Okular eines motorisierten Tachymeters durch eine CCD-Kamera ersetzt, die nun das Bild der Zielmarke abbildet. In der Abbildung 9.20 ist der verwendete Versuchsaufbau der Tachymeteranordnung skizziert. Die Bestimmung der Unsicherheit

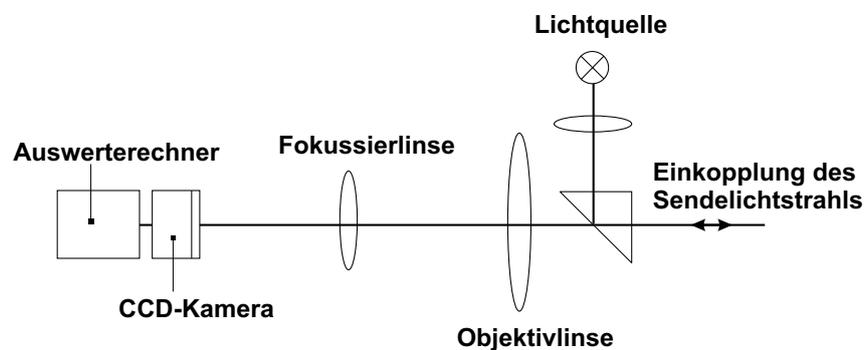


Abbildung 9.20: Tachymeteraufbau

einer automatischen Anzielung beschränkt sich auf einen Bereich um die Zielachse. Dieser Bereich ist ausreichend, da die Bestimmung der polaren Koordinaten ( $H_z$ ,  $V$ ) sowie die Entfernung zum Ziel immer in dieser „eingefahrenen Position“<sup>7</sup> erfolgt. Die Durchführung der Messung konzentrierte sich daher auf einen horizontalen Bereich<sup>8</sup> von  $\pm 25''$  um die Zielachse. Die einzelnen Messpositionen wurden über die in [Unr00] beschriebene Steuerersoftware mit einer Schrittweite von  $1''(3^{cc})$  angefahren und mit dem Schwerpunktverfahren ausgewertet<sup>9</sup>. Mit den in der Abbildung 9.19 dargestellten Ergebnissen konnte gezeigt werden, dass bereits nach zehn Messungen mit einer Belichtungszeit von 1 ms die Bestimmung der Standardabweichung gewährleistet ist. In jeder angefahrenen Position wurden zehn Positionswerte  $x_{ist}$ ,  $y_{ist}$  im Videobild mit dem Schwerpunktverfahren bestimmt. In der Tabelle 9.4 ist ein Auszug der aufgenommenen Messreihe gezeigt. Ein Vergleich der aus den einzelnen Positionen bestimmten Standardabweichung zeigt wiederum die gleiche Größenordnung wie die in der Abbildung 9.19 ermittelten Werte. Da die tatsächlichen Positionen der einzelnen Messungen nicht bekannt waren, wurde zunächst die Sollposition  $\hat{x}_{soll}$  durch eine Geradenregression aus den Mittelwerten der Positionen  $\bar{x}_{ist}$  in Abhängigkeit von  $\Delta H_z$  geschätzt. Die Tabelle 9.4 zeigt die geschätzte Sollposition

<sup>7</sup>Entspricht einer festgelegten Bildkoordinate, welche durch die Kalibrierung der Tachymeterachse bestimmt wird und im Zentrum des Divergenzbereiches des Entfernungsmessers liegt.

<sup>8</sup>Die Motorik der vertikalen Achse des Tachymeters wurde abgeschaltet und mechanisch arretiert.

<sup>9</sup>Die laterale Histogrammtechnik für die Lokalisierung einer Prismenposition wurde für die Anzielung von nur einem Prisma nicht verwendet.

$\Delta Hz$	0			1			50		
Nr.:	$x_{ist}$	$y_{ist}$	Nr.:	$x_{ist}$	$y_{ist}$	...	Nr.:	$x_{ist}$	$y_{ist}$
1	340,493	278,214	1	340,502	278,210		1	351,603	278,397
2	340,418	278,309	2	340,585	278,199		2	351,604	278,239
3	340,431	278,352	3	340,561	278,251		3	351,601	278,309
4	340,462	278,368	4	340,564	278,381		4	351,637	278,356
5	340,473	278,209	5	340,575	278,266	...	5	351,590	278,329
6	340,439	278,360	6	340,484	278,331		6	351,603	278,202
7	340,454	278,399	7	340,601	278,275		7	351,650	278,412
8	340,478	278,324	8	340,536	278,318		8	351,612	278,288
9	340,448	278,276	9	340,557	278,291		9	351,632	278,403
10	340,403	278,332	10	340,516	278,406	...	10	351,629	278,398
$\bar{x}_{ist}$	340,450			340,548				351,616	
$S_x$	0,028			0,037				0,019	
$\max S_x$	0,07008								

$x_{ist}, y_{ist}, S_x, \bar{x}_{ist}, \max S_x$  in Pixel  $\Delta Hz$  in " ( $1'' = 3^{cc} = 0,3$ ) mgon

Tabelle 9.3: Ermittelte Bildpositionen in Abhängigkeit einer horizontalen Verdrehung des Tachymeters mit 1" Schrittweite

und die maximale Abweichung von der Geraden. Mit der ausgelesenen Achsenposition

Hz	58	61	64	67	70	73
$\bar{x}_{ist}$	340,4505	340,5487	340,7376	341,0645	341,3367	341,5904
$\hat{x}_{soll}$	340,4591	340,6886	340,9181	341,1476	341,3772	341,6067
$\Delta x = \bar{x}_{ist} - \hat{x}_{soll}$	0,0086	0,1400	0,1805	0,0831	0,0404	0,0163
$\max \Delta x$	0,1805					

$\bar{x}_{ist}, \hat{x}_{soll}, \Delta x, \max \Delta x$  in Pixel Hz der ausgelesenen Achsenposition in  $^{cc}$  ( $1'' = 3^{cc}$ )

Regressionsgerade:  $\hat{x}_{soll} = m Hz + n$   $m = 0,0765, n = 336,0218$

Tabelle 9.4: Bestimmung der Abweichung der mittleren Bildposition  $\bar{x}_{ist}$  von der geschätzten Sollposition  $\hat{x}_{soll}$

Hz kann die angenäherte Position  $\hat{x}_{soll}$  und die Abweichung  $\Delta x = \bar{x}_{ist} - \hat{x}_{soll}$  bestimmt werden. Aus der maximalen Abweichung  $\Delta x$  und der maximalen Standardabweichung  $\max S_x$  der Messreihe kann nun der Unsicherheitsbereich der Messung bestimmt werden. Entsprechend der Norm DIN2257 Blatt 2 ergeben sich die in Tabelle 9.5 gezeigten Unsicherheitsbereiche für verschiedene statistische Sicherheiten. In den Abbildungen 9.21 und 9.22 ist der bestimmte Mittelwert der jeweiligen Prismenposition im Videobild mit dem entsprechenden Unsicherheitsbereich  $\bar{x}_{ist} \pm 1\sigma$  beziehungsweise  $\bar{x}_{ist} \pm 2\sigma$  aus den berechneten Positionen dargestellt. Eine Betrachtung der einzelnen Unsicherheitsbereiche zeigt, dass für  $\bar{x}_{ist} \pm 1\sigma$  die einzelnen Bereiche disjunkt sind. Dies bedeutet, dass die einzelnen detektierten Prismenpositionen für  $\Delta Hz = 3^{cc}$  voneinander eindeutig unterscheidbar sind. Für den Fall  $\bar{x}_{ist} \pm 2\sigma$  ist dies, wie in Abbildung 9.22 gezeigt, nicht mehr gegeben.

statistische Sicherheit	68,3%	95,4%	99,7%
Unsicherheitsbereich* <sup>1</sup> (Pixel)	0,32066	0,46082	0,60098

\*<sup>1</sup>Unsicherheitsbereich:  $(\min(\Delta x) - n \cdot \max S_x), \dots, (\max(\Delta x) + n \cdot \max S_x)$   
 $\min(\Delta x) = 0,00004$ ;  $\max(\Delta x) = 0,18054$ ;  $\max S_x = 0,07008$

Tabelle 9.5: Unsicherheitsbereich der Positionswerte für verschiedene statistische Sicherheiten

Dies gilt insbesondere, wenn die Standardabweichungen der einzelnen Positionen durch die maximale Standardabweichung  $\max S_x$  der Messreihe ersetzt wird.

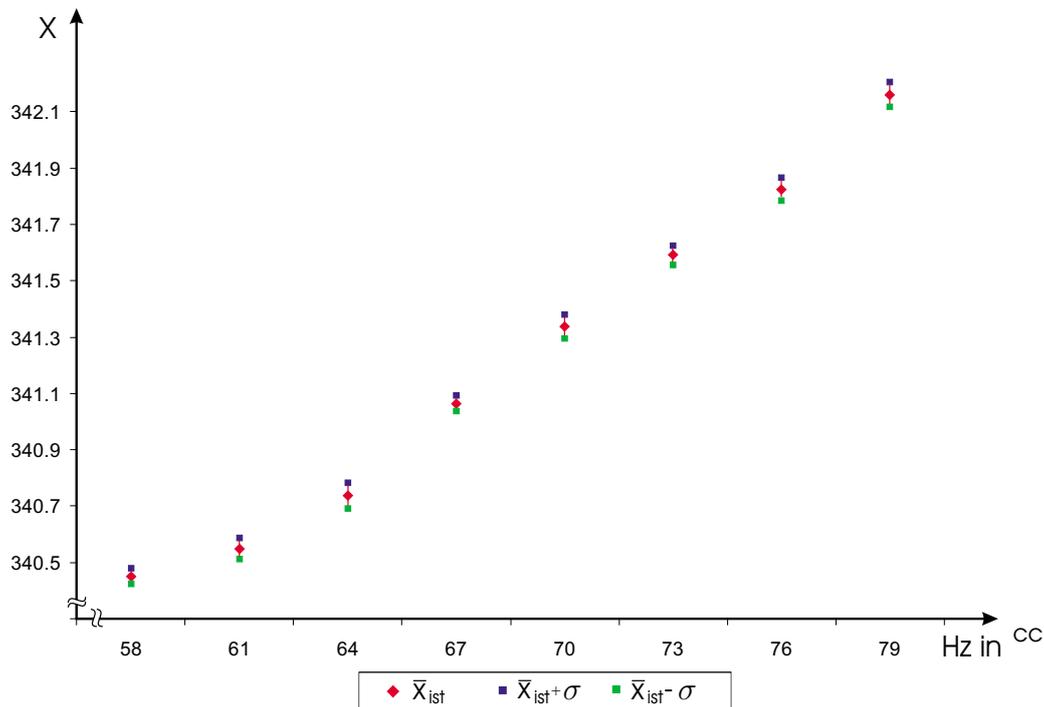


Abbildung 9.21: Resultierende Positionsunsicherheit der Einzelmessungen für  $\bar{x}_{ist} \pm 1\sigma$

Da die dem bestimmten Unsicherheitsbereich zugrunde liegende Regression zur Ermittlung der Position  $\hat{x}_{soll}$  selbst mit Fehlern behaftet ist, wurde eine zweite Variante zur Validierung des Ergebnisses untersucht. Für diese Variante wurde der Mittelwert  $\overline{\Delta \bar{x}_{ist}}$  und die Standardabweichung  $S_{\Delta \bar{x}_{ist}}$  aus den differentiellen Werten von  $\Delta \bar{x}_{ist}$  bestimmt. Die Tabelle 9.6 zeigt die aus den Werten  $\Delta \bar{x}_{ist}$  bestimmten Unsicherheitsbereiche. Ein

statistische Sicherheit	68,3%	95,4%	99,7%
Unsicherheitsbereich* <sup>2</sup> (Pixel)	0,41732	0,54129	0,66525

\*<sup>2</sup>Unsicherheitsbereich:  $(\min(\Delta \bar{x}_{ist}) - n \cdot S_{\Delta \bar{x}_{ist}}), \dots, (\max(\Delta \bar{x}_{ist}) + n \cdot S_{\Delta \bar{x}_{ist}})$   
 $\min(\Delta \bar{x}_{ist}) = 0,2278$ ;  $\max(\Delta \bar{x}_{ist}) = 0,39153$ ;  $S_{\Delta \bar{x}_{ist}} = 0,0619$

Tabelle 9.6: Unsicherheitsbereich der differentiellen Abweichung der Positionswerte

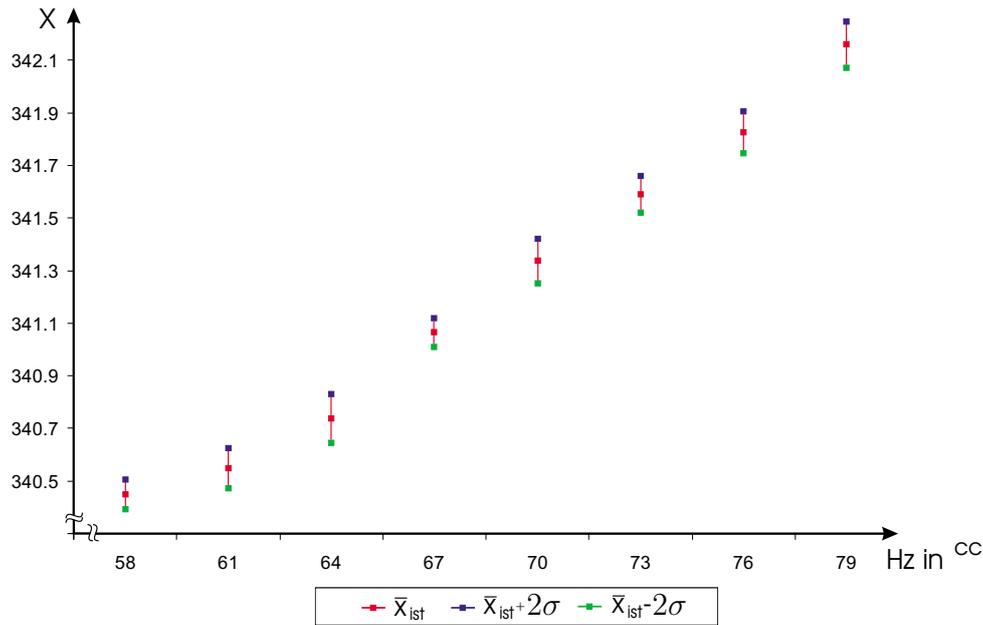


Abbildung 9.22: Resultierende Positionsunsicherheit der Einzelmessungen für  $\bar{x}_{ist} \pm 2\sigma$

Vergleich der Werte aus den Tabellen 9.5 und 9.6 zeigt, dass beide Verfahren etwa die gleichen Ergebnisse für die Standardabweichung liefern.

Mit dem ermittelten Wert des Unsicherheitsbereiches der Spotposition  $U_B$  im Videobild in Abhängigkeit der eingestellten Achsenposition Hz wurde durch die Ausgleichsgerade ein linearer Zusammenhang für das Tachymetersystem bestimmt (Abbildung 9.23). Dieser lineare Zusammenhang soll hier zur Abschätzung der Tachymeterunsicherheit  $U_S$  genutzt werden.

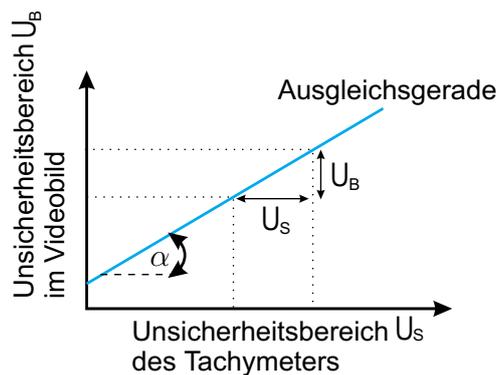


Abbildung 9.23: Zusammenhang der ermittelten Positionsunsicherheit und der Geräteunsicherheit

Entsprechend der Abbildung 9.23 ist der Zusammenhang zwischen den beiden Größen  $U_S$  und  $U_B$  über den Anstieg der ermittelten Ausgleichsgeraden bestimmbar.

$$U_S = \frac{U_B}{\tan \alpha} \tag{9.4}$$

Aus der Gleichung 9.4 kann der Unsicherheitsbereich des Tachymeters<sup>10</sup> ermittelt werden. Aus dem für eine statistische Sicherheit von 95,5% ermittelten Unsicherheitsbereich  $U_B = 0,46082$  (Tabelle 9.4) und dem Anstieg  $m = 0,0765$  ergibt sich der Unsicherheitsbereich von  $U_S = 6,0237^{cc} \approx 2''$ .

Bei der Bewertung dieses Ergebnisses sind jedoch verschiedene Fehlerquellen, die in die experimentellen Untersuchungen eingegangen sind, zu beachten. Hierzu gehört

- die Verarbeitung eines analogen Videosignals und
- der Einfluss des Gewichtes der am Fernrohr montierten Kamera.

Für ein mechanisch optimiertes Tachymetersystem, welches geräteintern das Videosignal digital verarbeitet, sollten Messunsicherheiten im Bereich von  $1''$  möglich sein.

---

<sup>10</sup>Diese Aussage gilt nur für den untersuchten Bereich von  $\pm 25''$  um die Zielachse.

# Kapitel 10

## Einfluss von Textur- und Intensitätsänderung auf den Kantenort

Im Abschnitt 7.1.1 wurde gezeigt, dass der Kantenort an einer Hauskontur durch Texturen und die Intensitätsänderung der Sonneneinstrahlung beeinflusst wird. Für die Quantisierung der Einflüsse einer örtlichen Texturänderung und der Änderung der Beleuchtungsintensität auf einen Kantenort wurde mit dem Computerprogramm „Maple“ [Inc02] eine Simulation erstellt. Die Grundlage dieser Simulation bildet der Intensitätsverlauf entsprechend den Gleichungen 7.1 beziehungsweise 7.2 an einer Kante und die Untersuchung von Texturen (Abbildung A.10) von Fassadenaufnahmen im Histogramm. Durch die Darstellung der Texturen im Histogramm ist der Bereich der Intensitätsverteilung  $\Delta I_{T_{max}}(x)$  bestimmbar und kann in der Simulation als zusätzliche Komponente  $I_T(x)$  zu dem Intensitätsverlauf  $I_{LH}(x)$  der Kante hinzugefügt werden. Für die Berechnung der örtlichen Änderung einer Textur wurde ein Zufallszahlengenerator gewählt, mit dem der Anteil der Textur über den Parameter  $P$  im Bereich von  $1 \leq I_T(x) \leq 100$  verändert werden kann. Der resultierende Intensitätsverlauf an einer texturierten Kante ergibt sich somit durch  $I(x) = I_{LH}(x) + I_T(x)$ . Der Kantenverlauf erstreckt sich in den Untersuchungen über

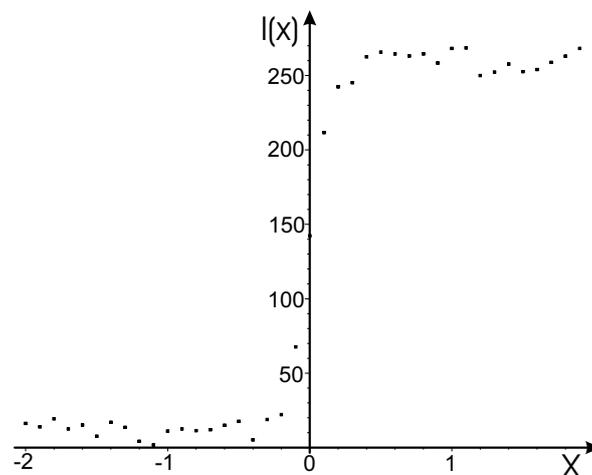


Abbildung 10.1: Diskreter Intensitätsverlauf mit überlagerter Textur

einen symmetrischen Bereich von  $\pm 20$  Pixel um den Kantenort  $x = 0$  einer idealen Kante. Die berechneten Intensitätswerte  $I(x)$  bilden die Intensität eines Pixels an der Position  $x$  entlang eines Suchstrahls. In der Abbildung 10.1 ist der generierte Intensitätsverlauf entlang einer texturierten Kante dargestellt. Der Texturanteil in dem gezeigten Intensitätsverlauf beträgt  $\Delta I_{T_{max}}(x) = 20$ .

Aus den Untersuchungen im Abschnitt 7.1.1 wurde ein optimaler Approximationsansatz mit dem Polynom  $I(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$  dritter Ordnung bestimmt, dessen Parameter  $a_i$  in der Simulation mit der Methode „Minimierung der Fehlerquadrate“ bestimmt werden. In der Gleichung 10.1 ist das Polynom  $\hat{I}_{LH}(x)$  dritter Ordnung mit den Parametern  $a_i$  für einen Intensitätsverlauf ohne Textur (Gleichung 7.1) berechnet worden, wodurch eine Abschätzung des Modellfehlers möglich wird.

$$\hat{I}_{LH}(x) = 125,0063 + 168,7386x - 0,0023x^2 - 30,8715x^3 \quad (10.1)$$

$$\hat{I}(x) = 135,6908 + 168,6404x + 0,6028x^2 - 31,0619x^3 \quad (10.2)$$

Das resultierende Polynom mit den Parametern  $a_i$  für eine Kante mit einem Texturanteil von  $\Delta I_{T_{max}}(x) = 20$  ist durch die Gleichung 10.2 beschrieben. Die Abbildungen 10.2a) und 10.2b) zeigen die approximierten Intensitätsverläufe. Der Einfluss der Textur ist durch einen Parametervergleich und in den gezeigten Kurvenverläufen der Polynome aus den Gleichungen 10.1 und 10.2 zu erkennen. Der Vergleich der beiden Polynomkurven zeigt, dass in diesem Beispiel die Kurve  $\hat{I}(x)$  etwas flacher gegenüber der Kurve  $\hat{I}_{LH}(x)$  verläuft und einen Offset im Punkt  $\hat{I}(x = 0)$  besitzt, der sich durch die Differenz der Parameter  $a_0$  bestimmen lässt.

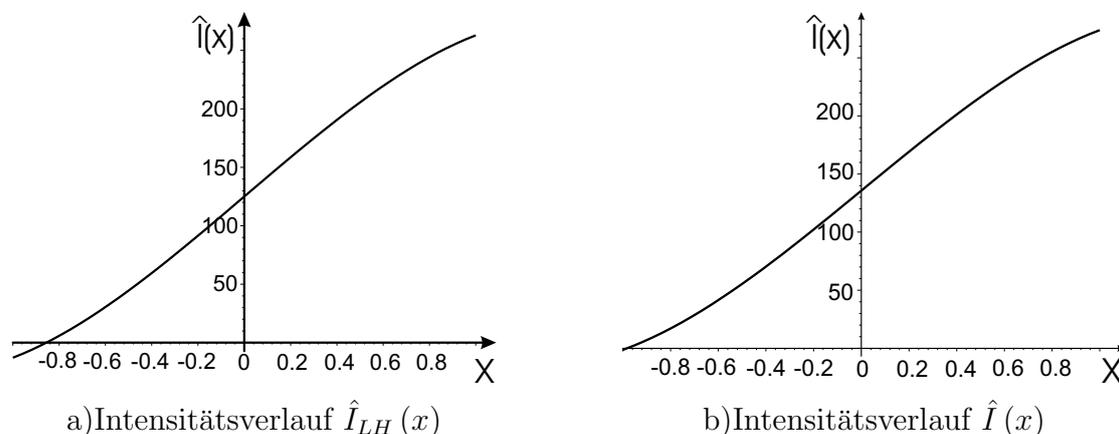


Abbildung 10.2: Approximation texturierter Intensitätsverläufe

Nach der Parameterschätzung  $a_i$  wird im weiteren Verlauf der Simulation die erste  $\frac{\partial \hat{I}(x)}{\partial x}$  und zweite Ableitung  $\frac{\partial^2 \hat{I}(x)}{\partial x^2}$  des Polynoms  $\hat{I}(x = 0)$  bestimmt. In der Gleichung 10.3 sind die Ableitungen des Polynoms  $\hat{I}(x)$  gezeigt.

$$\frac{\partial \hat{I}(x)}{\partial x} = 168,6404 + 1,2057x - 93,1859x^2 \quad (10.3)$$

$$\frac{\partial^2 \hat{I}(x)}{\partial x^2} = 1,2057 - 186,3718x$$

Die Nullstelle der zweiten Ableitung ergibt dann den gesuchten Kantenort. Für das gewählte Beispiel  $\Delta I_{T_{max}}(x) = 20$  wurde der Kantenort an der Stelle  $x = 0,06469$  bestimmt. Die Berechnung des Kantenortes entsprechend der Gleichung 7.1 ergab einen Modellfehler von  $x = -0,0002489$ . Die Ergebnisse der Simulation des Einflusses einer Textur- und/oder Intensitätsänderung sind in der Tabelle 10.2 für einen Kantenverlauf mit  $b = 8$  zusammengefasst. In der Tabelle 10.3 wird das Verhalten an zwei Intensitätsverläufen mit unterschiedlichem Texturanteil und unterschiedlicher Kantensteilheit  $b$  gezeigt. Eine grafische Darstellung der Zusammenhänge ist in den Abbildungen 7.4 und 10.3 gezeigt. Die

Kontrast h	approximierter Kantenort, b=8
50	-2,98E-05
75	1,25E-04
100	5,91E-05
125	-2,01E-04
150	1,99E-04
175	3,76E-04
200	-4,94E-04
225	-1,41E-04
250	-1,38E-04

Tabelle 10.1: Intensitätsänderungen an einer nicht texturierten Kante

Auswertung der Tabellen 10.2, 10.1 und des graphischen Verlaufs aus Abbildung 7.4 zeigt, dass an einem „idealen“ Kantenverlauf eine Intensitätsänderung keine Verschiebung des Kantenortes hervorruft. Die in der Tabelle gezeigten Abweichungen für einen Kantenverlauf ohne Textur sind auf den Modellfehler und Rechenungenauigkeiten zurückzuführen. Weiterhin ist zu erkennen, dass sich bei steigendem Kontrast der Einfluss der Textur auf den Kantenort verringert.

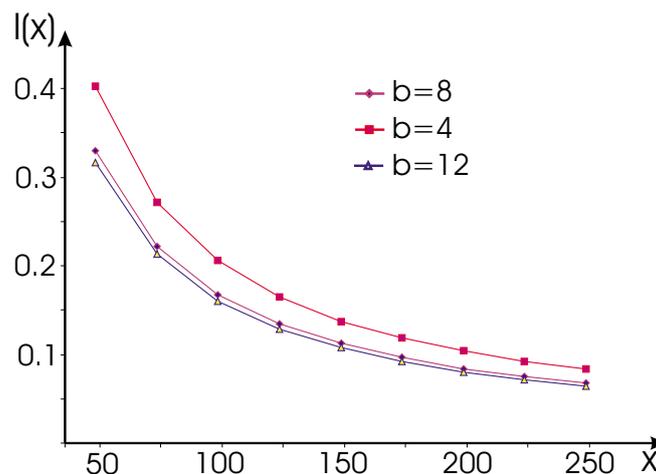


Abbildung 10.3: Einfluss von Textur- und Intensitätsänderungen bei unterschiedlichem Anstieg der Kante

Kontrast h	Texturanteil (%)	approximierter Kantenort, b=8
50	5	8,43E-02
75	5	5,65E-02
100	5	4,33E-02
125	5	3,44E-02
150	5	2,81E-02
175	5	2,51E-02
200	5	2,14E-02
225	5	1,92E-02
250	5	1,73E-02
50	10	1,67E-01
75	10	1,12E-01
100	10	8,45E-02
125	10	6,74E-02
150	10	5,66E-02
175	10	4,88E-02
200	10	4,19E-02
225	10	3,75E-02
250	10	3,38E-02
50	20	3,30E-01
75	20	2,22E-01
100	20	1,68E-01
125	20	1,34E-01
150	20	1,12E-01
175	20	9,67E-02
200	20	8,39E-02
225	20	7,49E-02
250	20	6,75E-02

Tabelle 10.2: Einfluss von Textur- und Intensitätsänderungen auf den Kantenort

Kontrast	Texturanteil in (%)	approx. Kantenort		
		b=4	b=8	b=12
50	20	4,03E-01	3,30E-01	3,17E-01
75	20	2,72E-01	2,22E-01	2,14E-01
100	20	2,06E-01	1,68E-01	1,60E-01
125	20	1,65E-01	1,34E-01	1,29E-01
150	20	1,38E-01	1,12E-01	1,08E-01
175	20	1,19E-01	9,67E-02	9,24E-02
200	20	1,04E-01	8,39E-02	8,06E-02
225	20	9,21E-02	7,49E-02	7,21E-02
250	20	8,33E-02	6,75E-02	6,47E-02

Tabelle 10.3: Einfluss von Textur- und Intensitätsänderungen bei unterschiedlichem Anstieg der Kante

```

# Simulation eines Kantenverlaufes ueberlagert
# mit nicht normalverteilten Texturaenderungen

restart;
with(stats): with(fit):

DX:=0;      # Verschiebung des Kantenortes
H:=250;     # max. Intensitaetssprung
P:=5;      # max. Rauschanteil in Prozent
B:=12;     # Breite des Uebergangs

# "idealer" Intensitaetsverlauf
f:=(x,b,h)->h*(1-(exp(-b*x)/(1+exp(-b*x))));
plot(f(x,B,H), x=-5..5);
plot(f(x,B,H), x=-0.25..0.25);
# Schrittweite
dataX:= [seq(-2+n*0.1+DX,n=0..40)];

# Berechnung der diskreten Intensitaetsverl\{a}ufe
dataY:= map(x->evalf(f(x,B,H),4),dataX);
dataYS:= map(x->evalf(f(x,B,H)+rand(100)()/P,4),dataX);
# Approximation des Verl\{a}ufe mit Polynom 3. Grades
f1:=rhs(leastsquare[[x1,y1], y1=a0+a1*x1+a2*x1^2+a3*x1^3,
                    {a0,a1,a2,a3}] ([dataX,dataY]));
f2:=rhs(leastsquare[[x1,y1], y1=a0+a1*x1+a2*x1^2+a3*x1^3,
                    {a0,a1,a2,a3}] ([dataX,dataYS]));
p1:= [seq([dataX[i],dataY[i]],i=1..40)];
plot(p1,style=point);
p2:= [seq([dataX[i],dataYS[i]],i=1..40)];
plot(p2,style=point);
plot(f1(x1),x1=-1..1);
plot(f2(x1),x1=-1..1);

# Differentiation
f1x:= diff(f1,x1);
plot(f1x(x1),x1=-2..2);
f2x:= diff(f2,x1);
plot(f2x(x1),x1=-2..2);
f1xx:=diff(f1x,x1);
plot(f1xx(x1),x1=-2..2);
f2xx:=diff(f2x,x1);
plot(f2xx(x1),x1=-2..2);

# Nullstelle der 2. Ableitung
solve(f1xx=0);
solve(f2xx=0);

```

# Kapitel 11

## Zusammenfassung und Ausblick

Betrachtet man die Entwicklung der Tachymetersysteme in den letzten fünf Jahren, so zeichnet sich eine zunehmende Automatisierung und Vereinfachung bestehender Messprobleme durch die Integration intelligenter Sensoren ab. Bisher am Markt verfügbare Systeme sind in der Lage, einen einzelnen signalisierten Messpunkt im Gelände zu erfassen.

Die vorliegende Arbeit zeigt hierzu im Kapitel 5, wie ausgehend von einer analytischen Beschreibung des Anzielvorgangs die Erfassung und präzise Vermessung von geodätischen Messpunkten im Videobild eines Bildsensors erfolgen kann. Darüberhinaus wurden aus der Bildverarbeitung bekannte Verfahren, die eine Erfassung von signalisierten Messpunkten ermöglichen, herausgearbeitet. Durch die Implementierung ausgewählter Algorithmen wurde mit der im Abschnitt 9 gezeigten Simulation die Positionsunsicherheit des Anzielvorgangs bestimmt und ein optimales Verfahren ausgewählt.

In weiteren experimentellen Untersuchungen unter realen Messbedingungen erfolgte eine Abschätzung der erreichbaren Messunsicherheit des Tachymetersystems. Auf der Basis dieser Ergebnisse wurde ein Konzept für ein intelligentes Bildverarbeitungssystem entwickelt, dessen Realisierung im Steinbeis Transferzentrum Qualitätssicherung und Bildverarbeitung an der Technischen Universität Ilmenau erfolgte.

Die Untersuchungen in dieser Arbeit haben einen entscheidenden Beitrag für die Entwicklung eines intelligenten Bildverarbeitungssystems [UBL97] für die automatische Erfassung und Vermessung von signalisierten kooperativen Messpunkten geliefert. Die herausragende wirtschaftliche Relevanz der wissenschaftlichen Leistung zum Thema „Feinzielsensor für Geodätische Vermessungsgeräte“ wurde durch das Thüringer Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst durch ein Sondervotum zur Vergabe des Forschungspreises gewürdigt.

In den weiteren Arbeiten stand die Entwicklung der Grundlagen neuer Vermessungskonzepte und Messapplikationen im Vordergrund, die in den nächsten Generationen von Vermessungsgeräten, den Videotachymetern, zum Einsatz kommen sollen. Hierzu bilden die im Kapitel 8 untersuchten Bildverarbeitungsverfahren zur Erfassung von kooperativen Zielen die Basis für die

- automatische Erfassung und Anzielung mehrerer signalisierter Messpunkte im Videobild,
- Messung mehrfach beobachteter Winkel,
- Bauwerksüberwachung und

- Fassadendigitalisierung.

Mit den Ergebnissen dieser Arbeit wurde gezeigt, dass durch die Integration der Bildverarbeitung in Vermessungsgeräte ein großer Teil der heute in der Ingenieur- und Katastermessung gestellten Aufgaben automatisiert und vereinfacht werden kann.

Durch die Kombination eines reflektorlos arbeitenden Entfernungsmessers, welcher heute bereits in verschiedenen Tachymetersystemen zur Verfügung steht, und einer automatischen beziehungsweise interaktiven Bildauswertung ist die Anzielung von schwer zugänglichen Messpunkten in beliebiger Höhe und mit einer beliebigen Punktdichte über das Videobild möglich. In dem Kapitel 7 sind diesbezüglich Methoden und Verfahren beschrieben, mit denen Messpunkte direkt an Hauskonturen im Videobild erfasst und dreidimensional vermessen werden können. Damit ist neben der effizienteren Erfassung von Einzelpunkten an Hausfassaden auch die Möglichkeit zur Fassadendigitalisierung mit einem Tachymeter gegeben. Der Abschnitt 7.2 zeigt weiterhin neue Möglichkeiten zur automatischen Bestimmung der Position von Leitungs- und Strommasten, die in der Vermessungstechnik für die Anfertigung von Spezialkarten, wie zum Beispiel Karten von Energieversorgern, von Interesse sind. Mit den erarbeiteten Bildverarbeitungsverfahren für die Erfassung von punkt- und linienförmigen Objekten sowie ausgedehnten Konturen sind darüberhinaus neue Applikationen und Zielmuster definierbar. Im Kapitel 6 wurde die Theorie zur Erfassung und Klassifizierung von lokalen Bildstrukturen im Videobild gezeigt. Durch die Anwendung dieses Verfahrens in den Abschnitten 6.1 und 6.2 auf geodätische Zielmarken wurde gezeigt, dass bekannte Methoden zur Absteckung eines Messpunktes (Fluchtstab, Zieltafel) wieder aufgegriffen werden können. In Kombination mit einem reflektorlosen Entfernungsmesser für die direkte Messungen auf natürlichen Oberflächen bietet diese Beschreibung von Bildstrukturen eine Vereinfachung des geodätischen Prozesses der Zielerfassung.

Die Ergebnisse der vorgelegten Arbeit sind nicht nur in der Landvermessung zur robusten Erfassung von Zielmarken einsetzbar. Neben diesem Einsatzgebiet haben die erarbeiteten robusten Bildverarbeitungsalgorithmen zur Lösung von Problemen in der optischen Koordinatenmesstechnik beigetragen.

Das Hauptziel weiterer Arbeiten wird die Optimierung der erarbeiteten Verfahren und Implementierung der Bildverarbeitung in Systeme der Landvermessung sein. Auf der Grundlage dieser neuen Gerätetechnologie werden zukünftig neue Verfahren und Methoden zur Absteckung und Erfassung von Messpunkten in der Katastermessung und Ingenieurgeodäsie definiert werden können.

# Literaturverzeichnis

- [Abm94] W. Abmeyer. *Einführung in die digitale Bildverarbeitung*. B. G. Teubner Stuttgart, 1994. ISBN 3-519-06138-4.
- [Bac95] E. Backer. *Computer - assisted reasoning in cluster analysis*. Prentice Hall International Limited, Hertfordshire, 1995. ISBN 0-13-341884-7.
- [Bac96] J. Bacher. *Clusteranalyse - anwendungsorientierte Einführung*. R. Oldenburg-verlag GmbH, München, Wien, Oldenburg, 1996. ISBN 3-486-23760-8.
- [BS91] J. R. Bergen and H. Shvaytser. A probabilistic algorithm for computing Hough transforms. *Journal of Algorithms*, 12:639–656, 1991.
- [BS00] I. N. Bronstein and K. A. Semendjajew. *Taschenbuch der Mathematik*. Harri Deutsch, Frankfurt Main, 5. edition, 2000. ISBN 3-8171-2015-X.
- [BUE02] P. Brückner, C. Usbeck, and A. Eichhorn. Aufnahme und Auswertung von Farbbildern in der Koordinatenmesstechnik. *Tagungsband zum Internationalen Wissenschaftlichen Kolloquium an der TU Ilmenau*, 2002.
- [Can86] J. Canny. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 67:753–763, 1986.
- [CM02] D. Comanicu and P. Meer. Mean shift: A robust approach toward feature space analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 5 2002.
- [Dav97] E. R. Davies. *Machine Vision*. Academic Press, San Diego, 2. edition, 1997. ISBN 0-12-206092-X.
- [FG87] W. Förstner and E. Gülch. A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centres of circular features. *ISPRS Intercommission Workshop, Interlaken 1987*, pages 281–305, 1987.
- [FN96] R. B. Fischer and D. K. Naidu. A comparison of algorithm for subpixel peak detection. Technical report, Department of Artificial Intelligence, University of Edinburgh, 5 Forest Hill, Edinburgh EH1 2QL, Scotland, 1996.
- [fNe95] Deutsches Institut für Normung e.V., editor. *DIN 2257 Blatt 2 Begriffe der Längenprüftechnik - Fehler und Unsicherheiten beim Messen*. Beuth Verlag GmbH, Berlin Köln, 1995.

- [GLW99] I. D. Guedalia, M. London, and M. Werman. An on-line agglomerative clustering method for nonstationary data. *Neural computation*, (11):521–540, 1999.
- [GW92] R. C. Gonzales and R. E. Woods. *Digital Image Processing*. ADDISON-Wesley Publishing Company, New York, 1. edition, 1992. ISBN 0-201-50803-6.
- [GYT02] D. G. Stork and E. Yom-Tov. Classification toolbox for use with matlab. [http://tiger.technion.ac.il/eladyt/Classification toolbox.html](http://tiger.technion.ac.il/eladyt/Classification%20toolbox.html), 2002.
- [Haf84] H. Haferkorn. *Optik*. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaft, Berlin, 2. edition, 1984. 65 Phy 81 A 325.
- [hGL02] Univ.-Prof.Dr.-Ing. habil. G. Linß. *Qualitätsmanagement für Ingenieure*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser verlag, München Wien, 2002. ISBN 3-446-21763-0.
- [HKK97] F. Höppner, F. Klawonn, and R. Kruse. *Fuzzy-Clusteranalyse, Verfahren für die Bilderkennung, Klassifizierung und Datenanalyse*. Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, Wiesbaden, 1997. ISBN 3-528-05543.
- [Hof02] R. Hoffmann. Antastverfahren zur Separation und Lokalisierung geodätischer Vermessungspunkte. Diplomarbeit, TU Ilmenau, Institut für Präzisionstechnik und Automation, 2002.
- [Hou62] P. V. C. Hough. Methods and means for recognising complex patterns. Patent, December 1962. U.S. Patent 3 069 654.
- [Hya02] Daniel Hyams. Curveexpert 1.3. <http://www.ebicom.net/dhyams/cvxpt.htm>, 2002.
- [Inc02] Waterloo Maple Inc. Maple. <http://www.maplesoft.com>, 2002.
- [Kas97] S. Kaski. Data exploration using self-organizing maps. *Acta Polytechnica Scandinavica, Mathematics, Computing and Management in Engineering*, 82, 1997.
- [KEB91] N. Kiryati, Y. Eldar, and A. M. Bruckstein. A probabilistic Hough transform. *Pattern Recognition*, 24(4):303–316, 1991.
- [Ker01] M. Kerckhove. *Scale-space and morphology in computer vision*. Springer Verlag, Berlin, 2001. ISBN 3-540-42317-6.
- [KfV01] A. Kuijper, L.M.J. Florack, and M.A. Viergever. Scale space hierarchy. Technical report, Utrecht University, Department of Computer Science, 2001. <http://archive.cs.uu.nl/pub/RUU/CS/techreps/CS-2001/2001-19.pdf>.
- [Kli92] J. Klicker. Ein zweidimensionales Triangulationsmesssystem mit Online-Messwertverarbeitung bei hoher Bildrate. Dissertation, Universität-GH-Siegen, 1992.

- [Kow99] P. Kowalzik. Realisierung und Kalibrierung einer berührungslos messenden Systemkomponente eines hybriden 3d Messsystems mit Hilfe eines codierten Lichtverfahrens. Diplomarbeit, Technische Universität Darmstadt, 1999. <http://www.tu-darmstadt.de/fb/bi/geod/gi/publikationen/diplomarbeiten/jahr1999>.
- [Küh97] O. Kühn. Ein Beitrag zur hochauflösenden zweidimensionalen Geometriemessung mit CCD-Zeilensensoren. Dissertation, TU Ilmenau, Institut für Präzisionstechnik und Automation, 1997.
- [Kui02] A. Kuijper. Logical filtering in scale space. technical report, Utrecht University, Institute of Information and Computer Sciences, 2002. <http://archive.cs.uu.nl/pub/RUU/CS/techreps/CS-2002/2002-018.pdf>.
- [KvD92] J. Koenderink and A. van Doorn. Surface shape and curvature scales. *Image and vision computing*, 10:557–565, 1992.
- [LBF<sup>+</sup>99] G. Linß, P. Brückner, W. Funk, U. Hamatschek, O. Kühn, N. Nehse, C. B. Nopper, A. Sichardt, and D. Volk. *Objektorientierte Softwarebibliothek für Bildverarbeitung, Qualitätssicherung, Messtechnik und Automation*. Referenzhandbuch, 4. Aufl. STZ-Eigenverlag, Suhl, 1999.
- [LBU00] G. Linß, P. Brückner, and C. Usbeck. Untersuchungen zu Antastunsicherheit von Einzelpunkten und Kanten in Farbbildern. Technical report, DFG Kolloquium am 20. und 21.03.2000, Chemnitz, 2000.
- [Lin94a] T. Lindeberg. Scale-space theory: A basic tool for analysing structures at different scales. *J. of Applied Statistics*, 21(2):224–270, 1994. Supplement on Advances in Applied Statistics: Statistics and Images: 2.
- [Lin94b] T. Lindeberg. *Scale-space theory in computer vision*. Kluwer Academic Publisher, Boston, 1994. ISBN 0-7923-9418-6.
- [Lud95] S. Ludwig. Untersuchungen zur Qualitätssicherung kompliziert geformter mechanischer Teile mit berührungslosen dreidimensionalen meßverfahren. Diplomarbeit, TU Ilmenau, Institut für Präzisionstechnik und Automation, 1995.
- [Luh88] T. Luhmann. Ein hochauflösendes automatisches Bildmesssystem. Dissertation, Universität Hannover, Fachrichtung Vermessungswesen, Hannover, 1988.
- [Luh00] T. Luhmann. *Nahbereichsphotogrammetrie*. Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH, Heidelberg, 2000. ISBN 3-87907-321.
- [Maa92] H.-G. Maas. Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmesstechnik. Dissertation 62, ETH Zürich, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, 1992.
- [MBW91] Y. Mainguy, J.B. Birch, and L.T. Watson. A robust variable order facet model for image data. Technical report, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1991.

- [McL97] R. A. McLaughlin. Technical report - randomized hough transform: Improved ellipse detection with comparison. Technical report, The University of Western Australia, Centre for Intelligent Information Processing Systems, 1997. <http://ciips.ee.uwa.edu.au/Papers>.
- [MH80] D. Marr and E. Hildret. Theory of edge detection. *Proceedings of the Royal Society of London*, 207:187–217, 1980.
- [MH97] H. Schlemmer M. Hovenbitzer. *A line-scanning theodolite-based system for 3D applications in close range Optical 3-D Measurement Techniques IV*. Wichmann-Verlag, Heidelberg, 1997.
- [Mir96] B. Mirkin. *Mathematical Classification and Clustering*, volume 11. Kluwer Academic Publisher, Dordrech, Boston, London, 1996. ISBN 0-7923-4159-7.
- [Mis97] A. Mischke. Entwicklung eines Videotheodolit-Messsystems zur automatischen Richtungsmessung von nicht signalisierten Objektpunkten. Dissertation, Technische Universität Wien, TU Wien, Technisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Institut für Landvermessung und Ingenieurgeodäsie, 1060 Wien, 1997.
- [MK02] O. Müller and R. Kunze. Bresenham algorithmus. Technical report, Universität Osnabrück, Fachgebiet Informatik, 2002. <http://www-lehre.informatik.uni-osnabrueck.de/cg/2002/skript/node37.html>.
- [MVT00] MVTEC. Halcon. <http://www.mvtec.de/halcon/>, 2000.
- [Neh01] U. Nehse. Beleuchtungs- und Fokusregelungen für die objektivierte optische Präzisionsantastung in der Koordinatenmesstechnik. Dissertation, TU Ilmenau, Institut für Präzisionstechnik und Automation, 2001.
- [Osu02] R. Gutierrez Osuna. Unsupervised learning ii. Vorlesungsschrift, TAMU Computer Science Faculty, 2002. <http://faculty.cs.tamu.edu/rgutier/courses/cs790wi02/115.pdf>.
- [Par94] J. R. Parker. *Practical Computer Vision Using C*. John Wiley & Sons, New York, 1994. ISBN 0-471-59259-5.
- [Par96] J.R. Parker. *Algorithms for Image Processing and Computer Vision*. Wiley Computer Publishing, John Wiley and Sons, New York, 1. edition, 1996. ISBN 0-471-14056-2.
- [PFP95] M. Pregonzer, D. Flotzinger, and G. Pfurtscheler. Distinction sensitive learning vector quantization: A new noise-insensitive classification method. *4th International Conference on Artificial Neural Networks*, 1995.
- [PIK89] John Princen, John Illingworth, and Josef Kittler. A hierarchical approach to line extraction. *in Proceedings CVPR 1989 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE*, 1(92-97), 1989.
- [PIK90] John Princen, John Illingworth, and Josef Kittler. A hierarchical approach to line extraction based on the Hough transform. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 52:57–77, 1990.

- [PTVF97] William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, and Brian P. Flannery. *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, 2 edition, 1997. ISBN 0-521-43108-5.
- [Rho02] Dr. Harvey Rhody. Circle hough transform. Technical report, Carlson Center for Imaging Science, Oktober 2002. [http://www.cis.rit.edu/class/simg782/lectures/lecture\\_11/lec\\_782\\_2002\\_11.pdf](http://www.cis.rit.edu/class/simg782/lectures/lecture_11/lec_782_2002_11.pdf).
- [Ros98] K. Rose. Deterministic annealing for clustering, compression, classification, regression, and related optimization problems. *Proceedings of IEEE*, 86(11):2210–2239, 1998. <http://citeseer.nj.nec.com/rose98deterministic.html>.
- [SC92] J. Shen and S. Castan. An optimal linear operator for step edge detection. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 54:112–133, 1992.
- [Sch90] E. Schrüfer. Signalverarbeitung - Numerische Verarbeitung digitaler Signale, 1990.
- [See96] M. Seeber. Untersuchungen von intelligenten Bildverarbeitungsalgorithmen zur Bestimmung der Lage optisch wirksamer Strukturen auf einer CCD-Matrix unter Echtzeitbedingungen sowie ihrer Einsatzfähigkeit in geodätischen Instrumenten. Diplomarbeit, TU Ilmenau, Institut für Präzisionstechnik und Automation, 1996.
- [Ski02] S. Skibak. Proseminar Computervision: Geradenbestimmung mit der Hough-Transformation. Technical report, Universität Ulm, Fakultät für Informatik, Juni 2002. [http://www.informatik.uni-ulm.de/ni/Lehre/SS02/Proseminar\\_CV/ausarbeitungen1/HT.pdf](http://www.informatik.uni-ulm.de/ni/Lehre/SS02/Proseminar_CV/ausarbeitungen1/HT.pdf).
- [SOS00] M. Seul, L. O’Gorman, and M. J. Sammon. *Practical Algorithms for Image Analysis*. Cambridge University Press, Cambridge, 1. edition, 2000. ISBN 0-521-66065-3.
- [Spo97] J. Sporring. *Gaussian scale-space theory*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 1997. ISBN 0-7923-4561-4.
- [Ste93] R. Steinbrecher. *Bildverarbeitung in der Praxis*. R. Oldenburg Verlag GmbH, 1993. ISBN 3-486-22372-0.
- [Ste98] C. Steger. Unbiased extraction of curvilinear structures from 2d and 3d images. Dissertation, Technische Universität München, Fakultät für Informatik, 1998.
- [Ste00] C. Steger. Subpixel-precise extraction of lines and edges. Kongresses der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Amsterdam, MVTec Software GmbH, 2000.
- [Teu93] J. Teuber. *Digital Image Processing*. Prentice Hall International Ltd, 1993.
- [UBKL02] C. Usbeck, P. Brückner, O. Kühn, and G. Linß. Verfahren zur Minimierung des Einflusses von Störungen bei der Formelementeberechnung aus Koordinatenpunkten. Patent in Anmeldung, 2002.

- [UBL97] C. Usbeck, P. Brückner, and G. Linß. Dokumentation - Feinzielsuchsensor. Unveröffentlichte Firmenschrift, 1997.
- [ULB02] C. Usbeck, G. Linß, and P. Brückner. Bildverarbeitung in der Vermessungstechnik - Erkennung von Zielmarken. *Der Vermessungsingenieur*, (4):S.270–274, 2002. ISSN 0042-4099.
- [Unr00] O. Unrath. Informationsgewinnung aus Farbbildern zur Positionserkennung kooperativer und nichtkooperativer Merkmale in der Vermessungstechnik. Diplomarbeit 200-99 D-092, TU Ilmenau, Institut für Präzisionstechnik und Automation, 2000.
- [vdBD01] R. van den Boomgaard and L. Dorst. The local structure of images. Lecture Notes, University of Amsterdam, 2001. <http://carol.wins.uva.nl/>.
- [VHS02] T. Villmann, B. Hammer, and Marc Strickert. Supervised neural gas for learning vector quantization. Artikel, Universität Leipzig, Universität Osnabrück, 2002. <http://www.informatik.uni-osnabrueck.de/marc/papers/gi02.pdf>.
- [Wal02] T. Walter. Lagebestimmung einfacher geometrischer Objekte in zweidimensionalen Bildern. Proseminar: Informatik in der Medizin, Universität Karlsruhe, Institut für Prozessrechentchnik, Automation und Robotik, 2002.
- [Wei90] M. Weigert. Ein Beitrag zur Untersuchung von Einflußfaktoren auf einen Optimalalgorithmus zur subpixelgenauen Lagebestimmung punktförmiger Abbildungen. Dissertation, TU Ilmenau, 1990. 90B166-2.
- [Wit83] A. P. Witkin. Scale-space filtering. *7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 1019–1022, 1983.
- [XOK90] L. Xu, E. Oja, and P. Kultanen. A new curve detection method: Randomized hough transform (rht). *Pattern Recognition*, 11(5):331–338, 1990.
- [YIK89] H. K. Yuen, J. Illingworth, and J. Kittler. Detecting partially occluded ellipses using the hough transform. *Image and Vision Computing*, 7(1):31–37, 1989.
- [Zam91] P. Zamperoni. *Methoden der digitalen Bildverarbeitung*. Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, 2. edition, 1991.
- [Zho86] G. Zhou. Accurate determination of ellipse centers in digital imagery. ASPRS Annual Convention 4, March 1986. pp. 256-264.

# Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Bei der Auswahl und Auswertung folgenden Materials haben mir die nachstehend aufgeführten Personen in der jeweils beschriebenen Weise (entgeltlich/unentgeltlich) geholfen:

1. keine
2. keine
3. keine

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalte der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich bin darauf hingewiesen worden, dass die Unrichtigkeit der vorstehenden Erklärung als Täuschungsversuch angesehen wird und den erfolglosen Abbruch des Promotionsverfahrens zu Folge hat.

Benshausen, den .....  
(Ort und Datum)

.....  
(Unterschrift)

Ein Beitrag zu neuartigen Verfahren für die  
Erkennung und Modellierung von  
Messobjekten

**Anhang**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTORINGENIEUR  
(Dr.-Ing.)

vorgelegt der Fakultät für Maschinenbau  
der  
Technischen Universität Ilmenau

von  
Dipl.-Ing.  
Christian Usbeck

geboren am 03.06.1967 in Suhl

# Anhang A

## Ergebnisse theoretischer Untersuchungen

## A.1 Untersuchung eines Approximationsansatzes für die Modellierung signalisierter kooperativer Messpunkte

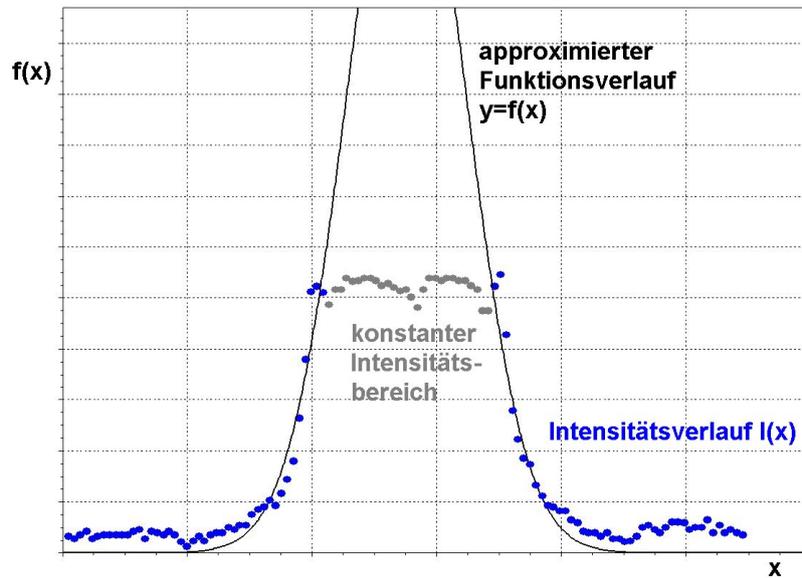


Abbildung A.1: Approximierter Verlauf der Modellfunktion  $f(x) = \frac{1}{a}e^{-\frac{(x-b)^2}{c}}$

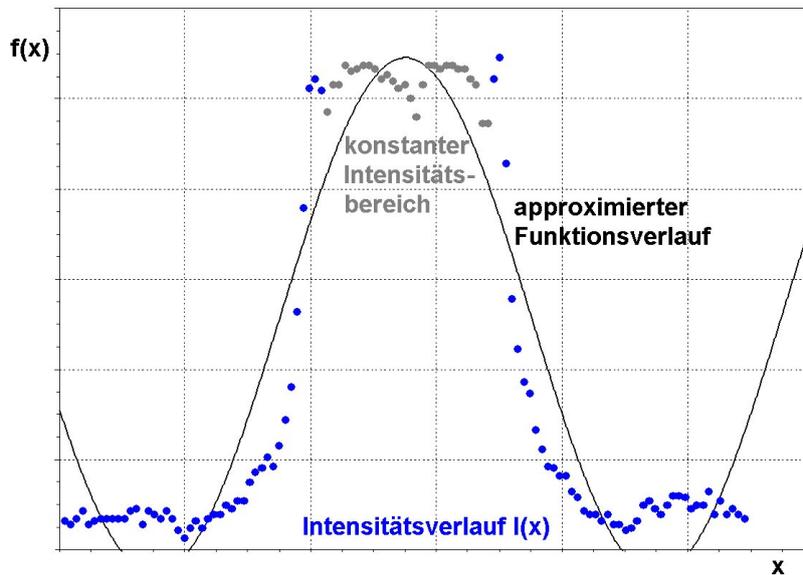


Abbildung A.2: Approximierter Verlauf der Modellfunktion  $f(x) = a + b\cos(cx + d)$

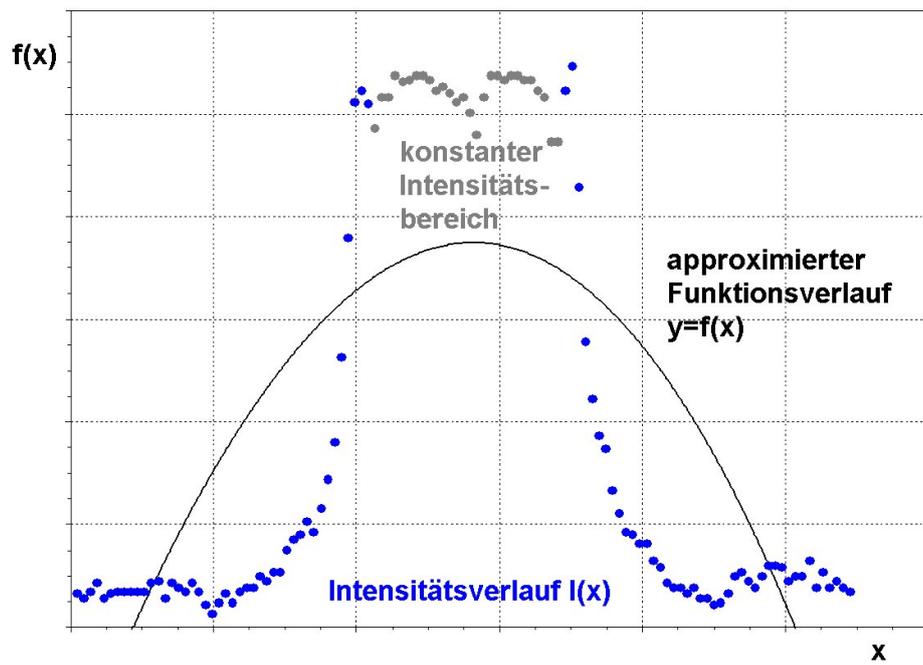


Abbildung A.3: Approximierter Verlauf der Modellfunktion  $f(x) = a + bx + cx^2 + dx^3$

## A.2 Reduzierung der Rauscheinflüsse für die histogrammbasierte Lokalisierung von Objekten

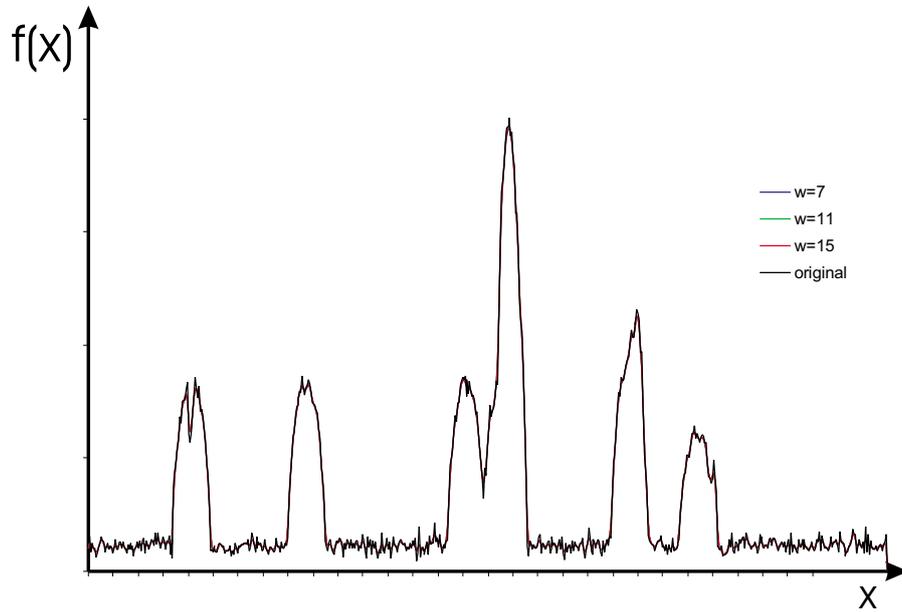


Abbildung A.4: Faltung des Histogrammverlaufs mit dem diskreten Gaußkern  $G(x, \sigma = 1)$

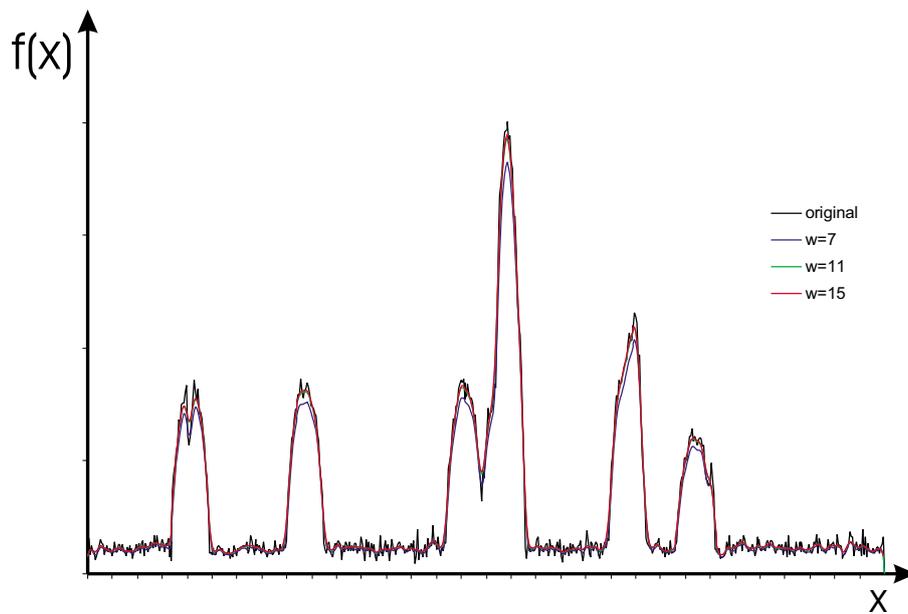


Abbildung A.5: Faltung des Histogrammverlaufs mit dem diskreten Gaußkern  $G(x, \sigma = 2)$

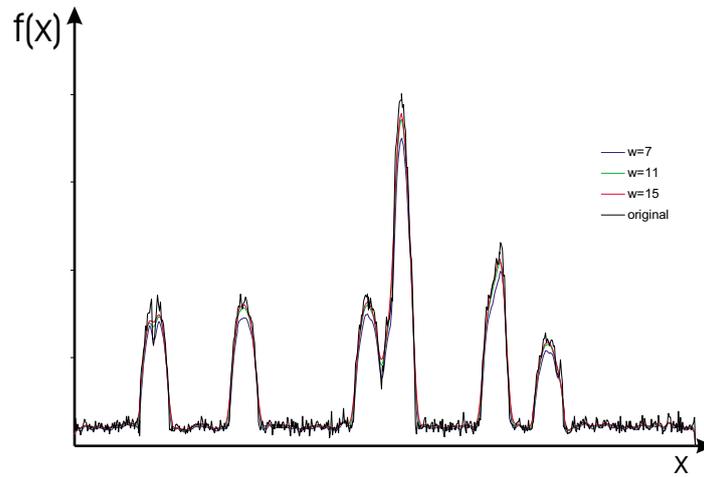


Abbildung A.6: Faltung des Histogrammverlaufs mit dem diskreten Gaußkern  $G(x, \sigma = 3)$

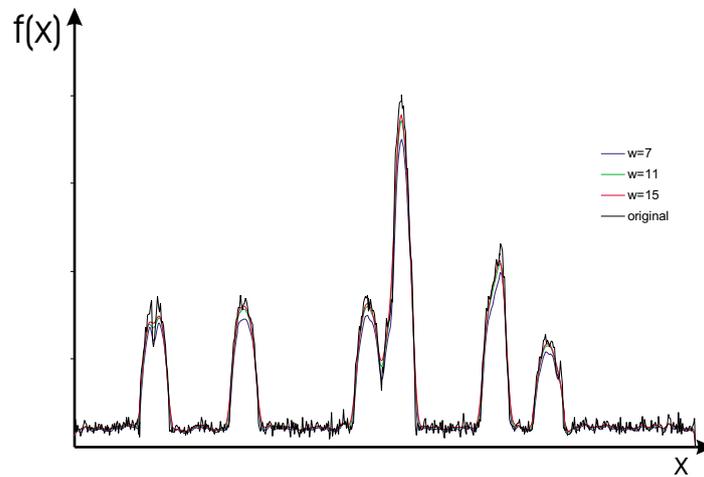


Abbildung A.7: Faltung des Histogrammverlaufs mit diskreten Gauß-Filterkernen  $G(x, \sigma = 1, 2, 3)$  der Filterbreite  $w = 7, 11, 15$  Pixel

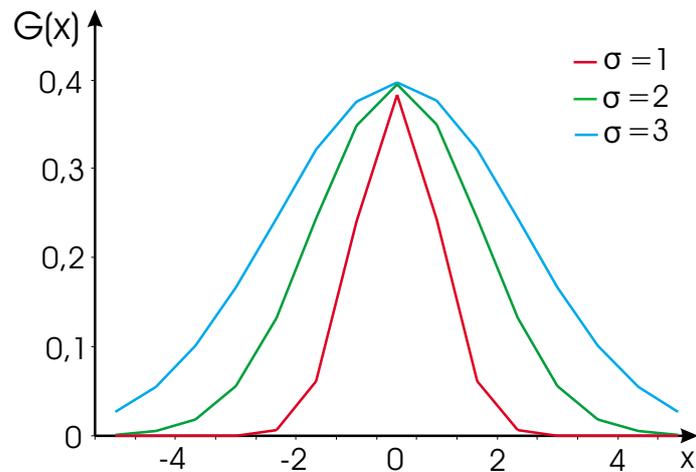


Abbildung A.8: Eindimensionale Gaußfilterkurven mit dem Mittelwert  $\mu = 0$  und Standardabweichungen  $\sigma = 1, 2, 3$

### A.3 Verfahren zur Konturpunktextraktion am Beispiel einer realen Messszene



a) asymmetrischer Gradient  
 $dx = f(x, y) - f(x - 1, y)$



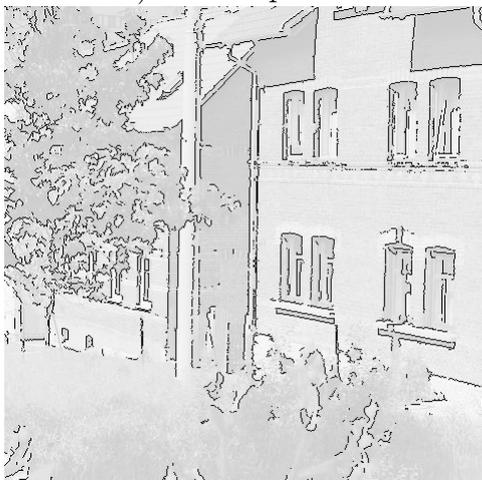
b) symmetrischer Gradient  
 $dx = f(x - 1, y) - f(x + 1, y)$



c) Sobel- Operator



d) Kirsch- Operator



e) Shen-Castan- Operator



f) Canny- Operator

Abbildung A.9: Vergleich bekannter Verfahren zur Konturpunktextraktion

## A.4 Histogrammdarstellung von Texturverläufen

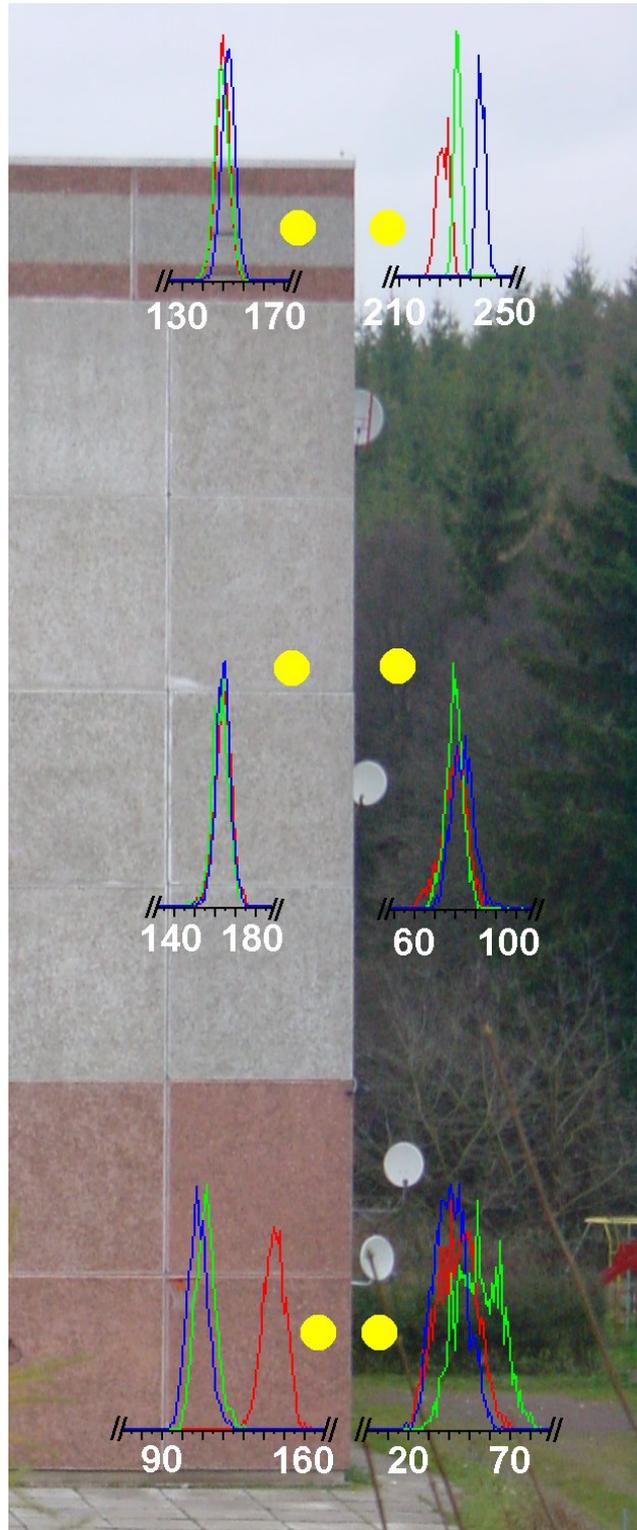


Abbildung A.10: Histogrammdarstellung ausgewählter Texturbereiche

## A.5 Einfluss der Houghparametrisierung auf die Lokalisierung von Kreisstrukturen

### A.5.1 Konturdaten und Konturparametrisierung

Position	$x_m$	$y_m$	r
1	161	261	22
2	226	161	12
3	320	272	18
4	322	272	18
5	320	272	16
6	322	272	16
7	161	259	20
8	376	176	10
9	320	270	16
10	322	270	16
11	159	261	20
12	163	261	20
13	159	259	24
14	163	259	24
15	159	263	24
16	163	263	24
17	161	263	20
18	318	272	20
19	324	272	20
20	161	265	18

Tabelle A.1: Ermittelte Kreisstrukturen aus Konturdaten ( $2 \leq r \leq 25$ ,  $\Delta r = 2$  Pixel)

Position	$x_m$	$y_m$	r
1	161	261	22
2	321	271	17
3	161	260	21
4	160	262	21
5	162	262	21
6	160	262	23
7	162	262	23
8	160	260	23
9	162	260	23
10	226	161	11
11	226	161	12
12	320	272	18
13	322	272	18
14	320	272	16
15	322	272	16
16	161	259	20
17	376	176	10
18	320	270	16
19	322	270	16
20	159	261	20

Tabelle A.2: Ermittelte Kreisstrukturen aus Konturdaten ( $2 \leq r \leq 25$ ,  $\Delta r = 1$  Pixel)

### A.5.2 Flächige Bildstruktur und Konturparametrisierung

Position	$x_m$	$y_m$	r
1	161	261	22
2	155	255	24
3	167	255	24
4	156	266	24
5	166	266	24
6	152	267	24
7	170	267	24
8	155	270	24
9	167	270	24
10	226	161	12
11	316	263	20
12	326	263	20
13	313	266	20
14	329	266	20
15	313	276	20
16	329	276	20
17	316	279	20
18	326	279	20
19	318	259	22
20	324	259	22

Tabelle A.3: Ermittelte Kreisstrukturen aus Kreisdaten ( $2 \leq r \leq 25$ ,  $\Delta r = 2$  Pixel)

Position	$x_m$	$y_m$	r
1	161	261	23
2	161	261	22
3	321	271	17
4	226	161	12
5	226	161	11
6	376	176	10
7	106	111	7
8	106	111	6
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
20	0	0	0

Tabelle A.4: Ermittelte Kreisstrukturen aus Kreisdaten ( $2 \leq r \leq 25$ ,  $\Delta r = 1$  Pixel)

### A.5.3 Flächige Bildstruktur und flächige Kreisparametrisierung

Position	$x_m$	$y_m$	r
1	161	261	22
2	226	161	12
3	376	176	10
4	106	111	6
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
20	0	0	0

Tabelle A.5: Ermittelte Kreisstrukturen aus Kreisdaten ( $2 \leq r \leq 25$ ,  $\Delta r = 2$  Pixel)

Position	$x_m$	$y_m$	r
1	161	261	23
2	161	261	22
3	321	271	17
4	226	161	12
5	226	161	11
6	376	176	10
7	106	111	7
8	106	111	6
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
20	0	0	0

Tabelle A.6: Ermittelte Kreisstrukturen aus Kreisdaten ( $2 \leq r \leq 25$ ,  $\Delta r = 1$  Pixel)

### A.5.4 Flächige Bildstruktur, flächige Kreisparametrisierung und Rauschen

Position	$x_m$	$y_m$	r
1	161	261	23
2	161	261	22
3	321	271	17
4	226	161	12
5	226	161	11
6	376	176	10
7	106	111	7
8	106	111	6
9	379	171	4
10	381	173	4
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
20	0	0	0

Tabelle A.7: Ermittelte Kreisstrukturen aus Kreisdaten ( $2 \leq r \leq 25$ ,  $\Delta r = 2$  Pixel) mit 10% Rauschen

Position	$x_m$	$y_m$	r
1	161	261	23
2	161	261	22
3	321	271	17
4	226	161	12
5	226	161	11
6	376	176	10
7	106	111	7
8	106	111	6
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
20	0	0	0

Tabelle A.8: Ermittelte Kreisstrukturen aus Kreisdaten ( $2 \leq r \leq 25$ ,  $\Delta r = 1$  Pixel) mit 20% Rauschen

# Anhang B

## Simulation der Prismenanziehung

## B.1 Unsicherheit der Anzielung im Binärbild

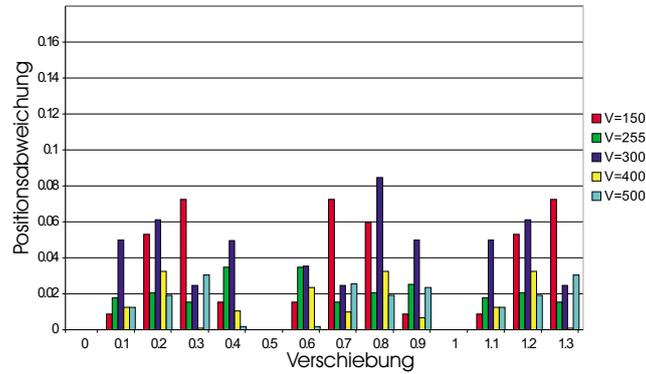


Abbildung B.1: Positionsabweichung  $\Delta P_m$  für einen Spot  $\sigma_x = \sigma_y = 10$

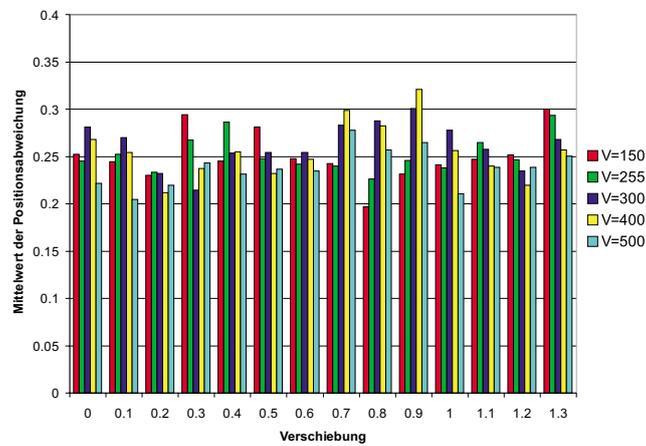


Abbildung B.2: Mittelwert von  $\Delta P_m$  für ein Spotmodell mit  $\sigma_x = \sigma_y = 10$  und Rauschanteil  $\beta(0, 1)$

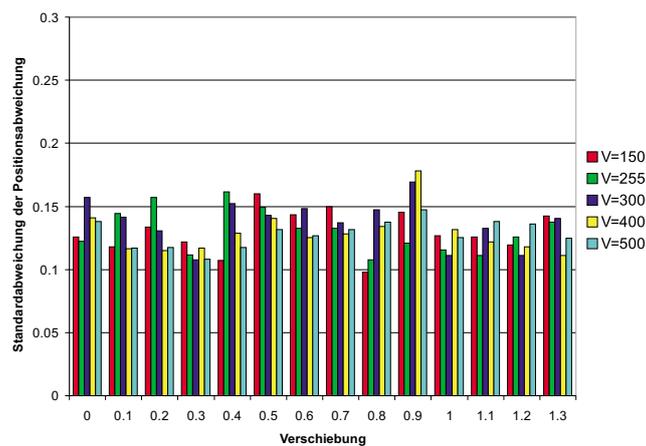


Abbildung B.3: Standardabweichung von  $\Delta P_m$  für ein Spotmodell mit  $\sigma_x = \sigma_y = 10$  und Rauschanteil  $\beta(0, 1)$

	$\sigma_x = \sigma_y = 4$	$\sigma_x = \sigma_y = 6$	$\sigma_x = \sigma_y = 10$	$\sigma_x = \sigma_y = 20$
V=150	0,3232	0,2834	0,3003	0,3382
V=255	0,2647	0,2727	0,2936	0,3364
V=300	0,2228	0,2791	0,3205	0,3287
V=400	0,3347	0,2714	0,3273	0,3443
V=500	0,2956	0,2594	0,3165	0,3236
Maximum <sup>1</sup> (V=150 ... 500):	0,3347	0,2834	0,3273	0,3443
Maximum <sup>1</sup> (V=255 ... 500):	0,3347	0,2791	0,3273	0,3443
Gesamt <sup>2</sup> :	0,3443			

<sup>1</sup> Maximaler Mittelwert über  $\Delta P_m$  für jeweils eine Spotgröße

<sup>2</sup> Maximaler Mittelwert über  $\Delta P_m$  für alle Spotgrößen  $\sigma_x, \sigma_y$  und Verstärkungsfaktoren  $V$

Tabelle B.1: Abhängigkeit des maximalen Mittelwertes über  $\Delta P_m$  von der Spotgröße für Anzielungen im Binärbild

	$\sigma_x = \sigma_y = 4$	$\sigma_x = \sigma_y = 6$	$\sigma_x = \sigma_y = 10$	$\sigma_x = \sigma_y = 20$
V=150	0,1276	0,1510	0,1598	0,1862
V=255	0,1224	0,1334	0,1613	0,1870
V=300	0,1217	0,1494	0,1693	0,1869
V=400	0,1469	0,1306	0,1798	0,1853
V=500	0,1412	0,1415	0,1757	0,1763
Maximum <sup>1</sup> (V=150 ... 500):	0,1469	0,1510	0,1798	0,1870
Maximum <sup>1</sup> (V=255 ... 500):	0,1469	0,1494	0,1798	0,1870
Gesamt <sup>2</sup> :	0,1870			

<sup>1</sup> Maximaler Mittelwert über  $\Delta P_m$  für jeweils eine Spotgröße

<sup>2</sup> Maximaler Mittelwert über  $\Delta P_m$  für alle Spotgrößen  $\sigma_x, \sigma_y$  und Verstärkungsfaktoren  $V$

Tabelle B.2: Abhängigkeit der maximalen Standardabweichung über  $\Delta P_m$  von der Spotgröße für Anzielungen im Binärbild

## B.2 Anzielunsicherheit des Schwerpunktverfahrens

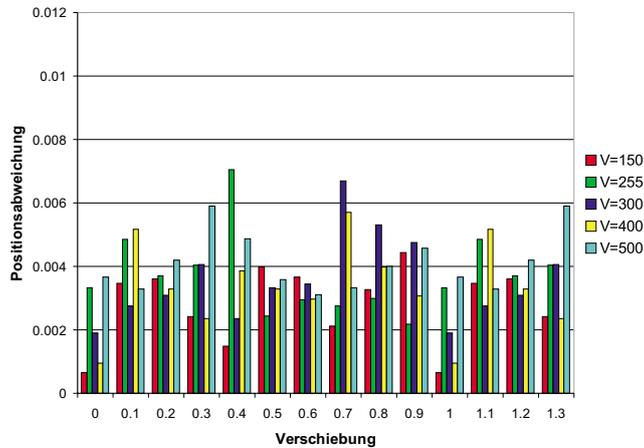


Abbildung B.4: Positionsabweichung für ein Spotmodell mit  $\sigma_x = \sigma_y = 10$

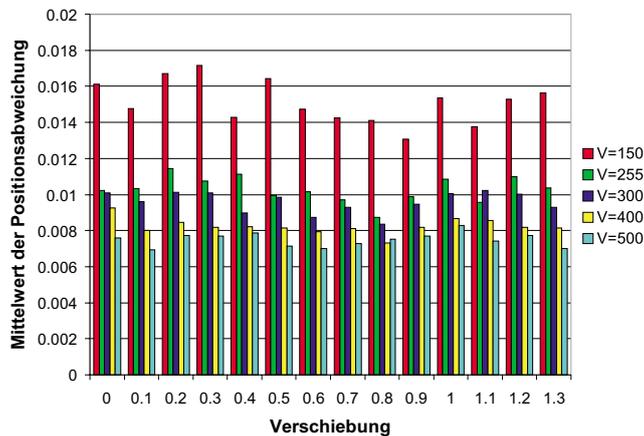


Abbildung B.5: Mittelwert von  $\Delta P_m$  für ein Spotmodell ( $\sigma_x = \sigma_y = 10$  und  $\beta(0, 1)$ )

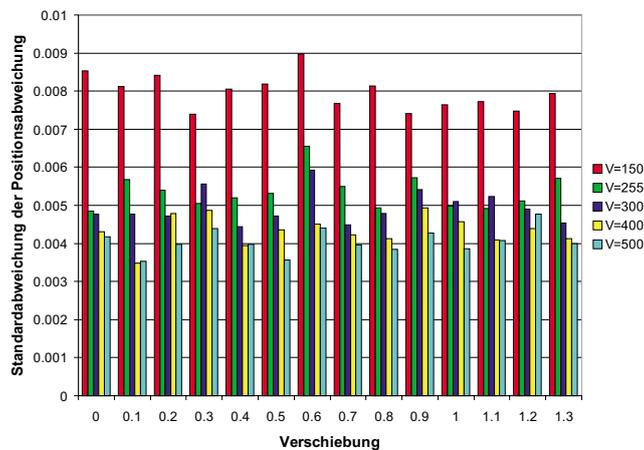


Abbildung B.6: Standardabweichung von  $\Delta P_m$  für ein Spotmodell ( $\sigma_x = \sigma_y = 10$  und  $\beta(0, 1)$ )

	$\sigma_x = \sigma_y = 4$	$\sigma_x = \sigma_y = 6$	$\sigma_x = \sigma_y = 10$	$\sigma_x = \sigma_y = 20$
V=150	0,0178	0,0181	0,0182	0,0220
V=255	0,0121	0,0110	0,0118	0,0141
V=300	0,0096	0,0102	0,0112	0,0143
V=400	0,0100	0,0088	0,0099	0,0107
V=500	0,0082	0,0078	0,0090	0,0108
Maximum <sup>1</sup> (V=150 ... 500):	0,0178	0,0181	0,0182	0,0220
Maximum <sup>1</sup> (V=255 ... 500):	0,0121	0,0110	0,0118	0,0143
Gesamt <sup>2</sup> :	0,0220			

<sup>1</sup> Maximaler Mittelwert über  $\Delta P_m$  für jeweils eine Spotgröße

<sup>2</sup> Maximaler Mittelwert über  $\Delta P_m$  für alle Spotgrößen  $\sigma_x, \sigma_y$  und Verstärkungsfaktoren  $V$

Tabelle B.3: Maximaler Mittelwert von  $\Delta P_m$  in Abhängigkeit der Spotgröße

	$\sigma_x = \sigma_y = 4$	$\sigma_x = \sigma_y = 6$	$\sigma_x = \sigma_y = 10$	$\sigma_x = \sigma_y = 20$
V=150	0,0099	0,0097	0,0099	0,0131
V=255	0,0058	0,0060	0,0065	0,0077
V=300	0,0052	0,0056	0,0059	0,0063
V=400	0,0051	0,0043	0,0049	0,0062
V=500	0,0040	0,0040	0,0048	0,0052
Maximum <sup>1</sup> (V=150 ... 500):	0,0099	0,0097	0,0099	0,0131
Maximum <sup>1</sup> (V=255 ... 500):	0,0058	0,0060	0,0065	0,0077
Gesamt <sup>2</sup> :	0,0131			

<sup>1</sup> Maximaler Mittelwert über  $\Delta P_m$  für jeweils eine Spotgröße

<sup>2</sup> Maximaler Mittelwert über  $\Delta P_m$  für alle Spotgrößen  $\sigma_x, \sigma_y$  und Verstärkungsfaktoren  $V$

Tabelle B.4: Maximale Standardabweichung von  $\Delta P_m$  in Abhängigkeit der Spotgröße

### B.3 Anzielunsicherheit der Polynomapproximation

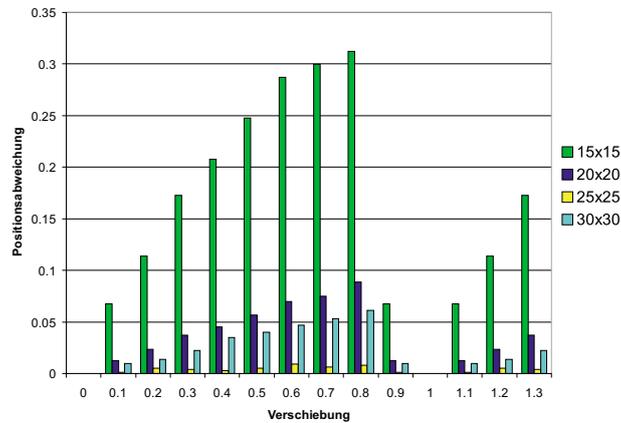


Abbildung B.7: Positionsabweichung für eine Zielmarke  $\sigma_x = \sigma_y = 12$ ,  $V = 300$

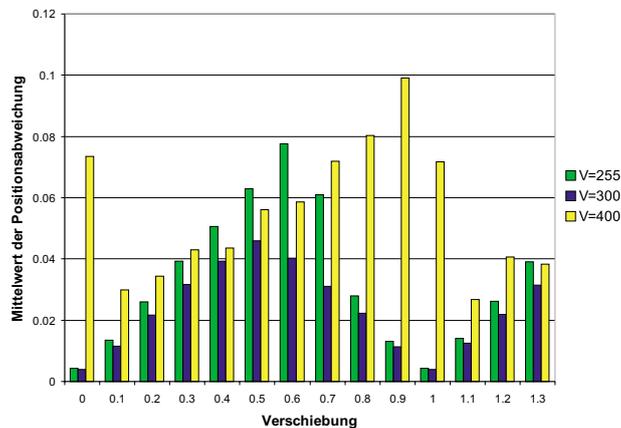


Abbildung B.8: Mittelwert von  $\Delta P_m$  für ein Spotmodell mit  $\sigma_x = \sigma_y = 10$  und Rauschenanteil  $\beta(0, 1)$

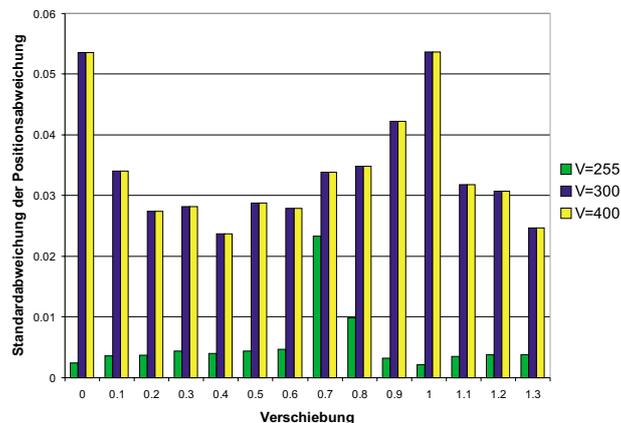


Abbildung B.9: Standardabweichung von  $\Delta P_m$  für ein Spotmodell mit  $\sigma_x = \sigma_y = 10$  und Rauschenanteil  $\beta(0, 1)$

	$\sigma_x = \sigma_y = 4$	$\sigma_x = \sigma_y = 8$	$\sigma_x = \sigma_y = 12$	$\sigma_x = \sigma_y = 20$
V=255	0,0777	0,0209	0,0468	0,0228
V=300	0,0463	0,0796	0,0083	0,0210
V=400	0,0991	0,0287	0,1019	0,1376
Maximum <sup>1</sup> (V=255 ... 400):	0,0991	0,0796	0,1019	0,1376
Gesamt <sup>2</sup> :	0,1376			

<sup>1</sup> Maximaler Mittelwert über  $\Delta P_m$  für jeweils eine Spotgröße

<sup>2</sup> Maximaler Mittelwert über  $\Delta P_m$  für alle Spotgrößen  $\sigma_x, \sigma_y$  und Verstärkungsfaktoren  $V$

Tabelle B.5: Maximaler Mittelwert der Positionsabweichung in Abhängigkeit der Spotgröße

	$\sigma_x = \sigma_y = 4$	$\sigma_x = \sigma_y = 8$	$\sigma_x = \sigma_y = 12$	$\sigma_x = \sigma_y = 20$
V=255	0,0233	0,0104	0,0222	0,0138
V=300	0,0068	0,0320	0,0045	0,0103
V=400	0,0537	0,0077	0,0498	0,0769
Maximum <sup>1</sup> (V=255 ... 400):	0,0537	0,0320	0,0498	0,0769
Gesamt <sup>2</sup> :	0,0769			

<sup>1</sup> Maximaler Mittelwert über  $\Delta P_m$  für jeweils eine Spotgröße

<sup>2</sup> Maximaler Mittelwert über  $\Delta P_m$  für alle Spotgrößen  $\sigma_x, \sigma_y$  und Verstärkungsfaktoren  $V$

Tabelle B.6: Maximale Standardabweichung in Abhängigkeit der Spotgröße

## B.4 Anzielunsicherheit der Ellipsenapproximation

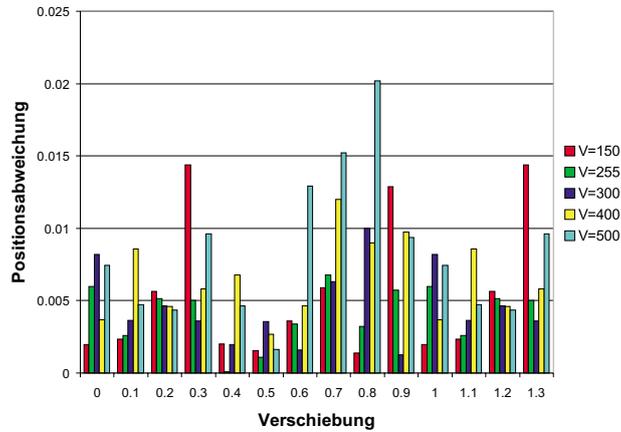


Abbildung B.10: Positionsabweichung eines Spotmodells  $\sigma_x = \sigma_y = 10$

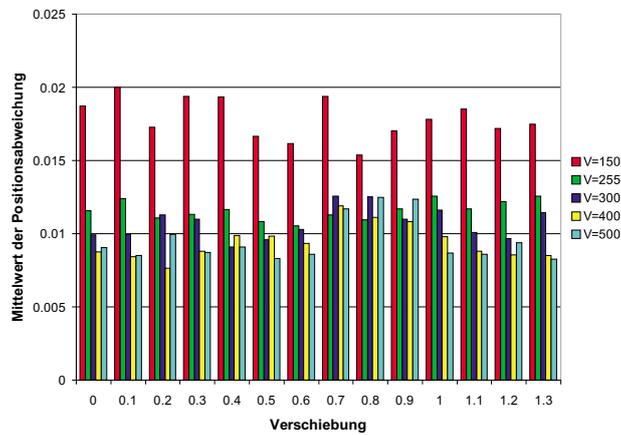


Abbildung B.11: Mittelwert von  $\Delta P_m$  für ein Spotmodell mit  $\sigma_x = \sigma_y = 10$  und Rauschanteil  $\beta(0, 1)$

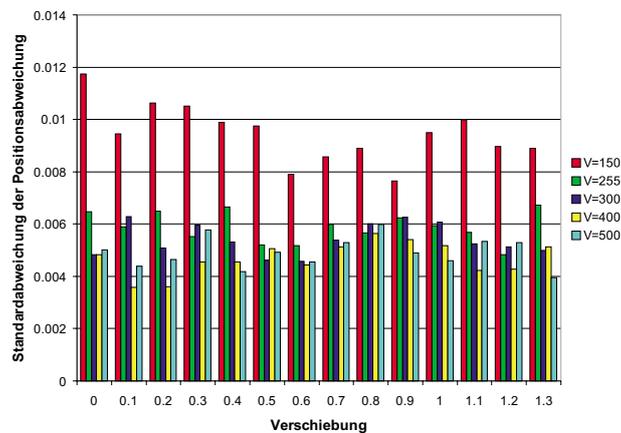


Abbildung B.12: Standardabweichung von  $\Delta P_m$  für ein Spotmodell mit  $\sigma_x = \sigma_y = 10$  und Rauschanteil  $\beta(0, 1)$

	$\sigma_x = \sigma_y = 10$	$\sigma_x = \sigma_y = 12$	$\sigma_x = \sigma_y = 14$	$\sigma_x = \sigma_y = 20$
V=150	0,0200	0,0228	0,0253	0,0303
V=255	0,0126	0,0148	0,0170	0,0208
V=300	0,0126	0,0140	0,0152	0,0207
V=400	0,0119	0,0124	0,0139	0,0142
V=500	0,0125	0,0124	0,0152	0,0135
Maximum <sup>1</sup> (V=255 ... 500):	0,0126	0,0148	0,0170	0,0208
Maximum <sup>1</sup> (V=150 ... 500):	0,0200	0,0228	0,0253	0,0303
Gesamt <sup>2</sup> :	0,0303			

<sup>1</sup> Maximaler Mittelwert über  $\Delta P_m$  für jeweils eine Spotgröße

<sup>2</sup> Maximaler Mittelwert über  $\Delta P_m$  für alle Spotgrößen  $\sigma_x, \sigma_y$  und Verstärkungsfaktoren  $V$

Tabelle B.7: Abhängigkeit des maximalen Mittelwertes von der Spotgröße für die Approximation einer Ellipse

	$\sigma_x = \sigma_y = 10$	$\sigma_x = \sigma_y = 12$	$\sigma_x = \sigma_y = 14$	$\sigma_x = \sigma_y = 20$
V=150	0,0117	0,0119	0,0133	0,0170
V=255	0,0067	0,0077	0,0090	0,0112
V=300	0,0063	0,0077	0,0094	0,0098
V=400	0,0056	0,0070	0,0081	0,0081
V=500	0,0063	0,0060	0,0073	0,0070
Maximum <sup>1</sup> (V=255 ... 500):	0,0067	0,0077	0,0094	0,0112
Maximum <sup>1</sup> (V=150 ... 500):	0,0117	0,0119	0,0133	0,0170
Gesamt <sup>2</sup> :	0,0170			

<sup>1</sup> Maximaler Mittelwert über  $\Delta P_m$  für jeweils eine Spotgröße

<sup>2</sup> Maximaler Mittelwert über  $\Delta P_m$  für alle Spotgrößen  $\sigma_x, \sigma_y$  und Verstärkungsfaktoren  $V$

Tabelle B.8: Abhängigkeit der maximalen Standardabweichung von der Spotgröße für die Approximation einer Ellipse

# Anhang C

## Lokalisierung von Prismenregionen

## C.1 Testbilder für die Bestimmung von Regionen

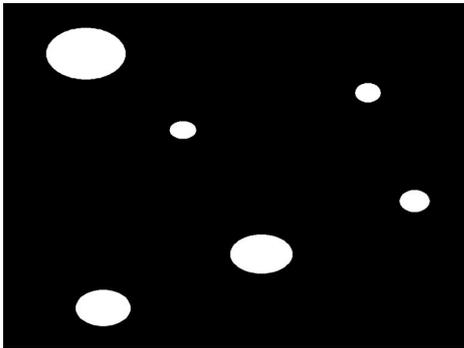


Abbildung C.1: Simulation von mehreren signalisierten Prismen

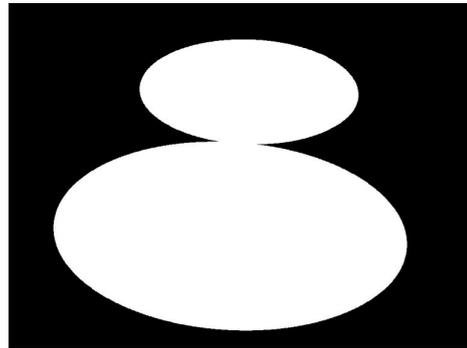


Abbildung C.2: Simulation der Überlapung von zwei Prismen

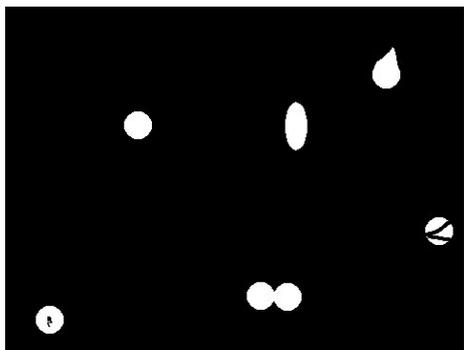


Abbildung C.3: Simulation gestörter Prismenbilder

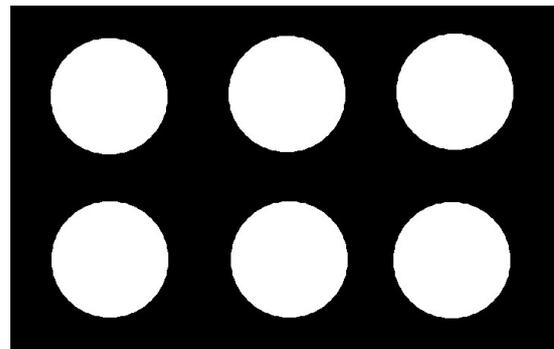


Abbildung C.4: Simulation von matrixförmig angeordneten Prismen

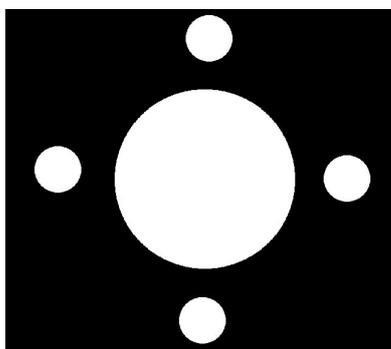


Abbildung C.5: Simulation von Prismen unterschiedlicher Entfernung

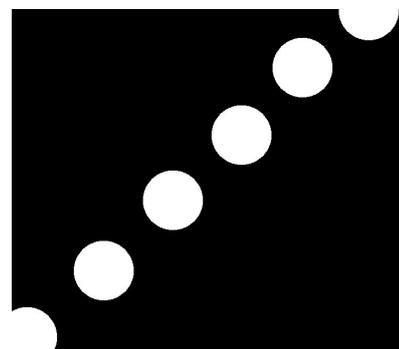


Abbildung C.6: Simulation von diagonal angeordneten Prismen

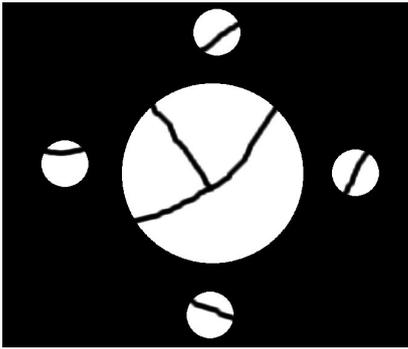


Abbildung C.7: Simulation von gestörten Prismenbildern in unterschiedlicher Entfernung

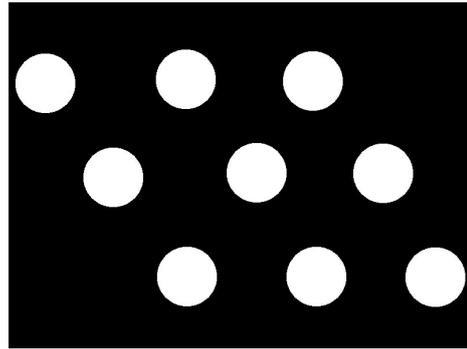


Abbildung C.8: Simulation von versetzt matrixförmig angeordneten Prismen

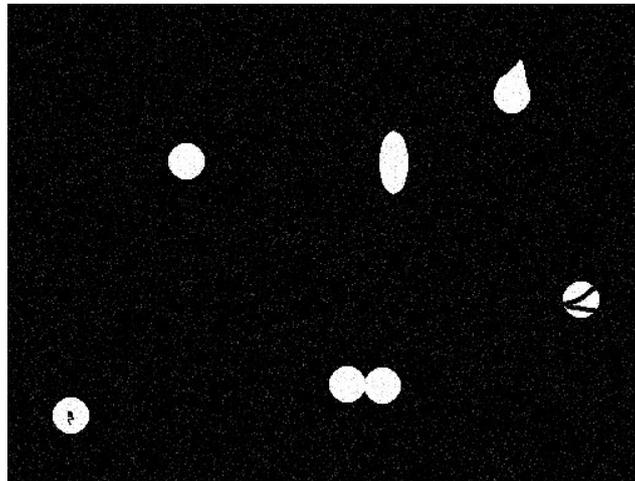


Abbildung C.9: Simulation mehrerer signalisierter Prismen mit 10% zufälligem Rauschen

## C.2 Laterale Histogrammtechnik

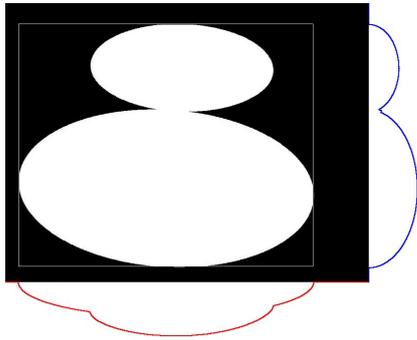


Abbildung C.10: Laterale Histogrammtechnik für überlappende Prismenbilder

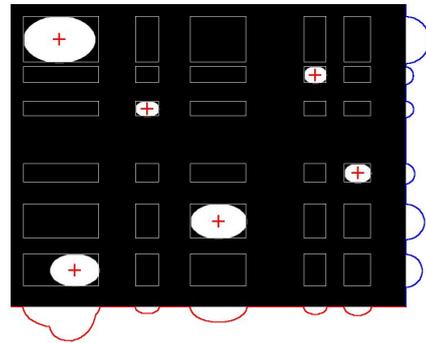


Abbildung C.11: Laterale Histogrammtechnik mit mehreren Prismenbildern

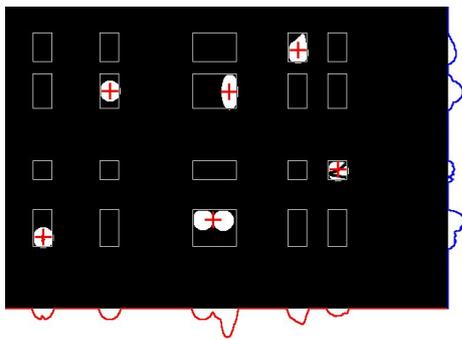


Abbildung C.12: Laterale Histogrammtechnik für gestörte Prismenbilder

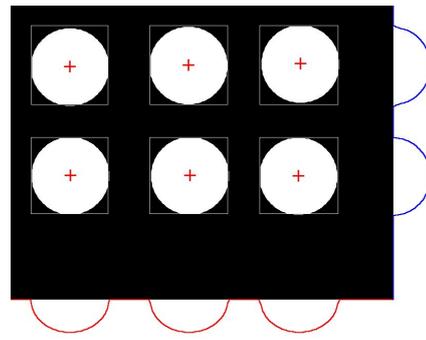


Abbildung C.13: Laterale Histogrammtechnik einer matrixförmigen Prismenanordnung

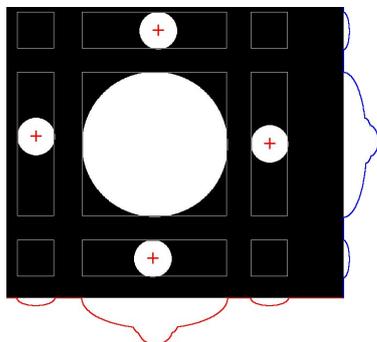


Abbildung C.14: Laterale Histogrammtechnik für Prismen unterschiedlicher Entfernung

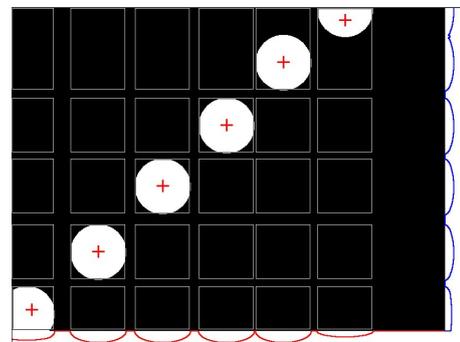


Abbildung C.15: Laterale Histogrammtechnik einer diagonalen Prismenanordnung

## C.3 Segmentierung durch Clusterbildung

### C.3.1 Clusterbildung mit mehreren Prismen

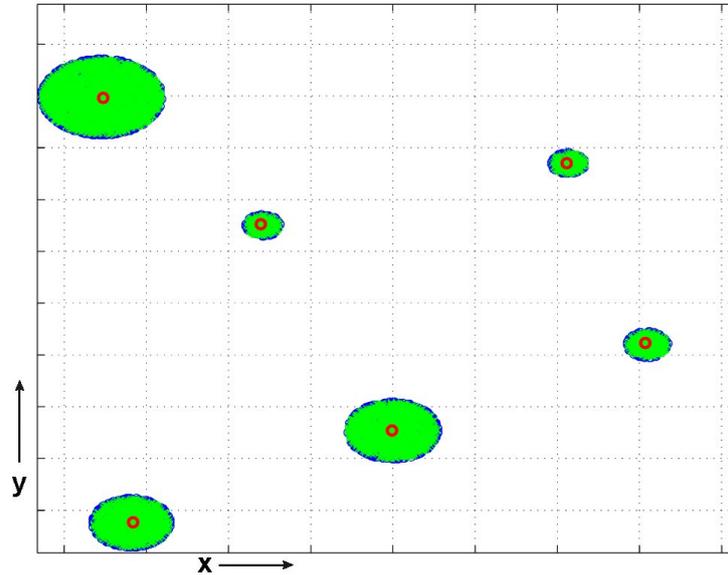


Abbildung C.16: Clusterbildung mit Agglomerative Clustering

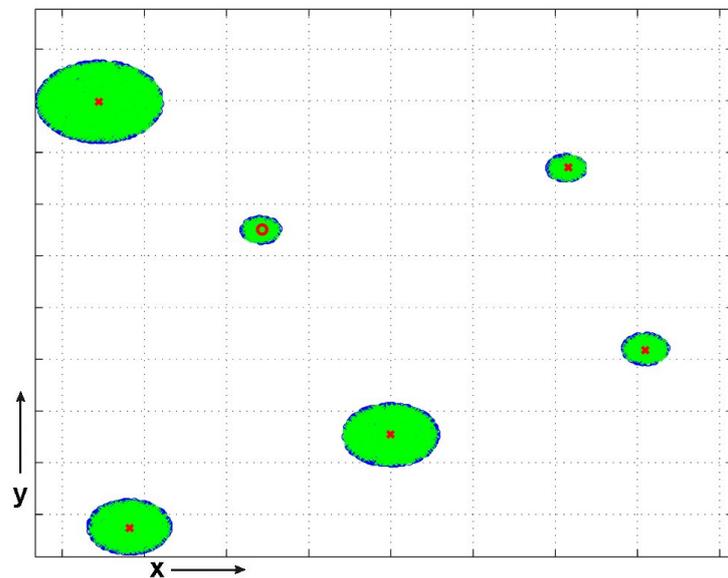


Abbildung C.17: Clusterbildung mit Deterministic Annealing

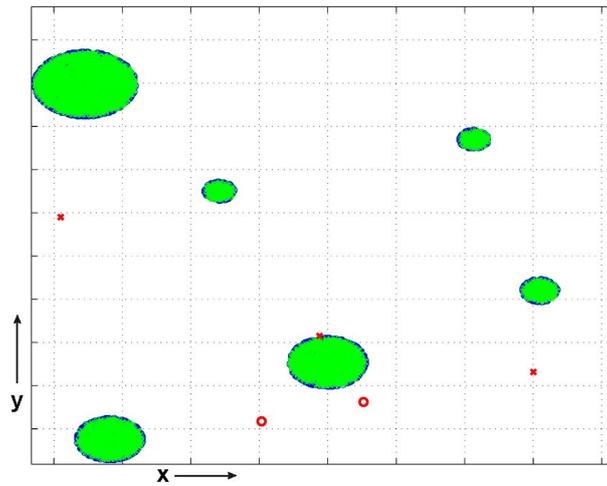


Abbildung C.18: Clusterbildung mit Distinction Sensitive Linear Vector Quantization

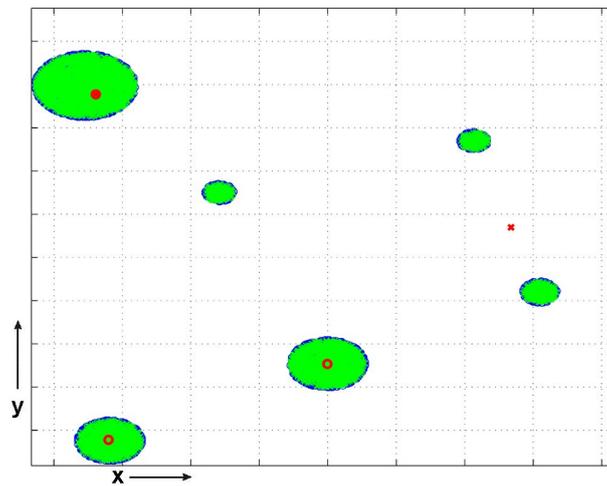


Abbildung C.19: Clusterbildung mit Stochastic simulated annealing

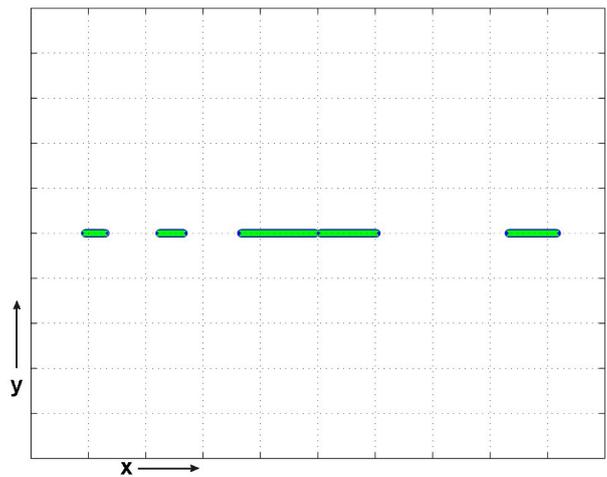


Abbildung C.20: Clusterbildung mit Fishers linear discriminant.

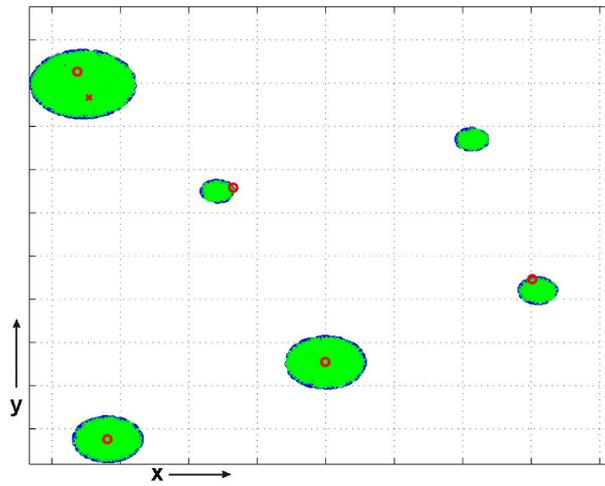


Abbildung C.21: Clusterbildung mit Fuzzy k-Means, Vorgabe 6 Cluster

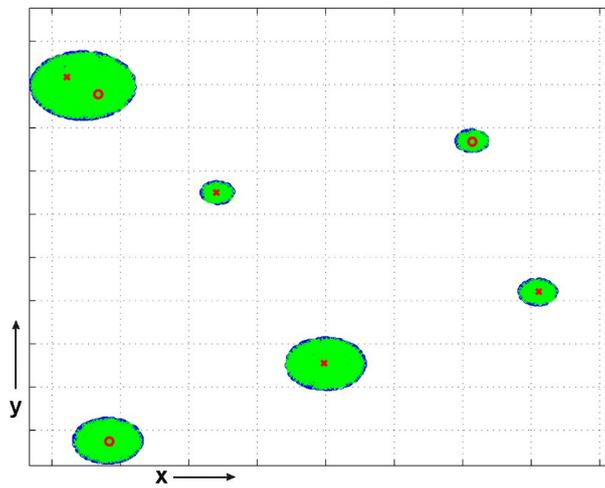


Abbildung C.22: Clusterbildung mit Fuzzy k-Means, Vorgabe 7 Cluster

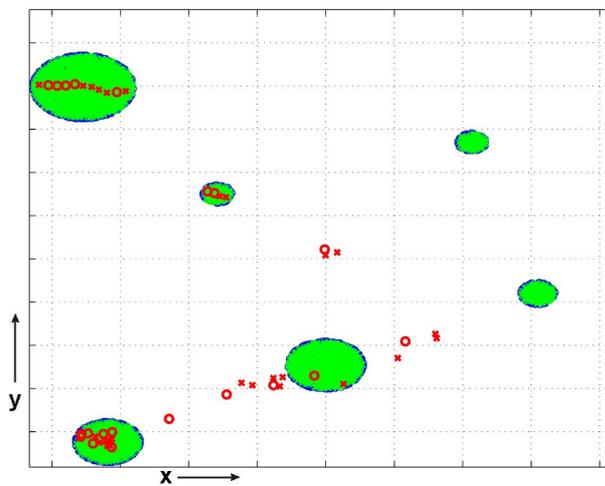


Abbildung C.23: Clusterbildung mit Basic Leader-Follower Clustering

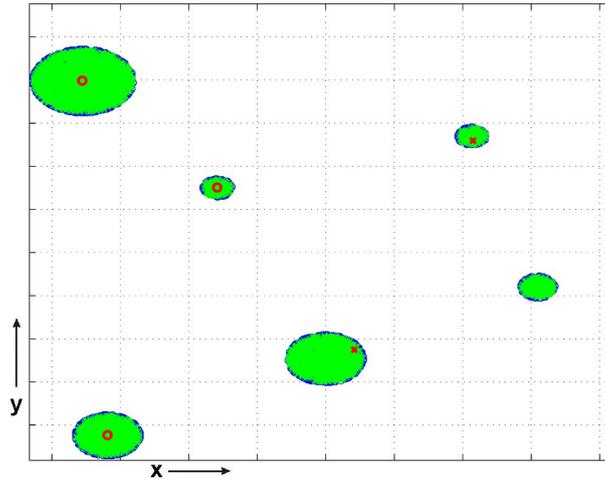


Abbildung C.24: Clusterbildung mit k-Means, Vorgabe 6 Cluster

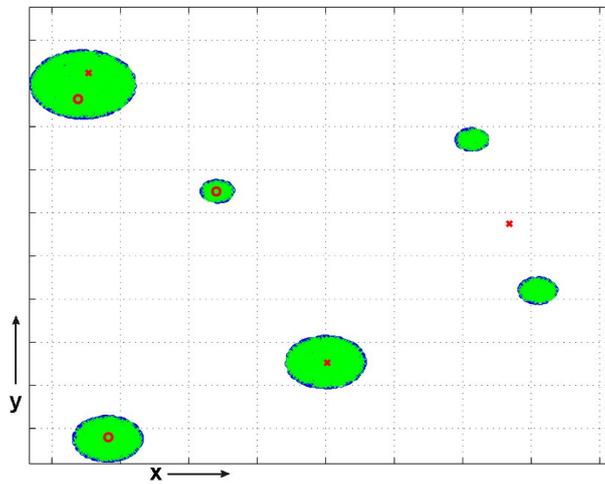


Abbildung C.25: Clusterbildung mit Fuzzy k-Means, Vorgabe 7 Cluster

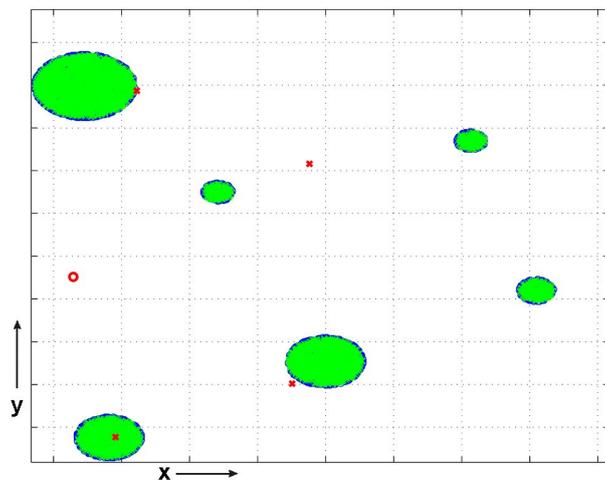


Abbildung C.26: Clusterbildung mit Linear Vector Quantization (1 Nachbarelement), Vorgabe 6 Cluster

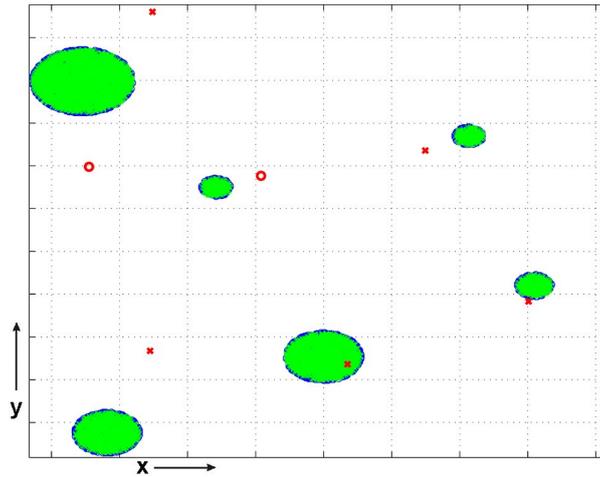


Abbildung C.27: Clusterbildung mit Linear Vector Quantization (1 Nachbarelement), Vorgabe 7 Cluster

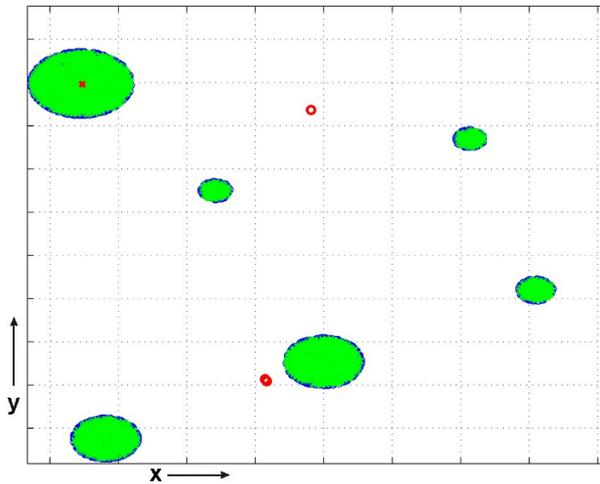


Abbildung C.28: Clusterbildung mit Linear Vector Quantization (3 Nachbarelemente), Vorgabe 6 Cluster

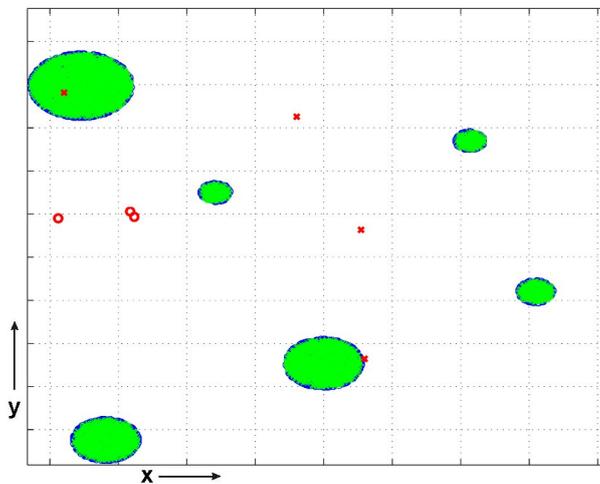


Abbildung C.29: Clusterbildung mit Linear Vector Quantization (3 Nachbarelemente), Vorgabe 7 Cluster

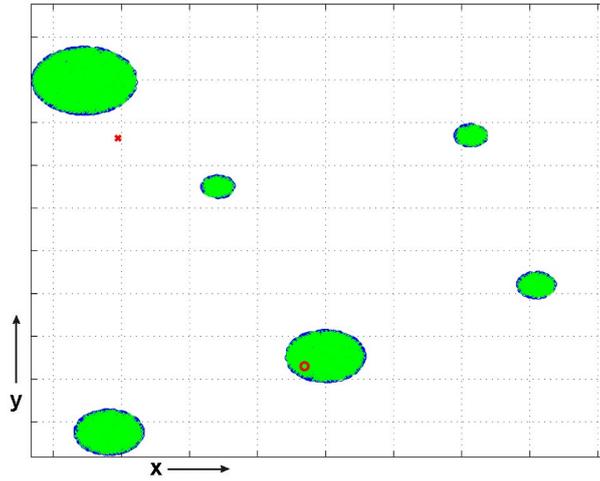


Abbildung C.30: Clusterbildung mit Self-Organizing Feature Maps, Parameter (10,5)

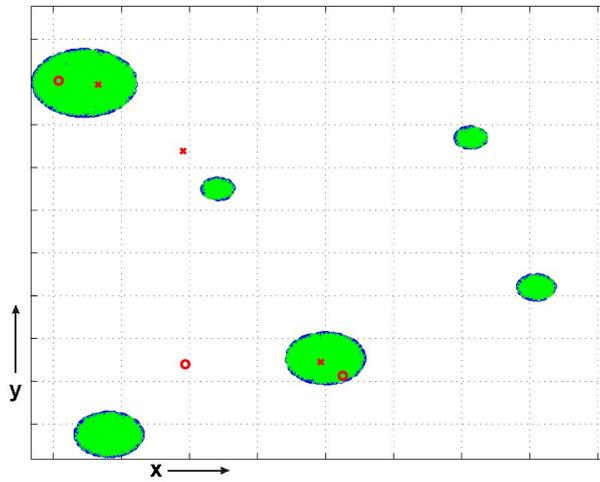


Abbildung C.31: Clusterbildung mit Self-Organizing Feature Maps, Parameter (30,7)

### C.3.2 Clusterbildung bei überlappenden Prismen

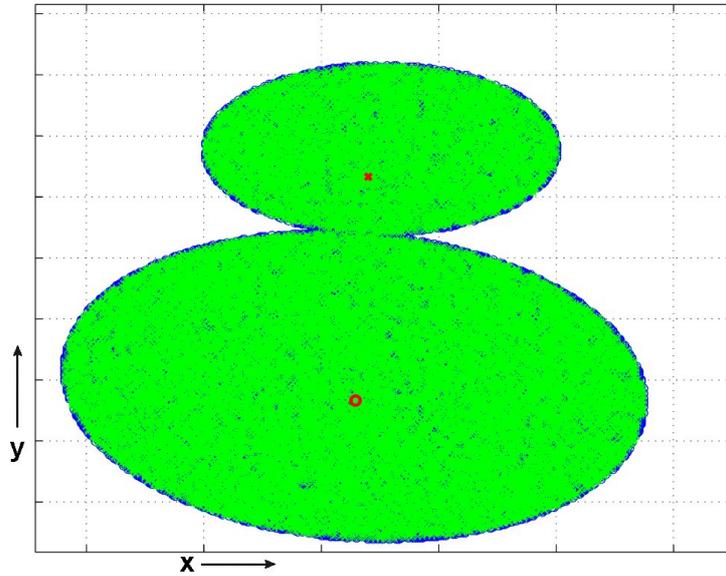


Abbildung C.32: Clusterbildung mit Agglomerative Clustering

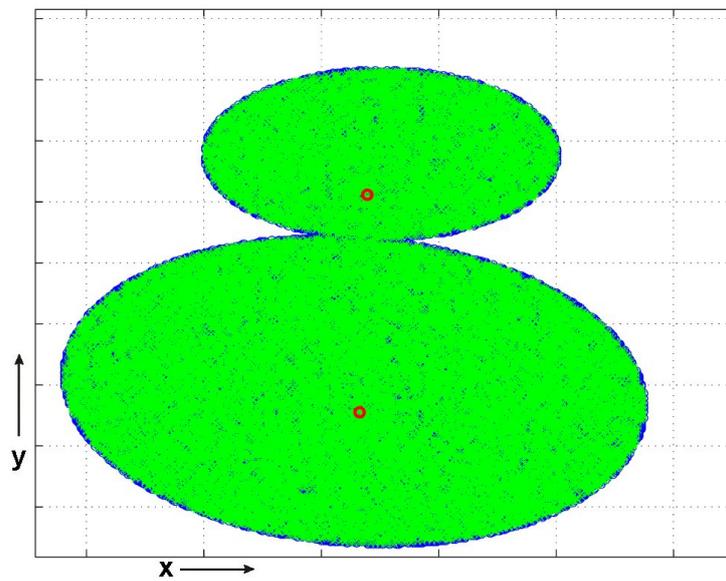


Abbildung C.33: Clusterbildung mit Deterministic Annealing

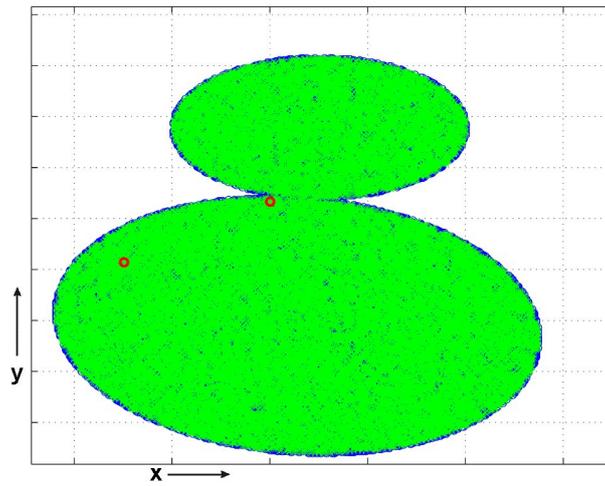


Abbildung C.34: Clusterbildung mit Distinction Sensitive Linear Vector Quantization

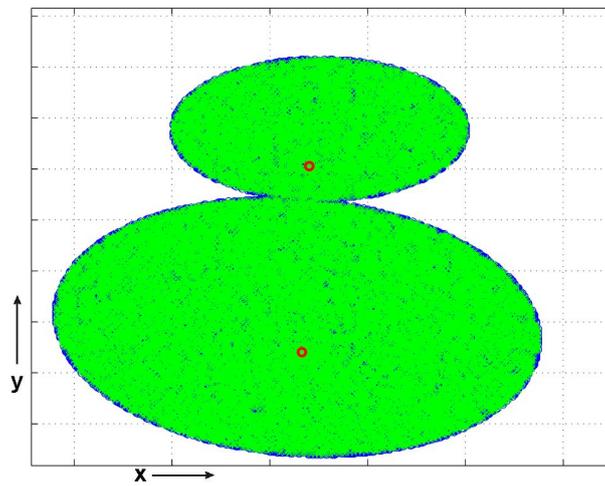


Abbildung C.35: Clusterbildung mit Fuzzy k-Means

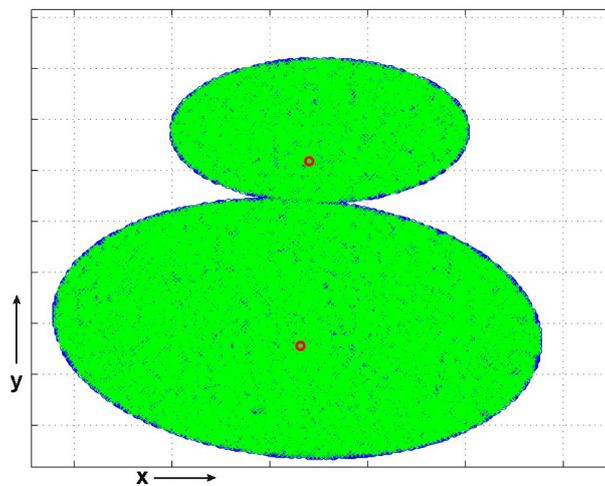


Abbildung C.36: Clusterbildung mit k-Means

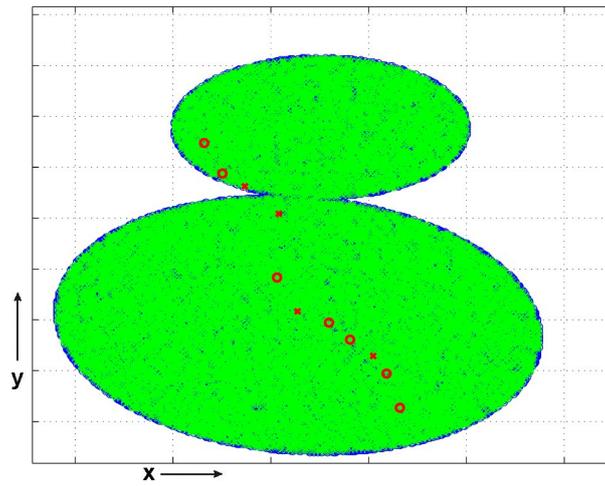


Abbildung C.37: Clusterbildung mit Leader-Follower Clustering, Parameter (0.1,0.1)

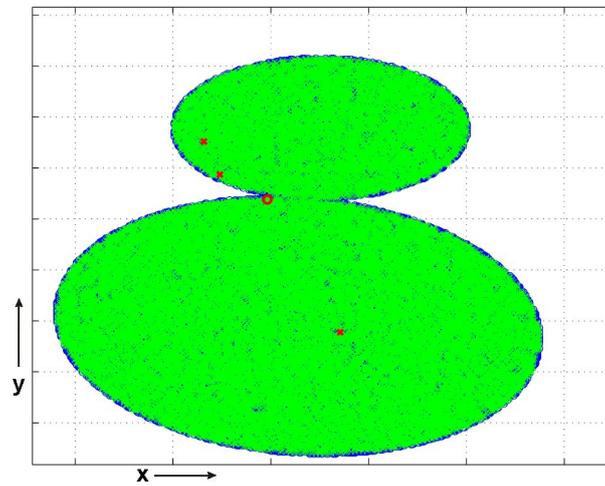


Abbildung C.38: Clusterbildung mit Leader-Follower Clustering, Parameter (0.2,0.1)

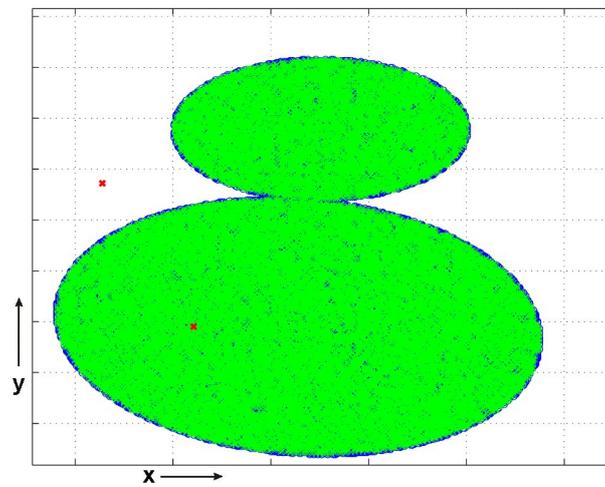


Abbildung C.39: Clusterbildung mit Linear Vector Quantization (1 Nachbarelement)

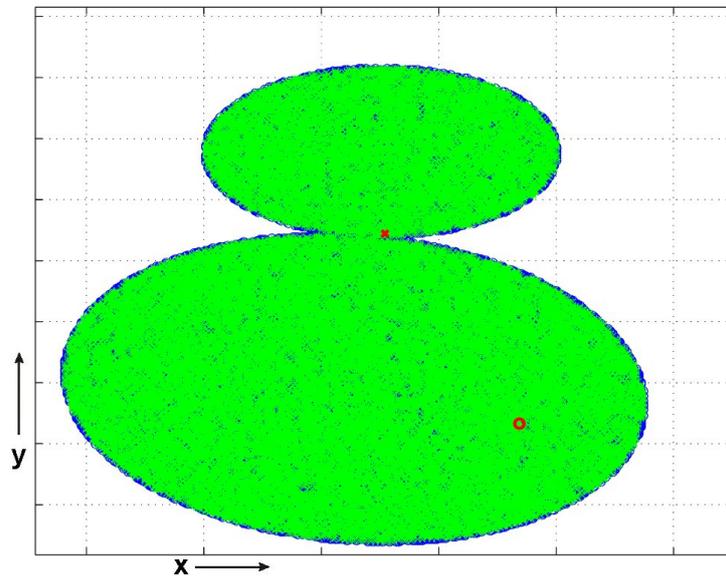


Abbildung C.40: Clusterbildung mit Linear Vector Quantization (3 Nachbarelemente)

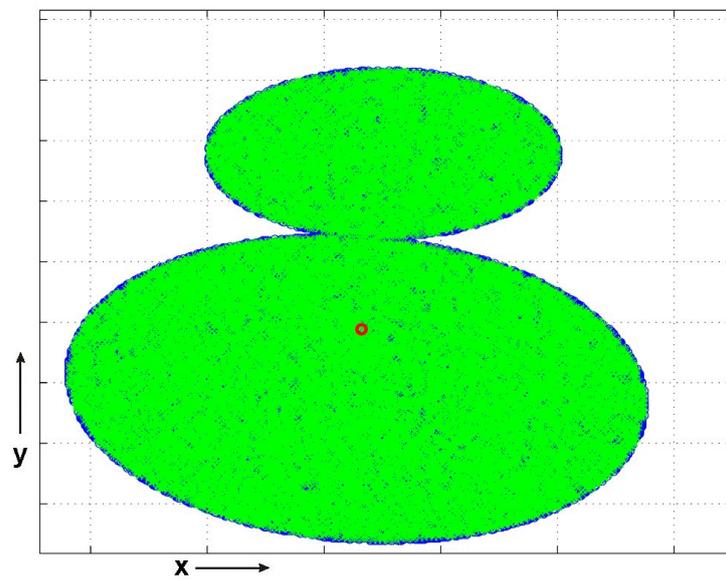


Abbildung C.41: Clusterbildung mit Kohonen Self-Organizing Feature Maps

### C.3.3 Clusterbildung bei gestörten Prismenbildern

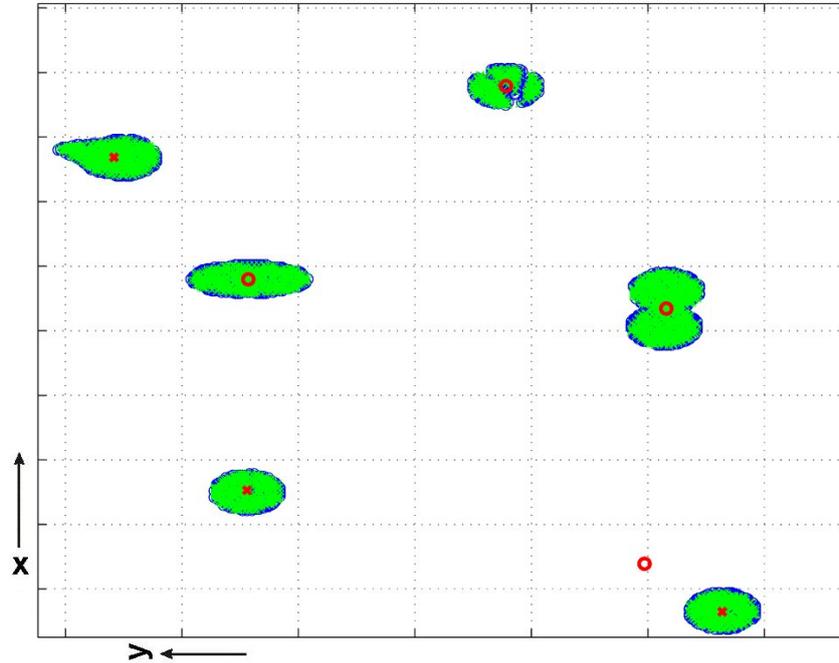


Abbildung C.42: Ergebnisse des Agglomerative Clustering bei gestörten Prismenbildern

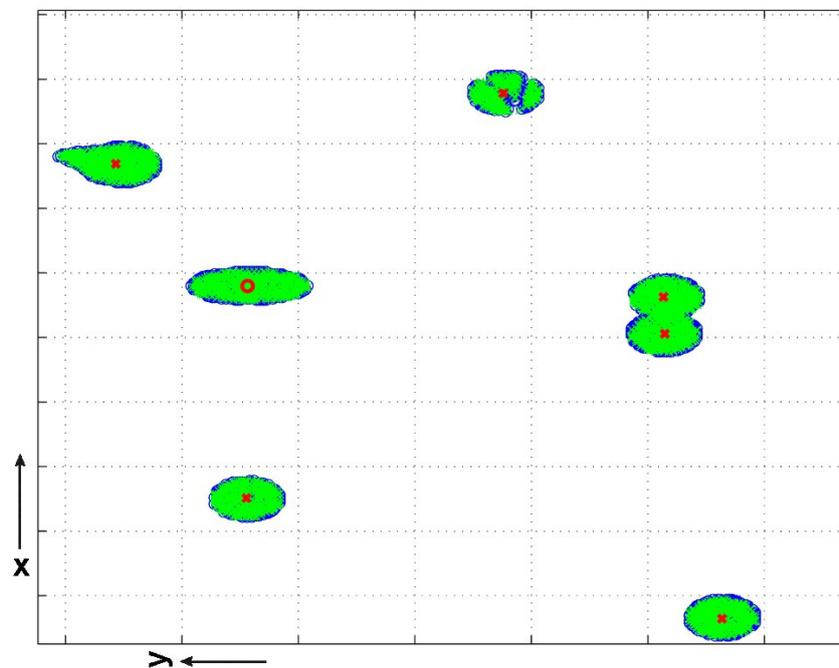


Abbildung C.43: Ergebnisse des Deterministic Annealing bei gestörten Prismenbildern

### C.3.4 Clusterbildung bei matrixförmiger Prismenanordnung

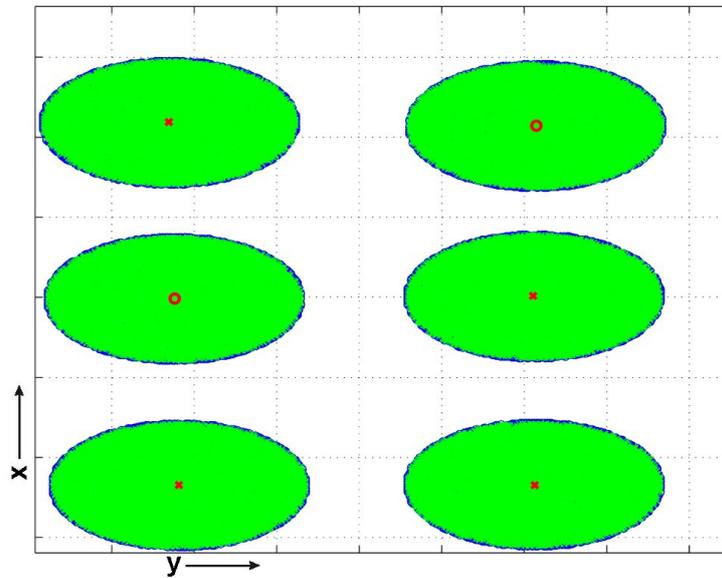


Abbildung C.44: Ergebnisse des Agglomerative Clustering bei matrixförmiger Prismenanordnung

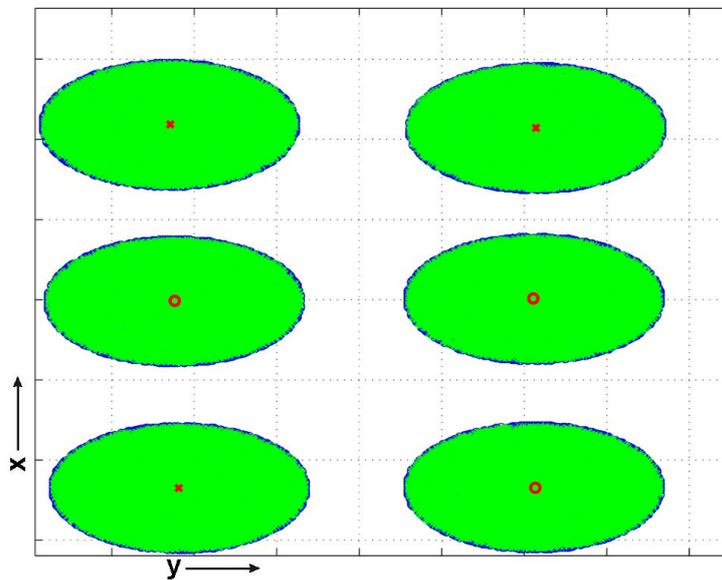


Abbildung C.45: Ergebnisse des Deterministic Annealing bei matrixförmiger Prismenanordnung

### C.3.5 Clusterbildung bei unterschiedlicher Prismenentfernung

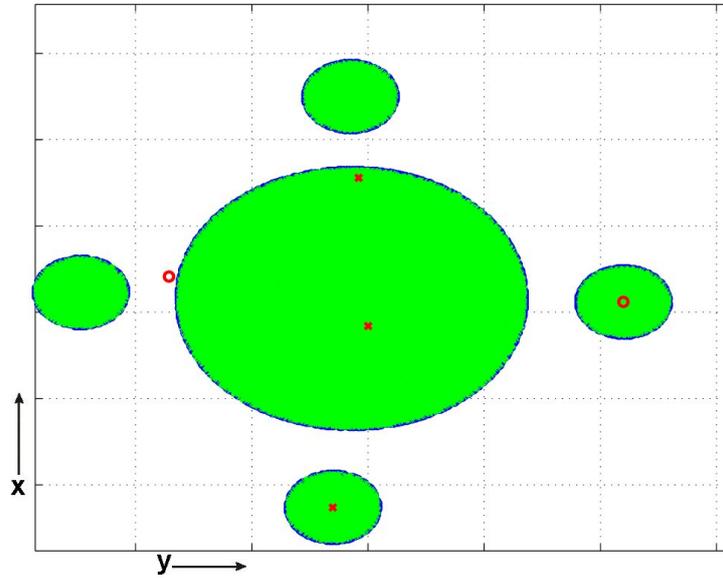


Abbildung C.46: Ergebnisse des Agglomerative Clustering bei unterschiedlicher Prismenentfernung

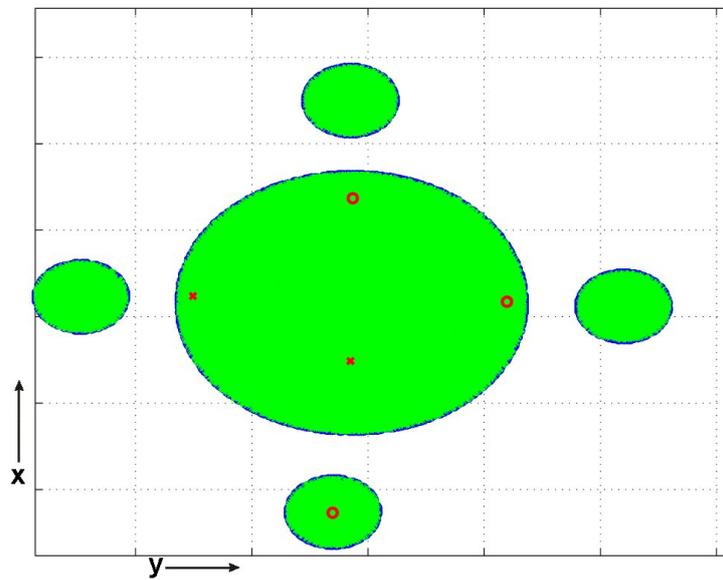


Abbildung C.47: Ergebnisse des Deterministic Annealing bei unterschiedlicher Prismenentfernung

### C.3.6 Clusterbildung bei diagonaler Prismenanordnung

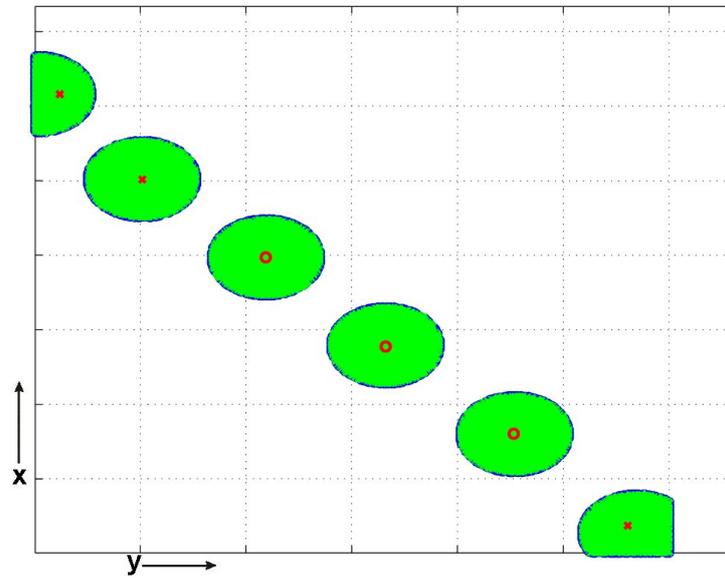


Abbildung C.48: Ergebnisse des Agglomerative Clustering bei diagonaler Prismenanordnung

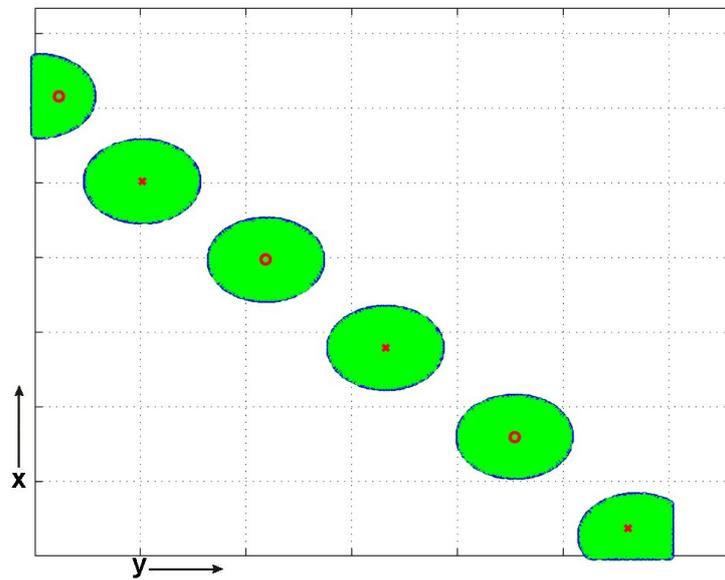


Abbildung C.49: Ergebnisse des Deterministic Annealing bei diagonaler Prismenanordnung

### C.3.7 Clusterbildung bei versetzter matrixförmiger Prismenanordnung

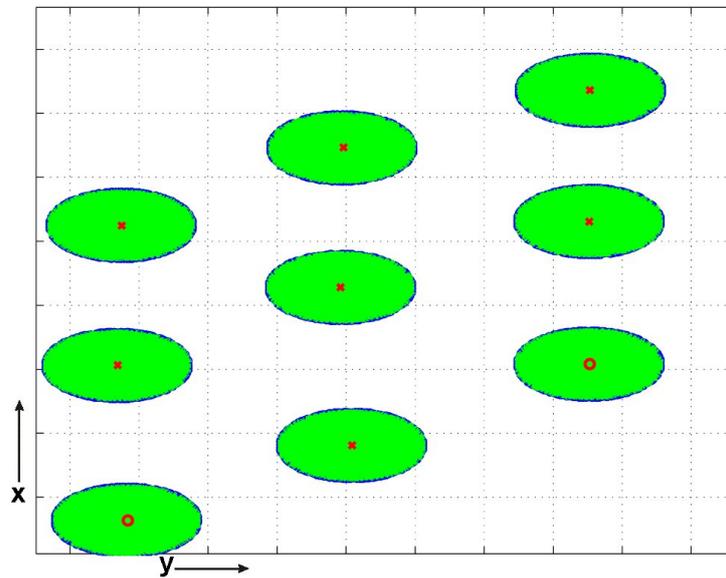


Abbildung C.50: Ergebnisse des Agglomerative Clustering bei matrixförmiger Prismenanordnung

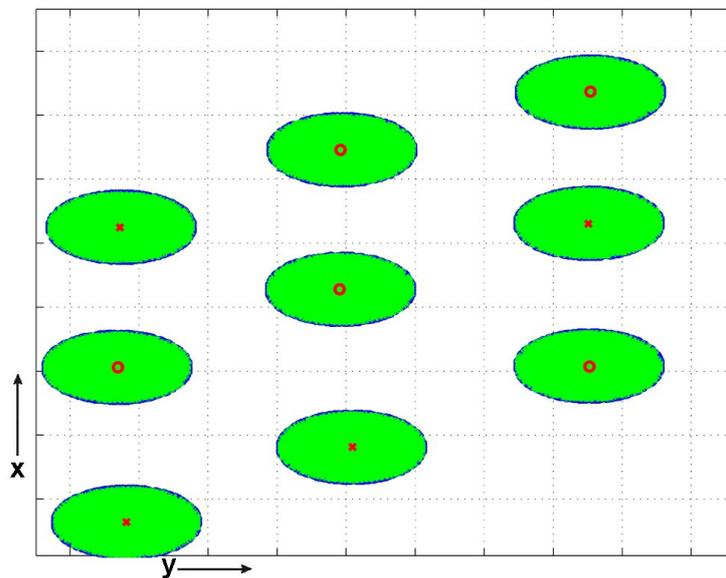


Abbildung C.51: Ergebnisse des Deterministic Annealing bei matrixförmiger Prismenanordnung

## C.4 Houghtransformation

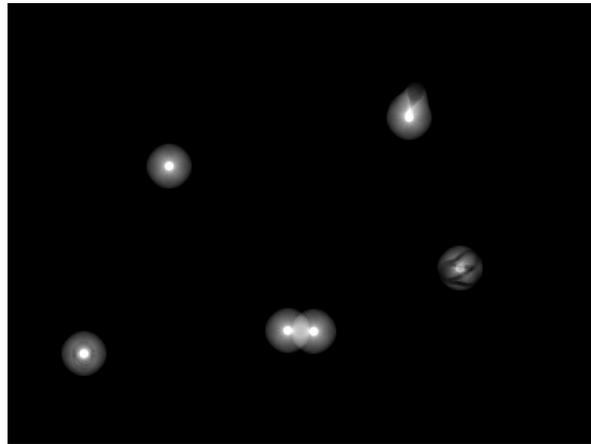


Abbildung C.52: Resultierendes Akkumulatorfeld für Kreise, Parameter  $r=10$  Pixel

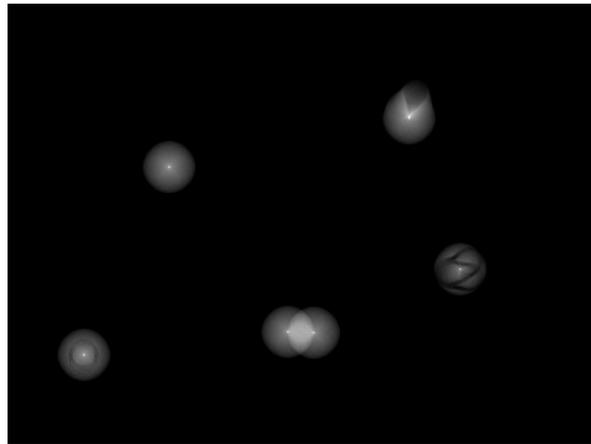


Abbildung C.53: Resultierendes Akkumulatorfeld für Kreise, Parameter  $r=14$  Pixel

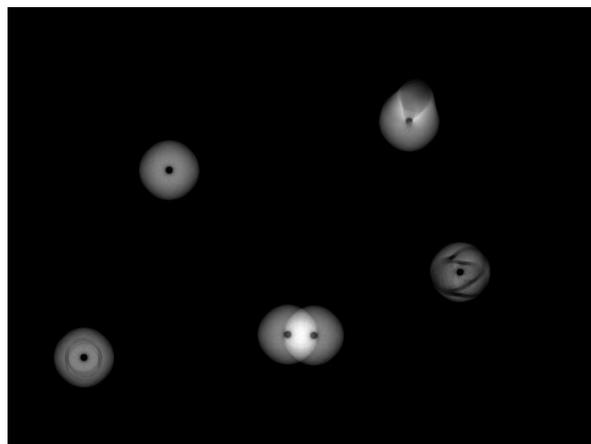


Abbildung C.54: Resultierendes Akkumulatorfeld für Kreise, Parameter  $r=18$  Pixel

## C.5 Komponentenanalyse

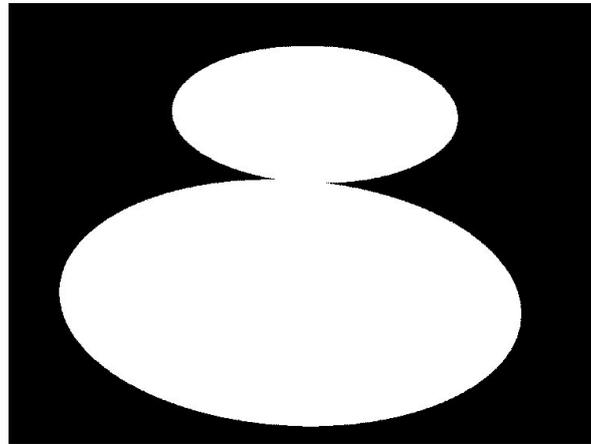


Abbildung C.55: Komponentenanalyse für überlappende Prismenbilder

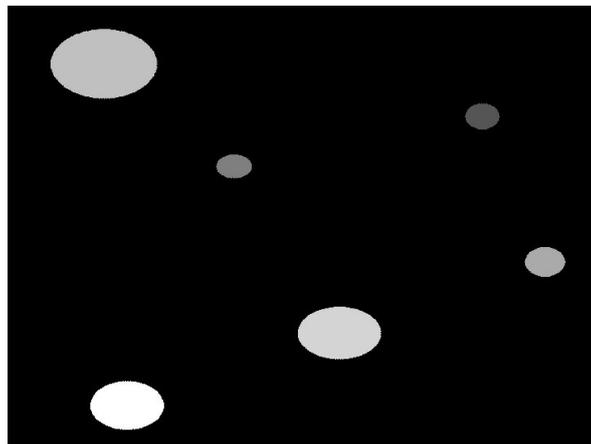


Abbildung C.56: Komponentenanalyse mehrerer Prismen

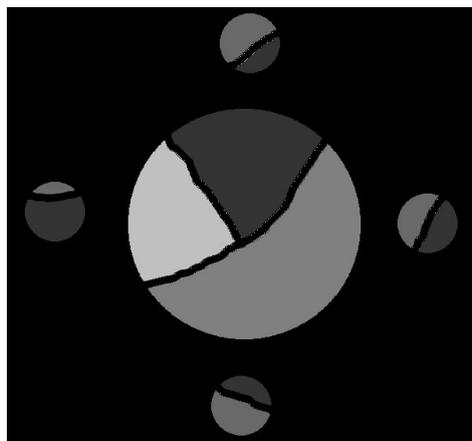


Abbildung C.57: Komponentenanalyse für Prismen unterschiedlicher Entfernung

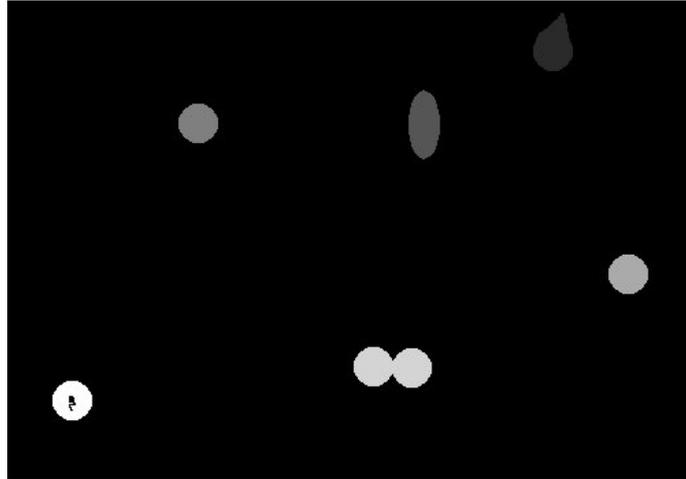


Abbildung C.58: Komponentenanalyse für Prismenbilder mit Störungen

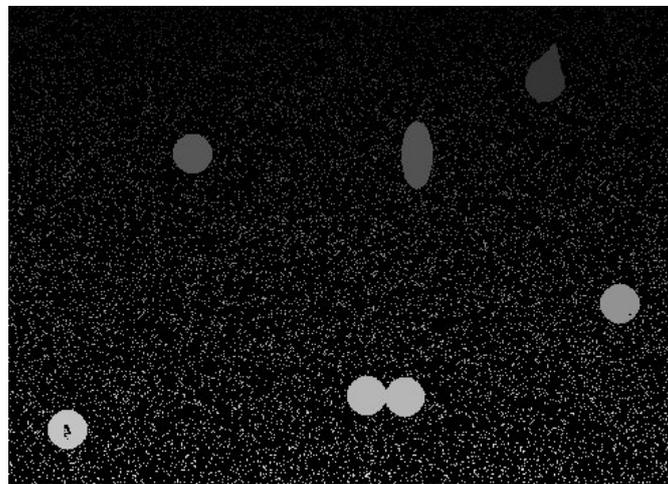


Abbildung C.59: Komponentenanalyse für verrauschte Prismenbilder (10% zufälliges Rauschen)

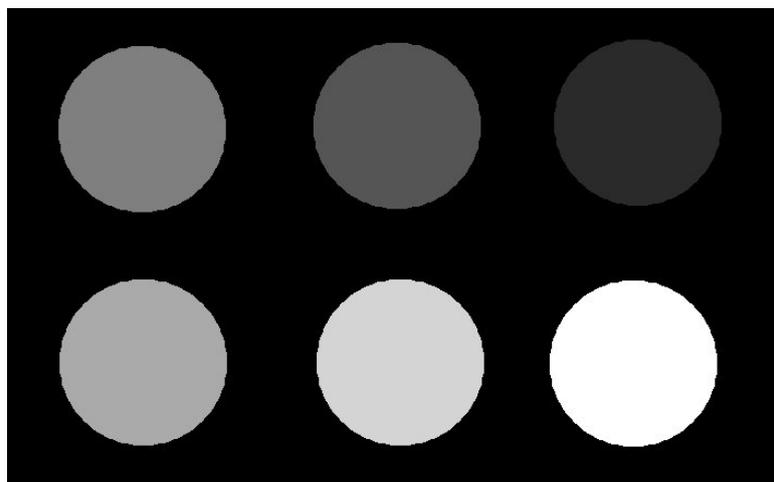


Abbildung C.60: Komponentenanalyse einer matrixförmigen Prismenanordnung

## C.6 L1 Distanzanalyse

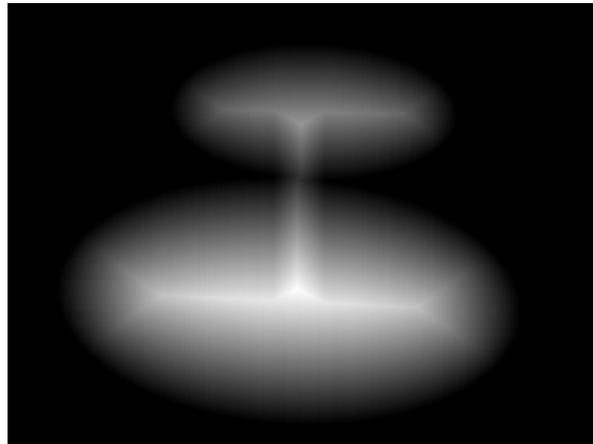


Abbildung C.61: L1 Distanzanalyse für überlappende Prismenbilder

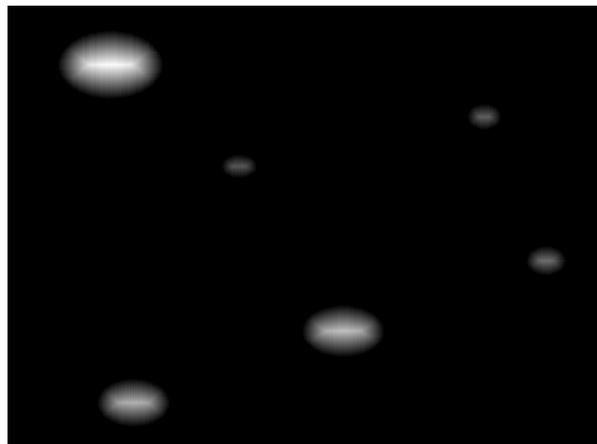


Abbildung C.62: L1 Distanzanalyse mehrerer Prismen

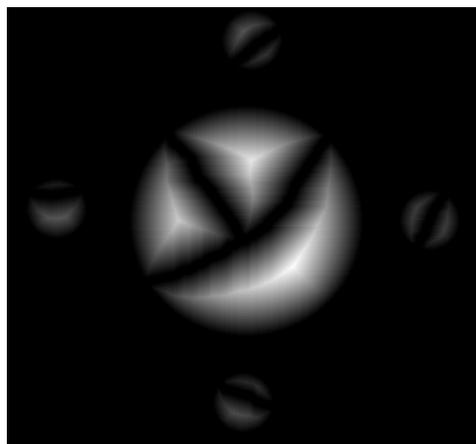


Abbildung C.63: L1 Distanzanalyse für Prismen unterschiedlicher Entfernung

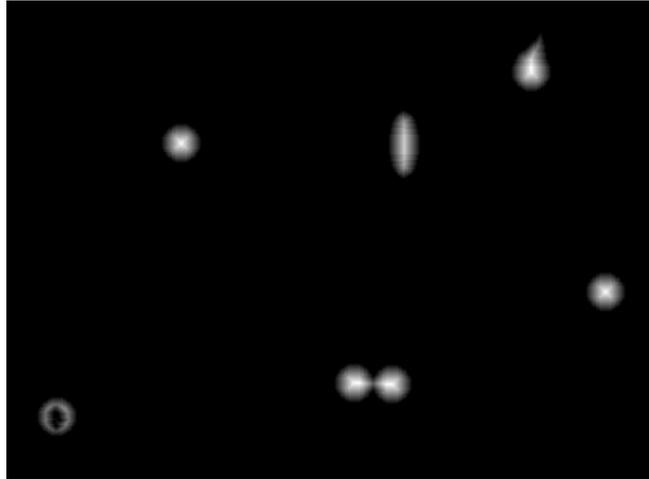


Abbildung C.64: L1 Distanzanalyse für Prismenbilder mit Störungen

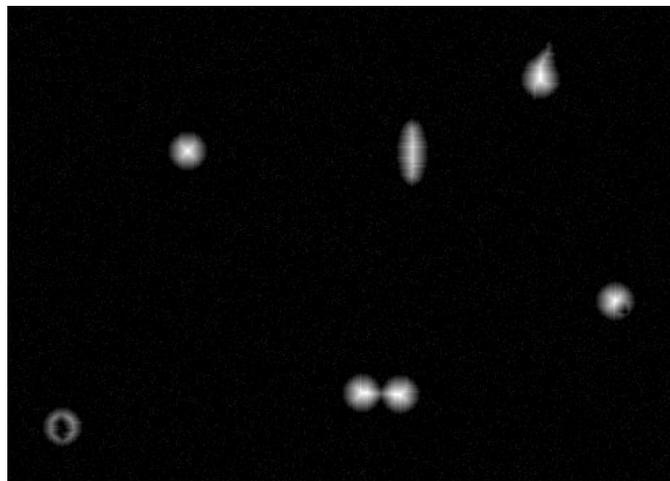


Abbildung C.65: L1 Distanzanalyse für verrauschte Prismenbilder (10% zufälliges Rauschen)

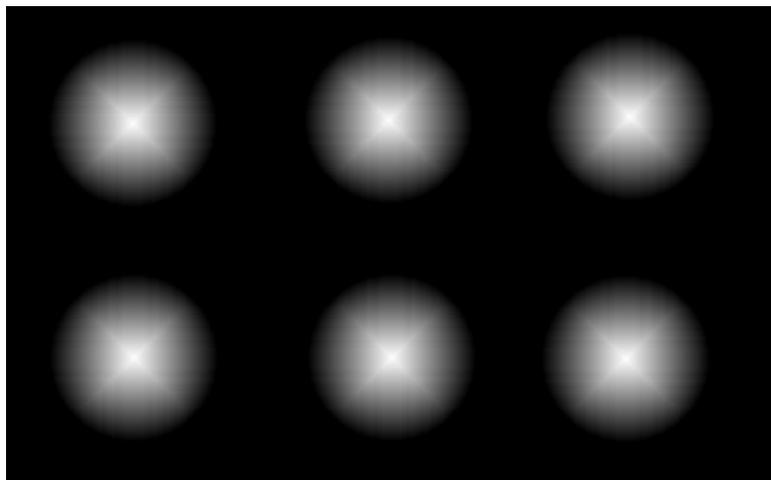


Abbildung C.66: L1 Distanzanalyse einer matrixförmigen Prismenanordnung

## C.7 L2 Distanzanalyse

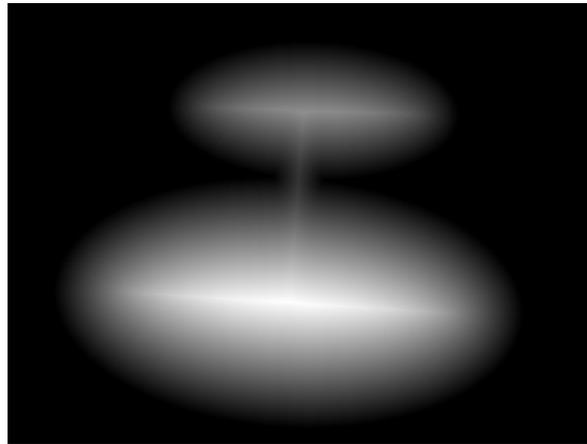


Abbildung C.67: L2 Distanzanalyse für überlappende Prismenbilder

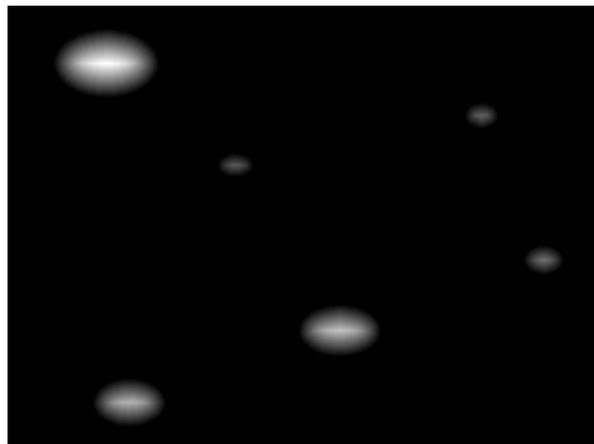


Abbildung C.68: L2 Distanzanalyse mehrerer Prismen

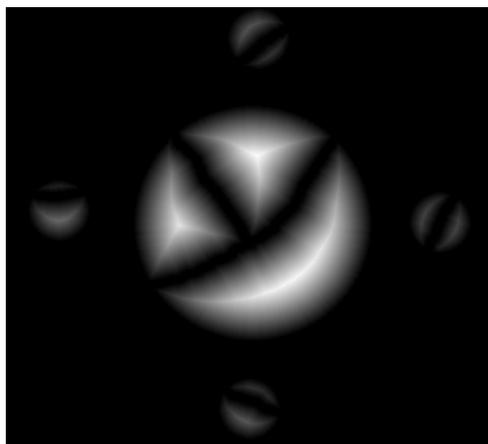


Abbildung C.69: L2 Distanzanalyse für Prismen unterschiedlicher Entfernung mit Störungen

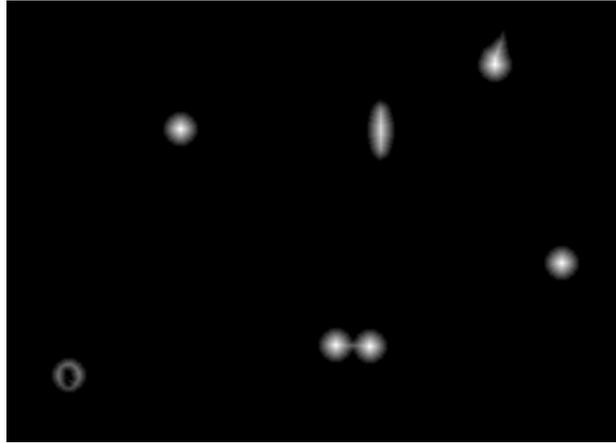


Abbildung C.70: L2 Distanzanalyse für Prismenbilder mit Störungen

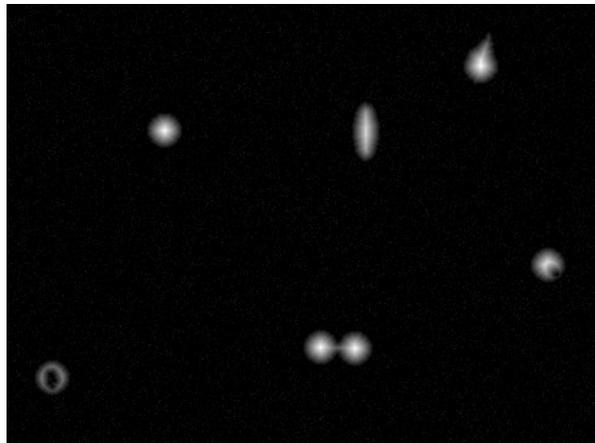


Abbildung C.71: L2 Distanzanalyse für verrauschte Prismenbilder (10% zufälliges Rauschen)

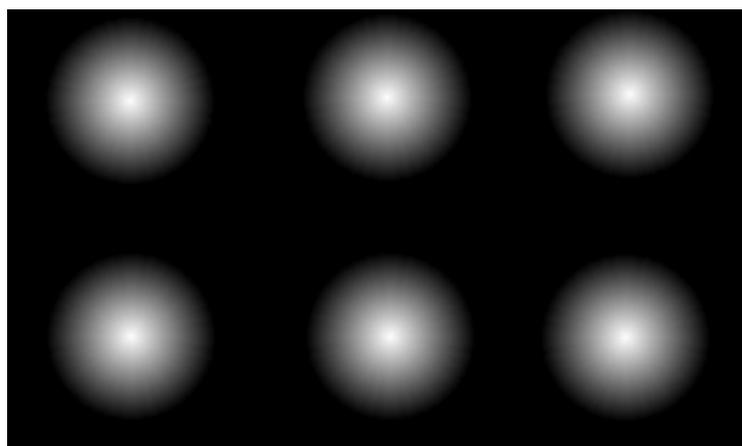


Abbildung C.72: L2 Distanzanalyse einer matrixförmigen Prismenanordnung

## C.8 Template Matching

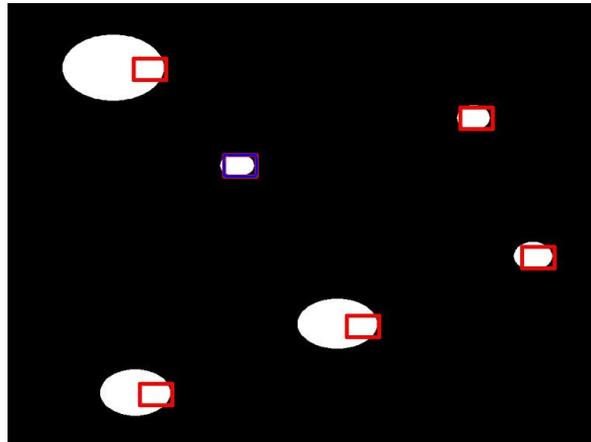


Abbildung C.73: Matching mit unvollständigem Muster

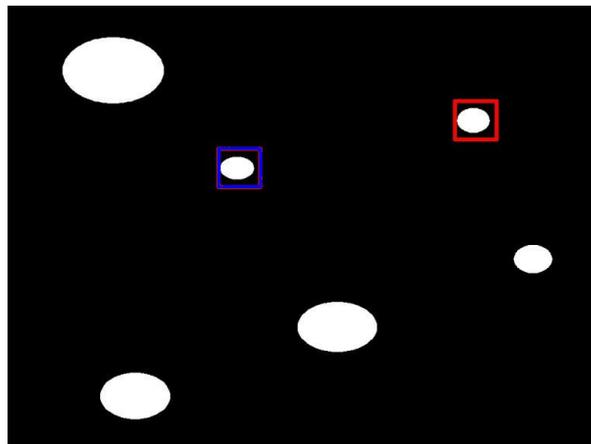


Abbildung C.74: Matching mit vollständigem Muster für kleine Strukturen

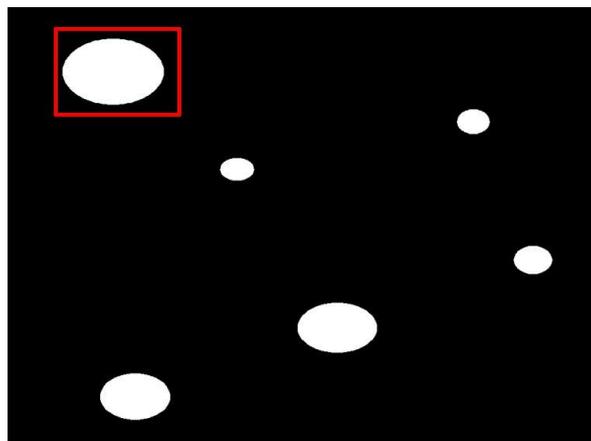


Abbildung C.75: Matching mit vollständigem Muster für große Struktur

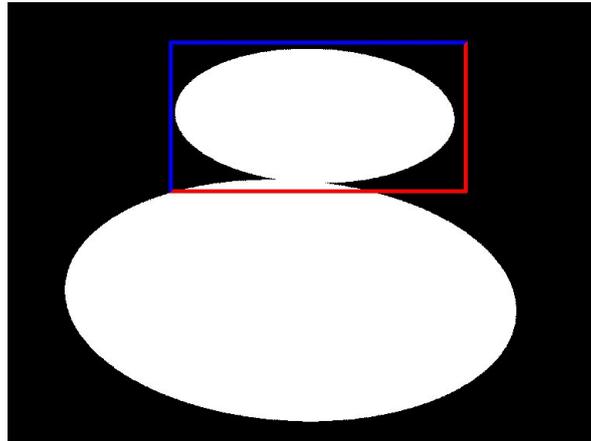


Abbildung C.76: Matching von überlappenden Strukturen mit vollständiges Muster

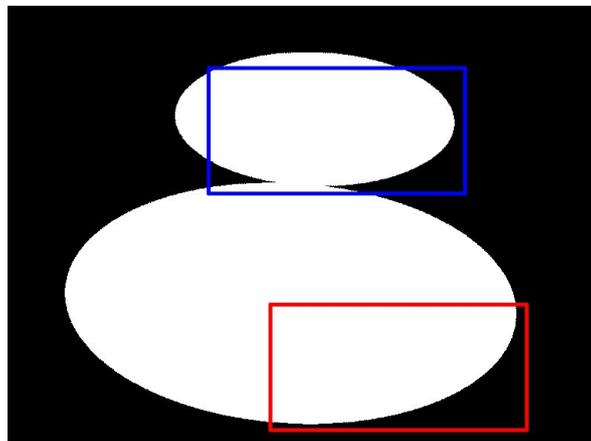


Abbildung C.77: Matching von überlappenden Strukturen mit unvollständigem Muster

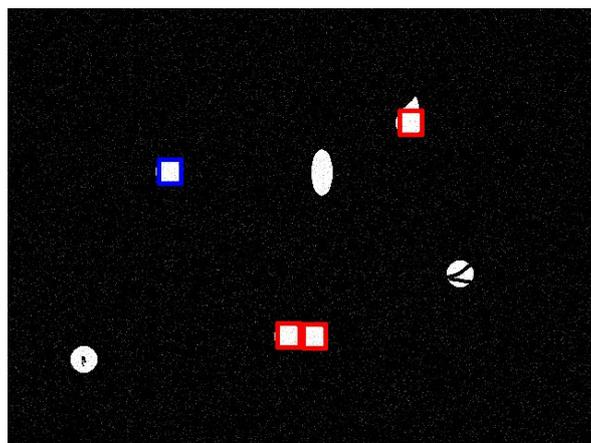


Abbildung C.78: Matching von mehreren Strukturen mit zufälligem Rauschen

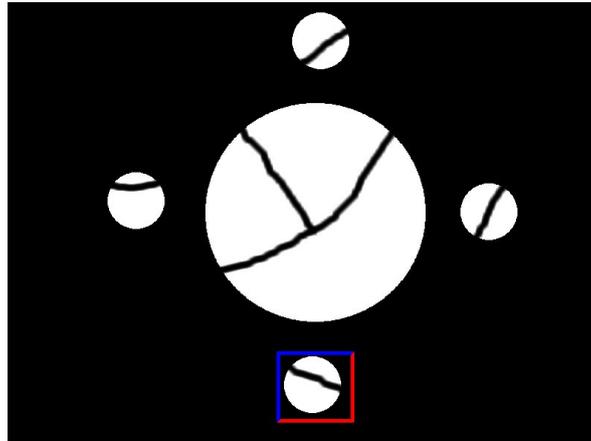


Abbildung C.79: Matching von gestörten Strukturen mit vollständiges Muster

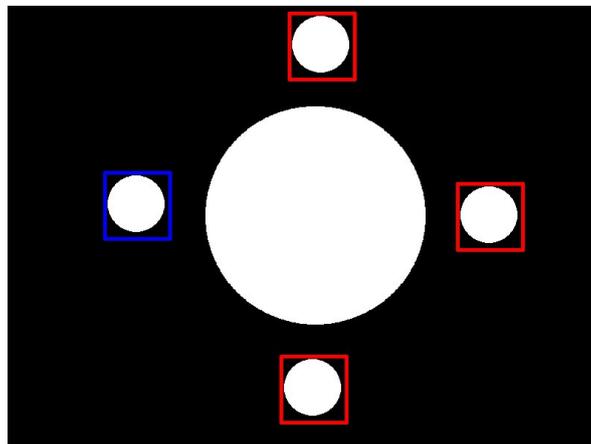


Abbildung C.80: Matching verschiedener Strukturgrößen mit vollständigem Muster

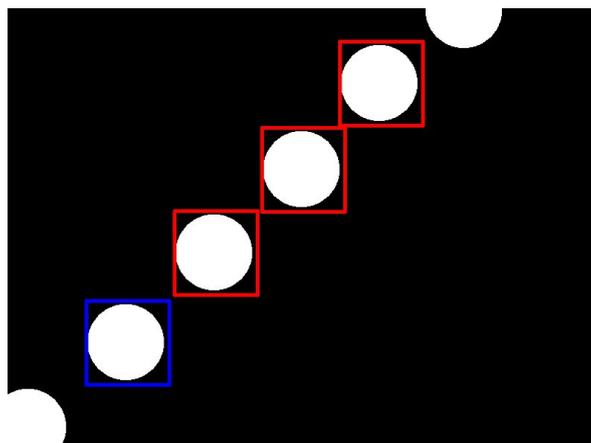


Abbildung C.81: Matching diagonal verlaufender Strukturen mit vollständigem Muster

# Anhang D

## Softwaremodule

### D.1 Programm zur Konvertierung einer Bitmap in multivariate Daten

Für die Clusterbildung von Bilddaten mit der Classification Toolbox [GYT02] wird ein Konvertierungsprogramm benötigt, welches ein digitales Farbbild lädt und in die benötigte multivariate Datenform umwandelt. Der nachfolgende MATLAB®- Programmcode stellt somit die Schnittstelle zwischen einer Bilddatei und der Clustertoolbox dar.

```
function [features, targets, distribution_parameters] =
    load_file(filename, region)

features = []; targets = []; distribution_parameters = [];
N = region(5);

if (~isempty(findstr(filename, '.bmp'))), n = 80;
    X = imread(filename, 'bmp');
    R = double( X(:,:,1) );
    G = double( X(:,:,2) );
    B = double( X(:,:,3) );
    rgb=(R+B+G)/3;
    [i,j]=find(rgb>n);
    data=[i,j];
    labels =(rand((size(data,1)),1));
    labels =(labels>0.50); features=data'; targets=labels';
    param = max(max(abs(features)));
    plot_scatter(features, targets)
    axis([-param,param,-param,param])
else
    if isempty(findstr(filename, '.mat')),
        filename = [filename '.mat'];
    end
end

if (~isempty(dir(filename)))
    load (filename)
```

---

```

if ((isempty(features) | isempty(targets)) &
    isempty(distribution_parameters) & ~exist('m0'))
    error('No features, targets, or distribution
          parameters found in this file')
end

hm = findobj('Tag', 'Messages');
st= '';
if (~isempty(features)),
st = ['File loaded. Found ' num2str(size(targets,2)) ' data points'],

if (size(features,1) > 2),
    h = feature_selection;
    waitfor(h, 'UserData',1)

    h1      = findobj(h, 'Tag', 'txtHiddenMethod');
    chosen = get(h1, 'String');
    h1      = findobj(h, 'Tag', 'txtHiddenParams');
    params = get(h1, 'String');

    if (~isempty(str2num(params))),
        params = str2num(params);
    end

    [features, targets] = feval(chosen, features, targets, params, []);

    close(h)
end

param = max(max(abs(features)));
plot_scatter(features, targets)
axis([-param,param,-param,param])
end

if ~isempty(distribution_parameters)
n0 = size(distribution_parameters.s0,1);
n1 = size(distribution_parameters.s1,1);
if (~isempty(st)),
    st = [st ', '];
else
    st = 'Found ';
end
st = [st num2str(n0) ' Gaussians for class 0 and
      ' num2str(n1) ' Gaussians for class 1.'];
end

if exist('m0')
```

---

```
warning('Located an old-styled distribution file.  
      Please use the new format!')  
distribution_parameters.m0 = m0;  
distribution_parameters.m1 = m1;  
distribution_parameters.w0 = w0;  
distribution_parameters.w1 = w1;  
distribution_parameters.s0 = s0;  
distribution_parameters.s1 = s1;  
distribution_parameters.p0 = p0;  
n0 = size(distribution_parameters.s0,1);  
n1 = size(distribution_parameters.s1,1);  
if (~isempty(st)),  
    st = [st ', '];  
else  
    st = 'Found ';  
end  
st = [st num2str(n0) ' Gaussians for class 0 and  
      ' num2str(n1) ' Gaussians for class 1.'];  
end  
  
set(hm,'String',st)  
else  
    hm = findobj('Tag', 'Messages');  
    set(hm,'String','File not found.')  
end  
end  
  
if (nargout == 1),  
    features = distribution_parameters;  
end
```

## D.2 Lokale Eigenschaften einer Fläche zweiter Ordnung

```
//*****
//
// MakePolynomPatch (CPoint point, CSize patchSize)
//
// Parameter:
// point      ... Punkt x0,y0 fuer das Facet- Modell
// patchSize  ... Groesse des Approximationsfensters
//
// Berechnung der Koeffizienten fuer das Polynom
//  $y=a_0+a_1*x+a_3*y+a_4*x^2+a_5*y^2+a_6*x*y$ 
// nach der Image Facet- Methode
//
//*****
bool CChildView::MakePolynomPatch(CPoint point, CSize patchSize)
{
    bool ret = false;
    CRect patch;
    MATRIX A, AT, AS, B, FS, H, LR;

    // erzeuge symmetrische Fenstergroesse +/-dx, +/-dy
    if (!(patchSize.cx & 1)) patchSize.cx++;
    if (!(patchSize.cy & 1)) patchSize.cy++;

    // Matrix A mit Facet- Koeffizienten
    A = CreateMatrix(patchSize.cx * patchSize.cy, 6, UNDEFINED_MATRIX);
    if (A != NULL)
    {
        // Matrix B, Intensitaetswerte
        B = CreateMatrix(patchSize.cx * patchSize.cy, 1, UNDEFINED_MATRIX);
        if (B != NULL)
        {
            int i,j, f;
            IMGINFO info;

            // Ueberpruefe die Gueltigkeit des Bildes
            if (Image)
            {
                info = Image->GetImageInfo();

                // Bestimmung der Facet- Koordinaten
                patch.left = point.x - patchSize.cx/2;
                patch.right = point.x + patchSize.cx/2;
                patch.top = point.y - patchSize.cy/2;
            }
        }
    }
}
```

```
patch.bottom = point.y + patchSize.cy/2;

// Facet muss ganz im Bildbereich liegen !
if ((patch.left >= info.ImgX) && (patch.right <= info.ImgDx) ||
    (patch.top >= info.ImgY) && (patch.bottom <= info.ImgDy))
{
    // Facet- Koeffizienten der Matrix A und B bestimmen
    // Gleichung 5.17
    for (f=0,i=-patchSize.cy/2; i<=patchSize.cy/2; i++)
    {
        for (j=-patchSize.cx/2; j<=patchSize.cx/2; j++)
        {
            //
            if (info.ImgMode == AREA_24)
                B[f][0] = Image->ReadPixel8(point.x+j,point.y+i,FRAME0|FRAME1|FRAME2);
            else
                B[f][0] = Image->ReadPixel8(point.x+j,point.y+i,FRAME0);

            A[f][0] = 1.0;
            A[f][1] = j;
            A[f][2] = i;
            A[f][3] = j*j;
            A[f][4] = i*j;
            A[f][5] = i*i;
            f++;
        }
    }

    // *****
    // Berechnung der Polynomkoeffizienten
    // *****

    // Transponierte Matrix A
    if((AT = TransMatrix(A)) != NULL)
    {
        // AS = AT * A, Dim(AS)=[6,6]
        if((AS = MultiplyMatrix(AT, A)) != NULL)
        {
            // FS = AT * B, Dim(FS)=[6,1]
            if((FS = MultiplyMatrix(AT, B)) != NULL)
            {
                // Loeschen der Ergebnismatrix,
                // fuer wiederholte Anwendung des Algorithmus
                if (Res) DestroyMatrix(Res);

                // Loesung des Gleichungssystems (AT*A)^-1 AT*B
                // Gleichung 3.32
            }
        }
    }
}
```

---

```

if((Res = LSolveMatrix(AS, FS)) != NULL)
{
    // *****
    // Berechnung des Extrempunktes
    // *****

    // Extrempunkt oder Sattelpunkt bestimmen
    // Gleichung 5.33
    // H ... Hesse- Matrix
    // LR ... (p2, p3)
    if ((H = CreateMatrix(2, 2, UNDEFINED_MATRIX)) != NULL)
    {
        if ((LR = CreateMatrix(2, 1, UNDEFINED_MATRIX)) != NULL)
        {
            // H[0,0] = 2*p4; H[1,0] = H[0,1] = p6;
            // H[1,1] = 2*p5;
            H[0][0] = Res[3][0]*2.0;
            H[0][1] = H[1][0] = Res[4][0];
            H[1][1] = Res[5][0]*2.0;

            // LR[0,0] = -p2;
            // LR[1,0] = -p3;
            LR[0][0] = -Res[1][0];
            LR[1][0] = -Res[2][0];

            // Loeschen vorher bestimmter
            if (Pnt) DestroyMatrix(Pnt);
            if ((Pnt = LSolveMatrix(H, LR)) != NULL)
            {
                // Offset zum Bildursprung beachten
                Pnt[0][0]+=point.x;
                Pnt[1][0]+=point.y;

                // *****
                // Extremwert oder Sattelpunkt ?
                // *****
                Det = Determinant(H);

                // Loeschen vorher bestimmter Eigenvektoren
                if (Eigenvector) DestroyMatrix(Eigenvector);

                //*****
                // Berechnung der Eigenvektoren
                //*****
                Eigenvector = CreateMatrix(MatRow(H), MatCol(H), UNDEFINED_MATRIX);
                if (Eigenvector)

```

```
{
    int rot=0;

    // Loeschen vorher bestimmter Eigenwerte
    if (Eigenvalue) DestroyVector(Eigenvalue);
    Eigenvalue = CreateVector(MatRow(H), UNDEFINED_VECTOR);
    JacobiEigensystem(H, MatRow(H), Eigenvalue, Eigenvector, &rot);

    ret = true;
}
}
DestroyMatrix(LR);
}
DestroyMatrix(H);
}
}
DestroyMatrix(FS);
}
DestroyMatrix(AS);
}
DestroyMatrix(AT);
}
}
}
DestroyMatrix(B);
}
DestroyMatrix(A);
}

return ret;
}
```

## D.3 Bestimmung des Schwerpunktes einer Intensitätsverteilung

```
//*****
//
// CalcGravity (int xs, int ys, int xe, int ye)
//
// Parameter:
// xe,ye ... Bildausschnitt linke obere Ecke
// ye,ys ... Bildausschnitt rechte untere Ecke
//
// Berechnung des Schwerpunktes einer zweidimensionalen
// Intensitätsverteilung, Gleichung 5.10, 5.11
//
//*****
Centroids::CENTROID m_LHTCentroid::CalcGravity(int xs, int ys,
                                                int xe, int ye)
{
    BYTE *pxl32,
          *tmp;
    BYTE R, G, B, I;
    int i,j;
    long widthline, xoffset, M;
    double Sx, Sy;
    LPBITMAPINFOHEADER infoHeader;
    Centroids::CENTROID Grav = {0,0};

    Sx = Sy = M = 0;
    infoHeader = Image->GetBitmapInfoHeader();
    pxl32 = (BYTE*) Image->GetDIBits();
    if (pxl32 != NULL)
    {
        widthline = Image->BytesPerLine(infoHeader->biWidth,
                                        infoHeader->biBitCount);
        xoffset = xs*infoHeader->biBitCount/8;
        for (i=ys; i<=ye; i++)
        {
            tmp = pxl32 + (((Centroids::Image->GetHeight()-1)-i)*widthline)
                    + xoffset;
            for (j=xs; j<=xe; j++)
            {
                B = *tmp; G = *(tmp+1); R = *(tmp+2);
                // Farbintensität
                I = (R+G+B)/3;
                if (I > Threshold)
                {
```

```
        M += I;
        Sx += (double)(j * I);
        Sy += (double)(i * I);
    }
    tmp += infoHeader->biBitCount/8;
}
}
}

if(M!=0)
{
    Grav.x = (float)(Sx / (double)M);
    Grav.y = (float)(Sy / (double)M);
}

GravityReady = TRUE;
return Grav;
}
```

## D.4 Berechnung des Mittelwertes eines binären Musters

```
//*****
//
// CalcGravity (int xs, int ys, int xe, int ye)
//
// Parameter:
// xe,ye ... Bildausschnitt linke obere Ecke
// ye,ys ... Bildausschnitt rechte untere Ecke
//
// Berechnung der geometrischen Mitte eines zweidimensionalen
// Binaermusters, Gleichung 5.15, 5.16
//
//*****
Centroids::CENTROID a_LHTCentroid::CalcGravity(int xs, int ys,
                                                int xe, int ye)
{
    BYTE *pxl32,
          *tmp;
    BYTE R, G, B, I;
    int i,j,N;
    long widthline, xoffset;
    double Sx, Sy;
    LPBITMAPINFOHEADER infoHeader;
    Centroids::CENTROID Grav = {0,0};

    Sx = Sy = 0.0; N = 0;
    pxl32 = (BYTE*) Image->GetDIBits();
    infoHeader = Image->GetBitmapInfoHeader();
    if (pxl32 != NULL)
    {
        widthline = Image->BytesPerLine(infoHeader->biWidth,
                                        infoHeader->biBitCount);
        xoffset = xs*infoHeader->biBitCount/8;
        for (i=ys; i<=ye; i++)
        {
            tmp = pxl32 + (((Image->GetHeight()-1)-i)*widthline) + xoffset;
            for (j=xs; j<=xe; j++)
            {
                B = *tmp; G = *(tmp+1); R = *(tmp+2);
                // Farbintensitaet
                I = (R+G+B)/3;
                if (I > Threshold)
                {
                    N++;
                }
            }
        }
    }
}
```

```
        Sx += j;
        Sy += i;
    }
    tmp += infoHeader->biBitCount/8;
}
}
}
if(N!=0)
{
    Grav.x = (float)(Sx / (double)N);
    Grav.y = (float)(Sy / (double)N);
}

Centroids::GravityReady = TRUE;
return Grav;
}
```

## D.5 Bestimmung des Maximums einer zweidimensionalen Intensitätsverteilung

```
//*****
//
// CalcGravity (int xs, int ys, int xe, int ye)
//
// Parameter:
// xe,ye ... Bildausschnitt linke obere Ecke
// ye,ys ... Bildausschnitt rechte untere Ecke
//
// Berechnung des Maximum einer zweidimensionalen
// Intensitätsverteilung, Gleichung 5.17
//
//*****
Centroids::CENTROID ls_LHTCentroid::CalcGravity(int xs, int ys,
                                                int xe, int ye)
{
    Centroids::CENTROID Grav = {0,0};
    CImageInterface* qidImg;

    qidImg = new CImageInterface();
    if (qidImg != NULL)
    {
        POINT point;
        SIZE patchSize;

        qidImg->SetImage(Image->GetDIBits(), Image->GetWidth(),
                        Image->GetHeight(), Image->GetBitCount());
        qidImg->Initialize(NULL, NULL);
        point.x = (xs+xe)/2;
        point.y = (ys+ye)/2;
        patchSize.cx = xe-xs;
        patchSize.cy = ye-ys;
        if (MakePolynomPatch(qidImg, point, patchSize))
        {
            Grav.x = Pnt[0][0];
            Grav.y = Pnt[1][0];
            GravityReady = TRUE;
        }
        delete qidImg;
    }
    return Grav;
}
```

## D.6 Approximation einer Ellipse

```

//*****
//
// CalcGravity (int xs, int ys, int xe, int ye)
//
// Parameter:
// xe,ye ... Bildausschnitt linke obere Ecke
// ye,ys ... Bildausschnitt rechte untere Ecke
//
// Berechnung einer Ausgleichsellipse aus den Konturdaten einer
// zweidimensionalen Intensitaetsverteilung
//
//*****
Centroids::CENTROID eqid_LHTCentroid::CalcGravity(int xs, int ys,
                                                    int xe, int ye)
{
    int NumPoints=0;
    DPOINT p1, p2;
    POINT3D* buf3d;
    POINT3D pEdge;
    Centroids::CENTROID Grav = {0,0};
    CImageInterface* qidImg;
    CEdge* edgeDetect;

    // Punktebuffer anlegen, 2Grad Schrittweite, 360Grad Umlauf
    if ((buf3d = new POINT3D[180]) != NULL)
    {
        if ((qidImg = new CImageInterface()) != NULL)
        {
            qidImg->SetImage(Image->GetDIBits(), Image->GetWidth(),
                            Image->GetHeight(), Image->GetBitCount());
            qidImg->Initialize(NULL, NULL);

            // Objekt zur Kantendetektion anlegen
            if ((edgeDetect = new CEdge(qidImg)) != NULL)
            {
                // Kantenortskriterium (Schwellwertverfahren) und
                // Subpixelmethode (Interpolation 1. Ordnung) auswaehlen
                edgeDetect->DetectMethod = THRESHOLD;
                edgeDetect->SubPixelMethod = IP1;
                // bevorzugter Kantenverlauf
                short edgeType = HL;
                // Schwellwert
                edgeDetect->ValueThreshold = 85;
                edgeDetect->Frame = FRAME0|FRAME1|FRAME2;
            }
        }
    }
}

```

```
p1.x = (xs+xe)/2;
p1.y = (ys+ye)/2;

for (double phi=0; phi<360; phi+=2)
{
    double rad = phi * M_PI / 180.0;
    p2 = p1;
    p2.x += (int)((xe-xs) * cos(rad));
    p2.y -= (int)((ye-ys) * sin(rad));

    if(edgeDetect->SearchContPoint(p1,p2,&edgeType,0,&buf3d[NumPoints]))
        NumPoints++;
}

if (NumPoints > 10)
{
    ELLIPSE ellipse;
    CALC typ;
    CCompensationCalc *pCoca;

    // Objekt zur Ausgleichsrechnung anlegen
    if((pCoca = new CCompensationCalc()) != NULL)
    {
        typ.pmode = D2_XY_Z0;          // 2D nur x,y
        typ.rmode = REST_NONE;

        // Ellipsenausgleich fuer Konturdaten
        ellipse = pCoca->GeEllipse(NumPoints-1, buf3d, typ, NULL);
        if (ellipse.error == 0)
        {
            // Anzielpunkt ist Mittelpunkt der Ellipse
            Grav.x = (float)ellipse.mp.x;
            Grav.y = (float)ellipse.mp.y;
        }
        delete pCoca;
    }
}
GravityReady = TRUE;
delete edgeDetect;
}
delete qidImg;
}
delete[] buf3d;
}
return Grav;
}
```

## D.7 Programmmodul zur Berechnung eindimensionaler Gaußfilterkerne

```

double GaussianDiscrete1D(double theta, KERNELTYPE kType, int x,
                          double dx, double stepX)
{
    double norm;
    double g = 0;

    for(double xSubPixel = (double)x - 0.5 + dx;
        xSubPixel < (double)x + 0.5 + dx;
        xSubPixel += stepX)
    {
        switch(kType)
        {
            case GAUSS:
            {
                norm = 1.0/(2.0*M_PI*theta*theta);
                g = g + (norm * exp(-(xSubPixel*xSubPixel) / (2.0*theta*theta)));
            } break;

            case GAUSS_DX:
            {
                norm = -1.0/(2.0*M_PI*theta*theta*theta*theta);
                g = g + (norm * xSubPixel * exp(-(xSubPixel*xSubPixel) /
                    (2.0*theta*theta)));
            } break;

            case GAUSS_DXX:
            {
                norm = 1.0/(2.0*M_PI*theta*theta*theta*theta*theta);
                g = g + (norm * ((xSubPixel*xSubPixel) - (2*theta*theta)) *
                    exp(-(xSubPixel*xSubPixel) / (2.0*theta*theta)));
            } break;
        }
    }
    norm /= stepX;
    g = g/norm;
    return g;
}

```

```

double* Gaussian1D(double theta, KERNELTYPE kType, const int size)
{
    int i;
    double* kernel;

```

```
kernel = new double[size];
for(i=0;i<size;++i)
    kernel[i] = GaussianDiscrete1D(theta, kType, i-(size/2), 0, 0.01);

return kernel;
}
```

---

## D.8 Template Matching mit „Halcon“

```
* load the image
dev_close_window ()
read_image (SpotImage, 'diag.bmp')
get_image_pointer1 (SpotImage, Pointer, Type, Width, Height)
dev_open_window (0, 0, Width, Height, 'white', WndID)
dev_display (SpotImage)
*
* select ROI, create the template
dev_set_color ('red')
dev_set_line_width (1)
draw_region (ROI, WndID)
reduce_domain (SpotImage, ROI, TemplateImage)
create_template (TemplateImage, 255, 4, 'sort', 'original', TemplateID)
*
* template matching
fast_match (SpotImage, SpotImage_Matches, TemplateID, 9)
*
* show results
connection (SpotImage_Matches, Matches_separate)
num_Matches := |Matches_separate|
dev_set_line_width (5)
dev_set_draw ('margin')
smallest_rectangle1 (ROI, ROI_y1, ROI_x1, ROI_y2, ROI_x2)
ROI_x := ROI_x2-ROI_x1
ROI_y := ROI_y2-ROI_y1
dev_display (SpotImage)
smallest_rectangle1 (Matches_separate, Pos_y, Pos_x, Pos_y, Pos_x)
disp_rectangle1 (WndID, Pos_y-ROI_y/2, Pos_x-ROI_x/2,
                Pos_y+ROI_y/2, Pos_x+ROI_x/2)
```

# Ein Beitrag zu neuartigen Verfahren für die Erkennung und Modellierung von Messobjekten

Dissertation, eingereicht am 20.02.2003 von Dipl.-Ing. Christian Usbeck

## Thesen

1. Die analytische Beschreibung der automatischen Anzielung eines koaxial beleuchteten Prismas ist im Intensitätsbild auf die Bestimmung des Schwerpunktes der abgebildeten Intensitätsverteilung zurückzuführen.
2. Die automatische Anzielung eines koaxial beleuchteten Prismas in einem schwellwertsegmentierten Bild ist auf die Berechnung des Mittelwertes  $\bar{x}$  und  $\bar{y}$  der strukturbeschreibenden Bildpunkte  $B[x_i, y_i]$  zurückzuführen.
3. Die lokale Approximation eines Polynoms  $f(x, y)$  zweiter Ordnung über einem Bildfenster der Dimension  $n \times m$  beschreibt für ein koaxial beleuchtetes Prisma die Fläche eines Ellipsoids. Das Maximum der approximierten Fläche kann für die Bestimmung des Anzielpunktes eines koaxial beleuchteten Prismas verwendet werden.
4. Die lokale Approximation eines Zielmusters ist auch für verschiedene farbige Varianten von Zielmustern einsetzbar und ermöglicht eine Messung von kodierten Messpunkten.
5. Die lokale Approximation eines Bildausschnittes mit einem Polynom  $f(x, y)$   $n$ -ter Ordnung, mit ( $n \geq 2$ ), ermöglicht die Lokalisierung von kodierten Zielmarken. Aus den Eigenschaften der lokal approximierten Fläche ist der Anzielpunkt und die Lage der Zielmarke bestimmbar.
6. Die abgebildeten Struktur einer linienförmigen Geometrie kann durch ein Polynom  $f(x, y)$  zweiter Ordnung beschrieben werden und ermöglicht die Bestimmung der Strukturlage aus den Eigenvektoren der approximierten Fläche.
7. Durch die Überwachung der Eigenwerte lokal approximierter Flächen, die entlang einer farbkodierten linienförmigen Geometrie durch Verschiebung der Facette bestimmt wurden, ist eine Lokalisierung der Farbübergänge möglich.
8. Die subpixelgenaue Bestimmung des Kantenortes an texturierten Kantenübergängen ist mit einem Approximationspolynom  $f(x)$  dritten Grades bestimmbar und zeigt eine Unterdrückung von zufälligen Ortsabweichungen.
9. Die Lage einer Kontur ist durch die lokale Approximation eines Polynoms  $f(x, y)$  zweiter Ordnung in einem Punkt bestimmbar und kann zur automatischen Festlegung der Antastrichtung verwendet werden.
10. Die Kontur in einem angezielten Punkt ist bei vorhandenen Texturen durch die Mittelung paralleler Antastungen senkrecht zur Kontur bestimmbar. Die Antastrichtung ist aus den Eigenwerten und Eigenvektoren der approximierten Fläche zweiter Ordnung ableitbar.

11. Für die Bestimmung ausgedehnter texturierter Konturübergänge ist die Houghtransformation zur Konturpunktverknüpfung von Punkten entlang einer Geraden anwendbar. Das globale Maximum im Parameterfeld entspricht der Konturlinie, die durch die meisten Konturpunkte beschrieben wird.
12. Durch die Kombination der Houghtransformation mit der Ausgleichsrechnung ist eine geometrieorientierte Filterung von Konturpunkten bei subpixelgenauer Bestimmung des Formelementes möglich.
13. Die Lokalisierung von mehreren kooperativen Zielen in einem Videobild kann durch die Verfahren der lateralen Histogrammtechnik, der Clusterbildung und der Houghtransformation erfolgen.
14. Der Vergleich verschiedener Verfahren zur Bestimmung der subpixelgenauen Position von signalisierten kooperativen Zielen für Spotgrößen bis  $\sigma_x = \sigma_y = 20$  zeigte für das Schwerpunktverfahren die geringsten Positionsunsicherheiten.
15. Die Kombination der lateralen Histogrammtechnik mit dem Schwerpunktverfahren ermöglicht die Bestimmung der Position von mehreren kooperativen Zielen im Videobild.

# Kurzfassung

## Ein Beitrag zu neuartigen Verfahren für die Erkennung und Modellierung von Messobjekten

Dissertation, eingereicht am 20.02.2003 von Dipl.-Ing. Christian Usbeck

Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung von intelligenten Bildverarbeitungsverfahren für die automatische Erkennung und Vermessung von signalisierten und nicht signalisierten Messpunkten. Für die Anzielung der signalisierten kooperativen Ziele werden verschiedene Verfahren vorgestellt, die eine subpixelgenaue Lagebestimmung der abgebildeten Struktur ermöglichen.

Durch eine Simulation des Anzielvorgangs auf kooperative Ziele konnte ein Vergleich verschiedener Verfahren bezüglich der zu erreichenden Positionsunsicherheit im Bild erfolgen und ein optimales Verfahren ausgewählt werden. Die Ergebnisse der Simulation werden durch Messungen an einem realen Messaufbau für die Abschätzung der erreichbaren Unsicherheit für ein Gesamtsystem verifiziert.

Die Anwendung der lokalen Approximation eines Polynoms  $f(x, y)$  zweiter Ordnung auf Ausschnitte eines Videobildes zeigt, wie für ausgewählte Muster einer Zielmarke der Anzielpunkt bestimmt werden kann. Darüber hinaus bietet das beschriebene Verfahren eine Möglichkeit zur Anzielung kodierter Messpunkte durch eine unterschiedliche Gestaltung der Zielmuster.

Weitere Untersuchungen zeigen, dass durch den Einsatz der Bildverarbeitung in Messsystemen die Erfassung von Zielmarken automatisiert werden kann. Für die automatische Anzielung von farbkodierten linienförmigen Geometrien ist das Verfahren der lokalen Approximation zur Ermittlung der Lage der abgebildeten Struktur und zur Bestimmung der Farbübergänge geeignet.

Für partiell verdeckte linienförmige Geometrien ist in dieser Arbeit eine Kombination der Houghtransformation und der Geradenapproximation zur subpixelgenauen Bestimmung der mittleren Konturlinie vorgestellt worden.

Die Entwicklung von Bildverarbeitungsverfahren zur Messung von nicht signalisierten Punkten ermöglicht die Erschließung neuer Anwendungsgebiete für Messsysteme mit einer reflektorlosen elektronischen Distanzmessung. „Intelligente Messsysteme“ für die Fassaden- und Bauwerksdigitalisierung sowie die Überwachung von Brückenbauwerken sind mögliche Anwendungen.

Die Ergebnisse der vorgelegten Arbeit sind in den verschiedensten Anwendungsgebieten der Bildverarbeitung zur robusten Erfassung von Zielmarken, wie zum Beispiel zur Lösung von Problemen in der optischen Koordinatenmesstechnik, einsetzbar.

# Abstract

## A contribution for new methods in object recognition, modelling and measurement

Dissertation, presented on February 20, 2003 by Dipl.-Ing. Christian Usbeck

The aim of the presented work is the investigation of intelligent image processing methods for automatic recognition and measurement of signalled and non-signalled measuring points. Different Methods are explained for sighting of cooperative targets to measure the position of such structures by an image sensor with sub-pixel accuracy.

Due to a simulation for the recognition of cooperative targets are image processing algorithms comparable through an analysis of the uncertainty of the detected position. By means of the uncertainty of the detected position an optimal method for the target detection is selected. The results of the simulations are verified by measuring the uncertainty of detected position on a real measuring system. Thus an estimation of the uncertainty of detected positions for the whole system is possible.

The estimation of the local structure of images is used to recognise the pattern of targets. It is shown how this method could be used to detect a sub-pixel accurate position that meets the sighting position of the target pattern. By the use of different patterns for targets this method is also applicable to coded measuring points.

Additional investigations are showing how the application of image processing could automate the acquisition of target pattern with a measurement system. Special methods are specified for the estimation of the position by using a color-coded linear structure and the estimation of a medial contour line derived from the outlines of linear geometries.

The development of intelligent image processing algorithms for the sighting of non-signalled points expands the application range of measurement systems with reflectorless electronic distance measurement. For example such intelligent measurement systems could be used for the digitalization of buildings and the monitoring of bridge constructions.

The results of the present work could be used for robust detection of target pattern. The developed image processing algorithms could solve many problems in the field of optical coordinate measurement too.