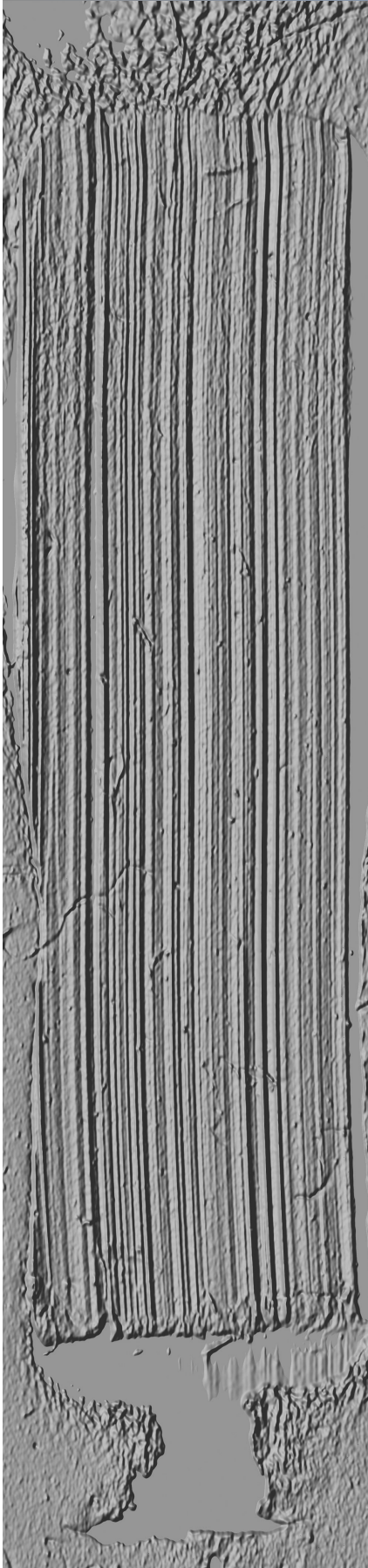


Institut für Mess- und Regelungstechnik
Universität Karlsruhe (TH)
Nr. 002

Dipl.-Ing. Michael Heizmann

**Auswertung von forensischen
Riefenspuren mittels
automatischer Sichtprüfung**



Impressum

Universitätsverlag Karlsruhe
c/o Universitätsbibliothek
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

www.uvka.de

© Universitätsverlag Karlsruhe 2004
Print on Demand
Druck: Digital Print Group Erlangen

ISSN 1613-4214
ISBN 3-937300-05-8

Auswertung von forensischen Riefenspuren mittels automatischer Sichtprüfung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte

Dissertation

von

DIPL.-ING. MICHAEL HEIZMANN

aus Kenzingen

Hauptreferent:

Prof. Dr.-Ing. C. Stiller

Korreferent:

Prof. Dr. rer. nat. B. Jähne

Tag der mündlichen Prüfung: 23. April 2004

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Mess- und Regelungstechnik der Universität Karlsruhe (TH). Die anfängliche Betreuung meiner Arbeit durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Franz Mesch ging im Frühjahr 2001 auf seinen Nachfolger, Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Stiller über. Beiden danke ich herzlich für ihre Förderung durch viele wichtige Anregungen und Diskussionen.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Bernd Jähne gilt mein Dank für die spontane Übernahme des Korreferats und sein Interesse an meiner Arbeit.

Bedanken möchte ich mich beim Bundeskriminalamt Wiesbaden für die langjährige fruchtbare Kooperation und finanzielle Unterstützung der forensischen Aktivitäten des Instituts. Stellvertretend seien an dieser Stelle Herr Dr. rer. nat. Horst Katterwe und Herr Dipl.-Phys. Michael Braune genannt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Fernando Puente León bin ich für seine zahlreichen Ideen, Ansätze und Vorarbeiten zur automatischen Sichtprüfung in der Kriminaltechnik zu Dank verpflichtet.

Den Herren Dipl.-Ing. Dirk vom Stein, Dr.-Ing. Christian Berger und Dipl.-Ing. Sören Kammel verdanke ich viele Anregungen und Vorschläge bei der Durchsicht meiner Arbeit und in zahlreichen Gesprächen.

Allen Kollegen des Instituts bin ich für die offene und freundschaftliche Atmosphäre dankbar, die zum motivierten Gelingen meiner Arbeit maßgeblich beigetragen hat. Dem Sekretariat, Frau Erna Schneider und Frau Sieglinde Klimesch, danke ich für die stets hilfsbereite Unterstützung bei den unvermeidlichen Verwaltungsangelegenheiten.

Nicht zuletzt habe ich den Mitarbeitern der Werkstätten des Instituts unter der Leitung der Herren Manfred Hauser, Marcus Hoffner und Peter Noe sowie den Herren Dipl.-Ing. (FH) Frank-Stefan Müller und Dipl.-Ing. (FH) Werner Paal zu danken, ohne deren tatkräftige und selbständige Arbeit die praktische Umsetzung des Identifikationssystems nicht möglich geworden wäre. Schließlich bedanke ich mich bei meinen studentischen Hilfskräften, deren Fleiß meine Arbeit unterstützt hat.

Karlsruhe, im April 2004

Michael Heizmann

Kurzfassung

In der Kriminalistik spielt die Auswertung von Spuren eine wesentliche Rolle, um Zusammenhänge zwischen Delikten herstellen zu können. Eine wichtige Spurengattung umfasst Riefen- oder Ziehspuren, die durch schleifende oder ziehende Bewegung eines Werkzeuges entstehen. Dazu zählen die kriminaltechnisch besonders relevanten Riefenspuren auf Geschossen sowie zahlreiche Arten von Werkzeugspuren, die z. B. von Schraubendrehern, Messern oder Zangen herrühren.

Thema der vorliegenden Dissertation ist die automatisierte Auswertung solcher Werkzeugspuren mit Methoden der automatischen Sichtprüfung. Die dargestellte Vorgehensweise macht charakteristische Individualspuren der rechnergestützten Verarbeitung zugänglich und ermöglicht so den Vergleich der Spuren.

Hierbei werden spezielle Eigenschaften von Werkzeugspuren berücksichtigt: Im Gegensatz zu Spuren auf Geschossen treten gekrümmte Riefen auf, die eine Begradigung auf Grundlage geeigneter Signalmodelle notwendig machen. Zudem zeigen Werkzeugspuren oft Lücken in der Riefenstruktur, so dass eine zuverlässige Segmentierung des Riefenbereichs unabdingbar ist. Schließlich erfordert die meist unsichere Ausrichtung der Spuren eine Erweiterung üblicher Vergleichsverfahren. Mit derartigen Auswertestrategien wurde ein automatisierter Spurenvergleich auf der Basis von Korrelationsverfahren realisiert. Experimentelle Ergebnisse belegen die Leistungsfähigkeit und Praxistauglichkeit des entwickelten Identifikationssystems.

Schlagworte: Kriminalistik – Spurenauswertung – Werkzeugspuren – Automatische Sichtprüfung – Bildverarbeitung – Segmentierung – Korrelationsanalyse – Vergleichsverfahren – Automatische Identifikation

Abstract

In forensic science, evaluation of marks plays an essential part in proving connections between different offences. Striation marks, caused by a grinding or dragging motion of a tool, form an important class of marks. The forensically relevant striation marks on firearm bullets belong to this category as well as numerous kinds of tool marks, which can be caused e. g. by screwdrivers, knives, or pliers.

The subject of this dissertation is the computerized evaluation of such tool marks by applying methods of automated visual inspection. The methodology described opens characteristic individual marks to computerized processing and hence paves the way for automated comparison of marks.

In this context, specific properties of tool marks are taken into consideration: In contrast to marks on bullets, curved grooves are frequently found that require a groove straightening on the basis of adequate signal models. Moreover, many tool marks show gaps in their groove structure thus demanding reliable segmentation of the groove area. Finally, the mostly uncertain orientation of the marks requires an extension of usual comparison algorithms. Using these evaluation strategies, an automated comparison method for tool marks on the basis of correlation techniques has been realized. Experimental results substantiate the performance and the suitability for practical application of the developed identification system.

Keywords: Forensic science – assessment of marks – tool marks – automated visual inspection – image processing – segmentation – correlation analysis – comparison algorithms – automated identification

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Kenntnisstand	2
1.2 Aufbau der Arbeit und Konzeption des Verfahrens	5
2 Signalmodell	9
2.1 Gerade Riefen	9
2.2 Gekrümmte Riefen	11
3 Datenakquisition	15
3.1 Messtechnische Erfassung von Riefenspuren	15
3.1.1 Profildaten	15
3.1.2 Schattenmodulation	19
3.1.3 Abformungen	20
3.1.4 Beleuchtung von Riefenspuren	22
3.1.5 Gegensätzliche Beleuchtung	26
3.2 Bildverbesserung durch Fusion von Einzelbildern	27
3.2.1 Fusion von Bildserien	29
3.2.2 Erfassung großer Objektbereiche	32
4 Vorverarbeitung	34
4.1 Unterdrückung von Beleuchtungs- und Texturinhomogenitäten . .	34
4.2 Segmentierung	35
4.3 Texturorientierte Segmentierung	39
4.3.1 Analyse der lokalen Varianz	39

4.3.2	Analyse lokaler Gradienten	45
4.3.3	Analyse lokaler Spektren	49
4.4	Segmentierung durch Fusion von Beleuchtungsserien	55
4.4.1	Lokales Varianzmaß	57
4.4.2	Harmonische Analyse	60
4.5	Nachbearbeitung von Segmentierungsmasken	66
4.5.1	Regionenwachstumsverfahren	66
4.5.2	Morphologische Operatoren	68
5	Merkmalsextraktion	77
5.1	Gerade Riefen	77
5.2	Begradigung gekrümmter Riefen	78
5.2.1	Lokale Orientierungsanalyse	78
5.2.2	Modellgestützte Riefenverfolgung	79
5.2.2.1	Korrelation von Riefenprofilen	83
5.2.2.2	Aktive Konturen (Snakes)	85
5.2.2.3	Kombination Aktiver Konturen und Splines	91
5.3	Signaturgewinnung	93
6	Automatische Spurensuche	95
6.1	Vergleich von Signalen	95
6.2	Detektion linearer Ähnlichkeit	96
6.3	Detektion verallgemeinerter Ähnlichkeit	98
6.3.1	Arten der zu detektierenden Ähnlichkeit	99
6.3.2	Energieansätze	100
6.3.3	Kreuzentropie-Analyse	103
6.3.4	Nichtlineare Transformationen	105
6.3.4.1	Verschiebungsinvariante Transformation	106
6.3.4.2	Verschiebungsvariante Transformation	109
6.4	Vergleich unterschiedlich orientierter Spuren	112
6.4.1	Gegensätzliche Beleuchtung	112

6.4.2	Unterschiedliche Orientierung	114
6.5	Bewertung von Vergleichsverfahren	116
6.5.1	Konzentrationskurve	116
6.5.2	Maßzahlen	119
6.6	Experimentelle Ergebnisse	122
7	Realisierung eines Identifikationssystems	128
7.1	Datenerfassungsstation	129
7.1.1	Beleuchtungseinrichtung	130
7.1.2	Positioniereinrichtung	131
7.2	Software	133
8	Zusammenfassung	136
A	Anhang	139
A.1	Inspektion geschliffener Oberflächen	139
A.2	Lösung der Optimierungsaufgabe Aktiver Konturen	143
A.3	Konvexität der Lorenzkurve	145
	Literaturverzeichnis	146

Symbolverzeichnis

Abkürzungen

AK	Aktive Kontur
DFT	Digitale Fourier-Transformation
KEF	Kreuzentropiefunktion
KKF	Kreuzkorrelationsfunktion
SE	Strukturierendes Element
WDF	Wahrscheinlichkeits-Dichtefunktion

Notationsvereinbarungen

Skalare	nicht fett, kursiv: a, b, c, \dots
Vektoren	fett, kursiv: $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}, \dots$
Matrizen	fett, kursiv, groß: $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \dots$
Mengen	kalligraphisch, groß: $\mathcal{A}, \mathcal{B}, \mathcal{C}, \dots$
Konstanten, Bezeichner	nicht kursiv: a, b, c, \dots

Symbole

\hat{x}	Schätzwert von x
\bar{x}	empirischer Mittelwert von x
\mathbf{x}^T	Transposition des Vektors \mathbf{x}
\propto	Proportionalität
\mapsto	Abbildung
$:=$	Definition
\emptyset	leere Menge
$ \cdot $	Mächtigkeit einer Menge, Betrag einer komplexen Zahl
$\ \cdot\ $	Euklidische Norm
$\angle\{\cdot\}$	Phase einer komplexen Zahl

∇	Nabla-Operator
*	Faltungsoperator
**	Faltungsoperator (zweidimensional)
\otimes	Korrelationsoperator
\otimes_x	Korrelation in Koordinatenrichtung x
\oplus	morphologische Dilatation
\ominus	morphologische Erosion
\circ	morphologische Öffnung
\bullet	morphologische Schließung
\wedge	Konjunktion
\vee	Disjunktion
\cup	Vereinigungsmenge
\cap	Schnittmenge
$\arg\{.\}$	Argument einer Funktion
\mathcal{A}	Spurenarchiv
b	Schneidenbreite
$B_{i,k}(l)$	Approximationskern eines Splines der Ordnung k
c	Stützstelle eines Splines
C_G	Gini-Koeffizient
C_H	Herfindahl-Index
C_R	Rosenbluth-Index
$d(\xi)$	Sensorsignal
$d(x)$	Impulsantwort einer Ableitungsmaske
D	Bildserie
\mathcal{D}	Dichtfläche, Trägermenge von $d(\xi)$
e	Eulersche Konstante
e	Einheitsvektor
E	Energiefunktional
E_D	Term für Datennähe
E_G	Glattheitsterm
E_I	Term für innere Energie
E_M	Term für merkmalsbezogene Energie
E_Q	Güteterm
E_Z	Term für Energie äußerer Zwänge

E_e	einfallende Bestrahlungsstärke
$E\{.\}$	Erwartungswert
$f(.)$	allgemeine Funktion, Verteilungsdichtefunktion
$\mathbf{f} = (f_x, f_y)^T$	Ortsfrequenzvektor
$F(.)$	kumulative Verteilungsfunktion
\mathbf{F}	virtuelle Kraft
$\mathcal{F}\{.\}$	Fourier-Transformation
g	Gitterweite
$g(\mathbf{x})$	Grauwertbild
G	Gütekriterium
$G(x; \sigma)$	eindimensionale Gauß-Funktion
$G(\mathbf{x}; \boldsymbol{\sigma})$	zweidimensionale Gauß-Funktion
$h(\xi)$	Histogramm
$h(\mathbf{x})$	Hintergrundtextur
H	Entropie
$H(\xi)$	kumulatives Histogramm
I	Intensität
\mathbf{I}	Einheitsmatrix
j	Imaginäre Einheit
$k_{12}(\tau)$	Kreuzkorrelationsfunktion
K	Anzahl der Bilder einer Bildserie
l	Kurvenparameter
\mathbf{l}	Beleuchtungsvektor
$L_i(r)$	Hitliste für die Spur i
L_e	reflektierte Strahlungsdichte
\mathcal{L}	sortierte Liste
$m(.)$	Messfunktion, Klassifizierungsmerkmal
$\mathbf{m}(l)$	Trajektorie des Werkzeuges
mod	Modulo-Operator
N	Anzahl möglicher Ereignisse
$p(\varrho)$	Projektion der Riefentextur
$p_Q(q)$	Wahrscheinlichkeits-Dichtefunktion (WDF) von Q
$P_Q(q)$	kumulative Wahrscheinlichkeitsfunktion von Q
$P(q_i)$	diskrete Wahrscheinlichkeit des Ereignisses q_i

$q(x)$	Ergebnis der Merkmalsextraktion, zu vergleichendes Signal
$q(\mathbf{x})$	Verhältnis lokaler Varianzen am Ort \mathbf{x}
Q	Prozess
$r(\rho)$	Riefenprofil
$r_i(k)$	Rang der Spur k in der Hitliste der Spur i
$r(\mathbf{x})$	Riefentextur
R	Radius
\mathbf{R}	Rotationsmatrix
s	Streifenabstand
$s(\xi)$	Messsignal
$s(\mathbf{x})$	symmetrischer Differenzenquotient, Strukturierendes Element
$s^2(x) = \text{var}\{x\}$	empirische Varianz von x
$\text{supp}\{.\}$	Träger einer Funktion
$\hat{S}_{tt}(\mathbf{f})$	Periodogramm von $t(\mathbf{x})$
t	Iterationsschritt
$t(\mathbf{x})$	Riefentextur
\mathcal{T}	Träger der Riefentextur
\mathcal{T}_i	Kriterium i für den Riefenbereich
$\mathcal{T}\{.\}$	Signaltransformation zur Umkehrung der Messfunktion $m(.)$
$\mathbf{u} = (u, v)^T$	lokale Ortskoordinaten
$v(\mathbf{x})$	Ergebnis einer Bildfusion
V	Sichtbarkeit von Interferenzstreifen, laterale Ausdehnung des Fensters $\mathcal{W}_{\mathbf{x}_p, \varphi}$
\mathcal{V}_q	Menge der vom Werkzeug q verursachten Spuren
$\mathcal{W}_{\mathbf{x}_p, \varphi}$	gleitendes und rotiertes Fenster
$w(\mathbf{x})$	Fensterfunktion
$\mathbf{x} = (x, y)^T$	Ortsvektor
\mathbf{x}_p	Bildpunkt
α	Dämpfungskonstante
$\boldsymbol{\alpha} = (a, b)^T$	relative Kameraposition
γ	Neigungswinkel eines Oberflächenelements, Schrittweite für Optimierungsrechnung
$\gamma_n(\cdot)$	Flächenöffnung
$\Gamma(x)$	Gammafunktion

$\delta(x)$	Diracsche Delta-Distribution
δ_a^b	Kronecker-Symbol
Δl_c	Kohärenzlänge
ΔE	virtuelle Arbeit
ε	kleine Konstante
ζ	Objektabstand
$\eta(\xi)$	Skalierungsfunktion
θ	Elevationswinkel der Beleuchtung
θ_0	Elevationswinkel einer Beleuchtungsebene
$\vartheta(\mathbf{x})$	Riefenwinkel
λ	Gewichtungsfaktor, Wellenlänge
$\mu(l)$	Gewichtungsfaktor für die Kontinuität Aktiver Konturen
$\nu(l)$	Gewichtungsfaktor für Richtungsänderungen Aktiver Konturen
$\boldsymbol{\xi} = (\xi, \eta)^T$	Ortsvektor
ρ_{12}	Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion
ϱ	Koordinate in Schneidenrichtung
σ^2	Skalierungsfaktor der Gauß-Funktion
ς_r	r -tes zentrales Absolutmoment einer verallgemeinerten Gauß-Funktion
τ	Verschiebung zwischen zwei Signalen
$\boldsymbol{\tau} = (\tau_x, \tau_y)^T$	Verschiebung zwischen zwei Bildern
$\phi_n(\cdot)$	Flächenschließung
Φ_e	Strahlungsfluss
φ	Azimut der Beleuchtung, Drehwinkel eines rotierten Fensters
$\varphi'(\mathbf{x})$	Beleuchtungskarte in Bezug auf das Azimut
$\tilde{\varphi}(\mathbf{x})$	geglättete Beleuchtungskarte in Bezug auf das Azimut
χ	Winkel zwischen der Oberflächennormalen und der Beleuchtungsrichtung
$\chi(\mathbf{x})$	Kohärenzmaß
ψ	Richtungswinkel der Schneide
$\boldsymbol{\omega}$	Parametervektor der Bilderfassung
$\tilde{\boldsymbol{\omega}}(\mathbf{x})$	für eine Bildfusion verwendeter Parametervektor

1 Einleitung

In der Kriminalistik spielt die Auswertung von Spuren eine wesentliche Rolle, um Zusammenhänge zwischen Delikten und Tatwerkzeugen herstellen zu können. Mit Hilfe charakteristischer Merkmale wird eine eindeutige Zuordnung unterschiedlicher Spuren zueinander ermöglicht. Durch Vergleichsspuren, die von sichergestellten Werkzeugen oder Waffen unter definierten Bedingungen erzeugt worden sind, gelingt die Identifikation des Asservats.

Eine wichtige Spurengattung sind Riefen- oder Ziehspuren, die durch eine schleifende oder ziehende Bewegung eines Werkzeuges entstehen. Dabei werden auf der Oberfläche des Spurenträgers durch plastische Umformung oder lokale Entfernung von Material Riefen erzeugt, deren Profil Rückschlüsse auf das Werkzeug erlaubt. Zu dieser Spurengattung zählen die kriminaltechnisch besonders relevanten Riefenspuren auf der Umfangsfläche von Geschossen. Darüber hinaus erzeugt eine Vielzahl von Werkzeugen wie z. B. Schraubendreher, Messer oder Zangen bei entsprechendem Einsatz ein ähnliches Spurenbild.

Zur visuellen Auswertung wird eine neu aufgefundene Spur mit gleichartigen Spuren aus einem Spurenarchiv verglichen und — falls keine Zusammenhänge mit diesen Spuren erkannt werden können — in diesem Archiv abgelegt. Der eigentliche Vergleich wird bisher meist durch einen Experten an einem Vergleichsmikroskop ohne Unterstützung durch ein automatisiertes System durchgeführt. Nach einer Vorklassifizierung der Spuren aufgrund grober Merkmale wie z. B. der Spurenbreite oder besonders tiefer Riefen ist der Experte auf sein Erinnerungsvermögen angewiesen, mit dem er sich zuvor untersuchte Spuren in seiner Vorstellung visualisieren kann. Große Mengen sichergestellter Spuren stellen die visuelle Spurenauswertung folglich vor unlösbare Probleme: Zum einen ist das Untersuchungsergebnis stark vom Experten abhängig, so dass eine Vielzahl von Zusammenhängen nicht erkannt werden kann. Zum anderen ist es aufgrund des großen Umfangs der Spurensammlungen häufig nur möglich, auf einen bestimmten Verdacht hin zu ermitteln.

Automatisierte Identifikationssysteme sind deshalb von zunehmender Bedeutung zur Objektivierung und Beschleunigung der Spurenauswertung. Während für Spuren auf Geschossen schon seit einiger Zeit bildbasierte Identifikationssysteme verfügbar sind, stellt die automatisierte Auswertung von riefenartigen Werkzeugspuren weitergehende Anforderungen an die Signalverarbeitung:

- Die Spur bedeckt nur einen kleinen Teilbereich des Spurenträgers, was eine Trennung des eigentlichen Spurenbereichs vom irrelevanten Hintergrund erforderlich macht.
- Die Riefen sind häufig gekrümmt, so dass besondere Verfahren zur Riefenbegradigung solcher Spuren notwendig werden.
- Im Gegensatz zu Geschossen, deren Orientierung durch ihre Gestalt eindeutig feststeht, ist die stets identische Ausrichtung von Werkzeugspuren zur Bilderfassung praktisch nicht möglich.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die Entwicklung einer automatisierten Verfahrensweise, um riefenartige Werkzeugspuren unter Berücksichtigung dieser Eigenschaften auszuwerten. Zweck ist somit die Realisierung eines Identifikationssystems, das den Experten von der langwierigen und monotonen Spurensuche in großen Archiven entlastet und somit einen wesentlichen Beitrag zur Effizienzsteigerung in der Spurenauswertung liefert.

1.1 Kenntnisstand

Erste Ansätze zur automatisierten Auswertung von Riefenspuren gehen bis vor 1980 zurück. Bereits damals war klar, dass dies nur dann gelingen kann, wenn die Charakteristika der Riefen in geeigneter Form zuverlässig verfügbar sind. In der Folge beschränkten sich zahlreiche Ansätze auf eine Rechnerunterstützung durch subjektive Bildverbesserung sowie durch Vorsortierung nach bestimmten, vom Anwender vorzugebenden kriminaltechnischen Merkmalen und anschließende Visualisierung, wobei der eigentliche Spurenvergleich beim Experten verblieb [Ebd94, Kat89, Kat94].

Frühe theoretische Überlegungen in [Bra70] zu einem automatisierten Vergleich von Riefenspuren führten starke Vereinfachungen der Riefen ein. Dazu wurde die Riefenstruktur als Menge einzelner Riefen modelliert, die ohne Berücksichtigung von Breite, Form oder sonstigen individuellen Eigenschaften nur durch ihre relative Position zu den benachbarten Riefen charakterisiert waren. Die Abfolge von Riefen konnte durch statistische Eigenschaften beschrieben werden, so dass eine erste rechnergestützte Bewertung der Ähnlichkeit von Riefenspuren ermöglicht wurde.

Die herausragende kriminalistische Relevanz der Schusswaffenidentifikation führte zusammen mit der einfacheren Spurenlage auf Geschossen dazu, dass zunächst

Verfahren zur automatischen Auswertung von Riefenspuren auf Projektilen realisiert wurden. Bei dem in [Gar78] beschriebenen Verfahren wurden aus elektronenmikroskopischen Aufnahmen eines Projektils mehrere Signaturen in Form aufbereiteter Intensitätsprofile gewonnen, die entlang einer global ermittelten Riefenrichtung projiziert wurden. Durch Extraktion mehrerer lokaler Signaturen versuchte man, die Zuverlässigkeit des Verfahrens bei verformten oder fragmentierten Geschossen zu erhöhen. Die Beschreibung der Struktur erfolgte durch Position, Breite und Amplitude besonders stark ausgeprägter Riefen, was den Zeitaufwand für den Spurenvergleich mit der damaligen Rechnertechnik erträglich hielt.

Ein ähnlicher Ansatz wurde in [Dei78, Dei81] für allgemeine Riefenspuren verfolgt, wobei als Datengrundlage digitalisierte Makroskopaufnahmen dienten, die in Form von binären Strichdiagrammen ausgewertet wurden. Zum Ausgleich von lokalen Störungen der Riefenstruktur wurden mehrere Profile derselben Spur durch Mittelwertbildung konkurrierend fusioniert, wobei benachbarte Profile aneinander ausgerichtet wurden, bis die bestmögliche Übereinstimmung der Profile erreicht war. Der Vergleich zweier Profile erfolgte in einem der Kreuzkorrelation ähnlichen Verfahren. Dabei wurde für jede Linie im ersten Profil eine Umgebung im zweiten Profil festgelegt, in der sich dort eine Linie befinden musste, um als Übereinstimmung zu gelten.

Die Methodik in [Ger94] verwendete zur Datenreduktion ein einziges Profil der Riefentextur aus einem Grauwertbild. Dort wurde zur Spurenauswertung ein Vergleich dieser Profile mittels neuronaler Netze vorgeschlagen. Gravierender Nachteil dieses Verfahrens zur Datenaufbereitung war die hohe Anfälligkeit gegen Störungen. Die Riefentextur des Spurenträgers konnte durch vielfältige Einflüsse gestört sein, beispielsweise durch nachträglich eingebrachte Kratzer, Staubkörner, Verschmutzungen, aber auch Lunker und Einschlüsse bei der Verwendung von Abformungen.

Als Konsequenz wurde in [Ger95] ein Verfahren entwickelt, bei dem aus einer Makroskopaufnahme mehrere Grauwertprofile durch Mittelwertbildung kombiniert wurden. Die Position dieser Profile im Bild war vom Experten zu definieren. In weiteren Studien des Autors [Ger02] wurde eine rudimentäre Riefenbegradigung beschrieben, bei der mehrere benachbarte Profile grob aneinander ausgerichtet wurden.

In einem gänzlich anderen Ansatz zur Datengewinnung wurde versucht, optische Verfahren der Rauheitsmessung für die Gewinnung von $2\frac{1}{2}$ D-Profilen zu nutzen. In [Pah90] wurden dazu ein der konfokalen Mikroskopie ähnliches Verfahren sowie ein Fokusdetektionsverfahren verwendet. Als problematisch stellten sich die teilweise stark unterschiedlichen Reflexionsgrade auf einer Probe heraus, so dass zur Erzielung zuverlässiger Höhenprofile eine zeilenweise Abtastung der Riefenstruk-

tur vorgeschlagen wurde. Darüber hinaus erwiesen sich die langen Erfassungszeiten für Profildaten als wesentliches Hindernis für einen praktischen Einsatz dieser Verfahren [Kat96].

Als Alternative wurde die Anwendung von Streulichtverfahren erprobt [Kat88, Pah90]. Das Prinzip dieses Ansatzes besteht darin, dass aus der Auffächerung eines Lichtbündels an der Riefenstruktur charakteristische Kennwerte gewonnen werden. Obwohl solche Verfahren erfolgreich zur Bewertung der Qualität technischer Oberflächen eingesetzt werden, erwiesen sich diese Kennwerte jedoch als nicht aussagekräftig genug für die Identifikation von Spuren auf Projektilen. Die Schwierigkeiten lagen u. a. darin begründet, dass bei der verwendeten Hellfeldbeleuchtung geringe Abweichungen des Elevationswinkels beträchtliche Abweichungen der gemessenen Intensitäten verursachten. Zusätzlich gestattete die damals verfügbare Auflösung kaum die Trennung einzelner Riefen. Dieses Verfahren war daher nur für eine Vorselektion von Spuren mit ähnlicher Merkmalsausprägung geeignet [Kat92].

In jüngster Zeit wurde ein erneuter Anlauf zur Automatisierung der Auswertung von riefenartigen Werkzeugspuren unternommen [Ahl00, Sch01b]. Zur Bilderfassung wurden Standardsysteme für Makroskopbilder eingesetzt; Profildaten konnten mittels eines optischen Messtasters und eines Mikrostreifenprojektionssystems eingelesen werden. Durch Fuzzy Clustering wurde versucht, aus mehreren Spuren desselben Werkzeugexemplars ein typisches Profil zu erhalten. Für den Vergleich solcher Profile dienten Ähnlichkeitskriterien auf der Basis einer syntaktischen Beschreibung stark geglätteter Profile, die dann mittels allgemeiner Methoden des Syntax Matching mit Fuzzy-Klassifikatoren und Neuronaler Netze ausgewertet wurden.

Am Institut für Mess- und Regelungstechnik wurden für die automatische Identifikation von Schusswaffen in [Pue99a] zahlreiche Ansätze und Verfahren entwickelt, die ein umfassendes System zur Auswertung von Spuren auf Projektilen bildeten. Schwerpunkte dieser Arbeit waren die komplementäre Fusion von Bildserien mit variierter Beleuchtung und Fokussierung, die Extraktion aussagekräftiger Merkmale sowie der Vergleich solcher Spuren mit Hilfe von Korrelationsverfahren. Für Werkzeugspuren sind viele der dort aufgezeigten Verfahren gut anwendbar, die oben genannten charakteristischen Eigenschaften von riefenartigen Werkzeugspuren erfordern jedoch eine grundlegende Erweiterung der Methodik.

Zur Beschreibung von technisch erzeugten Riefenstrukturen wurde in [Bey94] ein parametrisches Riefenmodell eingeführt. Charakteristisch für solche Riefenstrukturen ist die geometrische Anordnung von gleichartigen Riefen in Form von Kreisbögen oder Geradenstücken, die durch den spanenden Bearbeitungsprozess festgelegt sind. Das Signalmodell beruht darauf, dass durch einen impulsförmigen Spei-

seprozess aus einzelnen Riefenprofilen überlagerte Riefenscharen erzeugt werden. Der Speiseprozess gibt dabei eine Vorschrift zur Anordnung und Ausrichtung der Riefen an und spiegelt die Eigenschaften des Bearbeitungsprozesses wider. Die Grundlage dieses Ansatzes kann daher als Basis eines für Riefenspuren geeigneten Signalmodells dienen.

1.2 Aufbau der Arbeit und Konzeption des Verfahrens

Für einen automatisierten Spurenvergleich müssen die erfassten Bilder der Riefenspur in eine Form überführt werden, die für einen anschließenden rechnergestützten Vergleich geeignet ist. Die Gliederung der vorliegenden Arbeit orientiert sich daher an der Abfolge der Verfahrensschritte von der Bilderfassung bis zum Vergleich.

Die Schritte der Aufbereitung von Spurenbildern sind in den Bildern 1.1 und 1.2 am Beispiel einer riefenartigen Werkzeugspur visualisiert, die mittels zweier lichtmakroskopisch erfasster Bilder mit unterschiedlichen Beleuchtungsrichtungen ausgewertet wird¹:

- In Kapitel 2 wird zunächst ein Signalmodell für die Struktur von Riefenspuren eingeführt, die durch eine starre Werkzeugschneide erzeugt werden. Dieses Modell dient bei der Segmentierung, besonders jedoch bei der Merkmalsextraktion der zielführenden Verarbeitung der Riefenspuren.
- Kapitel 3 beleuchtet Aspekte der Datenakquisition. Diese erfordert viel Sorgfalt, da die aussagekräftigsten Merkmale im Wesentlichen in feinen Strukturen zu suchen sind, was evtl. die Erfassung und Fusion von Bildserien erforderlich macht. Auf grundsätzliche Unterschiede zwischen $2\frac{1}{2}$ D-Daten und lichtmakroskopischen Bildern wird in Abschnitt 3.1 eingegangen.
- Im ersten Verarbeitungsschritt eliminieren die in Kapitel 4 vorgestellten Vorverarbeitungsverfahren unerwünschte Signalanteile der erfassten Bilder. Bei lichtmakroskopischen Bildern werden Störungen unterdrückt, die z. B. aus der Wechselwirkung zwischen der Beleuchtung und lokal unterschiedlichen Reflektanzeigenschaften der Probe stammen.

¹Bei vielen der in dieser Arbeit enthaltenen Grauwertbilder wurde zugunsten der besseren Erkennbarkeit der Strukturen eine Kontrastspitzung durchgeführt. Dadurch können in den dargestellten Bildern Grauwertunter- bzw. -überläufe auftreten, die in den tatsächlichen Daten nicht vorkommen.

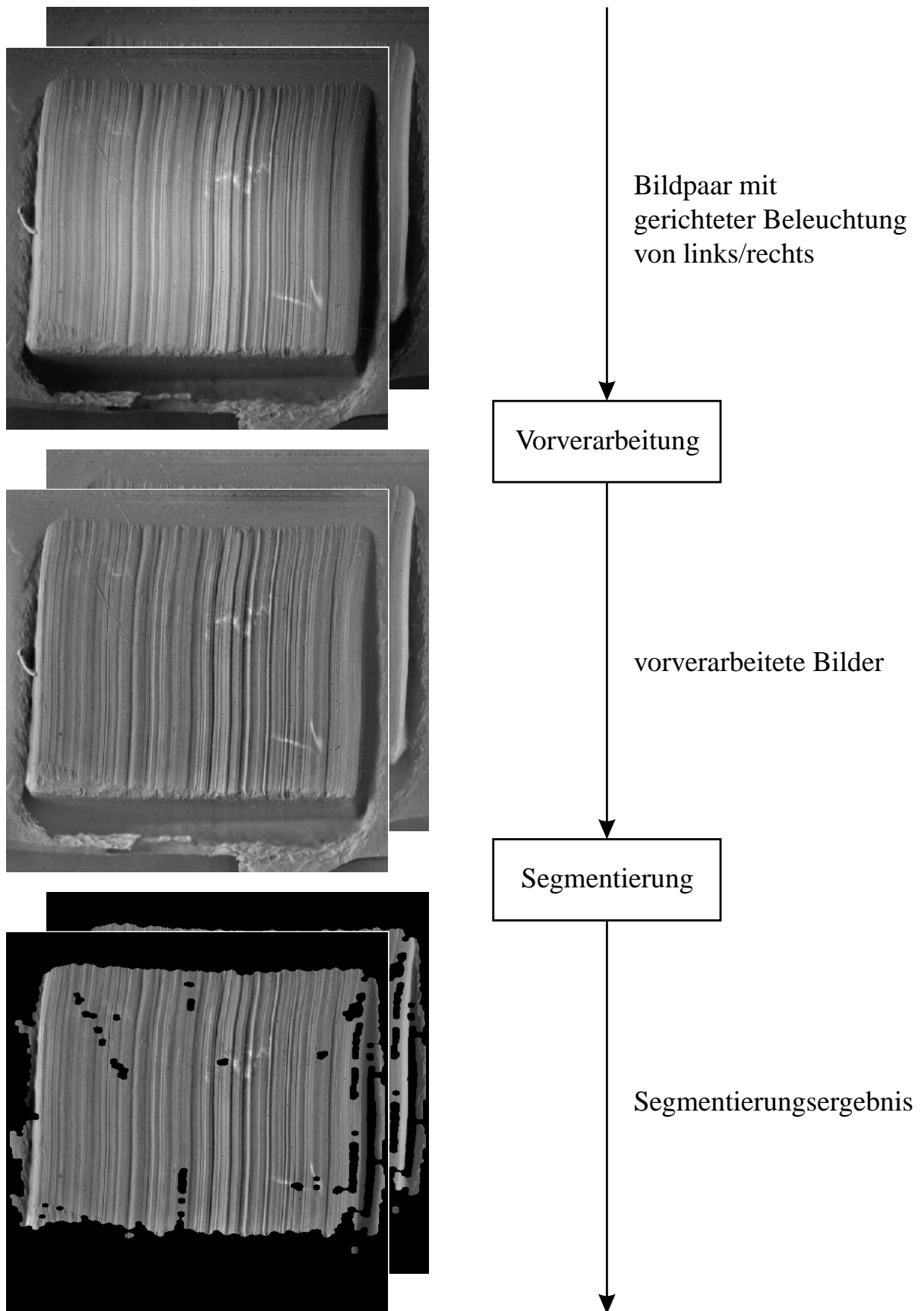


Bild 1.1: Verarbeitungsschema einer Werkzeugspur.

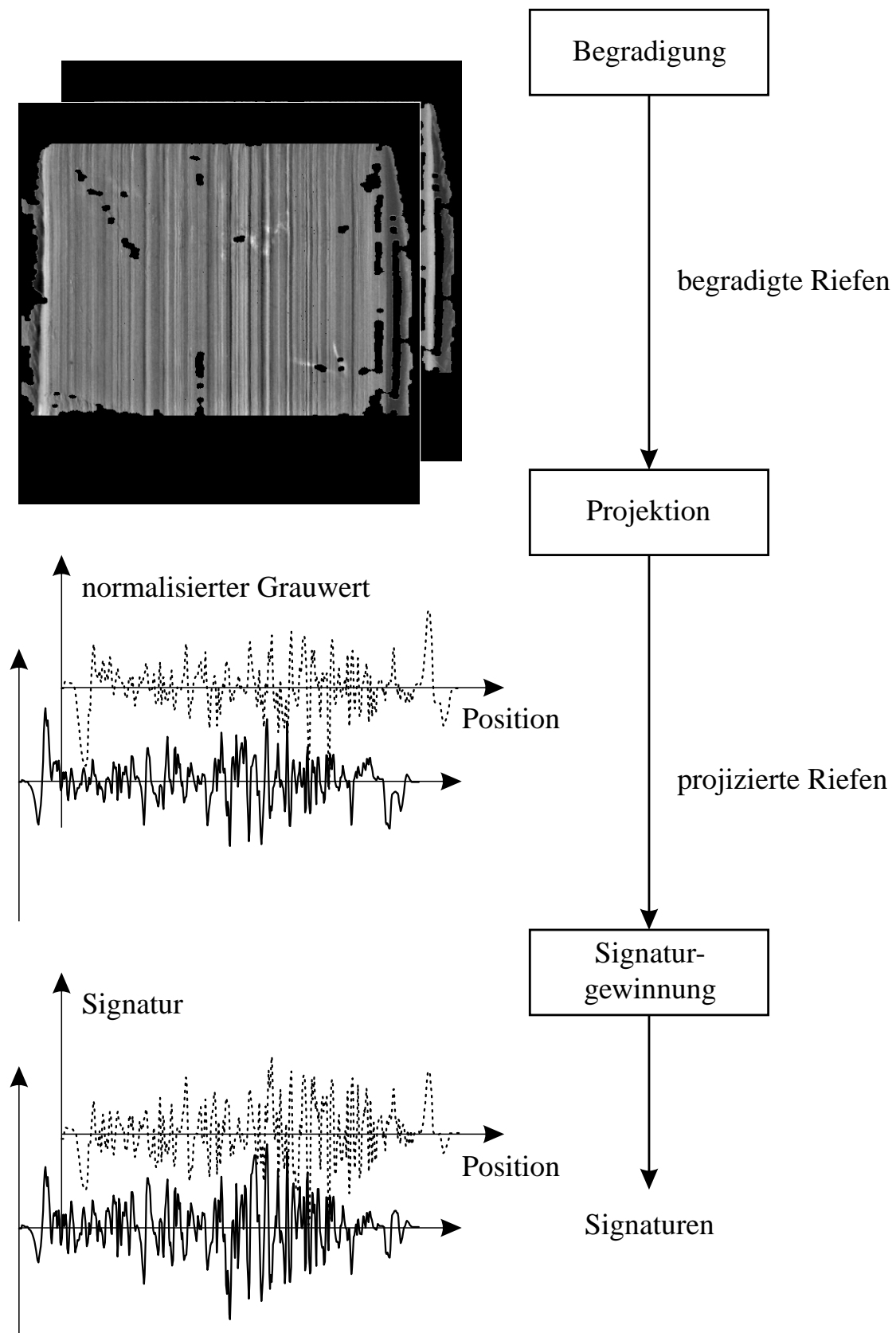


Bild 1.2: Verarbeitungsschema einer Werkzeugspur (Fortsetzung).

- Da für den Vergleich der Riefenspuren nur der eigentliche Riefenbereich herangezogen werden soll, wird eine Segmentierung des Riefenbereichs mit den in Abschnitt 4.2 vorgestellten Verfahren durchgeführt. Dieser Verfahrensschritt ist dadurch motiviert, dass zur Segmentierung geeignete und robuste Merkmale definiert werden müssen.
- Kapitel 5 geht auf die Extraktion aussagekräftiger Merkmale ein. Bei Riefenspuren bestehen die Merkmale in den Erhöhungen und Scharten der Werkzeugschneide, so dass eine Darstellung in Form eines eindimensionalen Profils sinnvoll erscheint. Die in Abschnitt 5.2 dargestellten modellbasierten Ansätze sind für gekrümmte Spuren besonders geeignet, so dass die gesamte Ausdehnung des Riefenbereichs Berücksichtigung findet. Hierbei wird der Riefenbereich zunächst begradigt, anschließend erfolgt eine gewichtete Summation in Riefenrichtung.
- Da die erhaltenen Projektionen außer den für den Vergleich relevanten Charakteristika noch unerwünschte Signalanteile enthalten, ist zur Signaturgewinnung eine Nachverarbeitung durch die in Abschnitt 5.3 gezeigten Verfahren erforderlich. Ergebnis der Merkmalsextraktion sind *Signaturen*, welche die relevanten Anteile der Riefenspur in einer für den automatisierten Vergleich geeigneten Form enthalten.

Die in Kapitel 6 gezeigte automatische Spurensuche baut auf dem Vergleich der Signaturen auf. Hier werden in dieser Arbeit besonders folgende Aspekte beleuchtet:

- Zur Bewertung der Ähnlichkeit von Signalen ist die in Abschnitt 6.2 dargestellte Kreuzkorrelation ein bekanntes und bewährtes Verfahren, das als Grundlage für den automatischen Spurenvergleich dient.
- Aufgrund nichtlinearer Verzerrungen der Signaturen ist der Einsatz verallgemeinerter Strategien zur Spurensuche erforderlich. Solche Strategien, die zur Detektion nichtlinearer Ähnlichkeit geeignet sind, werden in Abschnitt 6.3 erörtert.
- Im Gegensatz zu Riefenspuren auf Projektilen ist die korrekte Orientierung von Werkzeugspuren meist unbekannt. Möglichkeiten zur geeigneten Auswertung solcher Spuren werden in Abschnitt 6.4 vorgestellt.
- Schließlich werden durch die in Abschnitt 6.5 gezeigten Bewertungsverfahren quantitative Aussagen zur Leistungsfähigkeit aller dargestellten Verfahren und Algorithmen möglich.

2 Signalmodell

Durch die messtechnische Erfassung des flächigen Spurenträgers liegt ein Bild, d. h. ein zweidimensionales Datenobjekt, vor. Die Entstehung von Riefenspuren zeigt, dass diese *zweidimensionale* Struktur aus der kombinierten Translation und Rotation eines *eindimensionalen* Profils hervorgeht. In der Realität kann die Riefenstruktur zwar durchaus von einer räumlich ausgedehnten Schneidengeometrie erzeugt worden sein; es ist jedoch meistens zulässig, eine eindimensionale Schneide als Verursacher der Riefenstruktur anzunehmen.

Für eine derartige Vereinfachung müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Die Winkelposition des Werkzeuges zur Oberfläche des Spurenträgers muss weitgehend konstant gehalten worden sein, so dass sich das Riefenprofil nicht über der Länge der Riefen ändert.
- Im Fall von Spuren auf Geschossen müssen die Spuren während der gleichförmigen Bewegung des Projektils im Lauf der Waffe erzeugt worden sein. Die eindimensionale Schneide kann dann als Projektion aller Erhebungen und Vertiefungen des Laufs in Bewegungsrichtung der Geschossmantelfläche relativ zum Lauf modelliert werden.
- Bei der Bilderfassung muss die Beleuchtung relativ zur Riefenrichtung konstant gehalten werden. Dies kann bei stärker gekrümmten Spuren dadurch sichergestellt werden, dass durch Fusion einer Beleuchtungsserie mit variiertem Azimut der Beleuchtungswinkel synthetisch angepasst wird. Bei Profildaten entfällt diese Voraussetzung.

Sind diese Bedingungen erfüllt, so können Signalmodelle definiert werden, welche die Extraktion charakteristischer Riefenprofile aus den Spurendaten ermöglichen.

2.1 Gerade Riefen

Der Fall streng geradliniger Riefen tritt vor allem bei unverformten Geschossen auf. Diese Verfeuerungsspuren werden beim Passieren des Laufs der Waffe durch die Züge und Felder in die Umfangsfläche des Geschosses eingegraben. Dabei können zwei Gruppen unterschieden werden [Sel82]:

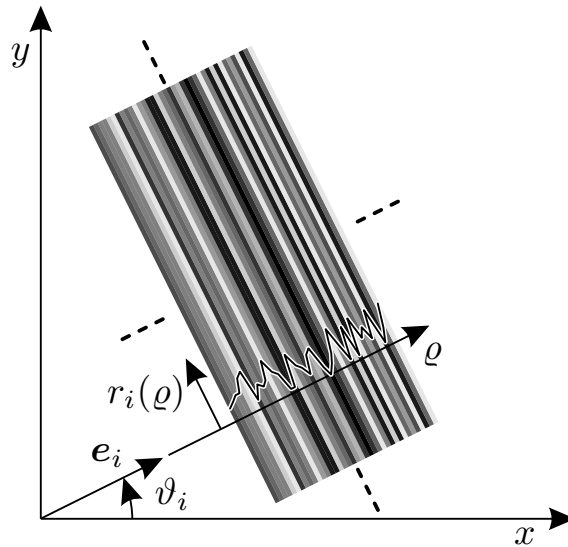


Bild 2.1: Riefenmodell für Verfeuerungsspuren auf Geschossen.

- Die Primärspuren entstehen beim Eintreten des Geschosses in den Lauf. Da das Geschoss zu diesem Zeitpunkt noch keine Drallbewegung ausführt, sind diese Spuren parallel zur Geschossachse.
- Sobald das Geschoss eine dem Drallwinkel des Laufs entsprechende Drehbewegung ausführt, werden die Sekundärspuren erzeugt, die um den Drallwinkel geneigt zur Geschossachse auftreten.

Die beiden Riefenscharen entstehen nacheinander, wobei die Sekundärspuren die Primärspuren lokal auslöschen. Ein passendes Signalmodell für eine derartige Riefentextur kann daher durch Überlagerung zweier Teiltexturen beschrieben werden, welche die Primär- und die Sekundärspuren als gerade und unendlich lange Riefen mit jeweils konstantem Riefenwinkel modellieren [Bey94, Pue99a]:

$$t(\mathbf{x}) = \begin{cases} t_{\text{primär}}(\mathbf{x}), & \mathbf{x} \in \mathcal{T}_{\text{primär}}, \\ t_{\text{sekundär}}(\mathbf{x}), & \mathbf{x} \in \mathcal{T}_{\text{sekundär}} \end{cases} \quad (2.1)$$

mit

$$\mathcal{T}_{\text{primär}} \cap \mathcal{T}_{\text{sekundär}} = \emptyset, \quad (2.2)$$

$$t_i(\mathbf{x}) = \sum_{\nu} r'_{i,\nu}(\mathbf{x}^T \cdot \mathbf{e}_i - d_{i,\nu}). \quad (2.3)$$

Dabei sind $r'_{i,\nu}(\varrho)$ das eindimensionale Profil der ν -ten Riefe der i -ten Riefenschare in Richtung des Normalenvektors $\mathbf{e}_i = (\cos \vartheta_i, \sin \vartheta_i)^T$ sowie $d_{i,\nu}$ der Abstand des Ursprungs von $r'_{i,\nu}(\varrho)$ vom Koordinatenursprung. Fasst man die Profile

$r'_{i,\nu}(\varrho)$ der einzelnen Riefen der i -ten Riefenschar zu einem Gesamtprofil $r_i(\varrho)$ dieser Riefenschar zusammen, so erhält man

$$t_i(\mathbf{x}) = r_i(\mathbf{x}^T \cdot \mathbf{e}_i) . \quad (2.4)$$

Ohne Beschränkung der Allgemeinheit wird dabei der Ursprung des Koordinatensystems in den Nullpunkt des Riefenprofils gelegt, siehe Bild 2.1.

Zur Auswertung der Riefenspuren auf Geschossen wird in der Regel nur eine der beiden Riefenscharen verwendet. Da die Sekundärspuren bei in Westeuropa gebräuchlichen Waffen meist stärker als die Primärspuren ausgeprägt sind, beschränkt sich die Auswertung hier auf die Riefenschar der Sekundärspuren, die durch ihr mittleres Profil und den Riefenwinkel ausreichend charakterisiert ist [Pue99a].

2.2 Gekrümmte Riefen

Für riefenartige Werkzeugspuren ist das obige Modell aus mehreren Gründen meist nicht anwendbar:

- Die strenge Geradlinigkeit der Werkzeugbewegung ist aufgrund der fehlenden mechanischen Führung der Werkzeugschneide nicht sichergestellt.
- Die endliche Breite des Werkzeuges muss Teil des Riefenmodells sein. Bei Geschossen führt die Zyklizität der Umfangsfläche dagegen zu einer periodischen Riefenstruktur.
- Während die Riefen auf Geschossen als unendlich lang modelliert werden können, muss ein Riefenmodell für Werkzeugspuren eine endliche Länge der Riefen beschreiben können. Da bei Spuren auf Geschossen außerhalb des eigentlichen Riefenbereichs keine Individualspuren erwartet werden können, werden die Bilder häufig so aufgenommen, dass sich die Riefen von einem Bildrand bis zum anderen Bildrand erstrecken. Demgegenüber sind bei Werkzeugspuren neben den Riefenspuren meist noch Eindruckspuren als weitere Individualspuren auf derselben Aufnahme vorhanden.
- Selbst wenn die Riefenstruktur das Bild vollständig ausfüllt, ist die Annahme unendlich langer Riefen mit konstantem Profil häufig nicht zulässig: Bei Werkzeugspuren, die durch ein Werkzeug mit linearer Schneide wie z. B. Schraubendrehern verursacht sind, kann durch Verkippung der Schneide senkrecht zur Schneidenrichtung das Profil signifikant geändert werden.

Das im Folgenden dargestellte Riefenmodell lehnt sich nahe an den mechanischen Prozess der Spurenentstehung durch ein Werkzeug mit linearer Schneide an. Dabei bewegt sich eine starre Schneide mit dem Profil $r(\varrho)$ auf einer Trajektorie $\mathbf{m}(l)$ auf der Oberfläche des Spurenträgers. Die Länge der Spur ist im Definitionsbereich des Kurvenparameters l enthalten. Der Kurvenparameter kann, muss aber nicht der Bogenlänge entsprechen. Die endliche Breite des Werkzeuges wird durch den Träger des Riefenprofils modelliert:

$$r(\varrho) = 0 \quad \text{für} \quad \varrho \notin [\varrho_{\min}; \varrho_{\max}] , \quad \varrho_{\max} - \varrho_{\min} = b . \quad (2.5)$$

Damit erhält man allgemein die Riefentextur $t(\mathbf{x})$ des Riefenbereichs \mathcal{T} aus dem Zusammenhang

$$t(\mathbf{x}) = \begin{cases} r \left(\left(\mathbf{x} - \mathbf{m}(l(\mathbf{x})) \right)^{\text{T}} \cdot \mathbf{e}_{\varrho}(l(\mathbf{x})) \right) , & \mathbf{x} \in \mathcal{T} , \\ 0 , & \text{sonst} , \end{cases} \quad (2.6)$$

wobei $\mathbf{e}_{\varrho}(l) = (\cos \psi(l), \sin \psi(l))^{\text{T}}$ den Einheitsvektor in Schneidenrichtung und $\psi(l)$ den Richtungswinkel der Schneide bezeichnen.

Hierbei ist $l(\mathbf{x})$ derjenige Wert des Kurvenparameters, der zur Überdeckung des Punktes \mathbf{x} führt. Die Bestimmung dieses Wertes ist nur dann eindeutig möglich, wenn keine Riefenüberdeckungen auftreten, d. h. wenn die Schneide höchstens einmal den Ort \mathbf{x} der Werkstückoberfläche berührt hat. Ansonsten ist die Zuordnungsvorschrift Gl. (2.6) nicht eindeutig.

Bild 2.2 skizziert eine diesem Modell entsprechende Spur. Dabei ist $\{\mathbf{e}_{\xi}(l), \mathbf{e}_{\eta}(l)\}$ ein lokales kartesisches Koordinatensystem, bei dem $\mathbf{e}_{\xi}(l)$ der Tangenteneinheitsvektor der Trajektorie ist:

$$\mathbf{e}_{\xi}(l) = \frac{\frac{d\mathbf{m}(l)}{dl}}{\left| \frac{d\mathbf{m}(l)}{dl} \right|} . \quad (2.7)$$

Als wesentliche Modellparameter stehen somit die Trajektorie $\mathbf{m}(l)$ und der Richtungswinkel $\psi(l)$ der Schneide zur Verfügung. Die Breite der Schneide b ist für das Riefenmodell nicht von entscheidender Bedeutung, da für eine zuverlässige Spurentexturuntersuchung auch Fragmente des Riefenprofils $r(\varrho)$ verwendbar sein müssen.

Wendet man bestimmte Einschränkungen auf diese Modellparameter an, kommt man auf speziellere Riefenmodelle, von denen einige in Bild 2.3 abgebildet sind. Der allgemeine Zusammenhang aus Gl. (2.6) kann dadurch vereinfacht werden. So

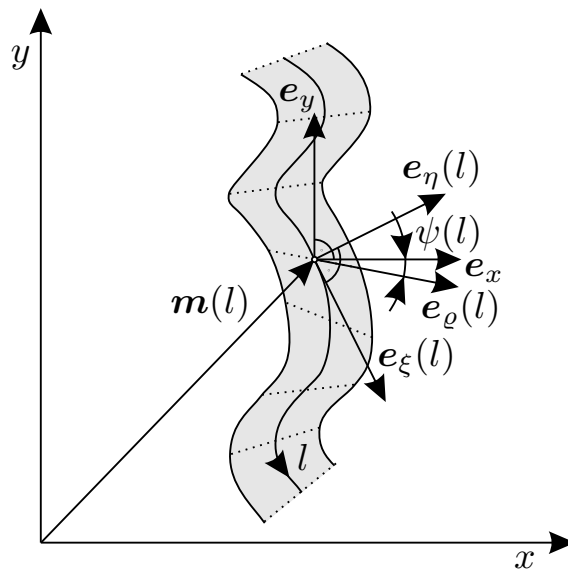


Bild 2.2: Allgemeines Riefenmodell für Werkzeugspuren.

gilt z. B. für den Fall kreisbogenförmiger Riefen, wenn der Koordinatenursprung in den Mittelpunkt der Kreisbahn gelegt wird und R den Radius der Trajektorie bezeichnet, siehe Bild 2.3(c),

$$\mathbf{m}(l) = R \cdot \mathbf{e}_\eta(l) = R \cdot \mathbf{e}_\rho(l) , \quad (2.8)$$

$$\mathbf{e}_\eta(l) = \frac{\mathbf{x}(l)}{|\mathbf{x}(l)|} \quad (2.9)$$

und damit

$$t(\mathbf{x}) = \begin{cases} r(\mathbf{x}^T \cdot \mathbf{e}_\eta(l) - R) = r(\sqrt{x^2 + y^2} - R) , & \mathbf{x} \in \mathcal{T} , \\ 0 , & \text{sonst} . \end{cases} \quad (2.10)$$

Solche Vereinfachungen lassen sich für sämtliche Fälle von Bild 2.3 finden. Die dabei auftretenden Gleichungen sind allerdings nicht auf andere spezielle Riefenmodelle übertragbar. Für jeden Modellmechanismus eine individuelle Methode zur Erkennung des Riefenverlaufs zu entwickeln, scheint daher im Hinblick auf die gewünschte Generalisierbarkeit des Verfahrens ein wenig geeigneter Ansatz zu sein.

Untersuchungen an zahlreichen Testspuren haben ergeben, dass die Annahme einer reinen Translation der Werkzeugschneide in den meisten Fällen zulässig ist [Hei01a]. Aufgrund der fehlenden mechanischen Führung des Werkzeuges tritt zusätzlich zur Translation zwar stets eine Rotation der Schneide auf, diese ist aber meist so gering, dass die Verdrehung nur zu einer unwesentlichen Stauchung des Riefenprofils $r(\varrho)$ führt und somit vernachlässigt werden kann. Das modifizierte

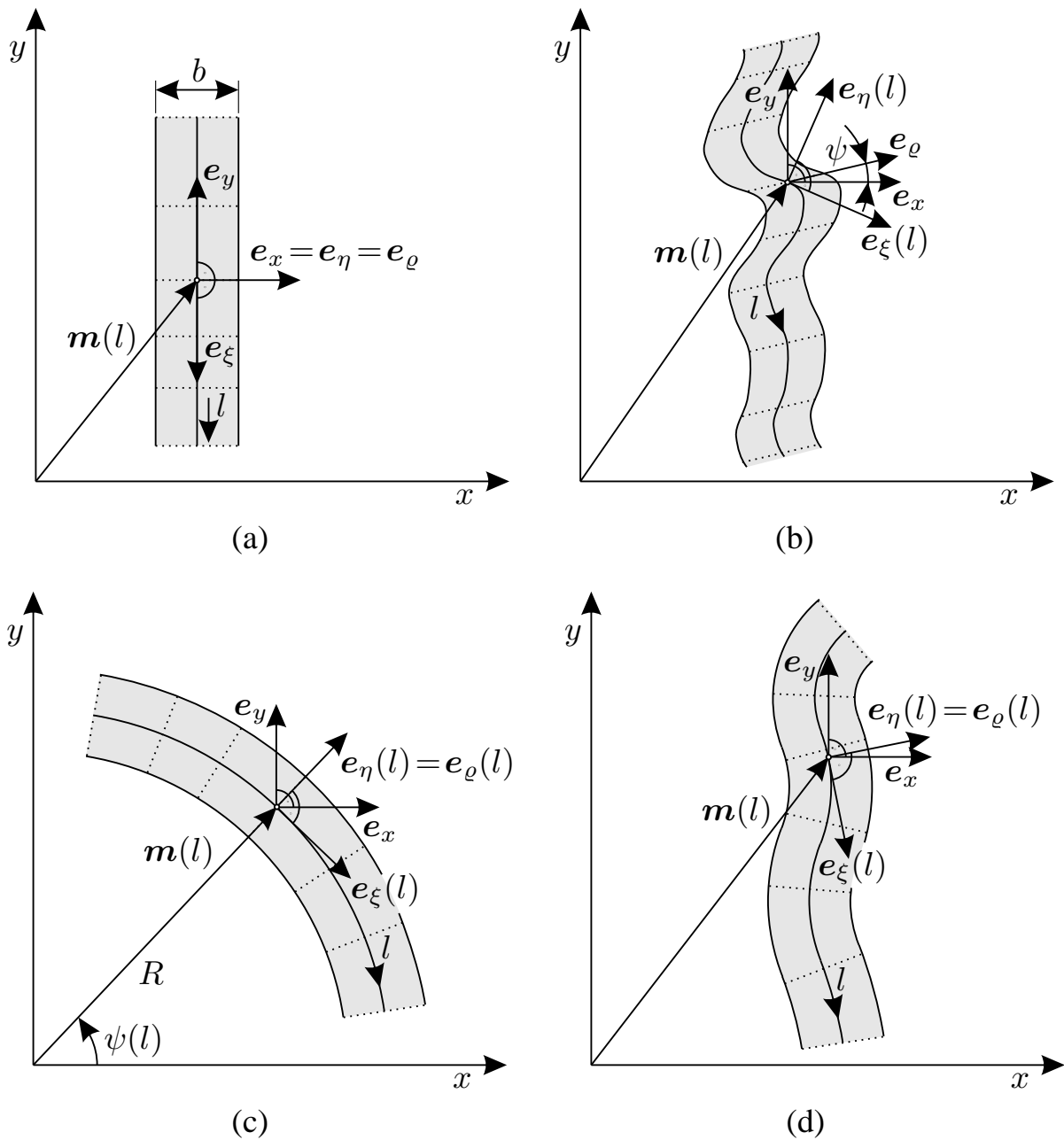


Bild 2.3: Riefenmodelle: (a) Gerade Riefen; (b) Reine Translation der Schneide; (c) Kreisbogenförmige Riefen; (d) Stückweise kreisbogenförmige Riefen.

Riefenprofil lässt sich dann mit

$$\mathbf{e}_\rho = (\cos \psi, \sin \psi)^T \quad (2.11)$$

in folgender Weise beschreiben, siehe Bild 2.3(b):

$$t(\mathbf{x}) = \begin{cases} r \left((\mathbf{x} - \mathbf{m}(l))^T \cdot \mathbf{e}_\rho \right), & \mathbf{x} \in \mathcal{T}, \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (2.12)$$

3 Datenakquisition

3.1 Messtechnische Erfassung von Riefenspuren

Die rechnergestützte Auswertung von Spuren setzt auf Daten auf, die das Oberflächenprofil des Spurenträgers wiedergeben. Für die Datenerfassung kommen zwei grundsätzlich unterschiedliche Ansätze in Frage:

3.1.1 Profildaten

Zur Gewinnung von Profildaten werden Verfahren verwendet, die direkt die Höhenkoordinate des Spurenträgers als $2\frac{1}{2}$ D-Informationen¹ aufnehmen. Die klassischen mechanischen Messverfahren tasten die Oberfläche punktweise mit Hilfe von Tastschnittsensoren ab. Außer dem störenden Einfluss des Tastnadel-Radius auf das gemessene Profil besitzen diese den entscheidenden Nachteil, dass die zweidimensionale Erfassung von Profildaten eine inakzeptabel hohe Messzeit erfordert.

Auf dem Gebiet optischer Topografie-Messverfahren sind Messmethoden verfügbar, die berührungslos Profildaten mit hoher räumlicher Auflösung bei akzeptabler Erfassungszeit bestimmen [Bod00, Koc98, Neu02, Tiz99]. Das Grundprinzip sämtlicher Verfahren besteht darin, die Feingestalt der Oberfläche mit Hilfe einer oder mehrerer Mikroskopoptiken durch Auswertung des an der Oberfläche reflektierten Lichts zu bestimmen. Die wesentlichen Eigenschaften der Verfahren sind in Tab. 3.1 zusammengefasst.

Mikroskopische Streifenprojektion: Verfahren der Streifenprojektion nutzen den Effekt, dass ein Strahl, der schräg zur optischen Achse des Messsystems auf ein Objekt projiziert wird, proportional zum Abstand von der Kamera lateral ausgelenkt erscheint, siehe Bild 3.1. Es handelt sich somit um ein triangulatorisches Verfahren, das der geometrischen Optik zugeordnet ist. Durch Projektion zahlreicher paralleler Lichtschnitte sowie durch Codierung des projizierten Lichtmusters

¹Die Bezeichnung $2\frac{1}{2}$ D spiegelt die Tatsache wider, dass die Oberfläche als Gitternetz mit genau einem Höhenwert je Gitterpunkt modelliert wird. Im Gegensatz zu einer echten dreidimensionalen Darstellung lassen sich dadurch z. B. Hinterschneidungen nicht beschreiben.

Tabelle 3.1: Eigenschaften optischer Topografie-Messverfahren.

	Streifen- projektion	Weißlicht- Interferometrie	Konfokale Mikroskopie
Laterales Messfeld	beliebig	$< 100 \times 100 \text{ mm}^2$	$< 1,6 \times 1,6 \text{ mm}^2$
Vertikaler Messbereich	beliebig	$< 100 \mu\text{m}$	$< 10 \text{ mm}$
Laterale Auflösung	$> 1,6 \mu\text{m}$	$> 0,6 \mu\text{m}$	$> 0,25 \mu\text{m}$
Vertikale Auflösung	$> 0,2 \mu\text{m}$	$> 0,1 \text{ nm}$	$> 5 \text{ nm}$
Eignung für steile Flanken	–	++	+

kann die erforderliche Messzeit im Vergleich zu einfachen Lichtschnittverfahren drastisch reduziert werden.

Die erzielbare vertikale Auflösung kann mit Hilfe einer effektiven Wellenlänge λ_{eff} bestimmt werden [Fra93]. Dabei wird der Begriff der Wellenlänge λ in Analogie zur interferometrischen Auswertung, bei der ein beobachteter Streifenabstand s einer Weglängendifferenz von λ zugeordnet werden kann, auf die geometrische Anordnung der Streifenprojektion übertragen. Mit der Gitterweite der projizierten Streifen g und dem Projektionswinkel θ gilt der Zusammenhang

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{2s}{\tan \theta} = \frac{2g}{\sin \theta}. \quad (3.1)$$

Durch geeignete Wahl der Gitterkonstanten und des Projektionswinkels lassen sich unterschiedliche Messanforderungen erfüllen. Verfahren der Mikrostrukturtechnik ermöglichen Beleuchtungsquellen zur Erzeugung mikroskopisch kleiner Lichtmuster, die zur Erfassung feiner Strukturen erforderlich sind. Allerdings lässt sich gerade bei stark zerklüfteten Oberflächen der Projektionswinkel nicht beliebig verändern. Damit keine Fehlstellen durch Abschattung auftreten, darf der Projektionswinkel nicht flacher als die steilste Stelle der Oberfläche gewählt werden.

Das dargestellte Prinzip der Streifenprojektion kann in unterschiedlicher Weise ausgewertet werden. Beim Phasenschiebe-Verfahren wird ein Gitter mit konstanter Weite g und veränderlicher Phase verwendet. Durch Erfassung mehrerer Aufnahmen können Störeinflüsse wie örtliche Variation der Oberflächenreflektivität ausgeglichen werden. Damit lassen sich vertikale Auflösungen von bis zu $\frac{1}{100}$

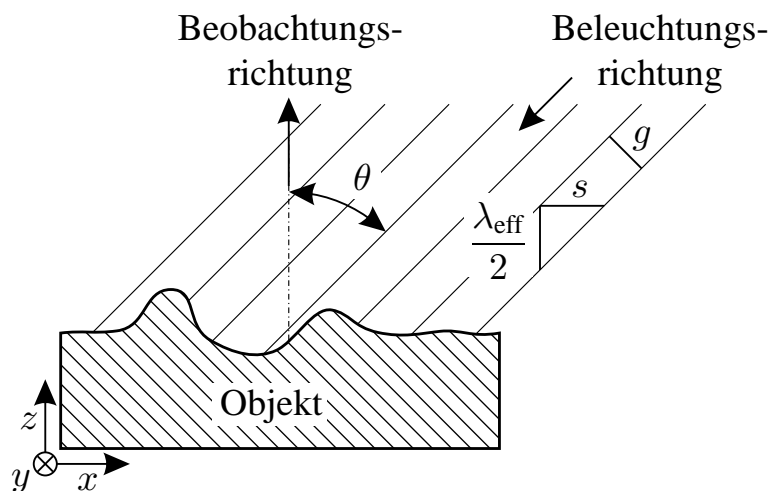


Bild 3.1: Messprinzip der mikroskopischen Streifenprojektion.

der effektiven Wellenlänge λ_{eff} erzielen [Fra93]. Ein prinzipbedingter Nachteil von Phasenschiebe-Verfahren ist die Mehrdeutigkeit der Phaseninformation, da die Höheninformation in der Phase modulo 2π enthalten ist.

Andere Ansätze verwenden eine Gray-Codierung, bei der die Gitterweite aufeinander folgender Streifenprojektionen jeweils halbiert wird. Die Phasenlage wird dabei so gewählt, dass die Hell-Dunkel-Grenzen der Streifen nie übereinander liegen. Vorteilhaft an dieser Methode ist ihre Robustheit, da die aufgenommenen Bilder binarisiert ausgewertet werden können. Entsprechend der geforderten lateralen Auflösung lässt sich die Bilderfassung auf eine geringe Anzahl von Bildern reduzieren. Von Vorteil ist die im Vergleich zum Phasenschiebe-Verfahren eindeutige Höheninformation, was die Untersuchung von rauen und zerklüfteten Oberflächen vereinfacht.

Weißlicht-Interferometrie: Die Weißlicht-Interferometrie, auch als *Kohärenz-Radar* bezeichnet, beruht auf der Interferenz zwischen einem Objekt- und einem Referenzstrahl [Dre92]. Kennzeichnend für dieses Verfahren ist der Einsatz einer Lichtquelle mit sehr kurzer Kohärenzlänge Δl_c . Die Kohärenzlänge gibt an, wie groß der Weglängenunterschied zwischen Objekt- und Referenzstrahl sein darf, damit die Sichtbarkeit

$$V = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}} \quad (3.2)$$

der Interferenzstreifen nicht kleiner als $\frac{1}{e}$ wird [Hec01, Neu02]. Dabei bezeichnen I_{max} und I_{min} die aufgrund von Interferenz der Teilstrahlen gemessene maximale bzw. minimale Intensität. Die geringe Kohärenzlänge von Halogenlicht mit ca.

$1,5 - 3 \mu\text{m}$ sorgt dafür, dass die Sichtbarkeit V ein scharf ausgeprägtes Maximum bei gleicher Weglänge der beiden Teilstrahlen aufweist. Im Gegensatz zu Interferometern, die mit Licht großer Kohärenzlänge arbeiten, so dass die Sichtbarkeit V über eine große Weglängendifferenz der Teilstrahlen groß bleibt, lässt sich dieses Maximum zur eindeutigen Bestimmung der absoluten Höhe eines Objektpunktes nutzen. Dazu wird die zu untersuchende Oberfläche vertikal in Richtung der optischen Achse verschoben und für jeden Objektpunkt die Position maximaler Sichtbarkeit als Höhenkoordinate registriert.

Durch Ausnutzung der Wellennatur des Lichts erreicht dieses Messverfahren eine sehr hohe Auflösung in vertikaler Richtung von ca. $0,1 \text{ nm}$, was Bruchteilen der Wellenlänge des verwendeten Lichts entspricht [Neu02]. Durch die geringe numerische Apertur des Messaufbaus von ca. $\frac{1}{80}$ gelingt die detailgetreue Abbildung selbst steiler Flanken [Dre92].

In lateraler Richtung ist die erreichbare Auflösung im Wesentlichen von der Anzahl der Messpunkte im Messfeld abhängig. Prinzipiell sind Auflösungen von bis zu ca. $0,6 \mu\text{m}$ möglich. Eine extrem detailgetreue Erfassung größerer Spurenbereiche ist daher möglich. Dabei sind u. U. mehrere Aufnahmen erforderlich, die dann zu einem Profil der gesamten Spur zusammengefügt werden müssen.

Für die Erfassung von zylindrischen Objekten, wie sie z. B. an der Umfangsfläche von Projektilen auftreten, kann die Erfassungszeit durch eine spezielle Aufnahmetechnik, welche die vertikale Objektbewegung durch eine Rotation ersetzt, erheblich gesenkt werden [Res03]. Als Nebeneffekt entfällt hier die Notwendigkeit zur Erfassung überlappender Aufnahmen und deren Kombination.

Konfokale Mikroskopie: Dieses Verfahren, das auch als *Confocal Scanning Light Microscope* (CSLM) bezeichnet wird, ermittelt ähnlich wie Autofokus-Sensoren punktweise die Position der optimalen Fokussierung. Dazu wird als Messeffekt das Auftreten eines Maximums der Bestrahlungsstärke ausgewertet, die eine fokussierte Punktlichtquelle auf der Oberfläche erzielt [Kag02, Neu02, Rus99, Tiz99, Weg02, Whi94].

Das Messverfahren erzielt Auflösungen von typischen $5 - 25 \text{ nm}$ in vertikaler Richtung und $0,25 \mu\text{m}$ in lateraler Richtung. Je nach Messanordnung können Objekte bis zu einigen Quadratmillimetern in einem Durchgang erfasst werden. Vorteilhaft bei diesem Verfahren ist die Eigenschaft, dass auch an steilen Flanken noch sinnvolle Messwerte erhalten werden [Jor00].

3.1.2 Schattenmodulation

Ein grundsätzlich anderer Ansatz beruht auf der lichtmikroskopischen Erfassung von Spuren, bei der die Oberflächenstruktur durch unterschiedliche Ausleuchtung verschieden geneigter Oberflächenelemente in ein Grauwertbild umgesetzt wird. Mit üblichen Makroskopen und Digitalkameras können problemlos Auflösungen in der Größenordnung von $1\ \mu\text{m}$ erzielt werden, so dass Grauwertbilder den oben erwähnten Verfahren zur Gewinnung von Profildaten bezüglich des Auflösungsvermögens kaum nachstehen.

Obwohl aus den Grauwertbildern nicht eindeutig auf das zu Grunde liegende Höhenprofil zurück geschlossen werden kann, weist diese auch als *Schattenmodulation* bezeichnete Art der Datenerfassung praktische Vorteile auf:

- Da die lichtmakroskopische Aufnahme dasselbe Aussehen der Spur liefert, das ein Experte beim Blick durch das Makroskop erhält, ist die Interpretierbarkeit von Grauwertbildern implizit gegeben. So kann z. B. ein dunkler Bereich direkt als Schatten und damit als Vertiefung identifiziert werden.
- Durch unterschiedliche Beleuchtungskonstellationen können bestimmte Details der Spur gezielt verstärkt oder unterdrückt werden. Bereits während der Datenerfassung stehen somit Freiheitsgrade zur Verfügung, welche die spätere Spurenauswertung erleichtern können. Durch Aufnahme und Fusion von Bildserien mit variiertem Beleuchtung lassen sich aussagekräftige Strukturen hervorheben, die weder in Profildaten noch in einem Grauwertbild mit einer einzigen Beleuchtung hinreichend gut wiedergegeben werden.
- Die Erfassung von Grauwertbildern benötigt in der Regel einen deutlich geringeren Zeitaufwand gegenüber der Gewinnung von Profildaten. Obwohl bei einigen Topografie-Messverfahren erhebliche Fortschritte bei der Beschleunigung der Datenerfassung gemacht worden sind, wird dort üblicherweise ein Zeitraum in der Größenordnung von einigen Sekunden benötigt. Demgegenüber kann die Aufnahme von Grauwertbildern mit dem vollen Videotakt der Kamera erfolgen, so dass selbst die Erfassung von Bildserien nur Bruchteile von Sekunden in Anspruch nimmt, sofern eine synchronisierbare rechnergestützte Beleuchtung mit geringer zeitlicher Trägheit wie z. B. LEDs eingesetzt wird.

Eine allgemein gültige Aussage darüber, ob Profil- oder Grauwertdaten zur Spurenauswertung besser geeignet sind, kann auf der Grundlage des momentanen Entwicklungsstands der Verfahren sicher nicht getroffen werden. Sowohl Profildaten als auch schattenmodulierte Grauwertbilder enthalten bei sorgfältiger Auswahl des

Messverfahrens, der Aufnahmekonstellation und der Signalaufbereitung diejenigen Strukturen in hinreichender Auflösung, die zur Identifikation von Spuren erforderlich sind. Aus diesem Grund ist die Frage, welche der beiden Datenarten zur Spurenauswertung verwendet werden soll, nur insofern von Bedeutung, als Profildaten und Grauwertbilder sinnvollerweise nur mit Daten desselben Typs verglichen werden sollten. Prinzipiell besteht zwar die Möglichkeit, aus Profildaten mit einer simulierten Beleuchtung Grauwertbilder synthetisch zu erzeugen; damit wird jedoch der wichtige Vorteil kurzer Erfassungszeiten von Grauwertbildern nicht genutzt.

3.1.3 Abformungen

Bei der Sicherstellung von Spuren stößt man zunächst auf die folgenden beiden Probleme:

- Der Spurenlräger kann oft nicht selbst im Labor aufgenommen werden. Die GröÙe des Objekts (z. B. Türzarge), seine implizite Zerstörung sowie die praktische Handhabbarkeit und Zugänglichkeit verbieten diese Vorgehensweise.
- Reproduzierbare Oberflächeneigenschaften sind von größter Bedeutung für den Vergleich von Spuren auf unterschiedlichen Werkstoffen. Das Reflexionsvermögen des Trägermaterials und eine eventuelle Volumenstreuung spielen hier eine wichtige Rolle. Die Konstanz der Oberflächeneigenschaften ist über die zu erfassende Fläche nicht immer gegeben, wenn z. B. die Spur bei lackierten Oberflächen durch die Farb- oder Decklackschicht bis auf eine andersartige Farbschicht oder das Trägermaterial reicht.

Aus diesen Gründen ist für die Spurenauswertung die Gewinnung von Abformungen mittels eines plastischen, aushärtenden Materials üblich. Das Abformmaterial muss — speziell für die erwünschte automatische Erfassung von Aufnahmen — folgende Eigenschaften aufweisen:

- Eine helle Oberfläche des Abformmaterials ist im Hinblick auf kleine Blendenöffnungen (gute Schärfentiefe, siehe Abschnitt 3.2), kurze Belichtungszeiten und niedrige Verstärkungen (geringes Rauschen) in der Signalverarbeitung erwünscht. Aufgrund des subjektiv höheren Kontrastes bei der visuellen Untersuchung wird in der Praxis bisher meist ein dunkelbraunes Material bevorzugt. Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Aufnahmen wurden jedoch mit einem hellgrauen Material durchweg bessere Ergebnisse erzielt.

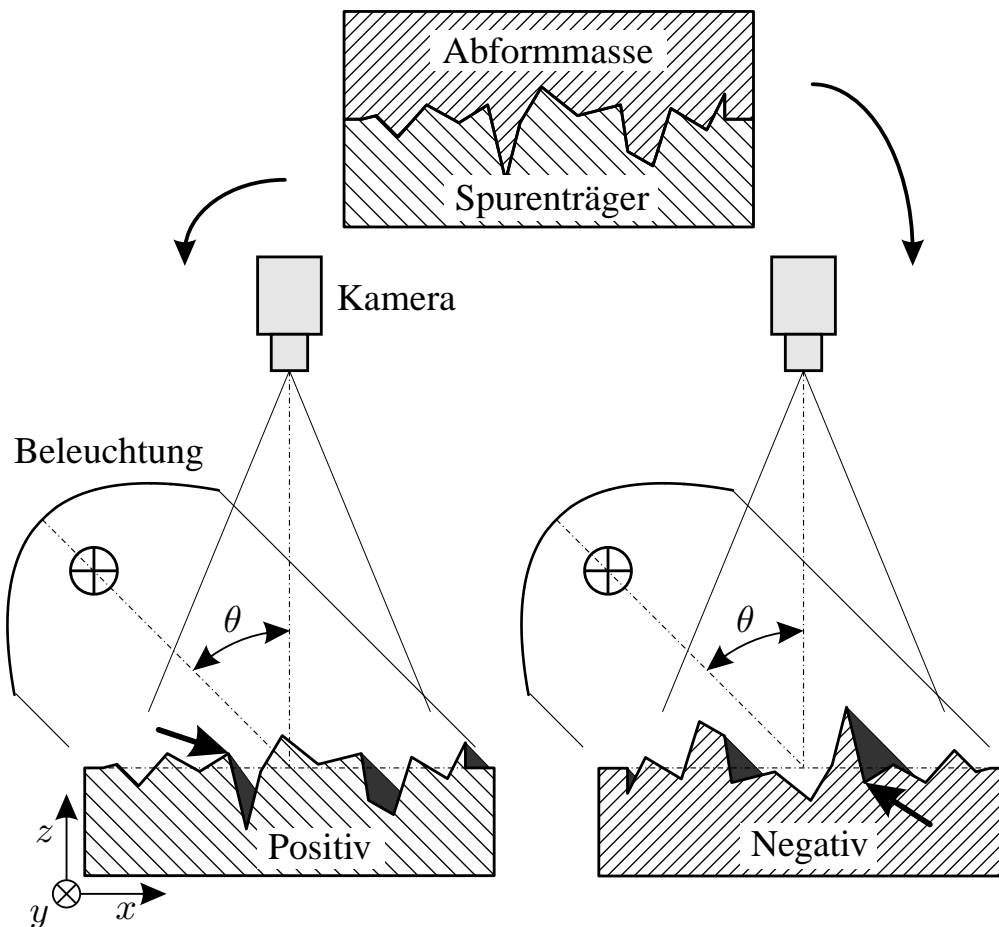


Bild 3.2: Vergleich Original — Abformung.

- Für die Erzielung hoher Kontraste muss eine Volumenstreuung im Abformmaterial verhindert werden. Wird Licht nicht nur vom Oberflächenrelief, sondern auch von tieferliegenden Schichten reflektiert, beeinträchtigt dies das erzielbare Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Hier muss die Zusammensetzung des Abformmaterials betrachtet werden: Die Grundlage des Materials bildet meist ein transparentes Medium (in der Regel auf Silikonbasis), dem Farbpartikel zugesetzt sind. Bei der Anmischung des Abformmaterials ist daher darauf zu achten, dass genügend Farbpartikel in der Abformmasse vorhanden sind.
- Darüber hinaus gelten die üblichen Anforderung an das Abformmaterial hinsichtlich Detailtreue, Dauerhaltbarkeit, Formstabilität etc. der ausgehärteten Abformungen, die auch bei einer visuellen Auswertung erfüllt sein müssen [Kat96].

In Bezug auf die Vergleichbarkeit des Oberflächenprofils von Abformungen und Originalspuren bleibt die Struktur des Originals — bei Einhaltung der oben ge-

nannten Anforderungen und bei sorgfältiger Verarbeitung des Abformmaterials — lokal im Wesentlichen erhalten, siehe Bild 3.2. Bei größeren Objektbereichen besteht allerdings die Gefahr, dass durch Deformation der ausgehärteten Abformung Krümmungen auftreten. Diese Verformungen verursachen dann laterale Dehnungen bzw. Stauchungen der abgeformten Struktur.

In Gestalt der Abformung liegt nun ein *Negativ* des Originals vor. Zwar kann durch Anwendung einer sog. gegensätzlichen Beleuchtung bei der Abformung im Vergleich zum Original eine ähnliche Beleuchtungssituation erzielt werden. Diese Beleuchtung ist charakterisiert durch Beibehalten des Azimuts φ und des Elevationswinkels θ , wenn die Abformung um 180° um die y -Achse gedreht wird, siehe Bild 3.2.

Diese Ähnlichkeit gilt jedoch nur qualitativ und nicht für abgeschattete Bereiche. Mit einer zugunsten hoher Kontraste häufig gewählten flachen Beleuchtung (großer Elevationswinkel θ) können Schlagschatten auftreten, siehe Abschnitt 3.1.4. In Bild 3.2 ist als Beispiel eine entsprechende Erhöhung bzw. Vertiefung mit Pfeilen markiert, die im Original als Kante erfasst wird, jedoch in der Abformung vollständig im Schatten liegt und damit der weiteren Auswertung nicht mehr zugänglich ist. Aus diesem Grund ist es in der Regel nicht sinnvoll, beim Spurenvergleich Abformungen und Originale gemischt zu verwenden.

3.1.4 Beleuchtung von Riefenspuren

Für die Bildqualität und die Reproduzierbarkeit einer Aufnahmesituation kommt der Beleuchtung große Bedeutung zu. Sie spielt außerdem eine wichtige Rolle bei der Entstehung von unerwünschten Inhomogenitäten [Bey94, Pue97], siehe Abschnitt 4.1.

Die Einflüsse der Objekteigenschaften und der Beleuchtung auf die von der Kamera wahrgenommene Helligkeit des Objekts sind vielfältig. Zu ihrer eingehenden Beschreibung kann z. B. die bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktion (BRDF) verwendet werden [Hor89]. Dabei sind das Oberflächenprofil sowie die lokale Reflektanz von größter Bedeutung. Im Gegensatz zu Oberflächen mit ortsabhängigen Reflektanzeigenschaften (z. B. lackierte Metalle mit Kratzern bis ins Metall; Metalloberflächen, die Korrosion aufweisen) liegt bei abgeformten Spuren ein weitgehend gleichartiges Material vor. Hier kann eine konstante Reflektanz über das Beobachtungsgebiet angenommen werden.

Prinzipiell ist die Beleuchtung von Werkzeugspuren sowohl mit diffusem als auch mit gerichtetem Licht denkbar. Mit diffusem Licht gelingen sehr gleichmäßige Beleuchtungsbedingungen, bei denen alle Objektbereiche ausreichend beleuchtet

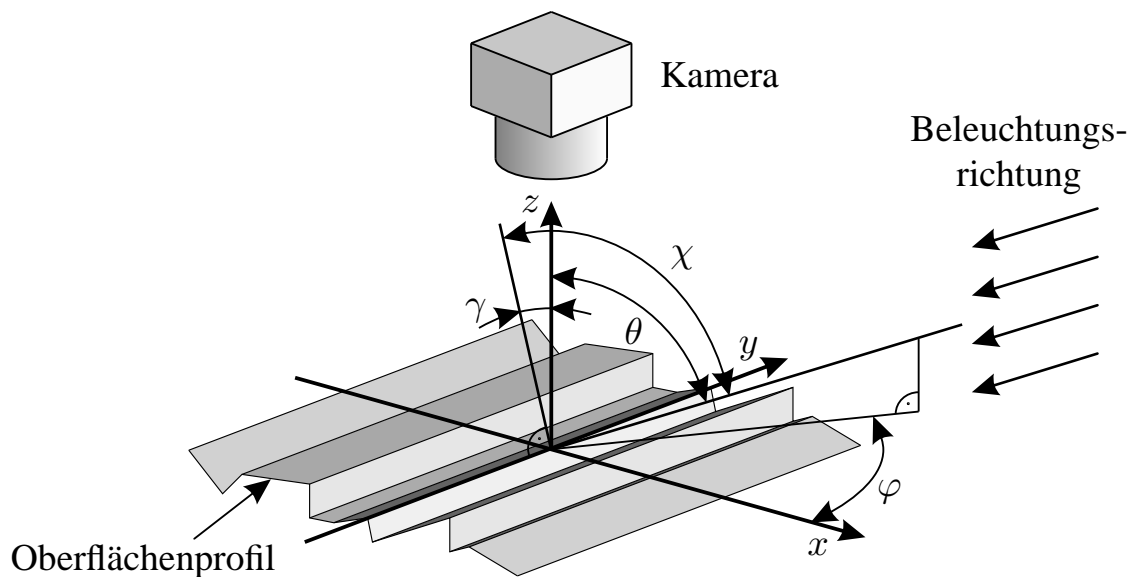


Bild 3.3: Prinzipielle Beleuchtungsgeometrie.

sind. Allerdings geht diese Gleichmäßigkeit zu Lasten des Kontrastes, da Schattenwürfe an geneigten Flächenelementen ausgeglichen werden.

Die Beleuchtung mit gerichtetem Licht bietet demgegenüber hohen Kontrast, so dass die Struktur des Oberflächenprofils mit einem hohen Signal-zu-Rausch-Verhältnis sichtbar wird [Hei01c]. Maximaler Kontrast wird offensichtlich erhalten, wenn der Beleuchtungsvektor senkrecht zur Riefenrichtung ist, d. h. $\varphi = 0^\circ$. Eine gerichtete Beleuchtung verbessert die Erkennbarkeit feiner Riefen, die bei diffuser Beleuchtung nicht erkennbar sind. Andererseits kann eine solche Beleuchtung bei ungünstiger Ausrichtung der Spur zu einer stärkeren Betonung von Störungen der Textur (z. B. von Kratzern quer zu Riefen) und zu unerwünschten Abschattungen führen.

Die geometrischen Zusammenhänge bei der Beleuchtung mit gerichtetem Licht sollen nun näher betrachtet werden [Sch02]. Die reflektierte Strahlungsdichte L_e der Objektoberfläche in Richtung der Kamera ist eine Funktion des lokalen Oberflächenprofils, der Objektposition und der Beleuchtung:

$$L_e(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}^T, \mathcal{U}(\mathbf{x})^T, \boldsymbol{\omega}^T), \quad (3.3)$$

$$\boldsymbol{\omega} = (E_e, \varphi, \theta, \zeta, \boldsymbol{\alpha}^T, \dots)^T \quad (3.4)$$

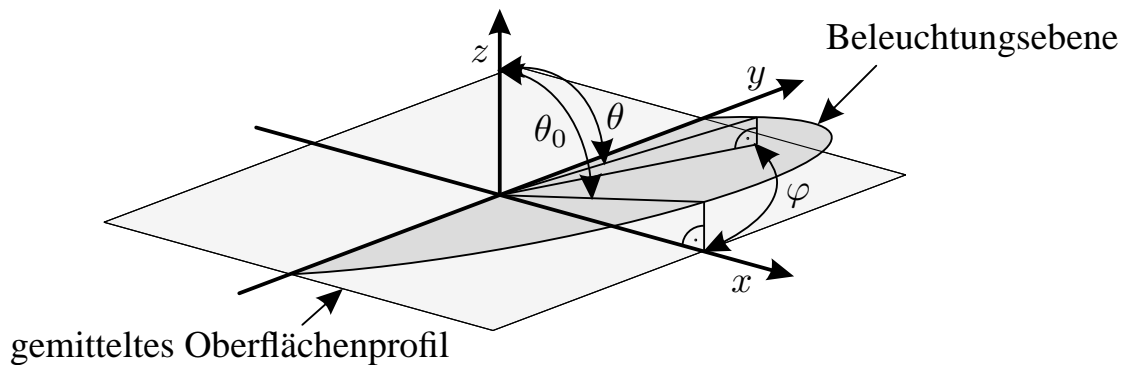


Bild 3.4: Ebenen ähnlicher Beleuchtung.

mit

- $\mathcal{U}(\mathbf{x})$: Umgebung des Ortes \mathbf{x} ,
- $\boldsymbol{\omega}$: Parametervektor der Bilderfassung,
- E_e : Bestrahlungsstärke,
- φ : Azimut der Beleuchtungsrichtung,
- θ : Elevationswinkel der Beleuchtungsrichtung,
- ζ : Objektabstand und
- $\boldsymbol{\alpha}$: relative Kameraposition.

Das Licht einer weit entfernten Punktlichtquelle fällt näherungsweise parallel mit dem Elevationswinkel θ zur optischen Achse und dem Azimut φ zur Normalen der Riefenrichtung ein, siehe Bild 3.3. Im Folgenden wird angenommen, dass die Riefen im betrachteten Bildausschnitt parallel und geradlinig verlaufen.

Als *Beleuchtungsebene* wird nun eine Ebene definiert, in der die y -Achse liegt und die mit der gemittelten Oberflächennormalen den Winkel θ_0 einschließt, siehe Bild 3.4. Die Beleuchtungswinkel aller Lichtquellen, bei denen der Beleuchtungsvektor in einer Beleuchtungsebene liegt und auf den Ursprung zeigt, erfüllen die Bedingung

$$\tan \theta \cdot \cos \varphi = \tan \theta_0 , \quad (3.5)$$

wobei θ_0 den Elevationswinkel bei $\varphi = 0^\circ$ darstellt. Ein Flächenelement dA , das parallel zur x,y -Ebene liegt, wird mit dem Strahlungsfluss

$$\Phi_e = E_e \cdot dA \cdot \cos \theta \quad (3.6)$$

beleuchtet. Ein Flächenelement, dessen Normale in der x,z -Ebene liegt und das um den Winkel γ gegen die z -Achse geneigt ist, empfängt den Strahlungsfluss

$$\Phi_{e,\chi} = E_e \cdot dA \cdot \cos \chi , \quad (3.7)$$

wobei χ der Winkel zwischen der Normalen des geneigten Flächenelements und dem Beleuchtungsvektor ist. Man kann zeigen, dass bei konstant gehaltener Bestrahlungsstärke E_e das Verhältnis der Strahlungsflüsse auf zwei beliebig geneigte Flächen konstant ist, sofern die Normalen dieser Flächen in der x, z -Ebene liegen:

$$\frac{\Phi_{e,\chi 1}}{\Phi_{e,\chi 2}} = f(\theta_0) . \quad (3.8)$$

Unterschiedliche Beleuchtungswinkel auf einer Beleuchtungsebene führen also zwar zu absolut unterschiedlichen Strahlungsflüssen, aber zu gleichen Verhältnissen der Strahlungsflüsse benachbarter Oberflächenelemente zueinander.

Nimmt man an, dass die Oberfläche des zu untersuchenden Negativs in guter Näherung einem *Lambertschen Strahler* entspricht, so wird die einfallende Strahlung unabhängig vom Einfallswinkel gleichmäßig in alle Richtungen reflektiert. Die reflektierte Strahlungsdichte L_e ist damit unabhängig von der Beobachtungsrichtung [Ger04, Haf03, Kle88, Sch02]. Die Annahme eines Lambertschen Strahlers ist zwar für die meisten Oberflächen nicht zutreffend. Insbesondere metallische Oberflächen zeigen einen starken Anteil spiegelnder Reflexion, was zu einer Richtungsabhängigkeit der reflektierten Strahlungsdichte führt. Dadurch überstrahlen Riefen der Textur bei einer Beleuchtung mit $\varphi = 0^\circ$, d. h. senkrecht zur Riefentextur [Bey94, Pue97]. Abgeformte Spuren weisen jedoch eine gummiartige Oberfläche auf, die in nur unwesentlichem Maße spiegelnde Reflexion zeigt, so dass eine diffuse Reflexion mit guter Näherung angenommen werden kann.

Für diesen Fall ist daher die reflektierte Strahlungsdichte L_e proportional zur einfallenden Bestrahlungsstärke E_e . Somit gilt für zwei beliebig geneigte Ebenen mit Flächennormalen in der x, z -Ebene:

$$\frac{L_{e,\chi 1}}{L_{e,\chi 2}} = \frac{\Phi_{e,\chi 1}}{\Phi_{e,\chi 2}} = f(\theta_0) . \quad (3.9)$$

Verändert man die Position einer zum Ursprung gerichteten Lichtquelle derart, dass der resultierende Beleuchtungsvektor in der Beleuchtungsebene bleibt, so ändert sich zwar der Absolutwert der Strahlungsdichte, das Verhältnis der Strahlungsdichten einzelner Oberflächenelemente zueinander — und damit die Erkennbarkeit solcher Flächen — bleibt jedoch erhalten. Mit dieser Erkenntnis kann die Lichtquelle variiert werden, ohne dass sich — in den Grenzen sinnvoller Belichtungsparameter — an der Aussagekraft des aufgenommenen Bildes eine Änderung ergibt.

Damit steht ein zusätzlicher Parameter zur Verfügung, der genutzt werden kann, um Störungen zu unterdrücken, deren Orientierungen nicht in Riefenrichtung lie-

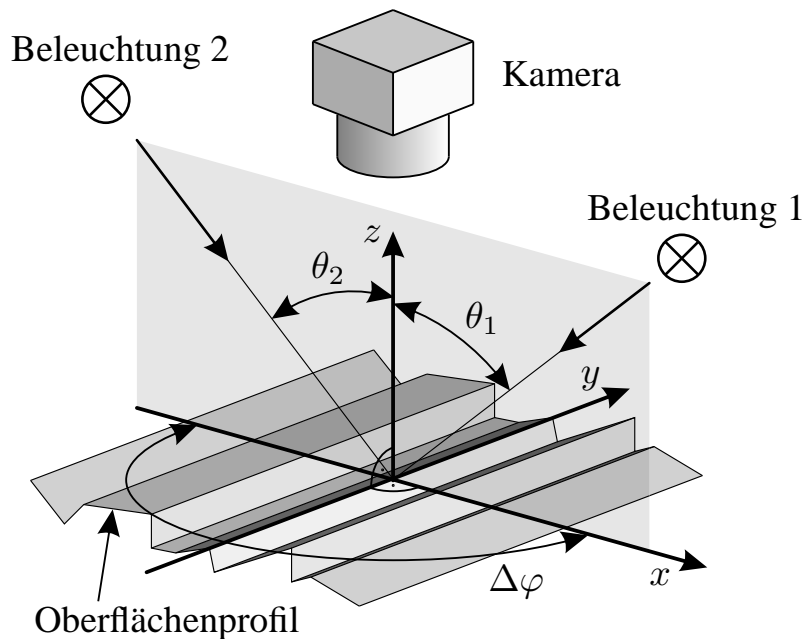


Bild 3.5: Prinzip der gegensätzlichen Beleuchtung von Riefentexturen.

gen. Eine geeignete Variation der Beleuchtung in einer Beleuchtungsebene kann daher zu einer sichtlichen Bildverbesserung führen.

3.1.5 Gegensätzliche Beleuchtung

Da die Orientierung einer Riefenspur in der Regel nicht eindeutig ist, sind zwei Ausrichtungen der Spur möglich, bei denen der Beleuchtungsvektor einer gerichteten Beleuchtung senkrecht zur Riefenrichtung steht. Dabei entstehen unterschiedliche Bilder der Riefen. Jede Spur wird daher zweimal erfasst, wobei mit konstantem Elevationswinkel $\theta_1 = \theta_2$ das Azimut um $\Delta\varphi = 180^\circ$ variiert wird, siehe Bild 3.5. Auf diese Weise entsteht von jeder Spur ein Bildpaar, das zusammen ausgewertet wird.

Bild 3.6 zeigt als Beispiel die Bilderfassung einer Abformung von einer Werkzeugspur. Anhand der Grauwertprofile in Bild 3.6(b) ist qualitativ erkennbar, dass die mit den beiden Beleuchtungsrichtungen erhaltenen Intensitäten im eigentlichen Spurenbereich eine deutliche Symmetrie zu einem lokalen Mittelwert aufweisen.

Diese Eigenschaft ist für die praktische Auswertung von Werkzeugspuren anhand lichtmakroskopischer Aufnahmen von großem Nutzen: Innerhalb einer Spurensammlung können Spurenbilder desselben Werkzeugs vorliegen, die mit unterschiedlichen Beleuchtungsorientierungen aufgenommen worden sind. Da eine näherungsweise Umrechnung der Intensitäten von einer Beleuchtungsrichtung in die

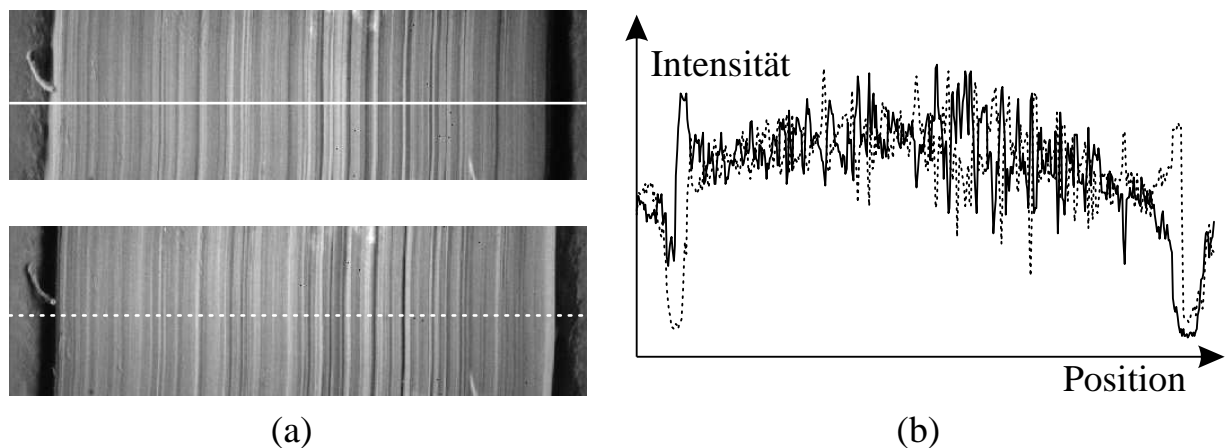


Bild 3.6: Gegenätzliche Beleuchtung einer Abformung: (a) Beleuchtung von rechts (oben) und links (unten); (b) Grauwertprofile bei Beleuchtung von rechts (durchgezogene Linie) bzw. links (Strichlinie) an den in (a) gekennzeichneten Stellen.

andere möglich ist, kann auch in solchen Fällen eine angemessene Spurenauswertung vorgenommen werden. Die Thematik der Auswertung von mit gegensätzlicher Beleuchtung erhaltenen Spurenbildern wird in Abschnitt 6.4.1 vertieft.

3.2 Bildverbesserung durch Fusion von Einzelbildern

Bei der Bilderfassung mittels Makroskop treten im Wesentlichen folgende Schwierigkeiten auf, siehe Bild 3.7:

1. Die Erzielung eines hohen Bildkontrasts erfordert den Einsatz gerichteten Lichts, siehe Abschnitt 3.1.4. Dies kann — insbesondere bei stark zerklüfteten Objekten — zur Abschattung einzelner Oberflächenbereiche führen.
2. Die hohe Vergrößerung des Makroskops — angesichts der feinen Details einer Riefenspur erscheint eine 25– bis 35–fache Vergrößerung angebracht — bedingt eine geringe Schärfentiefe. Die Schärfentiefe Δz kann prinzipiell durch Abblenden, d. h. Verkleinern der numerischen Apertur (NA), wegen $\Delta z \propto \text{NA}^{-2}$ erhöht werden [Pér96]. Allerdings gilt nach Abbe für das erzielbare Auflösungsvermögen $\Delta x \propto \text{NA}^{-1}$ [Hec01] und damit folgt wegen $\Delta x \propto (\Delta z)^{-1/2}$ auch eine Verminderung der lateralen Auflösung. Zudem würde durch Abblenden der vom Makroskop aufgenommene Licht-

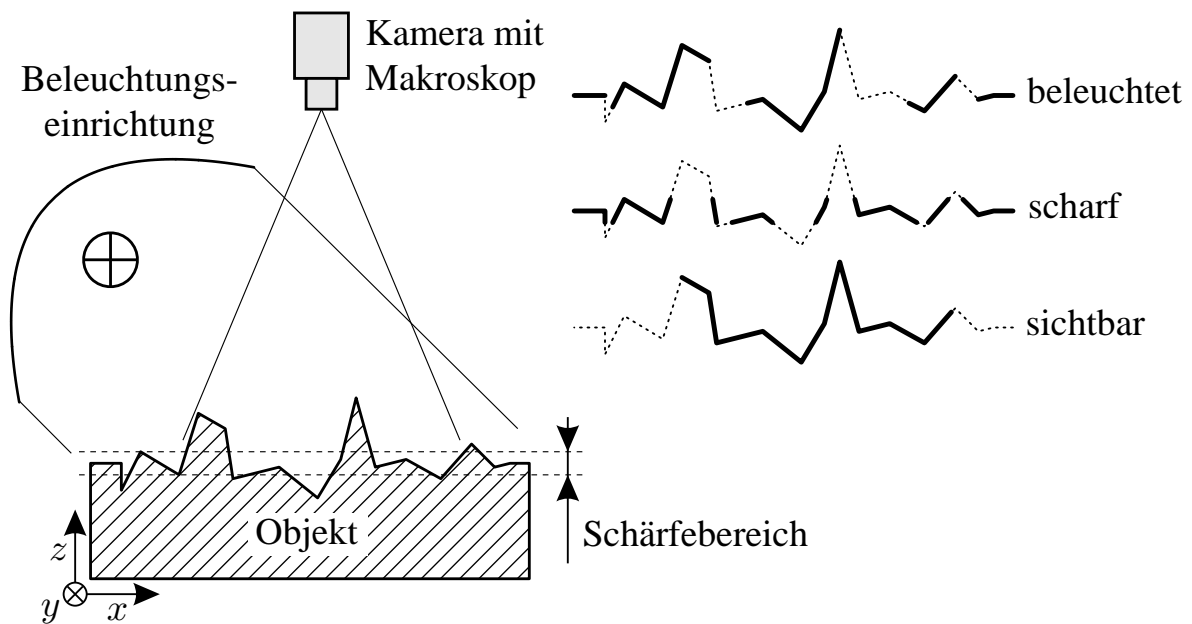


Bild 3.7: Problembereiche der Bilderfassung bei einer einzigen Aufnahme.

strom reduziert, was das Signal-zu-Rausch-Verhältnis der erfassten Bilder verschlechtern würde.

3. Das Gesichtsfeld der Kamera umfasst oft nicht die gesamte relevante Fläche. Einerseits kann aufgrund der Größe der zu erfassenden Spur eine einzige Kameraposition nicht ausreichen; andererseits kann wegen der Gestalt des Objekts u. U. nicht die gesamte Fläche sichtbar sein (z. B. Schließzylinder, Projektile oder stark verformte Objekte). Möglichkeiten zum Zusammenfügen von geeignet aufgenommenen Einzelbildern werden in Abschnitt 3.2.2 vorgestellt.

Die in den Punkten 1 und 2 dargestellten Schwierigkeiten können gelöst werden, indem nicht nur ein einziges Bild, sondern eine ganze Bildserie derselben Szene aufgenommen wird [Cla90, Pue97]. In dieser Serie wird die Aufnahmesituation systematisch derart verändert, dass jedes Detail des Objekts in mindestens einer Aufnahme der Serie in hinreichender Qualität abgebildet ist. Besitzt man ein Kriterium, das die Beurteilung der lokalen Qualität eines Bildes erlaubt, so kann für einen bestimmten Bereich aus der Bildserie das Bild mit der besten Qualität in bezug auf dieses Kriterium bestimmt werden. In einer Art „Patchworking“ kann dann die Bildserie zu einem Ergebnisbild verschmolzen werden.

3.2.1 Fusion von Bildserien

Bei der sog. Sensorfusion können drei Vorgehensweisen unterschieden werden: Die Fusion kann auf der Ebene der Signale (Datenfusion), der Merkmale (Merkmalsfusion) oder auf einer symbolischen Ebene (Entscheidungsfusion) durchgeführt werden. Die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Verfahren führen die Fusion auf der Ebene der Bildsignale durch. Da die Fusion außerdem auf der Auswertung von Merkmalen basiert, können sie als Verfahren zur *merkmalsgestützten Datenfusion* charakterisiert werden [Pue99a].

Zur Fusion von Sensordaten sind konkurrierende und komplementäre Fusionsverfahren zu unterscheiden. Eine konkurrierende Fusion wird durch punktweise Mittelwertbildung über alle Bilder der Serie erhalten. Sie kann sinnvoll zum Einsatz kommen, wenn die Bildinformation in gleicher Weise über mehrere Bilder verteilt vorliegt, z. B. zur Unterdrückung von Bildrauschen. Demgegenüber hat die komplementäre Fusion dann Vorteile, wenn die relevante Information lokal einzelnen Bildern der Serie zugeordnet werden kann. Diese Nutzinformation soll nicht durch eine Mittelung über alle Bilder verschmiert werden, sondern aus dem einzelnen, lokal optimalen Bild in das Fusionsergebnis möglichst unverändert übernommen werden [Hei01a].

Im Falle der Bilderfassung von Werkzeugspuren kann zunächst eine konkurrierende Fusion angebracht sein, um übermäßiges Bildrauschen — z. B. bedingt durch dunkle Oberflächen der Abformungen — zu vermindern. Anschließend werden in einer komplementären Fusion aus den Einzelbildern diejenigen Bildbereiche, die in der Bildserie lokal die beste Qualität aufweisen, zu einem „Flickenteppich“ zusammengefügt. Dadurch erhält das Ergebnisbild in bezug auf ein Kriterium G für jeden Ort des Bildes eine möglichst hohe Güte. Diese Methodik soll nun eingehender betrachtet werden.

In einer Serie D werden K Bilder $d(\mathbf{x}; \omega_i)$, $i \in \{0, 1, \dots, K - 1\}$ beschrieben durch den variierten Parametervektor der Bilderfassung ω_i , siehe Gl. (3.4). Falls notwendig, können weitere Parameter wie z. B. Integrationszeit oder Verstärkungsfaktor der Kamera, Gammawert, evtl. auch spektrale Merkmale oder Polarisationsrichtung der Beleuchtung etc. berücksichtigt werden. Ziel ist, mit einer möglichst geringen Zahl von Bildern die interessierenden Objektbereiche in guter Qualität zu erfassen. Eine Mindest- oder Höchstanzahl von notwendigen Bildern kann in der Regel nicht angegeben werden, da die Beschaffenheit der zu untersuchenden Objekte eine individuelle Anpassung erfordert.

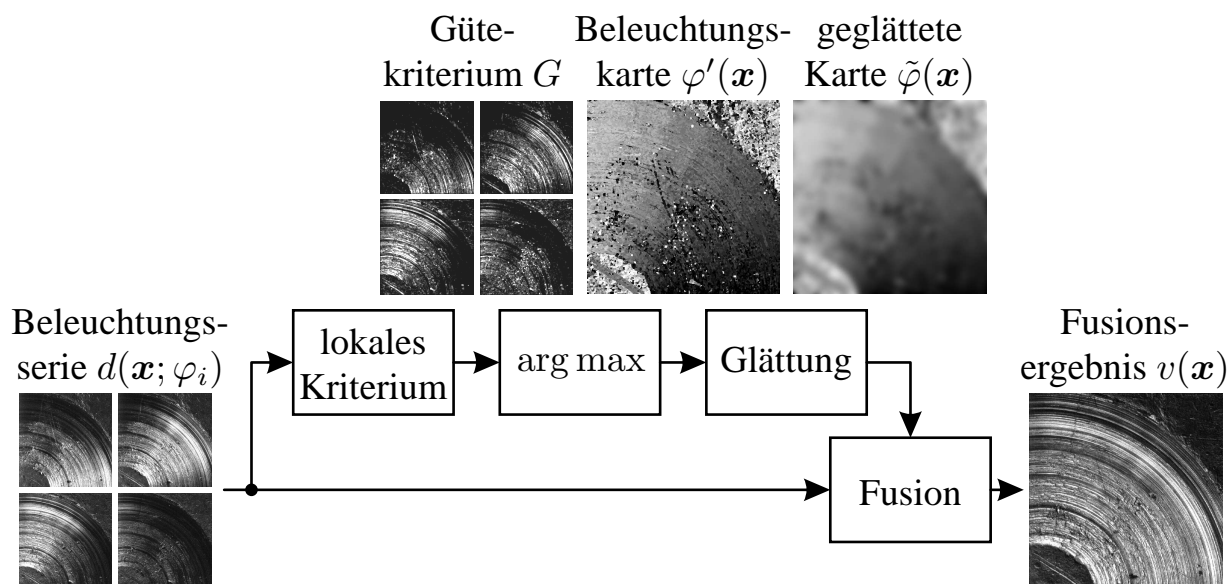


Bild 3.8: Algorithmus zur Fusion von Beleuchtungsserien.

Bildfusion: Der hier verwendete Ansatz zur Bildfusion beruht auf der Minimierung einer sog. *Energiefunktion* [Cla90, Pue97]

$$E = E_D(D, \tilde{\omega}) + \lambda_1 E_Q(v) + \lambda_2 E_G(\tilde{\omega}), \quad \lambda_i > 0. \quad (3.10)$$

$E_D(D, \tilde{\omega})$ modelliert den Zusammenhang zwischen der erfassten Bildserie $D = \{d(\mathbf{x}; \omega_i)\}$ und dem Ergebnis der Fusion $v(\mathbf{x})$, wobei $\tilde{\omega}(\mathbf{x})$ den zur Fusion verwendeten Parametersatz bezeichnet. $E_Q(v)$ bewertet die Güte des Fusionsergebnisses in Hinblick auf ein Gütekriterium G , das die Bildqualität von $v(\mathbf{x})$ in geeigneter Weise beschreibt. Schließlich sorgt ein Glattheitsterm $E_G(\tilde{\omega})$ dafür, dass der Parametersatz $\tilde{\omega}(\mathbf{x})$ örtlich hinreichend glatt ist. Dadurch lassen sich mögliche Artefakte bewerten, die durch Wechselwirkungen zwischen $\tilde{\omega}(\mathbf{x})$ und der sichtbaren Textur des Objekts entstehen könnten.

Bei der Umsetzung dieses Ansatzes sind die Energiekomponenten so zu modellieren, dass ein besseres Fusionsergebnis zu einer niedrigeren Gesamtenergie E führt, wobei die Parameter λ_i die Gewichtung der Energiekomponenten zueinander erlauben. Veränderungen, die ein schlechteres Fusionsergebnis bewirken, werden so durch eine höhere Gesamtenergie „bestraft“.

Fusion von Beleuchtungsserien: Die Theorie der Bildfusion soll nun auf die Bilderfassung von Riefenstrukturen mit stark gekrümmten Riefen angewendet werden, siehe Bild 3.8. Bei solchen Riefen wird das Azimut φ in einer Bildserie systematisch variiert. Damit wird erreicht, dass jeder Bereich der Riefentextur

mindestens einmal annähernd senkrecht zur Riefenstruktur beleuchtet und mit hohem Kontrast abgebildet wird. Die restlichen Komponenten des Parametervektors nach Gl. (3.4) werden konstant gehalten. Der zur Fusion verwendete Energieterm nach Gl. (3.10) vereinfacht sich in diesem Fall zu

$$E = E_D(D, \tilde{\varphi}) + \lambda_1 E_Q(v) + \lambda_2 E_G(\tilde{\varphi}), \quad \lambda_i > 0. \quad (3.11)$$

Für das Gütekriterium G eignet sich z. B. die lokale Grauwertvarianz, der lokale Gradientenbetrag oder die lokale Entropie. Mit dem Kriterium kann dann für jeden Ort \boldsymbol{x} ein Optimum $\varphi'(\boldsymbol{x})$ des Azimuts bestimmt werden. Da dieses Optimum zur Vermeidung von Artefakten sich örtlich nur „langsam“ im Vergleich zur Oberflächentextur verändern darf, muss es z. B. mittels eines Binomialfilters geglättet werden. $\tilde{\varphi}(\boldsymbol{x})$ gibt dann beim Zusammenfügen des Ergebnisbildes aus der Bildserie gleichsam als „Bauplan“ das jeweils an einem bestimmten Ort zu verwendende Einzelbild an.

Fusion von Fokussereien: Ganz analog zum vorigen Abschnitt kann bei der Fusion von Serien unterschiedlicher Fokussierung vorgegangen werden. Hier ist der in der Bildserie variierte Parameter der Objektabstand ζ_i bei konstanter Fokuseinstellung. Der von der Spannweite der realisierten Abstände $\zeta_n - \zeta_0$ überdeckte Bereich und die Schrittweite $\Delta\zeta = \zeta_{i+1} - \zeta_i$, $i \in \{0, 1, \dots, K-2\}$, müssen dabei so gewählt sein, dass sämtliche Bereiche des Bildes mindestens einmal ausreichend scharf erfasst werden. Über das Gütekriterium werden diejenigen Oberflächenpunkte in das Ergebnisbild selektiert, die im Fokus liegen.

Die Variation des Objektabstands besitzt eine weitere positive Eigenschaft: Da bei einer unveränderten Fokuseinstellung der Schärfebereich der Optik zwangsläufig bei einer konstanten Gegenstandsweite liegt, sind die Abbildungsmaßstäbe der scharfen Bereiche in den Einzelbildern annähernd gleich. Man erhält daher ähnlich wie bei einer telezentrischen Optik ein Ergebnisbild, bei dem die Gegenstandsweite und damit der Abbildungsmaßstab an allen Orten \boldsymbol{x} annähernd konstant ist.

Im allgemeinen Fall, wenn sowohl das Beleuchtungsazimut als auch der Objektabstand sowie evtl. weitere Komponenten des Parametervektors $\boldsymbol{\omega}$ variiert werden, können die Verarbeitungsschritte seriell durchgeführt werden. Zunächst gewinnt man eine Serie, bei der nur ein Parameter (z. B. φ) verändert wird. Für jeden gewünschten Wert eines anderen Parameters (z. B. ζ) gewinnt man aus der Fusion der Beleuchtungsserie ein Ergebnisbild, das anschließend in einer Fokusserei fusioniert wird.

Die Fusion von Fokussereien ergibt als Nebeneffekt eine Karte der im Fusionsergebnis verwendeten Teilbilder. Da jedes Teilbild einer bestimmten Tiefe zugeordnet ist, enthält diese Karte die Höheninformation der Oberfläche als $2\frac{1}{2}$ D-Daten.

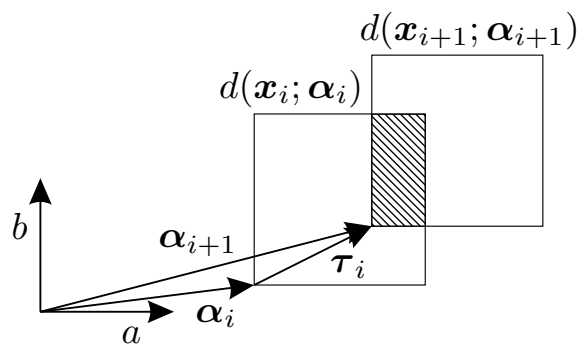


Bild 3.9: Erfassung überlappender Bilder.

Das darauf beruhende Messprinzip der passiven Fokussuche bietet gegenüber den in Abschnitt 3.1.1 genannten Verfahren zwar den Vorteil einer hohen Messgeschwindigkeit bei einfachem optischem Aufbau; die erzielbaren geringen vertikalen und lateralen Auflösungen sind mit ca. $4 \mu\text{m}$ bzw. $7 \mu\text{m}$ jedoch nicht für die Spurenerfassung geeignet [Rön99].

3.2.2 Erfassung großer Objektbereiche

Liegt ein zu erfassender Objektbereich vor, der größer als das Gesichtsfeld der Kamera ist, muss mit mehreren Objektpositionen das gesamte Objekt erfasst werden, siehe Bild 3.9. Dabei wird bei konstantem Abbildungsmaßstab die relative Kameraposition $\alpha = (a, b)^T$ um die Verschiebung $\tau = (\tau_x, \tau_y)^T$ verändert. Eine Verdrehung des Objekts zwischen zwei Bildern ist zwar möglich, sollte aber mit Rücksicht auf kurze Rechenzeiten vermieden werden. Man erhält dadurch eine Bildserie

$$D = \{d(\mathbf{x}_i; \alpha_i)\} , \quad (3.12)$$

deren Bilder teilweise überlappen. Um hochwertige Einzelbilder zu erhalten, kann eine vorangehende Bildfusion von Beleuchtungs- bzw. Fokuserien notwendig sein, siehe Abschnitt 3.2.1. Für den Überlappungsbereich zweier Bilder ist eine vergleichbare Beleuchtungssituation und Aufnahmegeometrie zu gewährleisten. Daher muss der Betrag der Verschiebung als Kompromiss zwischen einer großen Überlappung einerseits und einer geringen Bildanzahl andererseits gewählt werden.

Zur Vereinigung solcher Bildserien kommen Verfahren zur Anwendung, die sich zur Bildregistrierung z. B. in der Photogrammetrie und in der Medizin bewährt haben [Bäh85, Can02, Sze96].

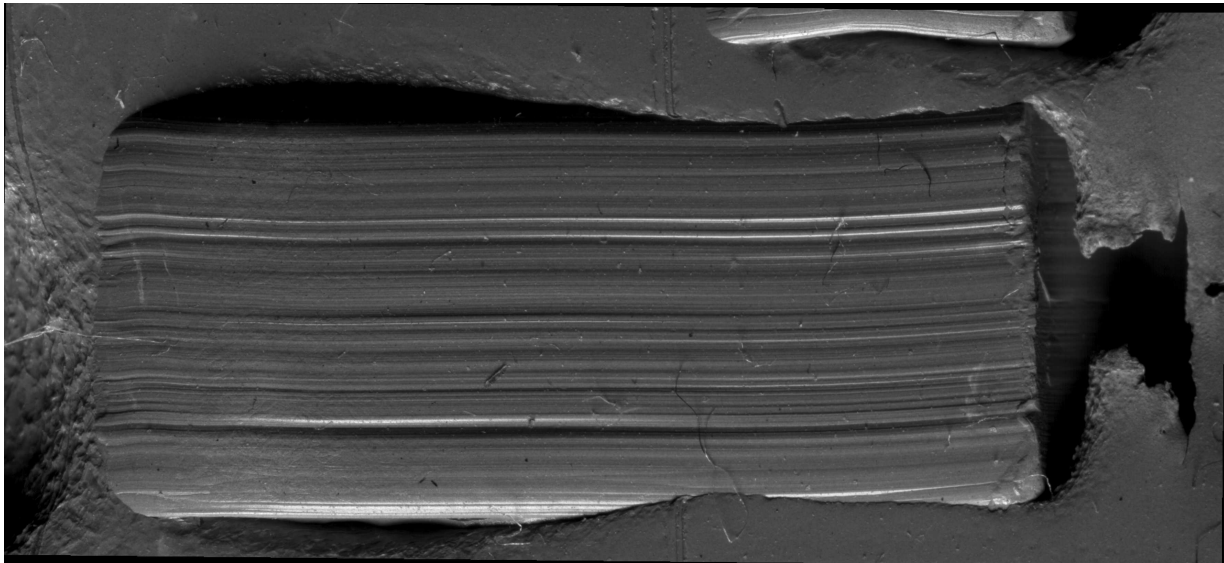


Bild 3.10: Zusammengefügtes Bild einer Werkzeugspur.

Eine geeignete Beschreibung der Translation zwischen zwei aufeinander folgenden Bildern $d(\mathbf{x}_i; \alpha_i)$ und $d(\mathbf{x}_{i+1}; \alpha_{i+1})$ kann mit Hilfe der Vektorgleichung

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i - \boldsymbol{\tau}_i \quad \text{mit} \quad \boldsymbol{\tau}_i = \alpha_{i+1} - \alpha_i \quad (3.13)$$

erhalten werden.

Durch die geometrischen Vorgaben der Positioniereinrichtung ist die grobe Translation zweier Bilder zueinander bekannt; für eine genaue Rekonstruktion ist es jedoch aufgrund des nicht exakt bekannten Abbildungsmaßstabs erforderlich, die genaue Position der Bilder zueinander zu bestimmen. Dies kann z. B. mit einer Kreuzkorrelation der überlappenden Bildbereiche erfolgen [Kep03]. Hier spielt die Genauigkeit der Positioniereinrichtung eine wichtige Rolle: Je genauer die relative Position der Bilder zueinander bekannt ist, desto kleiner kann der für die Kreuzkorrelation zu variierende Bereich gewählt werden, was sich direkt in der benötigten Berechnungszeit auswirkt. Bild 3.10 zeigt als Beispiel das Ergebnis der Kombination von 56 Einzelbildern geringer Auflösung, die ein Gesamtbild mit ca. 3500×1600 Bildpunkten ergeben.

4 Vorverarbeitung

Ziel dieses Teils der Verarbeitungskette ist die Aufbereitung des Bildsignals, um den nachfolgenden Schritt der Merkmalsextraktion zu vereinfachen. Nach Elimination aufnahmebedingter Störanteile findet in der Segmentierung eine Trennung des erfassten Bildbereichs in den interessierenden Spurenbereich und den restlichen Hintergrundbereich statt, der bei der Spurenauswertung unberücksichtigt bleiben soll.

4.1 Unterdrückung von Beleuchtungs- und Texturinhomogenitäten

Zahlreiche Veröffentlichungen der automatischen Sichtprüfung beschäftigen sich mit der Eigenschaft der Homogenität der zu untersuchenden Textur [Bey94, Bey97]. In diesem Zusammenhang ist folgende Definition der Homogenität nützlich:

$$E\{g^\nu(\mathbf{x})\} = \text{const.} \quad \forall 1 \leq \nu \leq n, \quad \nu \in \mathbb{N}. \quad (4.1)$$

Ein bilderzeugender stochastischer Prozess wird danach homogen n -ten Grades genannt, falls die ersten n Momente der Bildintensität nicht vom Ort \mathbf{x} abhängen.

Gründe für Inhomogenitäten sind vielfältiger Art. Sie können grob eingeteilt werden in multiplikativ und nicht multiplikativ überlagerte Störungen. Ein multiplikativer Einfluss von Störungen wird beispielsweise durch

- (a) die von $\cos^4(\alpha)$ abhängige Empfindlichkeit des Kamerasystems, wobei α der Blickwinkel zur optischen Achse ist, unter dem das betrachtete Oberflächenelement von der Kamera aus erscheint,
- (b) Vignettierung im optischen System,
- (c) örtlich unterschiedliche Empfindlichkeit des Kamerasensors oder
- (d) ungleichmäßige Beleuchtungsstärke über dem Ort \mathbf{x} im Aufnahmeausschnitt

verursacht. Nicht multiplikative Störeinflüsse lassen sich hingegen im Wesentlichen auf örtlich unterschiedliches Reflexionsverhalten durch variierende geometrische Verhältnisse zwischen Beleuchtungsrichtung, Orientierung des betrachteten Oberflächenelements und Beobachtungsrichtung zurückführen.

Die Elimination solcher Inhomogenitäten ist durch entsprechend angepasste Verfahren der Bildverarbeitung möglich. Multiplikative Störeinflüsse, die als Eigenschaften des Aufnahmesystems aufgefasst werden können, lassen sich mittels Division durch ein Referenzbild beseitigen [Wah84]. Von den oben genannten Beispielen können besonders die Fälle (a) bis (c) auf diese Weise behandelt werden.

Für andere Störungen sind zusätzliche Annahmen erforderlich. Liegt ein veränderlicher multiplikativer Störeinfluss vor (z. B. im Fall (d) einer ungleichmäßigen Ausleuchtung des Objekts), so kann mit der Annahme eines spektral unterschiedlichen Trägers von Nutzsignal und Störeinfluss eine homomorphe Filterung zur Anwendung kommen [Gon02]. Mit derselben Annahme lassen sich auch nicht multiplikative Inhomogenitäten beseitigen, wobei durch Wahl geeigneter Verfahren Homogenität unterschiedlichen Grades erzwungen werden kann [Bey97].

Während bei metallisch reflektierenden Oberflächen der Einfluss nicht multiplikativer Störkomponenten in der Regel berücksichtigt werden muss, sind deren Auswirkungen bei Abformungen von Spuren aufgrund der dort vorherrschenden diffusen Reflexion kaum von Bedeutung. Zwar verursachen auch multiplikative Störeinflüsse zusammen mit Nichtlinearitäten z. B. des Kamerasensors nicht multiplikative Inhomogenitäten, diese sind jedoch im Vergleich zum Einfluss spiegelnder Reflexionen an metallischen Oberflächen vernachlässigbar.

4.2 Segmentierung

Allgemein können Merkmale zur Beschreibung von Bildinformation unterschiedlichen Klassen zugeordnet werden. Dabei kann man sich an denjenigen Arten von Merkmalen orientieren, die das visuelle System des Menschen zu unterscheiden in der Lage ist [Har73]:

- Spektrale Merkmale beschreiben die Intensitäts- und Farbeigenschaften eines Bildpunktes. Diese Merkmale gehören zur Gruppe der punktwise definierten Merkmale.
- Strukturelle (texturale) Merkmale liefern Informationen über die regionale Anordnung von Intensitätsschwankungen. Sie sind also lokale Merkmale, die zur Bewertung eines Bildpunktes dessen Umgebung mit einbeziehen [Har79].

- Kontextuelle Merkmale schließlich beziehen sich auf den Zusammenhang einer Bildregion mit Regionen ihrer Umgebung. Sie setzen daher eine höhere Abstraktion als strukturelle Merkmale voraus. Dieser Klasse können auch modellbasierte Ansätze zugeordnet werden.

Für die automatische Sichtprüfung lassen sich die beiden erstgenannten Merkmale relativ einfach nutzen. Zahlreiche Beispiele für derartige Merkmale und deren Umsetzung lassen sich finden [Har85, Jäh02]. Die Implementierung entsprechender Algorithmen besitzt den Vorteil, dass nur ein kleiner Bereich des Ausgangsbildes ausgewertet werden muss.

Für eine zuverlässige Segmentierung reicht in der Regel eine punktweise, rein statistische Auswertung der Intensitäten des Bildes ohne Berücksichtigung lokaler Strukturen — außer bei trivialen Hell-/Dunkel-Bildern — nicht aus [Jul75, Jul78]. Geeignete Verfahren verwenden vielmehr strukturelle Merkmale wie z. B. den lokalen Zusammenhang der Grauwerte, so dass die Textur als Kombination lokaler Grauwerte mit in die Bewertung eingeht.

Die Vorzüge kontextueller Merkmale, die das Bild als Ganzes betrachten und in die Bewertung eines Bildpunktes oder eines Bereiches u. U. das Gesamtbild in komplexer Weise mit einbeziehen, führen bei der rechnergestützten Implementierung zu größeren Schwierigkeiten: Einerseits muss der Kontext eines Bildes zugänglich sein, was meist gleichbedeutend mit der Verfügbarkeit von Vorwissen über den Bildinhalt ist. Andererseits muss wegen der Betrachtung des Bildes als Ganzes ein ungleich höherer Rechenaufwand für die Bestimmung der Merkmale betrieben werden.

Durch eine Segmentierung von Werkzeugspuren lassen sich gleich mehrere günstige Effekte erzielen:

- Irrelevante Bereiche werden unterdrückt, die als Artefakte die Identifikation der Spuren erschweren können. Die in der Merkmalsextraktion durchgeführten Schritte Projektion bzw. Filterung des Bildsignals in Riefenrichtung kommen zwar einer Dämpfung von Strukturen gleich, die nicht dem Signalmodell des Spurenbereichs entsprechen. Diese unerwünschten Signalanteile sind jedoch noch in der Projektion vorhanden, so dass auch die Signatur als Ergebnis der Merkmalsextraktion verfälscht wird.

Bild 4.1 zeigt das Beispiel einer begradierten Werkzeugspur. Die Projektion zeigt neben der eigentlichen Spur auch dort ein Signal, wo die Spur nicht vorhanden ist. In diesen Bereichen, die grau hinterlegt sind, trägt also nur die für den Spurenvergleich irrelevante Oberflächenstruktur des Spurenträgers zum Signal bei und verändert somit das Gesamtsignal.

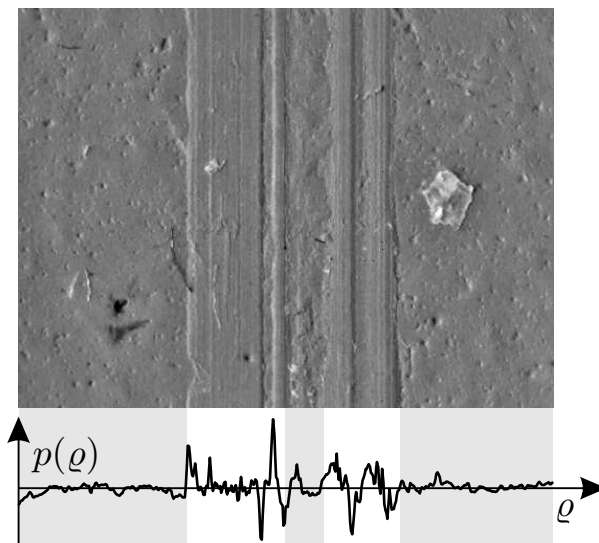


Bild 4.1: Motivation zur Segmentierung: Begradigte Riefen und Projektion. Die grau unterlegten Bereiche der Projektion sind nicht Teil der Riefenspur.

- Nachfolgende Verarbeitungsschritte können gezielt auf bestimmte Eigenschaften der Spurenbereiche optimiert werden. Viele Filterverfahren zur Auswertung lokaler Grauwertstrukturen lassen sich erheblich beschleunigen, wenn als lokale Umgebung ein linienhafter Bereich anstelle einer zweidimensionalen Region betrachtet wird. Da im Spurenbereich eine klare Vorzugsrichtung der Textur vorliegt, bei der z. B. die Hervorhebung relevanter Details nur senkrecht zur Riefenrichtung sinnvoll ist, kann durch geeignet gestaltete Filter eine Beschleunigung der Verfahren erzielt werden.
- Die Geschwindigkeit nachfolgender Verfahrensschritte ist häufig von der Größe der Eingabesignale abhängig. So werden zur Begradigung gekrümmter Riefen Profile aus dem Bild entnommen und durch Korrelationsverfahren miteinander verglichen, um die relative Lage der Profile zueinander zu ermitteln, siehe Abschnitt 5.2.2.1. Kann nun aufgrund der Segmentierung die Länge eines solchen Profils auf den eigentlichen Spurenbereich begrenzt werden, so reduziert sich damit im gleichen Maß die erforderliche Rechenzeit. Auch beim Datenbankvergleich der Signaturen sind kürzere Signale aus demselben Grund erwünscht.

Für die Segmentierung von Werkzeugspuren kann Vorwissen aus dem Entstehungsprozess genutzt werden. Im relevanten Spurenanteil $r(\mathbf{x})$ des Bildes gelten folgende Voraussetzungen:

- Das Werkzeug hat die Werkstückoberfläche in einer ziehenden Bewegung

berührt, so dass die Riefen durch die Signalmodelle nach Abschnitt 2.3 beschrieben werden können.

- Diese Textur ist bei ausreichender Strukturierung der Schneide lokal gekennzeichnet durch eine starke Anisotropie.
- Obwohl die meisten der in Abschnitt 2.3 definierten Signalmodelle örtlich unterschiedliche Riefenrichtungen erlauben, können die Riefen zumindest lokal als hinreichend geradlinig betrachtet werden.
- Es treten keine Überschneidungen der Riefen auf.

Über die Textur des Hintergrunds $h(\boldsymbol{x})$ kann zunächst nichts ausgesagt werden, da ihre Entstehung stark von der Bearbeitungsgeschichte des Spurenrägers abhängt. Diese Textur ist nicht durch das Werkzeug entstanden, so dass dort andere Merkmale vorliegen. Praxisrelevante Spurenräger besitzen häufig spritzlackierte, sandgestrahlte o. ä. Oberflächen, die als gemeinsames Merkmal eine überwiegend isotrope Textur, d. h. keine Vorzugsrichtung aufweisen.

Für die Segmentierung wird angenommen, dass das Werkzeug an jedem berührten Oberflächenpunkt des Spurenrägers so deutliche Spuren erzeugt hat, dass der Punkt entweder zum Spurenbereich oder zum Hintergrund gerechnet werden kann. Die Texturen der Riefen $t(\boldsymbol{x})$ und des Hintergrunds $h(\boldsymbol{x})$ besitzen also disjunkte Träger \mathcal{T} und \mathcal{H} :

$$\mathcal{T} \cap \mathcal{H} = \emptyset . \quad (4.2)$$

Zum Test der vorgestellten Segmentierungsverfahren werden zwei Spuren untersucht, die typische Aufgabenstellungen repräsentieren [Hei03b], siehe Bild 4.2: In Bild 4.2(a) ist die deutlich ausgeprägte und lückenfreie Spur an ihrem Rand vom Hintergrund zu trennen. Demgegenüber weist die Spur von Bild 4.2(b) Lücken auf, so dass die Riefen als eine Art Flickenteppich von mehreren getrennten Bereichen aus dem Hintergrund zu lösen sind.

Ergebnis der in den Abschnitten 4.3 und 4.4 vorgestellten Verfahren ist eine binäre Maske. Dort wird für jeden Bildpunkt die Zugehörigkeit zum Riefenbereich bzw. zum Hintergrund durch die Werte 1 (weiß markiert) und 0 (schwarz markiert) kodiert. Die eigentliche Segmentierung erfolgt anhand einer modifizierten Maske, bei der durch die morphologischen Verfahren von Abschnitt 4.5 Segmentierungsfehler unterdrückt worden sind.

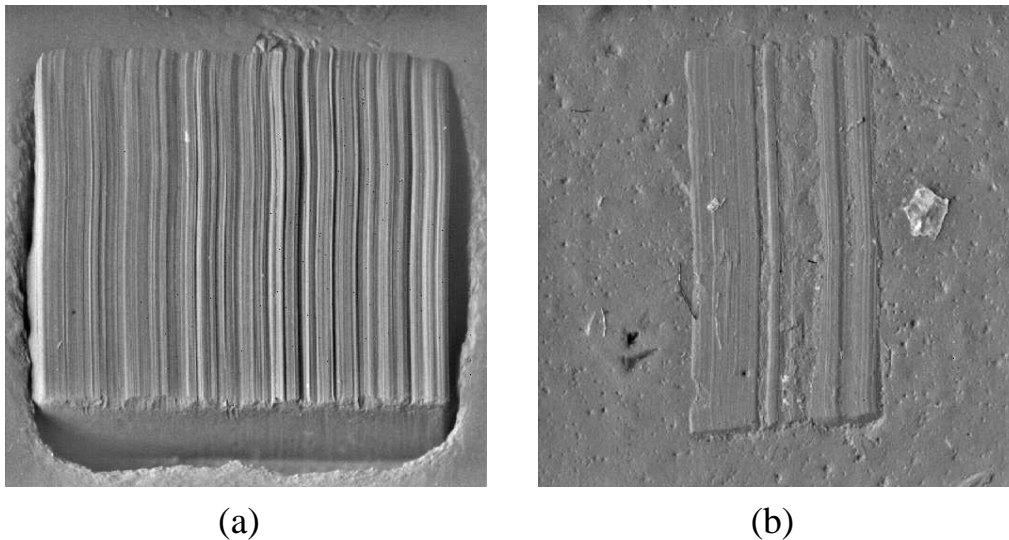


Bild 4.2: Testspuren zur Bewertung der Segmentierungsverfahren: (a) Lückenfreie Spur; (b) Lückenbehaftete Spur.

4.3 Texturorientierte Segmentierung

Ein geeigneter Ansatz zur Segmentierung von Werkzeugspuren besteht in der Auswertung einer lokalen Vorzugsrichtung der Textur im Spurenbereich. Derartige Verfahren klassifizieren die lokale Anisotropie, so dass eine Zuordnung der Bildpunkte zu einem der beiden Bereiche Riefen bzw. Hintergrund ermöglicht wird. Da die lokale Anisotropie die Umgebung des jeweiligen Bildpunktes betrifft, gehört sie zu den strukturellen (texturalen) Merkmalen.

4.3.1 Analyse der lokalen Varianz

Die empirische Varianz $s_{\mathcal{U}}^2$ in einer Umgebung $\mathcal{U}(\mathbf{x}_p)$ des Bildpunktes \mathbf{x}_p ist definiert durch

$$s_{\mathcal{U}}^2(\mathbf{x}_p) = \frac{1}{|\mathcal{U}| - 1} \sum_{\mathbf{x} \in \mathcal{U}} (g(\mathbf{x}) - \bar{g}_{\mathcal{U}}(\mathbf{x}_p))^2, \quad (4.3)$$

wobei $\bar{g}_{\mathcal{U}}(\mathbf{x}_p)$ den Mittelwert der Grauwerte und $|\mathcal{U}|$ die Anzahl der Bildpunkte in $\mathcal{U}(\mathbf{x}_p)$ bezeichnen.

Aufgrund der Anisotropie der Textur im Spurenbereich ist dort die lokale Varianz stark von der Gestalt der Umgebung \mathcal{U} abhängig. Besitzt die Umgebung eine größere Ausdehnung senkrecht zur lokalen Riefenrichtung, so ist eine größere Varianz zu erwarten, als wenn die Umgebung eine größere Ausdehnung in Riefenrichtung

aufweist. Im Extremfall kann die Umgebung als linienhaftes Rechteck gewählt werden, wobei eine der beiden Seitenlängen die Ausdehnung 1 besitzt. Variiert man die Orientierung dieser lokalen Umgebung, so wird ein Minimum bzw. Maximum der lokalen Varianz in Bezug auf die Orientierung genau dann erzielt, wenn die lokale Umgebung in Riefenrichtung bzw. senkrecht dazu ausgerichtet ist.

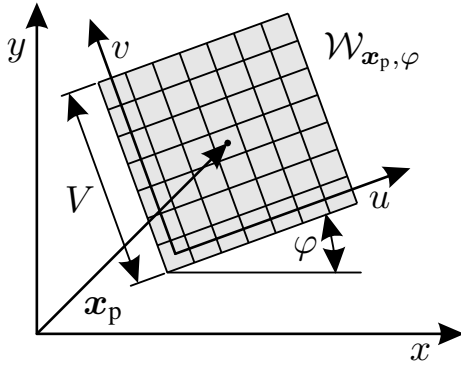


Bild 4.3: Gleitendes Fenster.

Zur Umsetzung des Verfahrens wird ein gleitendes Fenster $\mathcal{W}_{\mathbf{x}_p, \varphi}$ ausgewertet, das eine um den Winkel φ gegen die x -Achse gedrehte quadratische Umgebung des Bildpunktes $\mathbf{x}_p = (x_p, y_p)^T$ mit der Kantenlänge V ausschneidet, siehe Bild 4.3. Durch die Fensterung wird ein Bildausschnitt $g_{\mathcal{W}}(\mathbf{u}; \mathbf{x}_p, \varphi)$ auf dem Koordinatensystem $\mathbf{u} = (u, v)^T$ mit

$$\mathbf{x}(\mathbf{u}; \mathbf{x}_p, \varphi) = \begin{pmatrix} x_p + (u - \frac{V-1}{2}) \cdot \cos \varphi - (v - \frac{V-1}{2}) \cdot \sin \varphi \\ y_p + (u - \frac{V-1}{2}) \cdot \sin \varphi + (v - \frac{V-1}{2}) \cdot \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

des Fensters definiert. Die Grauwerte $g_{\mathcal{W}}(\mathbf{u}; \mathbf{x}_p, \varphi)$ werden dann mittels bilinearer Interpolation aus dem Bild $g(\mathbf{x})$ gewonnen.

In jeder Zeile v bzw. Spalte u des Bildausschnitts werden nun die empirischen Varianzen $s_{\varphi}^2(v; \mathbf{x}_p)$ bzw. $s_{\varphi+90^\circ}^2(u; \mathbf{x}_p)$ berechnet:

$$s_{\varphi}^2(v; \mathbf{x}_p) = \frac{1}{V-1} \sum_{u=0}^{V-1} (g_{\mathcal{W}}(\mathbf{u}; \mathbf{x}_p, \varphi) - \bar{g}_{\mathcal{W}_{\varphi}}(v; \mathbf{x}_p))^2, \quad (4.5)$$

$$s_{\varphi+90^\circ}^2(u; \mathbf{x}_p) = \frac{1}{V-1} \sum_{v=0}^{V-1} (g_{\mathcal{W}}(\mathbf{u}; \mathbf{x}_p, \varphi) - \bar{g}_{\mathcal{W}_{\varphi+90^\circ}}(u; \mathbf{x}_p))^2, \quad (4.6)$$

dabei sind

$$\bar{g}_{\mathcal{W}_{\varphi}}(v; \mathbf{x}_p) = \frac{1}{V} \sum_{u=0}^{V-1} g_{\mathcal{W}}(\mathbf{u}; \mathbf{x}_p, \varphi), \quad (4.7)$$

$$\bar{g}_{\mathcal{W}_{\varphi+90^\circ}}(u; \mathbf{x}_p) = \frac{1}{V} \sum_{v=0}^{V-1} g_{\mathcal{W}}(\mathbf{u}; \mathbf{x}_p, \varphi). \quad (4.8)$$

Sind die Riefen parallel zu einer der Koordinatenrichtungen von \mathbf{u} , z. B. zu v ausgerichtet, nimmt eine der beiden lokalen Varianzen, im Beispiel $s_{\varphi}^2(v; \mathbf{x}_p)$, besonders große Werte an, während die Varianz in der senkrecht dazu stehenden

Umgebung besonders geringe Werte ergibt. Mit dem relativen Verhältnis $q_\varphi(\mathbf{x}_p)$ der gemittelten lokalen Varianzen kann der mittlere Riefenwinkel im betrachteten Fenster $\mathcal{W}_{\mathbf{x}_p, \varphi}$ als Schätzung des Riefenwinkels $\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p)$ am Bildpunkt \mathbf{x}_p verwendet werden¹:

$$\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p) = \arg \max_{\varphi} \{q_\varphi(\mathbf{x}_p)\} \quad (4.9)$$

mit

$$q_\varphi(\mathbf{x}_p) = \frac{\frac{1}{V} \sum_{v=0}^{V-1} s_\varphi^2(v; \mathbf{x}_p) - \frac{1}{V} \sum_{u=0}^{V-1} s_{\varphi+90^\circ}^2(u; \mathbf{x}_p)}{\varepsilon + \frac{1}{V} \sum_{v=0}^{V-1} s_\varphi^2(v; \mathbf{x}_p) + \frac{1}{V} \sum_{u=0}^{V-1} s_{\varphi+90^\circ}^2(u; \mathbf{x}_p)} . \quad (4.10)$$

ε ist eine kleine positive Konstante zur Vermeidung einer Division durch 0. Durch Mittelwertbildung der Varianzen quer zur Richtung der für die Varianzberechnung verwendeten lokalen Umgebungen in Gl. (4.10) werden kleinräumige Störungen der Textur unterdrückt. Das Maximum von $q_\varphi(\mathbf{x}_p)$ selbst kann als Kohärenzmaß $\chi(\mathbf{x}_p)$ für die Ausprägung der Riefen und damit als Maß für die Zuverlässigkeit der Schätzung des Riefenwinkels interpretiert werden:

$$\chi(\mathbf{x}_p) = \max_{\varphi} \{q_\varphi(\mathbf{x}_p)\} . \quad (4.11)$$

Bei der praktischen Umsetzung des Verfahrens wird für jeden Bildpunkt \mathbf{x}_p und jeden Rotationswinkel $\varphi_i \in [0^\circ; 90^\circ)$,

$$\varphi_i = i\Delta\varphi , \quad i \in \left\{ 0, 1, \dots, \frac{90^\circ}{\Delta\varphi} - 1 \right\} \quad \text{mit} \quad (4.12)$$

$$k\Delta\varphi = 90^\circ , \quad k \in \{1, 2, \dots\} \quad (4.13)$$

des gleitenden Fensters $\mathcal{W}_{\mathbf{x}_p, \varphi}$ das relative Verhältnis der lokalen Varianz $q_\varphi(\mathbf{x}_p)$ bestimmt und mit den Gln. (4.9) und (4.11) ausgewertet. Für $\varphi_i \in [90^\circ; 180^\circ)$ ist eine Neuberechnung des gleitenden Fensters nicht erforderlich, da der fehlende Winkelbereich durch Uminterpretation des Rotationswinkels φ erhalten werden kann:

$$q_{\varphi+90^\circ}(\mathbf{x}_p) = -q_\varphi(\mathbf{x}_p) . \quad (4.14)$$

Für die Zuordnung eines Bildpunktes zum Spurenbereich werden folgende Merkmale definiert:

¹Als Bezugsgeraden für den Riefenwinkel dienen hier und im Folgenden stets die x -Achse und die *Senkrechte* zu den Riefen. Der Wertebereich für den Riefenwinkel ist $\vartheta(\mathbf{x}_p) \in [0^\circ; 180^\circ)$.

1. Der punktweise geschätzte Riefenwinkel $\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p)$ muss nahe am mittleren Riefenwinkel der Spur liegen.

Da vom Hintergrund angenommen wird, dass er eine isotrope Textur aufweist, bei der die Schätzung des Riefenwinkels auf den Winkelbereich $[0^\circ; 180^\circ)$ näherungsweise gleichverteilt ist, kann der mittlere Riefenwinkel der Spur mit dem zirkulären Mittelwert $\bar{\vartheta}$ sämtlicher geschätzter Riefenwinkel im Bild gleichgesetzt werden. Zur Gewinnung des zirkulären Mittelwerts werden die den Riefenwinkeln zugeordneten Vektoren

$$\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p) = e^{j\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p)} \quad (4.15)$$

betrachtet [Rao90]. Der Betrag der Projektion dieses Vektors auf eine um den Winkel β gegen die x -Achse geneigte Gerade ist durch

$$\lambda(\beta; \mathbf{x}_p) = \left| \cos(\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p) - \beta) \right| \quad (4.16)$$

gegeben. Die Maximierung der Summe der Projektionen bezüglich β ergibt einen Schätzwert für die dominierende Orientierung:

$$\bar{\vartheta} := \arg \max_{\beta} \left\{ \sum_{\mathbf{x}_p} \lambda(\beta; \mathbf{x}_p) \right\} . \quad (4.17)$$

Man kann zeigen [Rao90], dass diese Maximierung und damit der zirkuläre Mittelwert sämtlicher geschätzter Riefenwinkel erhalten wird durch

$$\bar{\vartheta} = \frac{1}{2} \cdot \arctan \left(\frac{\sum_{\mathbf{x}_p} \sin 2\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p)}{\sum_{\mathbf{x}_p} \cos 2\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p)} \right) . \quad (4.18)$$

Als erstes numerisches Kriterium zur Entscheidung, ob ein Bildpunkt \mathbf{x}_p zur Spur gehört, wird ein zirkulärer Schwellwert $\Delta\theta$ für die geschätzte Riefenrichtung $\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p)$ verwendet:

$$\mathcal{T}_1 = \left\{ \mathbf{x}_p \mid \begin{aligned} &(\bar{\vartheta} - \hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p)) \bmod 180^\circ \leq \Delta\theta \\ &\vee (\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p) - \bar{\vartheta}) \bmod 180^\circ \leq \Delta\theta \end{aligned} \right\} . \quad (4.19)$$

2. Zusätzlich wird gefordert, dass die Schätzung des Riefenwinkels mit guter Zuverlässigkeit und folglich mit einem hohen Kohärenzmaß $\chi(\mathbf{x}_p)$ erfolgt ist. Auch hier kommt ein Schwellwert zum Einsatz:

$$\mathcal{T}_2 = \left\{ \mathbf{x}_p \mid \chi(\mathbf{x}_p) \geq \Delta\chi \right\} . \quad (4.20)$$

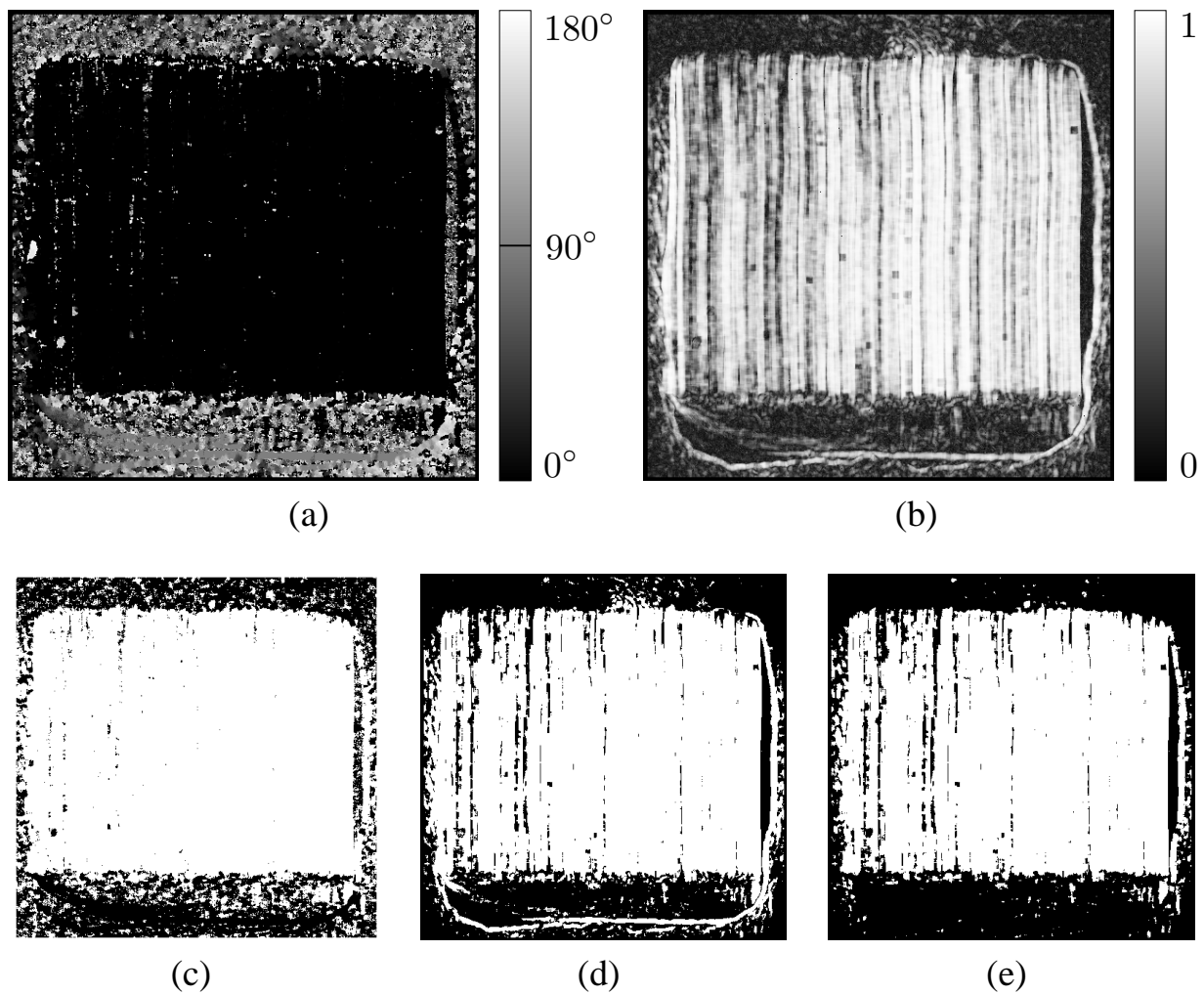


Bild 4.4: Auswertung der lokalen Varianz am Beispiel der Spur aus Bild 4.2(a) mit $V = 7$, $\Delta\varphi = 9^\circ$, $\varepsilon = 10^{-2}$, $\Delta\theta = 10^\circ$, $\Delta\chi = 0,45$: (a) Schätzung des Riefenwinkels $\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p)$ nach Gl. (4.9); (b) Kohärenzmaß $\chi(\mathbf{x}_p)$ nach Gl. (4.11); (c) Kriterium Riefenwinkel \mathcal{T}_1 nach Gl. (4.19); (d) Kriterium Kohärenzmaß \mathcal{T}_2 nach Gl. (4.20); (e) Geschätzter Riefenbereich \mathcal{T} nach Gl. (4.22).

Aufgrund der Ableitung des Kohärenzmaßes aus dem relativen Verhältnis der lokalen Varianzen $q_\varphi(\mathbf{x}_p)$ nach den Gln. (4.10) und (4.14) gilt

$$\chi(\mathbf{x}_p) \in \left[0; \frac{1}{1 + \varepsilon} \right]. \quad (4.21)$$

Die beiden Kriterien der Gln. (4.19) und (4.20) werden zusammengefasst, wobei der Träger der Riefentextur als Schnittmenge geschätzt wird:

$$\mathcal{T} = \mathcal{T}_1 \cap \mathcal{T}_2. \quad (4.22)$$

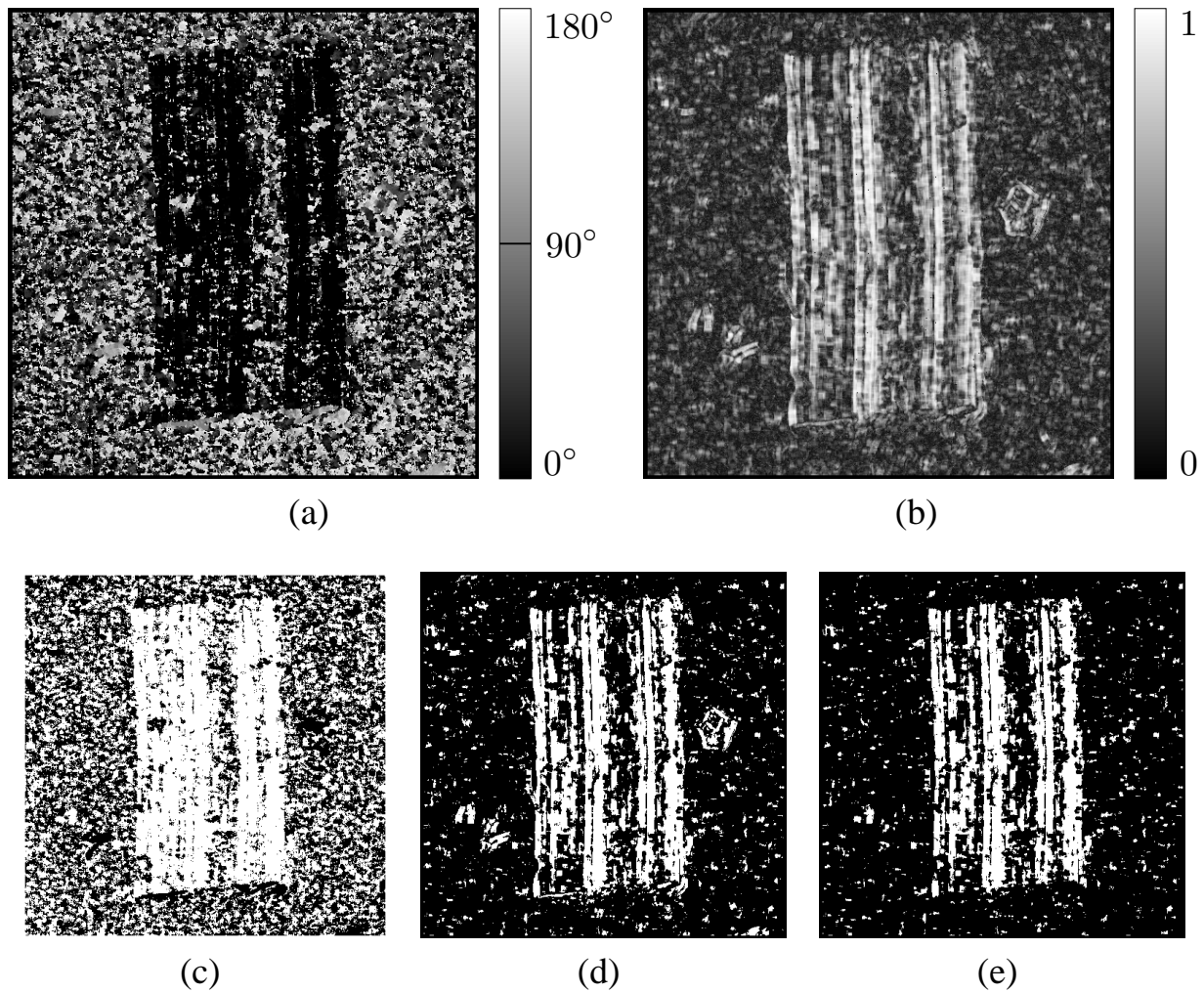


Bild 4.5: Auswertung der lokalen Varianz am Beispiel der Spur aus Bild 4.2(b) mit $V = 7$, $\Delta\varphi = 9^\circ$, $\varepsilon = 10^{-2}$, $\Delta\theta = 10^\circ$, $\Delta\chi = 0,45$: (a) Schätzung des Riefenwinkels $\hat{\vartheta}(x_p)$ nach Gl. (4.9); (b) Kohärenzmaß $\chi(x_p)$ nach Gl. (4.11); (c) Kriterium Riefenwinkel T_1 nach Gl. (4.19); (d) Kriterium Kohärenzmaß T_2 nach Gl. (4.20); (e) Geschätzter Riefenbereich T nach Gl. (4.22).

Die Bilder 4.4 und 4.5 zeigen die Anwendung des Verfahrens auf die Beispielspuren von Bild 4.2. Die Spurenbereiche werden bei der Schätzung des Riefenwinkels (Bilder 4.4(a) und 4.5(a)) durch Winkel von ca. 0° bzw. 180° repräsentiert, was der senkrechten Ausrichtung der Riefen entspricht. Solche Winkel sind außerhalb der Spur jedoch ebenfalls häufig anzutreffen, so dass die Segmentierung mit dem Kriterium Riefenwinkel (Bilder 4.4(c) und 4.5(c)) alleine für eine zuverlässige Segmentierung nicht ausreicht.

Das Kohärenzmaß (Bilder 4.4(b) und 4.5(b)) zeigt im Riefenbereich hohe Werte, allerdings auch bei den Störungen mit deutlich sichtbaren Kanten außerhalb des Spurenbereichs. Dementsprechend ist auch das Kriterium Kohärenzmaß allei-

ne zur Segmentierung nicht hinreichend, siehe Bilder 4.4(d) und 4.5(d). Erst die gleichzeitige Anwendung beider Kriterien mit geeigneten Schwellwerten ergibt zufrieden stellende Ergebnisse, siehe Bilder 4.4(e) und 4.5(e).

4.3.2 Analyse lokaler Gradienten

Die Anisotropie im Spurenbereich sorgt für geringe Gradienten in Riefenrichtung, während senkrecht dazu höhere Gradienten zu erwarten sind. Aus der Richtung der maximalen Ableitung der Grauwerte lässt sich daher der lokale Riefenwinkel schätzen, wobei der zugehörige Betrag als Kohärenzmaß genutzt werden kann.

Derartige Strategien [Kas87a, Rao90] zur Schätzung des lokalen Riefenwinkels $\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p)$ verwenden den Gradientenvektor

$$\nabla g(\mathbf{x}_p) = \left(\frac{\partial g(\mathbf{x}_p)}{\partial x}, \frac{\partial g(\mathbf{x}_p)}{\partial y} \right)^T \quad (4.23)$$

und dessen Richtung

$$\begin{aligned} \hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p) &= \angle\{\nabla g(\mathbf{x}_p)\} \bmod 180^\circ \\ &= \left[\arctan \left(\frac{\partial g(\mathbf{x}_p)}{\partial y} / \frac{\partial g(\mathbf{x}_p)}{\partial x} \right) \right] \bmod 180^\circ \end{aligned} \quad (4.24)$$

sowie als Kohärenzmaß für die Zuverlässigkeit der Schätzung dessen Betrag

$$\chi(\mathbf{x}_p) = \|\nabla g(\mathbf{x}_p)\| . \quad (4.25)$$

Die Bestimmung des Gradienten wird durch Faltung des Bildes mit einer Ableitungsmaske angenähert:

$$\nabla g(\mathbf{x}_p) = g(\mathbf{x}_p) ** \mathbf{d}(\mathbf{x}_p) \quad (4.26)$$

mit

$$\mathbf{d}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} d_x(\mathbf{x}) \\ d_y(\mathbf{x}) \end{pmatrix} . \quad (4.27)$$

Für den Entwurf dieses Filters sind unterschiedliche Ansätze denkbar. Gebräuchliche Realisierungen basieren auf der zweidimensionalen Gauß-Funktion [Bas02]

$$G(\mathbf{x}; \boldsymbol{\sigma}) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x}\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad \text{mit} \quad \sigma = \sigma_x = \sigma_y \quad (4.28)$$

und deren Ableitungen. Ein geeignetes Werkzeug zur Detektion von Grauwertgradienten stellt die erste Ableitung dar [Can86], wobei ein Vorfaktor $k(\sigma)$ zur Vermeidung von Artefakten bei unterschiedlichen Skalierungen σ verwendet wird [Kor88]:

$$\begin{aligned} d(\mathbf{x}) &= k(\sigma) \cdot \nabla G(\mathbf{x}) \\ &= -\frac{1}{\sigma^3 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x}\|^2}{2\sigma^2}\right) \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (4.29)$$

Vorteilhaft an diesem Ansatz ist die implizite Kombination des Ableitungsoperators mit einer Glättung quer zu derjenigen Richtung, in der die Ableitung bestimmt wird. Das Filter nach Gl. (4.29) besitzt Bandpass-Charakter und kann dadurch hochfrequente Störungen, die in realen Bildern stets enthalten sind, wirkungsvoll unterdrücken. Andererseits bedeutet diese Eigenschaft, die für die sichere Detektion von Bereichsgrenzen ausgedehnter Strukturen erwünscht ist, bei der Anwendung auf Werkzeugspuren mit ihren feinen Riefen einen entscheidenden Nachteil: Für eine ausreichend feine Abtastung der Gauß-Funktion und zur Erzielung des Glättungseffekts besitzt das Filter selbst bei Unterdrückung kleiner Filterwerte eine Größe von typisch mindestens 7×7 Bildpunkten [Kor88], so dass das Verfahren mit dem Ableitungsoperator nach Gl. (4.29) die feinen Strukturen von Werkzeugspuren — abhängig von der Auflösung des Bildmaterials — meist nicht trennen kann.

Geeigneter für die vorliegende Aufgabe erscheint ein Ansatz auf der Grundlage des eindimensionalen symmetrischen Differenzenquotienten [Jäh02]

$$s_x(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} (1 \ 0 \ -1). \quad (4.30)$$

Zur Störungsunterdrückung wird senkrecht zur Richtung der Ableitung ein Binomialfilter mit

$$b_y^3(\mathbf{x}) = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.31)$$

verwendet, so dass durch Faltung der Sobel-Operator entsteht [Jäh02]:

$$\begin{aligned} d_x(\mathbf{x}) &= s_x(\mathbf{x}) ** b_y^3(\mathbf{x}) \\ &= \frac{1}{8} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (4.32)$$

Mit diesem Filter und dem um 90° gedrehten Gegenstück $d_y(\mathbf{x})$ könnte die Bestimmung der Richtung $\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p)$ sowie des Betrags $\chi(\mathbf{x}_p)$ des Gradientenvektors in den Gln. (4.24) und (4.25) erfolgen. Bei feinen, dicht nebeneinander liegenden Riefen und der kleinen Filtermaske des Sobel-Operators ist es jedoch vorteilhaft, wenn die Riefen stets parallel zur vertikalen Richtung der Filtermaske von Gl. (4.32) verlaufen. Es kommt daher ein Kompass-Gradientenverfahren zum Einsatz, bei dem ähnlich wie in Abschnitt 4.3.1 ein gleitendes und rotiertes Fenster $\mathcal{W}_{\mathbf{x}_p, \varphi}$ mit der Kantenlänge 3 ausgewertet wird. Die Verwendung eines rotierten Fensters besitzt gegenüber anderen Operatoren zur Bestimmung von Kompass-Gradienten, die mit mehreren Filtermasken arbeiten (z. B. dem Kirsch-Operator [Abm86]), Vorteile bezüglich der Isotropie der Richtungsschätzung sowie der möglichen Winkelauflösung.

Zur praktischen Realisierung des Verfahrens wird für jeden Bildpunkt \mathbf{x}_p und jeden Rotationswinkel $\varphi_i \in [0^\circ; 180^\circ)$,

$$\varphi_i = i\Delta\varphi, \quad i \in \left\{0, 1, \dots, \frac{180^\circ}{\Delta\varphi} - 1\right\} \quad \text{mit} \quad (4.33)$$

$$k\Delta\varphi = 180^\circ, \quad k \in \{1, 2, \dots\} \quad (4.34)$$

des gleitenden Fensters $\mathcal{W}_{\mathbf{x}_p, \varphi}$ der Betrag des Gradienten

$$b_\varphi(\mathbf{x}_p) = \left| \frac{\partial g_{\mathcal{W}}(\mathbf{u}; \mathbf{x}_p, \varphi)}{\partial u} \right| = |g_{\mathcal{W}}(\mathbf{u}; \mathbf{x}_p, \varphi) ** d_u(\mathbf{u})| \quad (4.35)$$

durch Faltung mit der Filtermaske entsprechend Gl. (4.32) bestimmt. Als Schätzung für den Riefenwinkel und das Kohärenzmaß erhält man

$$\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p) = \arg \max_{\varphi} \{b_\varphi(\mathbf{x}_p)\} \quad \text{und} \quad \chi(\mathbf{x}_p) = \max_{\varphi} \{b_\varphi(\mathbf{x}_p)\}. \quad (4.36)$$

Die weitere Auswertung des geschätzten Riefenwinkels $\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p)$ und des Kohärenzmaßes $\chi(\mathbf{x}_p)$ erfolgt wie in Abschnitt 4.3.1 mit Hilfe eines zirkulären Schwellwerts $\Delta\theta$ für den Riefenwinkel sowie eines Schwellwerts $\Delta\chi$ für das Kohärenzmaß. Im Gegensatz zu Gl. (4.21) gilt hier für den Wertebereich von $\chi(\mathbf{x}_p)$ die Ungleichung

$$\chi(\mathbf{x}_p) \geq 0. \quad (4.37)$$

Da eine obere Grenze für den Wertebereich von $\chi(\mathbf{x}_p)$ nicht unabhängig vom Bild $g(\mathbf{x})$ angegeben werden kann, wird eine robuste Segmentierung durch Vergleich mit dem Maximalwert des Kohärenzmaßes durchgeführt:

$$\mathcal{T}_2 = \left\{ \mathbf{x}_p \mid \frac{\chi(\mathbf{x}_p)}{\max \chi(\mathbf{x}_p)} \geq \Delta\chi \right\}. \quad (4.38)$$

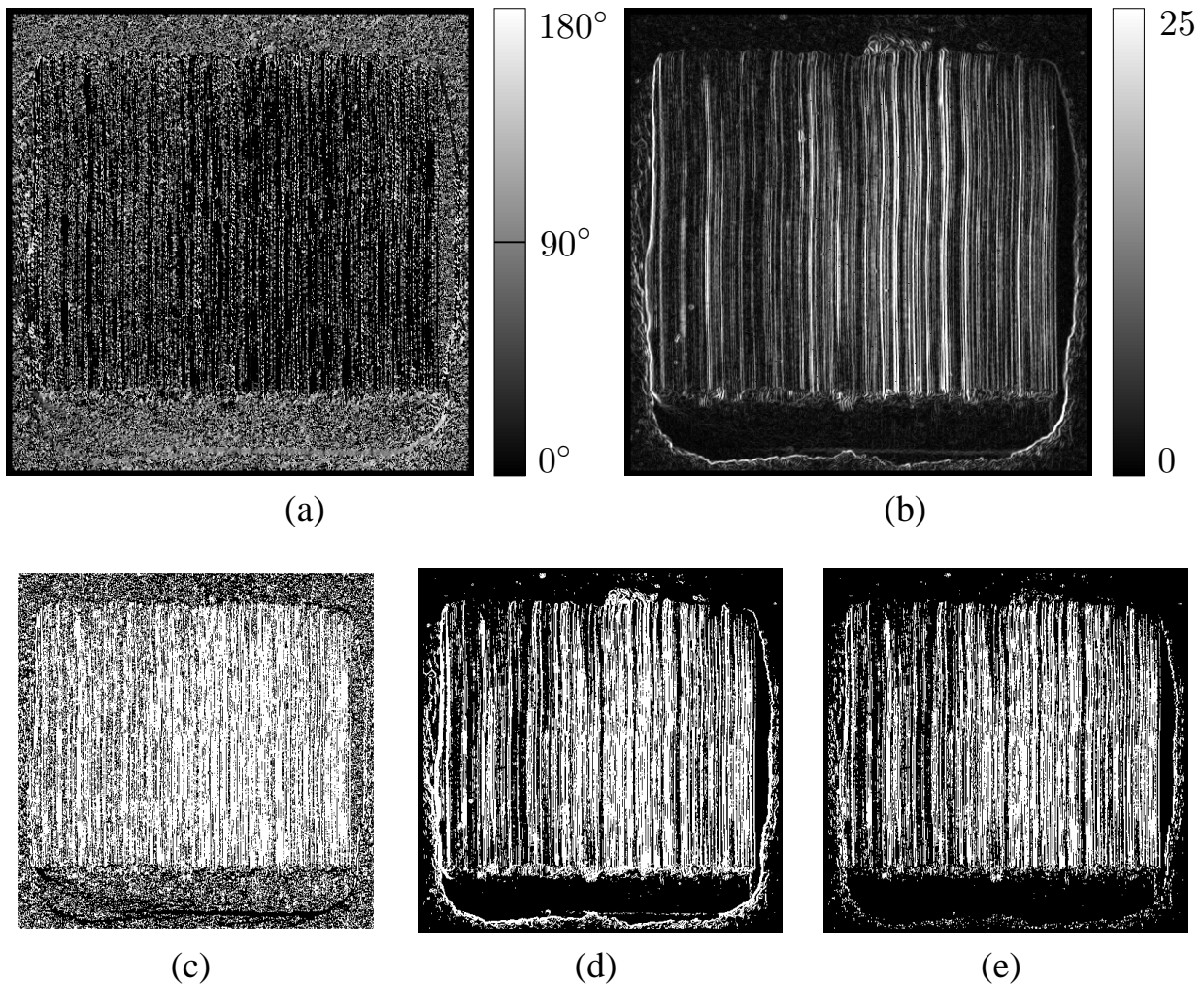


Bild 4.6: Auswertung des lokalen Gradienten am Beispiel der Spur aus Bild 4.2(a) mit $\Delta\varphi = 9^\circ$, $\Delta\theta = 10^\circ$, $\Delta\chi = 0,1$: (a) Schätzung des Riefenwinkels $\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p)$ nach Gl. (4.36); (b) Kohärenzmaß $\chi(\mathbf{x}_p)$ nach Gl. (4.36); (c) Kriterium Riefenwinkel \mathcal{T}_1 , vgl. Gl. (4.19); (d) Kriterium Kohärenzmaß \mathcal{T}_2 nach Gl. (4.38); (e) Geschätzter Riefenbereich \mathcal{T} , vgl. Gl. (4.22).

Die Bilder 4.6 und 4.7 zeigen die Anwendung des Verfahrens. Aufgrund der kleinen Maskengröße des Sobel-Operators nach Gl. (4.32) zeigt die Schätzung des Riefenwinkels $\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p)$ sehr starke Fluktuationen, was sich bei der Segmentierung nach diesem Kriterium in stark unterbrochenen Spurenbereichen bemerkbar macht, siehe Bilder 4.6(c) und 4.7(c). Auffallend am Kohärenzmaß $\chi(\mathbf{x}_p)$ ist, dass besonders an den Spurenrändern hohe Werte auftreten, was zu einer unerwünschten Segmentierung des Spurenrands führt, siehe Bilder 4.6(d) und 4.7(d). Die insgesamt weniger zufrieden stellenden Ergebnisse sind darauf zurückzuführen, dass Gradientenverfahren zwar gut auf einzelne Kanten reagieren und die dort vorhandenen Grauwertsprünge detektieren, jedoch bei zahlreichen benachbarten feinen

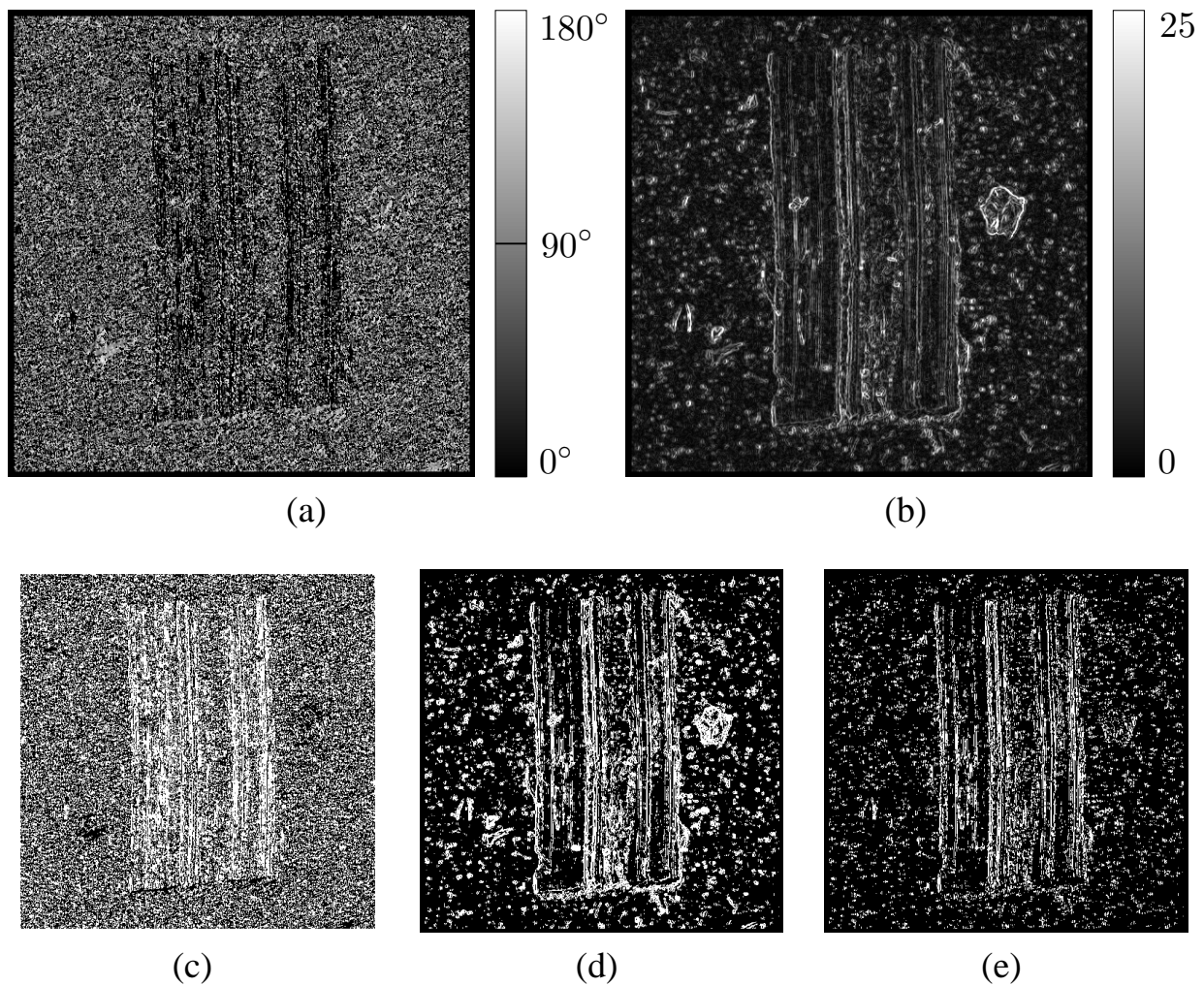


Bild 4.7: Auswertung des lokalen Gradienten am Beispiel der Spur aus Bild 4.2(b) mit $\Delta\varphi = 9^\circ$, $\Delta\theta = 10^\circ$, $\Delta\chi = 0,1$: (a) Schätzung des Riefenwinkels $\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p)$ nach Gl. (4.36); (b) Kohärenzmaß $\chi(\mathbf{x}_p)$ nach Gl. (4.36); (c) Kriterium Riefenwinkel \mathcal{T}_1 , vgl. Gl. (4.19); (d) Kriterium Kohärenzmaß \mathcal{T}_2 nach Gl. (4.38); (e) Geschätzter Riefenbereich \mathcal{T} , vgl. Gl. (4.22).

Riefen diese nicht als Kanten erkennen können.

4.3.3 Analyse lokaler Spektren

Die Analyse lokaler Spektren nutzt die Eigenschaft der Fourier-Transformation aus, dass das mit geraden Riefen korrespondierende Signal im Ortsfrequenzbereich auf zentrale Strahlen abgebildet wird [Bey94]. Für eine hinreichend kleine Umgebung $\mathcal{U}(\mathbf{x}_p)$ kann die Riefentextur durch

$$t(\mathbf{x}; \mathbf{x}_p) = r(\mathbf{x}^T \cdot \mathbf{e}(\mathbf{x}_p)) \cdot w(\mathbf{x}; \mathbf{x}_p) \quad (4.39)$$

modelliert werden, wobei $r(\cdot)$ das Riefenprofil des Werkzeugs bezeichnet,

$$\mathbf{e}(\mathbf{x}_p) = \begin{pmatrix} \cos \vartheta(\mathbf{x}_p) \\ \sin \vartheta(\mathbf{x}_p) \end{pmatrix}, \quad \vartheta(\mathbf{x}_p) \in [0^\circ; 180^\circ) \quad (4.40)$$

der lokale Normalenvektor der Riefentextur ist und $w(\mathbf{x}; \mathbf{x}_p)$ die Fensterfunktion der Umgebung $\mathcal{U}(\mathbf{x}_p)$ ist. Die Fourier-Transformation von $t(\mathbf{x}; \mathbf{x}_p)$ erhält man durch Faltung der Fourier-Transformierten des Riefenprofils

$$R(f_\xi) = \mathcal{F}\{r(\xi)\}, \quad (4.41)$$

die mit der senkrecht zum Riefenprofil gedrehten Diracschen Delta-Distribution gewichtet wird, siehe Gl. (6.52),

$$\delta(\mathbf{f}^T \cdot \mathbf{e}_\perp(\mathbf{x}_p)), \quad (4.42)$$

$$\mathbf{e}_\perp(\mathbf{x}_p) = \begin{pmatrix} -\sin \vartheta(\mathbf{x}_p) \\ \cos \vartheta(\mathbf{x}_p) \end{pmatrix} \quad (4.43)$$

und der Fourier-Transformation der Fensterfunktion $W(\mathbf{f}; \mathbf{x}_p)$ zu

$$\begin{aligned} T(\mathbf{f}; \mathbf{x}_p) &= \mathcal{F}\{t(\mathbf{x}; \mathbf{x}_p)\} \\ &= \frac{1}{(2\pi)^2} (R(\mathbf{f}^T \cdot \mathbf{e}(\mathbf{x}_p)) \cdot \delta(\mathbf{f}^T \cdot \mathbf{e}_\perp(\mathbf{x}_p)) ** W(\mathbf{f}; \mathbf{x}_p)) . \end{aligned} \quad (4.44)$$

Bei Wahl einer isotropen Fensterfunktion wird die Riefentextur demnach auf einen Strahl durch den Ursprung abgebildet, der senkrecht zu den Riefen steht. Die Begrenzung des Bildes durch eine isotrope Apertur $w(\mathbf{x})$ hat die Aufgabe, die Auswirkungen des Leckeffekts der Digitalen Fourier-Transformation (DFT) zu reduzieren [Bri88]. Wegen der impliziten Fortsetzung des Bildausschnitts in x - und y -Richtung bei der DFT entstünden sonst an den Bildkanten abrupte Übergänge, die im Ortsfrequenzbereich die Existenz von senkrechten und waagrechten Strukturen vortäuschten. Durch die Fensterung bleiben die Übergänge zwar bestehen, sie verteilen sich jedoch isotrop über den gesamten Ortsfrequenzbereich und verursachen so keine Artefakte bei der Schätzung der lokalen Orientierung.

Als Fensterfunktion kann eine beliebige Funktion mit isotroper Ausblendeigenschaft zum Rand der Umgebung \mathcal{U} hin verwendet werden; im Folgenden wird eine Gauß-Funktion

$$w(\mathbf{x}) = \exp\left(-\frac{|\mathbf{x}|^2}{2\sigma^2}\right), \quad \sigma = \frac{V}{6}, \quad (4.45)$$

eingesetzt. Diese hat gegenüber anderen üblichen Fensterfunktionen zwar den Nachteil, dass sie einen großen Anteil der Umgebung ausblendet (auf ca. 48% der Fläche einer Umgebung mit der Kantenlänge V hat die Fensterfunktion nach Gl. (4.45) Werte von weniger als 5% des Maximalwerts gegenüber nur ca. 22% Datenverlust bei kreisförmiger Fensterung einer gleich großen Umgebung [Bey94]), jedoch wird durch die stärkere Gewichtung der Mitte der Umgebung der lokale Aspekt der Schätzung der Riefenrichtung in günstiger Weise betont.

Die Konzentration der Riefen auf zentrale Strahlen durch den Ursprung der Fourier-Transformierten $T(\mathbf{f}; \mathbf{x}_p)$ wird durch Integration des Periodogramms des gefensterten Bildausschnitts

$$\hat{S}_{tt}(\mathbf{f}; \mathbf{x}_p) := \frac{1}{V^2} |T(\mathbf{f}; \mathbf{x}_p)|^2 \quad (4.46)$$

entlang Ursprungsgeraden mit dem Winkel φ ausgewertet:

$$I(\varphi; \mathbf{x}_p) = \int_{f_x=0}^{\infty} \int_{f_y=-\infty}^{\infty} \hat{S}_{tt}(\mathbf{f}; \mathbf{x}_p) \cdot \delta(\mathbf{f}^T \mathbf{e}_{\varphi\perp}) \, d\mathbf{f} \quad (4.47)$$

mit

$$\mathbf{e}_{\varphi\perp} = \begin{pmatrix} -\sin \varphi \\ \cos \varphi \end{pmatrix}. \quad (4.48)$$

Aufgrund der Punktsymmetrie des Periodogramms ist es ausreichend, nur die obere Hälfte des Periodogramms mit $f_y \geq 0$ sowie $\varphi \in [0^\circ; 180^\circ)$ zu berücksichtigen.

Zur praktischen Umsetzung der Integration für diskrete Grauwertbilder werden die Werte des Periodogramms bilinear interpoliert. Die Wahl eines geeigneten Abtastasters für den Winkel φ muss das Abtasttheorem der Computer-Tomographie berücksichtigen [Bam89]. Für die Anzahl notwendiger Abtastwerte n gilt bei Beschränkung auf den größtmöglichen kreisförmigen Ausschnitt des Periodogramms der Größe V

$$n \geq \frac{\pi}{2} \cdot BV, \quad (4.49)$$

wobei B die relative Bandbreite in Bezug auf das theoretische Maximum der Grauwertbilder ist. Bei den feinen Strukturen hoher Bandbreite, die bei Werkzeugspuren auftreten, hängt die relative Bandbreite im Wesentlichen vom Auflösungsvermögen der Optik ab und wird mit 0,9 abgeschätzt.

Einen Schätzwert für den Riefenwinkel erhält man mit dem Maximum von $I(\varphi; \mathbf{x}_p)$:

$$\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p) = \arg \max_{\varphi} \{I(\varphi; \mathbf{x}_p)\}. \quad (4.50)$$

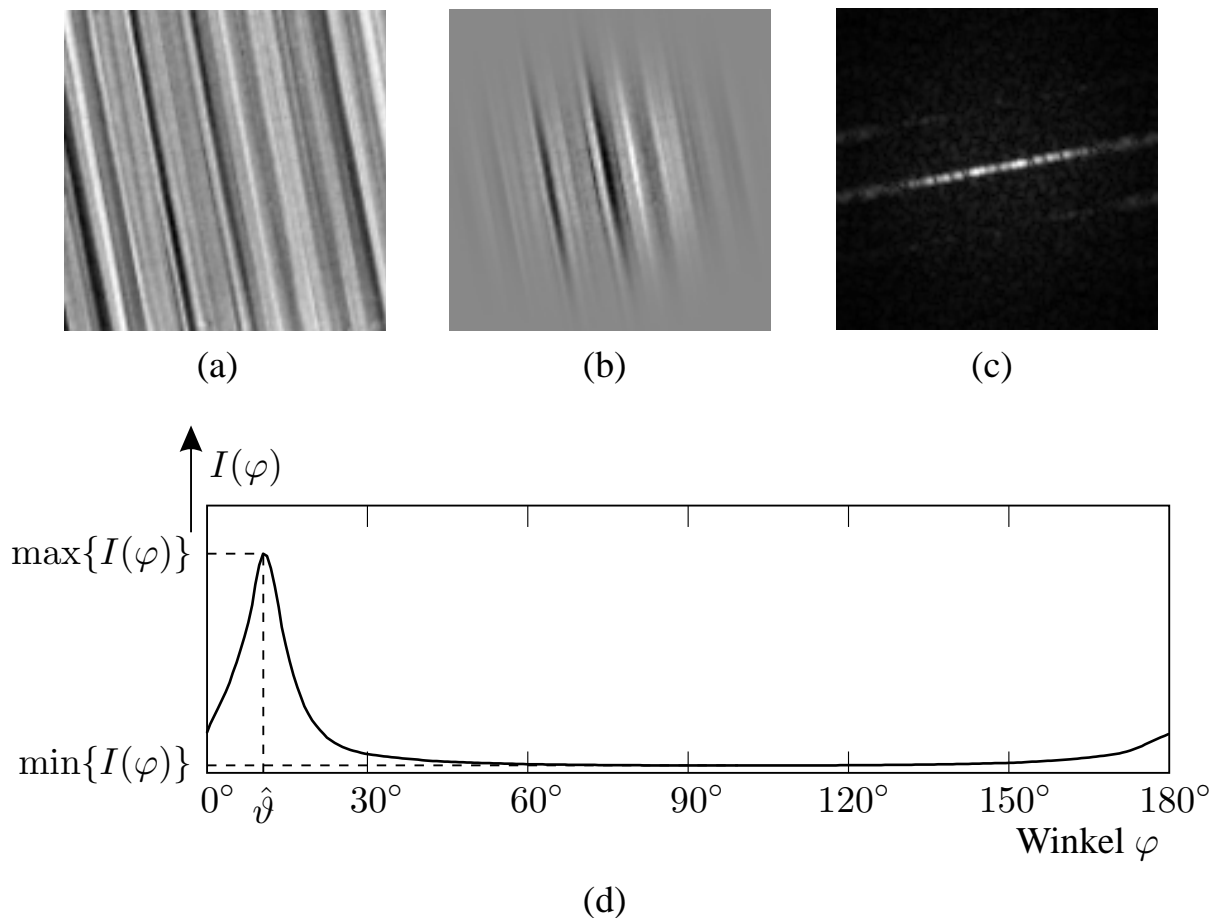


Bild 4.8: Schätzung der lokalen Orientierung durch Spektralanalyse: (a) Bildausschnitt; (b) Fensterung mit einer Gauß-Funktion nach Gl. (4.45); (c) Periodogramm; (d) Radiale Projektion des Periodogramms.

Als Kohärenzmaß kann die relative Ausprägung des Maximums von $I(\varphi; \mathbf{x}_p)$ verwendet werden

$$\chi(\mathbf{x}_p) = \frac{\max_{\varphi}\{I(\varphi; \mathbf{x}_p)\} - \min_{\varphi}\{I(\varphi; \mathbf{x}_p)\}}{\varepsilon + \max_{\varphi}\{I(\varphi; \mathbf{x}_p)\} + \min_{\varphi}\{I(\varphi; \mathbf{x}_p)\}}, \quad (4.51)$$

wobei ε eine kleine Konstante zur Vermeidung einer Division durch 0 ist.

Bild 4.8 veranschaulicht das Prinzip der Analyse lokaler Spektren anhand eines gedrehten Ausschnitts aus der Werkzeugspur von Bild 4.2(a). Die in Bild 4.8(b) durchgeführte Fensterung reduziert den Bildausschnitt auf einen isotropen Bereich um die Bildmitte, so dass das Periodogramm in Bild 4.8(c) die artefaktfreie Konzentration der Riefentextur auf die Senkrechte zur Riefenrichtung belegt. Die radiale Projektion des Periodogramms in Bild 4.8(d) zeigt folglich ein deutlich ausgeprägtes Maximum, das der Schätzung des lokalen Riefenwinkels und des Kohärenzmaßes dient.

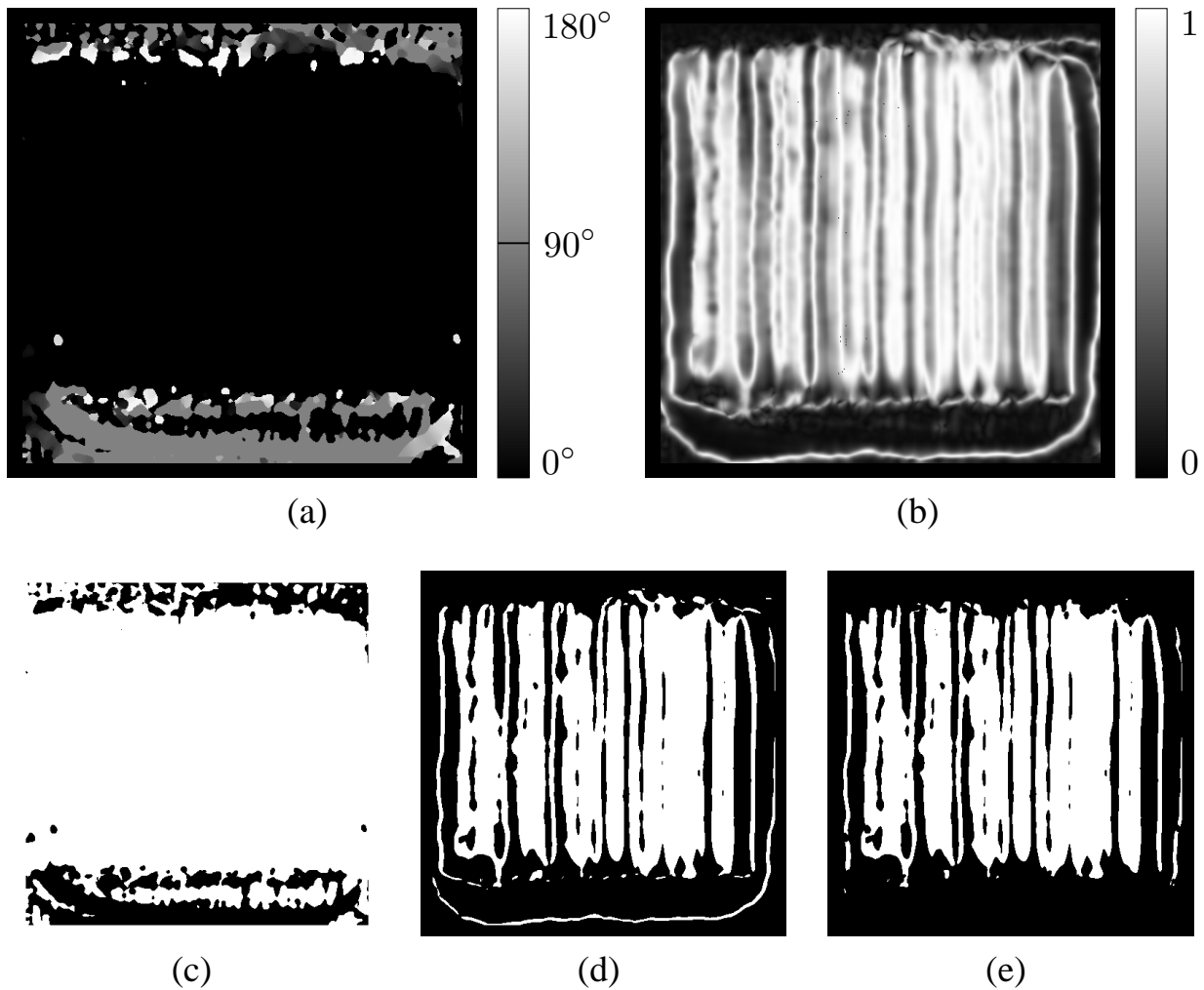


Bild 4.9: Auswertung lokaler Spektren am Beispiel der Spur aus Bild 4.2(a) mit $V = 32$, $n = 64$, $\varepsilon = 10^{-2}$, $\Delta\theta = 5^\circ$, $\Delta\chi = 0,65$: (a) Schätzung des Riefenwinkels $\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p)$ nach Gl. (4.50); (b) Kohärenzmaß $\chi(\mathbf{x}_p)$ nach Gl. (4.51); (c) Kriterium Riefenwinkel \mathcal{T}_1 , vgl. Gl. (4.19); (d) Kriterium Kohärenzmaß \mathcal{T}_2 , vgl. Gl. (4.20); (e) Geschätzter Riefenbereich \mathcal{T} , vgl. Gl. (4.22).

Die Bewertung des geschätzten Riefenwinkels $\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p)$ und des Kohärenzmaßes $\chi(\mathbf{x}_p)$ wird analog zu Abschnitt 4.3.1 durchgeführt. Wie dort ist der Wertebereich von $\chi(\mathbf{x}_p)$ durch Gl. (4.21) gegeben.

Die Bilder 4.9 und 4.10 zeigen die Anwendung des Verfahrens. Wegen der relativ großen Umgebung eines Bildpunktes, die zur Berechnung der Fourier-Transformierten benötigt wird ($V = 32$), erscheinen sowohl die Schätzung des Riefenwinkels als auch das Kohärenzmaß stark geglättet. Bei der Schätzung des Riefenwinkels werden im Spurenbereich insgesamt sehr gute Ergebnisse erzielt, insbesondere der Riefenwinkel der Spur in Bild 4.9(a) ist vollständig korrekt detektiert. Aus diesem Grund kann der zirkuläre Schwellwert für den Riefenwinkel

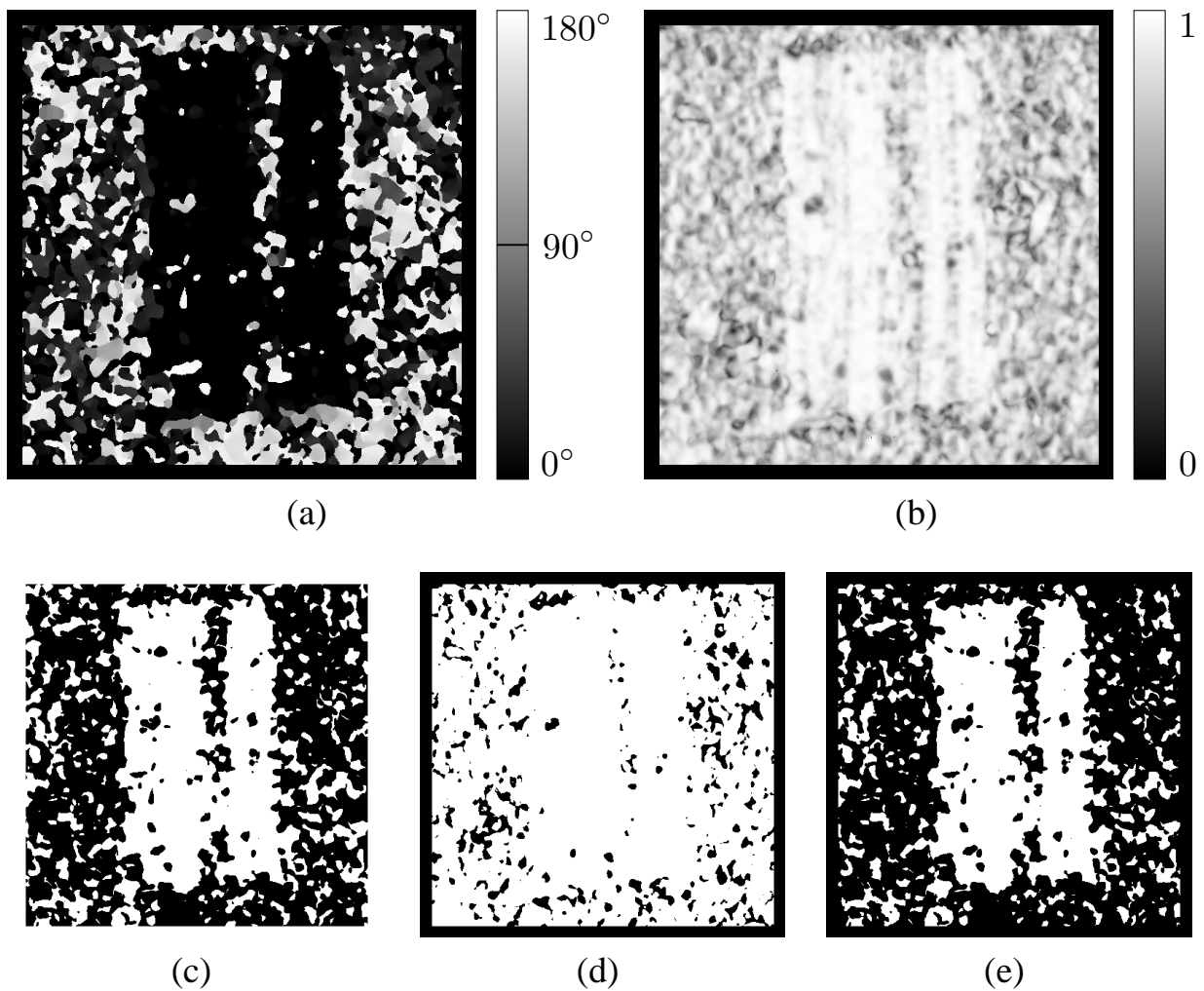


Bild 4.10: Auswertung lokaler Spektren am Beispiel der Spur aus Bild 4.2(b) mit $V = 32$, $n = 64$, $\varepsilon = 10^{-2}$, $\Delta\theta = 5^\circ$, $\Delta\chi = 0,65$: (a) Schätzung des Riefenwinkels $\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p)$ nach Gl. (4.50); (b) Kohärenzmaß $\chi(\mathbf{x}_p)$ nach Gl. (4.51); (c) Kriterium Riefenwinkel \mathcal{T}_1 , vgl. Gl. (4.19); (d) Kriterium Kohärenzmaß \mathcal{T}_2 , vgl. Gl. (4.20); (e) Geschätzter Riefenbereich \mathcal{T} , vgl. Gl. (4.22).

mit $\Delta\theta = 5^\circ$ sehr klein gewählt werden.

Im Gegensatz dazu ist die Wahl eines geeigneten Schwellwerts für das Kohärenzmaß $\Delta\chi$ schwieriger. Einerseits ist in Bild 4.9(d) die Spur nur unvollständig segmentiert, so dass ein niedrigerer Schwellwert sinnvoller wäre. Andererseits führt derselbe Schwellwert in Bild 4.10(d) zur Klassifizierung weiter Bereiche des Hintergrunds zum Spurenbereich, was auf einen zu niedrigen Schwellwert hindeutet. Eine Erklärung dieses Verhaltens ist darin zu suchen, dass die körnige Struktur des Hintergrunds von Bild 4.2(b) nach der Fensterung lokale Vorzugsrichtungen aufweist, die ähnliche Eigenschaften besitzen wie die Riefentextur.

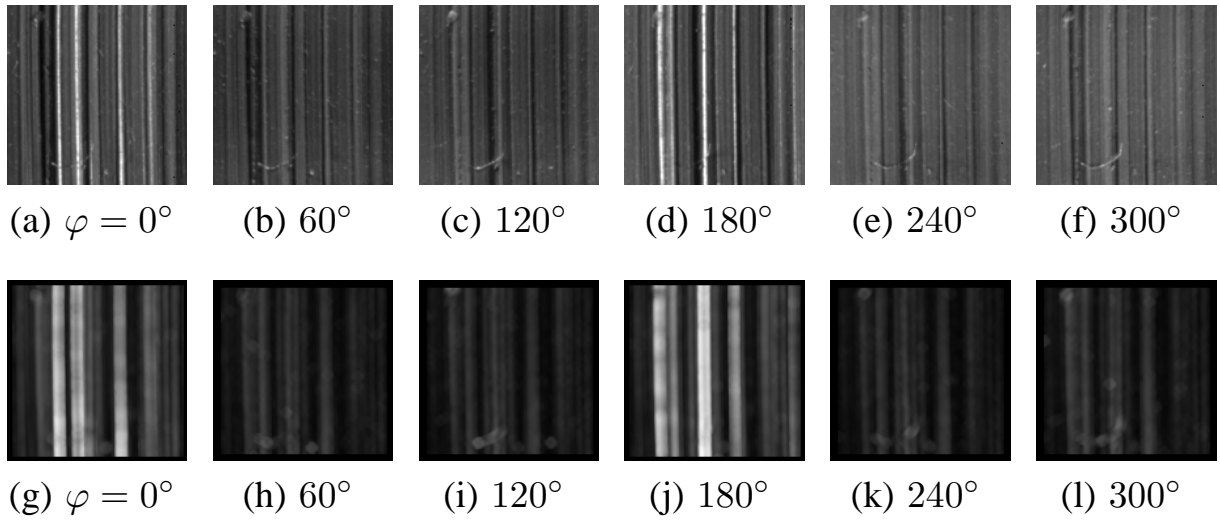


Bild 4.11: Beleuchtungsserie einer Riefenstruktur: Obere Reihe: Bilddaten; Untere Reihe: Lokale Varianz in einer kreisförmigen Umgebung mit Durchmesser $d = 9$.

4.4 Segmentierung durch Fusion von Beleuchtungsserien

Im Gegensatz zu den in Abschnitt 4.3 vorgestellten texturorientierten Verfahren, die auf der Bestimmung von Merkmalen aus Einzelbildern beruhen, werden im Folgenden Strategien zur Auswertung von Beleuchtungsserien vorgestellt. In den Bildserien wird das Azimut φ einer weit entfernten Punktlichtquelle über den gesamten Winkelbereich systematisch variiert, während der Elevationswinkel so festgelegt wird, dass in den erhaltenen Bildern Strukturen gut erkennbar sind.

Grundlage einer beleuchtungs-basierten Segmentierung ist das Verhalten der lokalen Varianz in Abhängigkeit vom Azimut der gerichteten Beleuchtung:

- Im Bereich der Riefenstruktur kann ein Maximum der lokalen Varianz $s_{\mathcal{U}}^2(\mathbf{x}_p; \varphi)$ bezüglich des Azimuts φ erwartet werden, wenn das Azimut senkrecht auf der lokalen Riefenrichtung steht. Dies ist gleichbedeutend damit, dass das Azimut parallel zum lokalen Riefenwinkel $\vartheta(\mathbf{x}_p)$ ist:

$$\vartheta(\mathbf{x}_p) \approx \varphi \bmod 180^\circ \implies s_{\mathcal{U}}^2(\mathbf{x}_p; \varphi) \xrightarrow{\varphi} \max. \quad (4.52)$$

Die lokale Varianz weist demnach für jeden Bildpunkt \mathbf{x}_p der Riefenstruktur zwei Maxima bei

$$\varphi_1 \approx \vartheta(\mathbf{x}_p) \quad \text{und} \quad \varphi_2 = (\varphi_1 + 180^\circ) \bmod 360^\circ \quad (4.53)$$

auf.

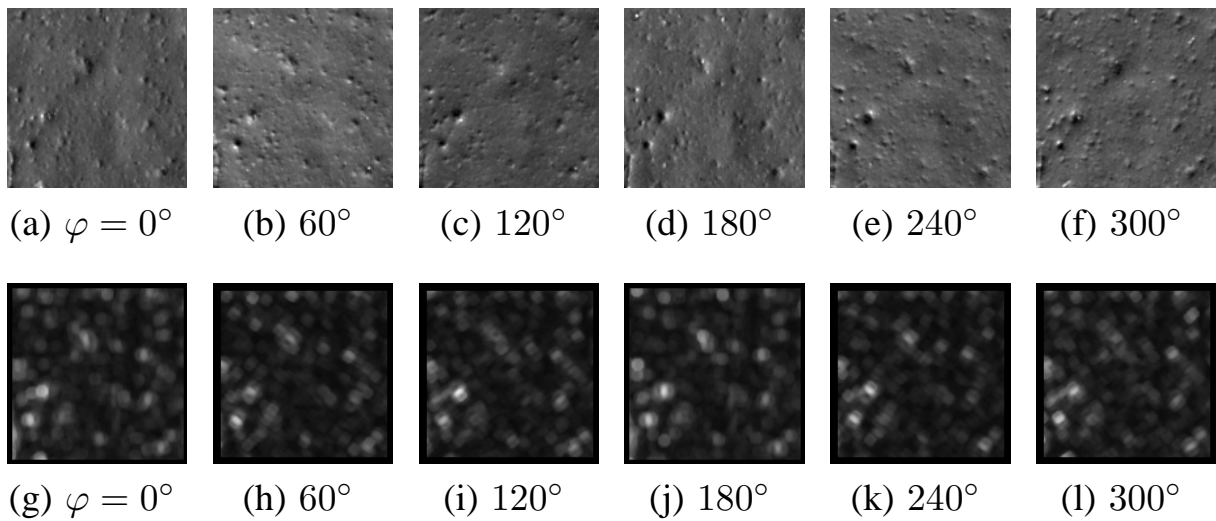


Bild 4.12: Beleuchtungsserie einer isotropen Hintergrundstruktur: Obere Reihe: Bilddaten; Untere Reihe: Lokale Varianz in einer kreisförmigen Umgebung mit Durchmesser $d = 9$.

- Im Gegensatz zur Riefenstruktur treten in einer isotropen Hintergrundstruktur Maxima der lokalen Varianz auf, ohne dass ein Zusammenhang zu einer bestimmten Beleuchtungsrichtung existiert.

Als Ansatz kann demnach die lokale Varianz $s_{\mathcal{U}}^2(\mathbf{x}_p; \varphi)$ als Funktion des Azimuts φ der Beleuchtung auf harmonische Anteile zweiter Ordnung hin untersucht werden, deren Phasenlage mit dem lokalen Riefenwinkel übereinstimmt.

Bild 4.11 zeigt als Beispiel in der oberen Reihe eine Riefenstruktur, bei der das Azimut der Beleuchtung systematisch variiert wurde. Mit einem Azimut der Beleuchtung von 0° und 180° ist ein deutliches Maximum der lokalen Varianz feststellbar. Eine Hintergrundstruktur (Bild 4.12) weist demgegenüber über sämtliche Azimutwinkel ähnliche Werte der lokalen Varianz auf. Maxima treten hier mit zufälliger Phasenlage auf.

Bei der Umsetzung des dargestellten Ansatzes lassen sich die durch das systematisch variierte Azimut erhaltenen Signaleigenschaften weitergehend ausnutzen. Das Maximum der lokalen Varianz, das für eine Beleuchtungsrichtung senkrecht zur Riefenrichtung erhalten wird, stammt aus großen Intensitätsunterschieden, die in Richtung des Azimuts der Beleuchtung auftreten, siehe Bilder 4.11(a) und (d). Die Fluktuationen senkrecht zu dieser Richtung sind dagegen auf Störungen der Riefenstruktur zurückzuführen, die keinen Beitrag zum Nutzsignal leisten und daher unterdrückt werden sollen.

4.4.1 Lokales Varianzmaß

Die Bestimmung eines geeigneten lokalen Varianzmaßes erfolgt aus diesen Gründen in zwei Stufen: Zunächst wird zur Störungsunterdrückung eine anisotrope Glättung durchgeführt, wobei die verwendete Fensterfunktion eine größere Ausdehnung senkrecht zur azimuthalen Richtung der Beleuchtung besitzt. In einem zweiten Schritt wird die lokale Varianz in einer ebenfalls anisotropen Umgebung bestimmt, die nunmehr eine größere Ausdehnung in Richtung des Azimuts der Beleuchtung aufweist. Diese Vorgehensweise stellt sicher, dass nur solche Riefenstrukturen des Spurentägers bei der Bestimmung des lokalen Varianzmaßes berücksichtigt werden, die im jeweiligen Bild der Serie quer zur lokalen Riefenrichtung beleuchtet sind.

Für die anisotrope Glättung wird ein Bild der Serie $d(\mathbf{x}; \varphi)$ mit einer Glättungsmaske $w_g(\mathbf{x})$ der Größe $V_{g,x} \times V_{g,y}$, $V_{g,x} < V_{g,y}$ gefaltet, die mittels der Rotationsmatrix

$$\mathbf{R}(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (4.54)$$

um den Winkel φ gedreht und durch

$$W_g = \sum_{x=0}^{V_{g,x}-1} \sum_{y=0}^{V_{g,y}-1} w_g(\mathbf{x}) \quad (4.55)$$

normiert wird:

$$d_g(\mathbf{x}; \varphi) = d(\mathbf{x}; \varphi) ** \left(\frac{1}{W_g} w_g(\mathbf{R}(\varphi) \cdot \mathbf{x}) \right) . \quad (4.56)$$

Die Glättungsmaske $w_g(\mathbf{x})$ ist Ergebnis der Abtastung einer anisotropen zweidimensionalen Gauß-Funktion

$$G(\mathbf{x}; \boldsymbol{\sigma}) = \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} \right)\right) \quad (4.57)$$

mit

$$\sigma_i = \frac{V_{g,i}}{6}, \quad i = x, y . \quad (4.58)$$

Durch diese Festlegung der Parameter σ_x und σ_y wird sichergestellt, dass die Maske nur Werte der Gauß-Funktion ausblendet, die kleiner als 1,1% des Maximalwerts sind. Die Verwendung einer Gauß-Funktion als Grundlage für die Maske

sorgt dafür, dass Artefakte an großen Grauwertsprüngen vermieden werden. Bei der Rotation der Glättungsmaske in Gl. (4.56) wird der Träger der rotierten Maske gegenüber $w_g(\mathbf{x})$ passend ergänzt.

Zur Bestimmung der lokalen Varianz $s_{\mathcal{U}}^2(\mathbf{x}_p; \varphi)$ wird die Umgebung $\mathcal{U}_\varphi(\mathbf{x}_p)$ mit Hilfe einer Fensterfunktion $w_v(\mathbf{x})$ definiert, die zur Vermeidung von Artefakten ebenfalls auf einer Gauß-Funktion nach Gl. (4.57) basiert und um den Beleuchtungswinkel φ gedreht wird. Um eine größere Ausdehnung dieser Umgebung in Richtung des Azimuts der Beleuchtung zu erhalten, wird hier

$$\sigma_i = \frac{V_{v,i}}{6}, \quad i = x, y \quad \text{mit} \quad V_{v,x} > V_{v,y} \quad (4.59)$$

gewählt. Das lokale Varianzmaß lässt sich dann zu

$$s_{\mathcal{U}}^2(\mathbf{x}_p; \varphi) = \frac{1}{W_v(\varphi) - 1} \sum_{\mathcal{U}_\varphi} \left(w_v(\mathbf{R}(\varphi) \cdot \mathbf{x}_p) \cdot (d_g(\mathbf{x}_p; \varphi) - \bar{d}_{\mathcal{U}_\varphi}(\mathbf{x}_p)) \right)^2 \quad (4.60)$$

bestimmen, wobei die Umgebung

$$\mathcal{U}_\varphi = \text{supp}\{w_v(\mathbf{R}(\varphi) \cdot \mathbf{x})\} \quad (4.61)$$

mit

$$\text{supp}\{f(\mathbf{x})\} := \{\mathbf{x} \mid f(\mathbf{x}) \neq 0\} \quad (4.62)$$

durch den Träger der gedrehten Fensterfunktion gegeben ist und

$$\bar{d}_{\mathcal{U}_\varphi}(\mathbf{x}_p) = \frac{1}{W_v(\varphi)} \sum_{\mathcal{U}_\varphi} w_v(\mathbf{R}(\varphi) \cdot \mathbf{x}_p) \cdot d_g(\mathbf{x}_p; \varphi) \quad \text{mit} \quad (4.63)$$

$$W_v(\varphi) = \sum_{\mathcal{U}_\varphi} w_v(\mathbf{R}(\varphi) \cdot \mathbf{x}) \quad (4.64)$$

einen mit der gedrehten Fensterfunktion gewichteten Mittelwert darstellt.

Bild 4.13 zeigt anhand zweier Beispiele aus einer Bildserie die Vorgehensweise: Für jedes Bild der Serie wird zunächst die anisotrope Glättung durchgeführt (Bilder 4.13(c) und (d)), die Fluktuationen senkrecht zur azimutalen Beleuchtungsrichtung unterdrückt. Durch die geringe Ausdehnung der Fensterfunktion in azimutaler Beleuchtungsrichtung bleibt der Kontrast ideal beleuchteter Riefenstrukturen erhalten. Das anschließend bestimmte lokale Varianzmaß (Bilder 4.13(e) und (f)) weist in denjenigen Strukturen Maxima auf, die senkrecht zur azimutalen Beleuchtungsrichtung verlaufen. Neben den Riefenstrukturen in Bild 4.13(e) sind dies auch die Ränder des Abdrucks in Bild 4.13(f).

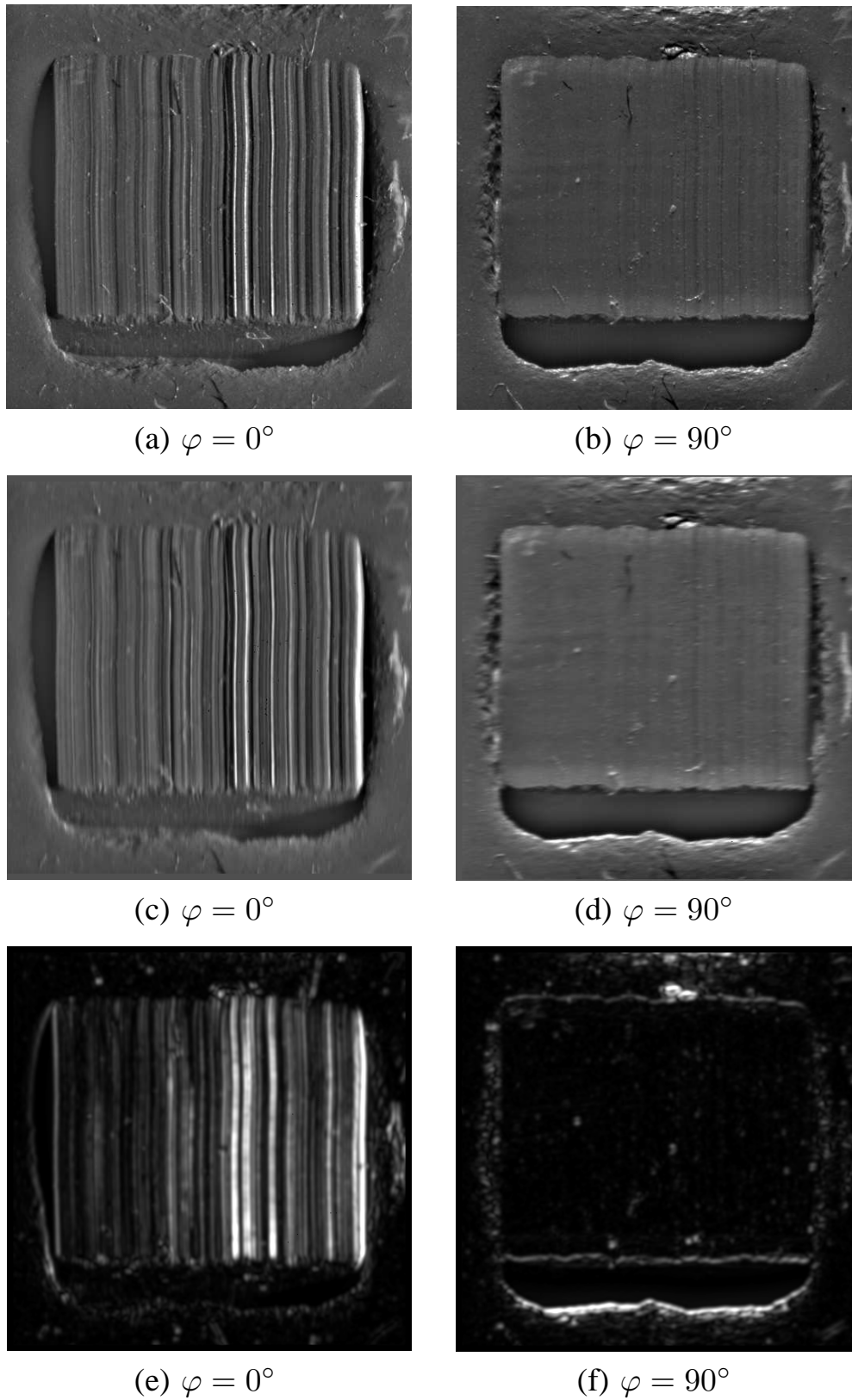


Bild 4.13: Beispiel der Varianzbestimmung in einer Beleuchtungsserie: Obere Reihe: Bilddaten; Mittlere Reihe: Geglättete Bilddaten mit $V_{g,x} = 3$, $V_{g,y} = 17$; Untere Reihe: Lokales Varianzmaß mit $V_{v,x} = 17$, $V_{v,y} = 3$.

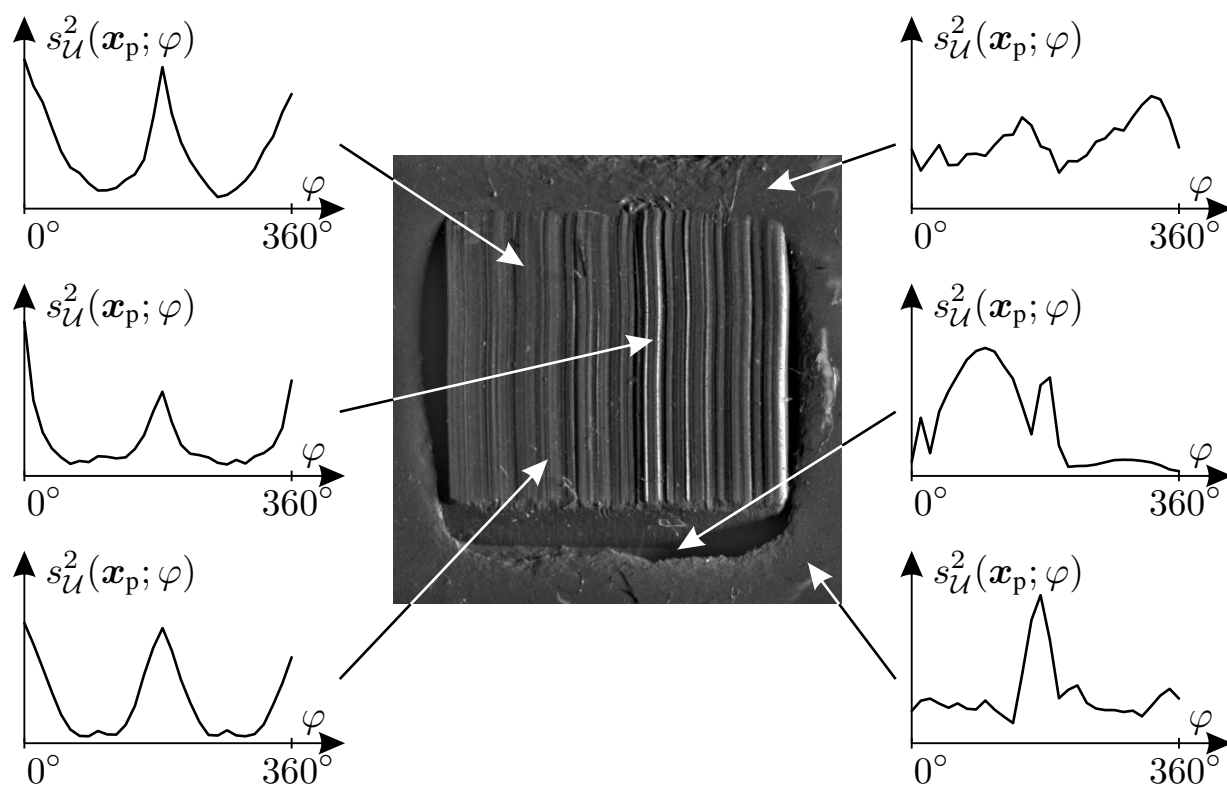


Bild 4.14: Typische Verläufe des lokalen Varianzmaßes $s_{\mathcal{U}}^2(\mathbf{x}_p; \varphi)$ für Punkte innerhalb (linke Spalte) und außerhalb (rechte Spalte) der Riefentextur.

4.4.2 Harmonische Analyse

Betrachtet man das lokale Varianzmaß $s_{\mathcal{U}}^2(\mathbf{x}_p; \varphi)$ für jeden Punkt \mathbf{x}_p als Funktion des Azimuts φ der Beleuchtung, so kann eine punktweise Auswertung der harmonischen Anteile dieser Funktionen erfolgen. Für die in Bild 4.13 gezeigte Werkzeugspur sind in Bild 4.14 die Funktionsverläufe für einige Punkte innerhalb der Riefentextur (linke Spalte) sowie in der Hintergrundtextur (rechte Spalte) skizziert.

Bei Punkten innerhalb der Riefentextur treten zwei Maxima auf, die um 180° gegeneinander verschoben sind. Die dabei auftretenden Azimutwinkel entsprechen Beleuchtungsrichtungen senkrecht zur Riefentextur. Die zweite Harmonische des lokalen Varianzmaßes ist daher stark ausgeprägt und weist eine Phasenlage auf, die vom lokalen Riefenwinkel $\vartheta(\mathbf{x}_p)$ abhängt.

Für Punkte außerhalb der Riefentextur treten Maxima dagegen je nach Oberflächenstruktur bei unterschiedlichen Azimutwinkeln auf. Die zweite Harmonische ist in der Regel weit weniger stark ausgeprägt und weist keine bevorzugte Phasenlage auf. Als Beispiel zeigt das mittlere Diagramm der rechten Spalte einen typischen Verlauf des lokalen Varianzmaßes für den Rand einer Vertiefung, die

Schlagschatten verursacht.

Zur Bestimmung der zweiten Harmonischen wird die Fourier-Transformation des lokalen Varianzmaßes $s_{\mathcal{U}}^2(\mathbf{x}_p; \varphi)$ einer äquidistanten Beleuchtungsserie von K Bildern, die mit den Azimutwinkeln

$$\varphi_k = k\Delta\varphi, \quad k \in \{0, 1, \dots, K-1\}, \quad K\Delta\varphi = 360^\circ \quad (4.65)$$

erfasst worden sind, bezüglich des Azimuts φ der Beleuchtung betrachtet:

$$\begin{aligned} S(\mathbf{x}_p; f_\varphi) &= \mathcal{F}\{s_{\mathcal{U}}^2(\mathbf{x}_p; \varphi)\} \\ &= \sum_{k=0}^{K-1} s_{\mathcal{U}}^2(\mathbf{x}_p; \varphi_k) \exp\left(-j2\pi \frac{kf_\varphi}{K}\right). \end{aligned} \quad (4.66)$$

Für die Segmentierung der Riefentextur \mathcal{T} werden zwei Kriterien definiert:

1. Mittels der Phasenlage $\angle\{S(\mathbf{x}_p; f_\varphi = 2)\}$ wird ein Schätzwert für den lokalen Riefenwinkel $\vartheta(\mathbf{x}_p)$ definiert:

$$\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p) = 180^\circ - \frac{1}{2} \cdot (\angle\{S(\mathbf{x}_p; f_\varphi = 2)\} \bmod 360^\circ). \quad (4.67)$$

Gleichung (4.67) berücksichtigt folgende Zusammenhänge zwischen der Phasenlage und dem Azimutwinkel, siehe Bild 4.15:

- Bei steigendem Azimut der Beleuchtung nimmt die auf den Wertebereich $[0^\circ; 360^\circ)$ normierte Phase ab.
- Bei einem vollen azimutalen Umlauf der Beleuchtung ist das Azimut φ 360° -periodisch, während die Phasenlage $\angle\{S(\mathbf{x}_p; f_\varphi = 2)\}$ eine Phasendifferenz von 720° aufweist.

Die Abweichung des nach Gl. (4.67) geschätzten Riefenwinkels von einem mittleren Riefenwinkel $\bar{\vartheta}$ stellt das erste Merkmal dar. Der mittlere Riefenwinkel kann als zirkulärer Mittelwert sämtlicher Riefenwinkel im Bild nach Gl. (4.17) bestimmt werden.

Beim vorliegenden Verfahren wurden jedoch mit dem Maximalwert des Histogramms von $\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p)$

$$\bar{\vartheta} := \arg \max_{\varphi} \left\{ h(\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p)) \right\} \quad (4.68)$$

bessere Ergebnisse erzielt. Als Kriterium \mathcal{T}_1 für die Zuordnung eines Bildpunktes \mathbf{x}_p zum Riefenbereich wird der in Gl. (4.19) definierte zirkuläre Schwellwertoperator verwendet.

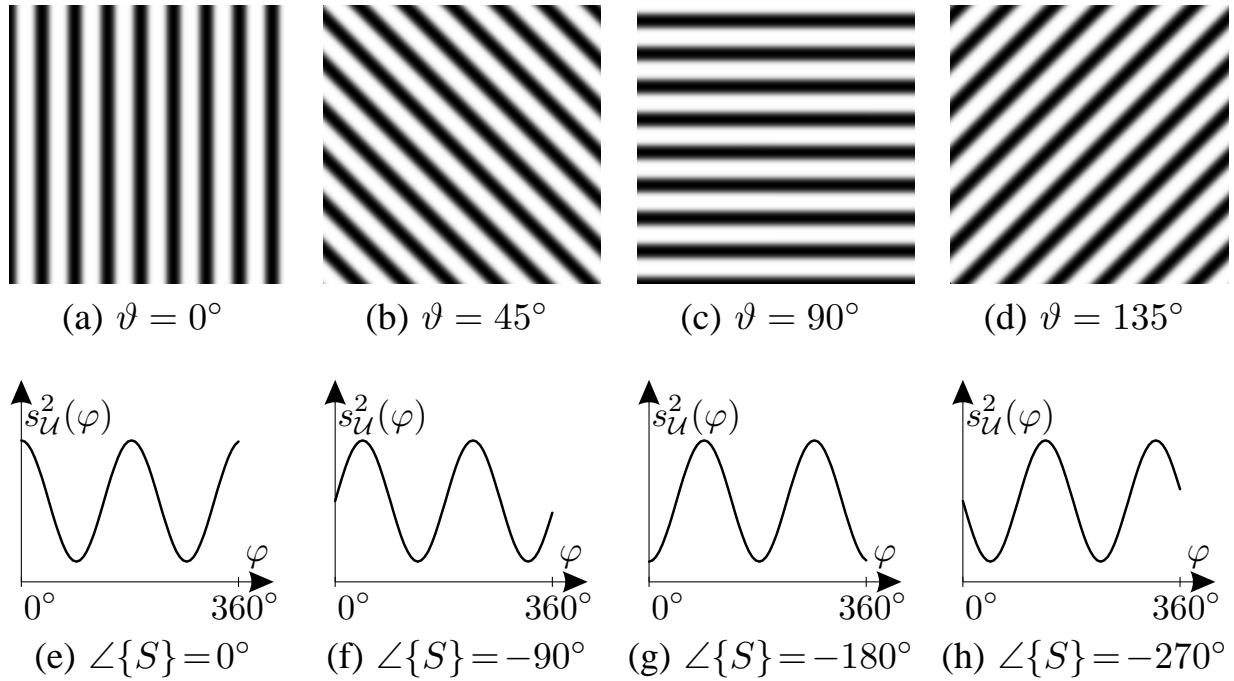


Bild 4.15: Zusammenhang zwischen Riefenwinkel ϑ und Phase $\angle\{S(f_\varphi = 2)\}$ des resultierenden lokalen Varianzmaßes: Obere Reihe: Bilddaten einer harmonischen Riefenstruktur nach [Pue99a] bei gerichteter Beleuchtung mit $\theta = 45^\circ$ $\varphi = \vartheta$; Untere Reihe: Qualitativer Verlauf des lokalen Varianzmaßes $s_{\mathcal{U}}^2(\varphi)$, darunter sind die entsprechenden Phasenlagen $\angle\{S(f_\varphi = 2)\}$ vermerkt.

2. Eine weitere zu fordernde Eigenschaft eines Bildpunktes im Riefenbereich ist die Dominanz der zweiten Harmonischen in der Fourier-Transformierten $S(\mathbf{x}_p; f_\varphi)$. Dazu wird als Merkmal der Betrag der zweiten Harmonischen im Verhältnis zur Summe der Beträge aller Frequenzanteile verwendet:

$$m_t(\mathbf{x}_p) = \frac{|S(\mathbf{x}_p; f_\varphi = 2)|}{\sum_{f_\varphi=0}^{\frac{K}{2}-1} |S(\mathbf{x}_p; f_\varphi)|} . \quad (4.69)$$

Die Zuordnung eines Bildpunktes \mathbf{x}_p zum Riefenbereich \mathcal{T}_2 erfolgt, falls ein Schwellwert Δm_t überschritten ist:

$$\mathcal{T}_2 = \{\mathbf{x}_p \mid m_t(\mathbf{x}_p) \geq \Delta m_t\} . \quad (4.70)$$

Beide Kriterien werden als Schnittmenge zu einer zuverlässigeren Schätzung des Riefenbereichs kombiniert.

Beispiele: In den Bildern 4.16 und 4.17 ist das Ergebnis des Verfahrens für die beiden Werkzeugspuren von Bild 4.2 abgebildet. Die Spur von Bild 4.2(b) wurde

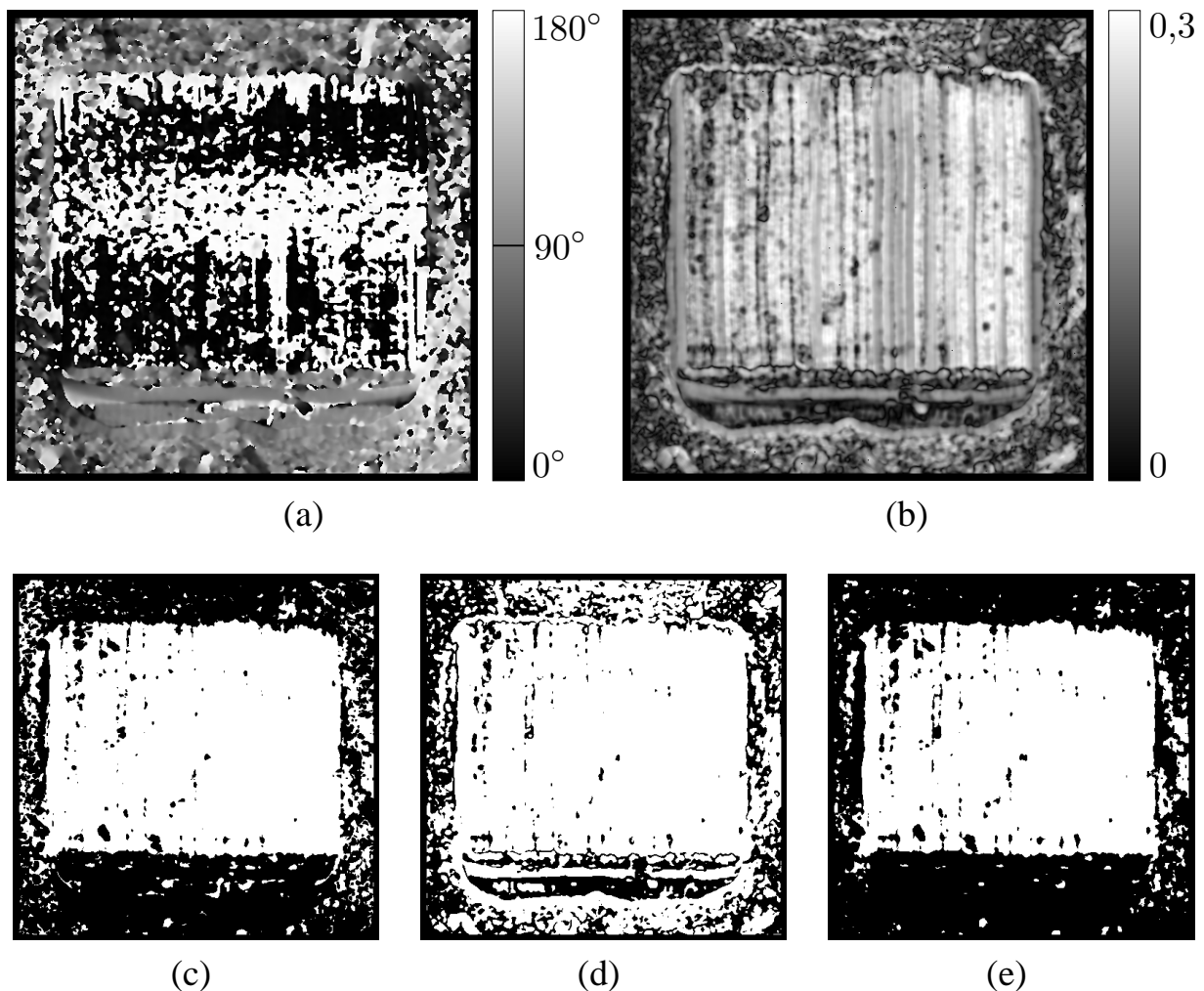


Bild 4.16: Auswertung einer Beleuchtungsserie aus $K = 30$ Bildern am Beispiel der Spur aus Bild 4.2(a) mit $V_{g,x} = V_{v,y} = 3$, $V_{g,y} = V_{v,x} = 17$, $\Delta\theta = 15^\circ$, $\Delta m_t = 0,1$: (a) Schätzung des Riefenwinkels $\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p)$ nach Gl. (4.67); (b) Relativer Betrag der zweiten Harmonischen $m_t(\mathbf{x}_p)$ nach Gl. (4.69); (c) Kriterium Riefenwinkel \mathcal{T}_1 , vgl. Gl. (4.19); (d) Kriterium Relativer Betrag der zweiten Harmonischen \mathcal{T}_2 nach Gl. (4.70); (e) Geschätzter Riefenbereich \mathcal{T} , vgl. Gl. (4.22).

zur Bilderfassung gedreht, so dass der mittlere Riefenwinkel $\bar{\vartheta} \approx 152^\circ$ beträgt. Azimutale Beleuchtungsserien mit $K = 30$ Bildern wurden erfasst.

Der Spurenbereich wird durch das Kriterium Riefenwinkel \mathcal{T}_1 zwar gut erkannt, allerdings weisen auch zahlreiche Bildpunkte der Hintergrundstruktur entsprechende Merkmale auf, was zu punktförmigen Fehldetektionen führt. Demgegenüber kann aus dem Kriterium Relativer Betrag der zweiten Harmonischen \mathcal{T}_2 alleine keine sinnvolle Aussage zur Segmentierung getroffen werden, da zu viele Punkte des Hintergrundes dem Spurenbereich zugeordnet werden. Aus der Kombination beider Kriterien ergibt sich jedoch eine sinnvolle Segmentierung. Dieses Verhalten

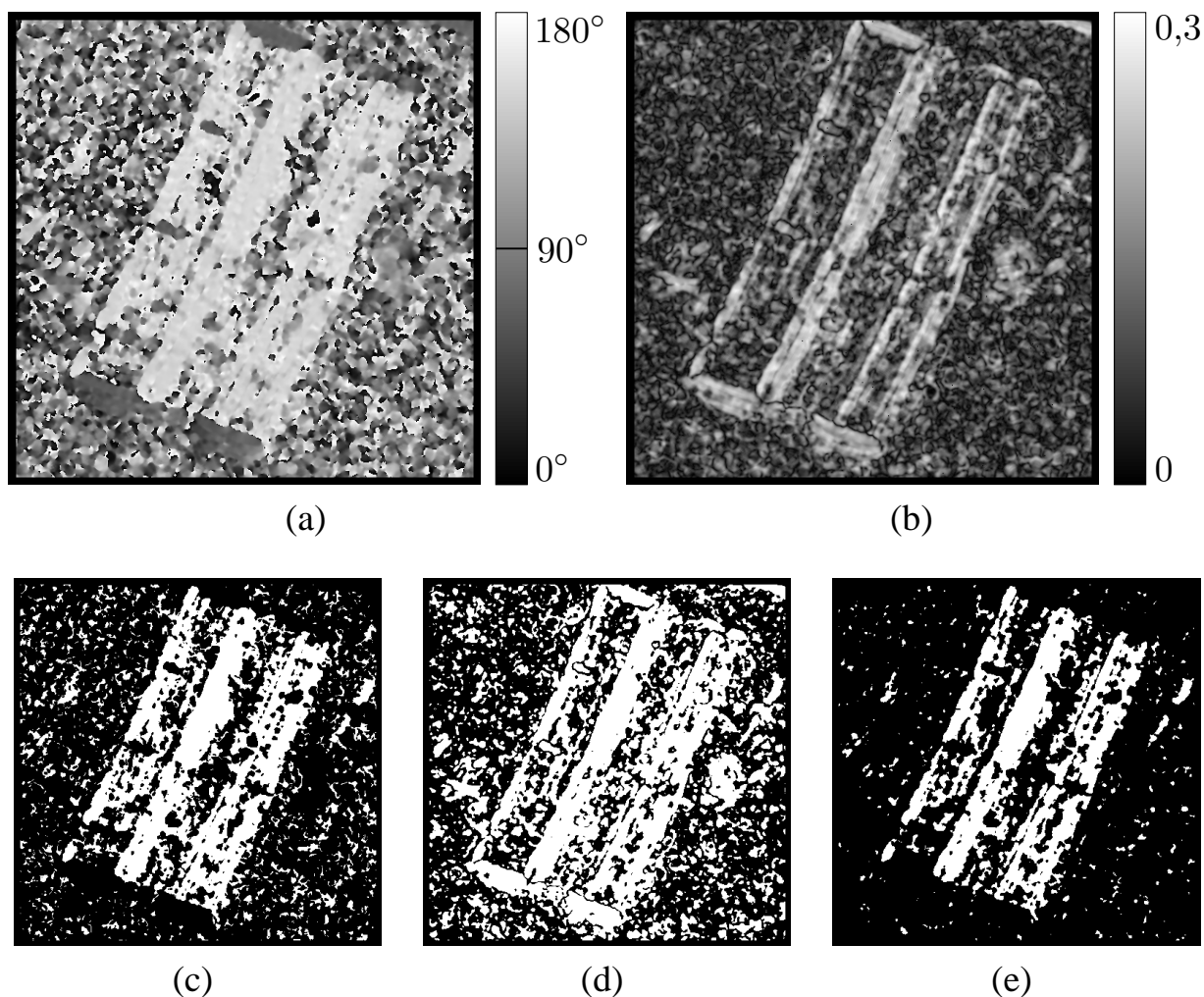


Bild 4.17: Auswertung einer Beleuchtungsserie aus $K = 30$ Bildern am Beispiel der Spur aus Bild 4.2(b) mit $V_{g,x} = V_{v,y} = 3$, $V_{g,y} = V_{v,x} = 17$, $\Delta\theta = 15^\circ$, $\Delta m_t = 0,1$: (a) Schätzung des Riefenwinkels $\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p)$ nach Gl. (4.67); (b) Relativer Betrag der zweiten Harmonischen $m_t(\mathbf{x}_p)$ nach Gl. (4.69); (c) Kriterium Riefenwinkel \mathcal{T}_1 , vgl. Gl. (4.19); (d) Kriterium Relativer Betrag der zweiten Harmonischen \mathcal{T}_2 nach Gl. (4.70); (e) Geschätzter Riefenbereich \mathcal{T} , vgl. Gl. (4.22).

ist darauf zurückzuführen, dass in der Hintergrundtextur zwar durchaus Bildpunkte mit einer zur Riefenstruktur passenden Phase der zweiten Harmonischen zu finden sind, wobei deren relativer Betrag jedoch zu gering ist, um auf die Existenz einer Riefenstruktur zu schließen. In der Riefentextur sind beide Kriterien — Phase und relativer Betrag der zweiten Harmonischen — gleichermaßen erfüllt. Insofern ist die Kombination beider Kriterien als logische Konjunktion folgerichtig und sinnvoll. \diamond

Zur Auswertung von azimutalen Beleuchtungsserien sei an dieser Stelle ange-

merkt, dass ein ganz ähnlicher Ansatz zur Inspektion geschliffener Oberflächen geeignet ist [Xin04], siehe Anhang A.1.

Vergleicht man die in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren zur Segmentierung von Riefenspuren, so kann zusammenfassend festgestellt werden:

- Sämtliche Verfahren ermöglichen eine Identifizierung des Riefenbereichs. Die Bewertung kann durch texturorientierte Verfahren in einem Einzelbild mit Grauwert- oder Profildaten durchgeführt werden; die Anwendung einer Fusionsstrategie setzt die Erfassung von Beleuchtungsserien voraus.
- Um die zur Fusion von Beleuchtungsserien erforderlichen Bildserien in angemessenen Erfassungszeiten zu gewinnen, wird eine schnelle und flexible Beleuchtungseinrichtung benötigt. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Bilderfassungsstation ist aufgrund der rechnergestützten Steuerung der Beleuchtung prädestiniert für die Erfassung solcher Bildserien, siehe Abschnitt 7.1.1.
- Bei der Erfassung von azimutalen Beleuchtungsserien ist die Gefahr, dass der Anwender eine ungünstige Einstellung des Azimuts der Beleuchtung wählt, prinzipbedingt ausgeschlossen. Der einzige verbleibende Beleuchtungsparameter, der vom Anwender festgelegt werden muss, ist der Elevationswinkel, der in einem weiten Wertebereich sinnvolle Bilddaten ergibt. Somit entbindet das Beleuchtungssystem den Anwender durch die Erfassung von Beleuchtungsserien von der Aufgabe, eine Entscheidung für eine zweckmäßige Beleuchtungsrichtung zu treffen.
- In Bezug auf die erforderliche Berechnungszeit zeigen die Verfahren deutliche Unterschiede. Während die Fusion von Beleuchtungsserien sowie das Gradientenverfahren auf einem Standard-PC in ca. 10 s abgeschlossen sind, benötigen das Varianzverfahren ca. 14 s und das Spektralverfahren ca. 45 s. Berücksichtigt man, dass die Güte der Segmentierung vor der Nachbearbeitung bei der Fusion von Beleuchtungsserien und beim Varianzverfahren den texturorientierten Strategien überlegen ist, so stellt die Fusion von Beleuchtungsserien trotz des höheren Aufwandes zur Bilderfassung das am besten geeignete Hilfsmittel für die Segmentierung von Riefenspuren dar.

Zusätzlich wurden im Rahmen dieser Arbeit Verfahren auf der Basis von Grauwert-Co-occurrence-Matrizen² (GCMen) untersucht, die das lokale Zusammenreffen von Intensitäten bewerten [Got90, Har79]. Dazu machen GCMen Aussa-

²Diese Matrizen werden auch als gray-tone spatial-dependence matrices, Verbundverteilungs-Matrizen oder Grauwertübergangs-Matrizen bezeichnet.

gen über die Häufigkeit bestimmter Kombinationen von Intensitäten mit bestimmten relativen Positionen. Zahlreiche ähnliche Ansätze werten die direkte Nachbarschaft eines Bildpunktes in vergleichbarer Weise aus. Dazu gehören z. B. Methoden auf der Grundlage von Texture Spectra [AJ01, He91], Local Binary Pattern [Oja99] und Texture Feature Coding [Hor03]. Eine wichtige Motivation für die Untersuchung dieser Bildeigenschaften liegt in der Hypothese, dass das menschliche visuelle System solche statistische Eigenschaften zweiter Ordnung zur Unterscheidung von Texturen verwendet [Jul75].

Es hat sich gezeigt, dass Methoden der Auswertung von GCMen in ähnlicher Weise wie die anderen in Abschnitt 4.3 vorgestellten texturorientierten Verfahren eine Segmentierung ermöglichen, wobei der erforderliche Rechenaufwand hier allerdings deutlich erhöht ist. Auf eine detaillierte Darstellung der Auswertung von GCMen wird daher verzichtet.

4.5 Nachbearbeitung von Segmentierungsmasken

Ergebnis der in den Abschnitten 4.3 und 4.4 vorgestellten Segmentierungsverfahren ist eine binäre Maske, die für jeden Bildpunkt eine Zuordnung zur Riefenstruktur bzw. zum Hintergrund vornimmt. Fehlklassifikationen in diesen Masken treten in der Hintergrundstruktur durch riefenartige Strukturen auf, im Riefenbereich gehen solche Fehler z. B. auf Staubkörner und deren Schatten sowie auf schwach ausgeprägte Riefenbereiche zurück. Die Masken \mathcal{T} enthalten folglich zahlreiche kleine fehlklassifizierte Bereiche.

Eine wesentliche Verbesserung der Masken kann erzielt werden, wenn Nachbarschaftsbeziehungen berücksichtigt werden. Die Plausibilität, dass ein Bildpunkt dem Riefenbereich angehört, ist sicherlich größer, wenn sämtliche Nachbarpunkte ebenfalls dem Riefenbereich zugeordnet sind, als wenn dieser Punkt als einziger in seiner Umgebung Riefenmerkmale aufweist. Für die Auswertung dieser Nachbarschaftsbeziehungen kommen mehrere Ansätze in Frage, die im Folgenden dargestellt werden.

4.5.1 Regionenwachstumsverfahren

Bei dieser auch als Bereichswachstumsverfahren bezeichneten Methodik werden in einem Intensitätsbild anfangs festgelegte Bildpunkte oder Regionen in einem iterativen Prozess so lange erweitert, bis das gesamte Bild in Regionen segmentiert ist. Eine Region kann dabei einen benachbarten Bildpunkt oder Bereich integrieren, wenn eine bestimmte Ähnlichkeit der Regionen besteht. Wesentliches

Merkmal dieser Verfahren ist, dass der Schwellwert zur Aufnahme von Punkten oder Bereichen im jeweiligen Iterationsschritt variiert werden kann und somit nicht *a priori* global definiert ist.

Zur Anwendung dieses Prinzips kommen u. a. folgende Strategien in Frage:

- Das zu segmentierende Bild wird zunächst in elementare Regionen \mathcal{A}_i gleicher Intensität eingeteilt. Benachbarte Regionen $\mathcal{A}_i, \mathcal{A}_j$ werden dann miteinander verschmolzen, wenn sie eine bestimmte Ähnlichkeit aufweisen. Diese Ähnlichkeit kann sich auf statistische Eigenschaften der Intensitäten beziehen, aber auch über die gemeinsame Grenze definiert sein [Jai89]. Der Algorithmus wird beendet, falls die Ähnlichkeit der übrig gebliebenen Regionen nicht für deren Vereinigung ausreicht.
- Ausgehend von wenigen geeignet gewählten Initialpunkten oder -regionen, die als „Keime“ für Regionen dienen und geschickt in sämtlichen Plateaus ähnlicher Eigenschaft platziert sein sollen, werden iterativ benachbarte Bildpunkte zugefügt, wenn sie eine mit dem Schwellwert Δ definierte Mindestähnlichkeit aufweisen [Gon02]. Falls der Schwellwert vor Aufteilung des gesamten Bildes von keinem der übrigen Bildpunkte mehr erreicht wird, kann der Schwellwert Δ verändert, ein neuer Startpunkt definiert oder die Definition des Ähnlichkeitsmaßes angepasst werden [Jai95]. Im letzten Schritt werden benachbarte Regionen mit hinreichender Ähnlichkeit verschmolzen. Entscheidend für das Ergebnis dieser Strategie ist die Definition geeigneter Initialpunkte, so dass dafür ausgeklügelte Methoden entwickelt worden sind [Abe82, Wah84, Wan03].

Hinsichtlich der Bewertung von Riefenspuren besitzen Regionenwachstumsverfahren allerdings einige Nachteile, was die Eignung solcher Ansätze stark einschränkt:

- Fehlstellen weisen häufig Merkmale auf, die von den erwarteten Werten im Riefen- bzw. Hintergrundbereich stark abweichen. Diese Fehlstellen werden dann als eigene Regionen klassifiziert.
- Zur Bewertung des geschätzten Riefenwinkels $\hat{\vartheta}(\mathbf{x}_p)$ ist es zweckmäßig, den mittleren Riefenwinkel $\bar{\vartheta}$ für das Ähnlichkeitsmaß zu verwenden. Der mittlere Riefenwinkel $\bar{\vartheta}$ ist allerdings eine globale Eigenschaft der Spur, was dem Grundgedanken von Regionenwachstumsverfahren widerspricht.

4.5.2 Morphologische Operatoren

Die mathematische Morphologie hat die Analyse und Bewertung der Gestalt von Objekten als Ziel [Bäs98, Jai95, Ser82, Soi98, Zam91]. Sie führt einen Mengenformalismus ein, der ursprünglich zur Bearbeitung binärer Objekte durch Mengenoperationen wie z. B. Schnittmengen, Vereinigungen etc. definiert wurde [Mat67]. Mit den hier verwendeten verallgemeinerten Definitionen wird die Bearbeitung von Intensitätsdaten ermöglicht.

Wesentlich für morphologische Operatoren ist die Definition eines *Strukturierenden Elements* (SEs), das die zu berücksichtigende Umgebung eines Bildpunktes beschreibt. Morphologische Operatoren sind folglich lokale Operatoren, bei denen über eine geeignete Form des SEs gezielt Vorwissen über relevante Strukturen eingebracht werden kann. Die im Folgenden vorgestellten Verfahren sind nichtlinear, da sie auf der Bestimmung von minimalen bzw. maximalen Intensitäten beruhen.

Erosion: Für jeden Bildpunkt \mathbf{x} eines Bildsignals $g(\mathbf{x})$ wird in einer Umgebung \mathcal{S} das lokale Minimum ausgewertet:

$$g(\mathbf{x}) \ominus s(\mathbf{x}) := \min_{\xi \in \mathcal{S}} \{g(\mathbf{x} + \xi) - s(\xi)\} . \quad (4.71)$$

Dabei bezeichnet $s(\mathbf{x})$ das SE mit dem Träger $\mathcal{S} = \text{supp}\{s(x)\}$. Mit diesem Operator können somit kleine helle Spitzen beseitigt werden, wobei gleichzeitig dunkle Bereiche größer werden.

Für binäre Signale $g_b(\mathbf{x})$ kann Gl. (4.71) vereinfacht werden. Hier ist das SE eben und stellt eine Punktmenge ohne Gewichtung dar:

$$s(\mathbf{x}) = \begin{cases} \text{const.} , & \mathbf{x} \in \mathcal{S} , \\ 0 , & \text{sonst} . \end{cases} \quad (4.72)$$

Die Erosion wird dann zur Konjunktion der um die Vektoren ξ verschobenen Binärbilder:

$$g_b(\mathbf{x}) \ominus s(\mathbf{x}) = \bigwedge_{\xi \in \mathcal{S}} g_b(\mathbf{x} + \xi) . \quad (4.73)$$

Dilatation: Die Dilatation ist das Komplement zur Erosion und verwendet das lokale Maximum:

$$g(\mathbf{x}) \oplus s(\mathbf{x}) := \max_{\xi \in \mathcal{S}} \{g(\mathbf{x} + \xi) + s(\xi)\} . \quad (4.74)$$

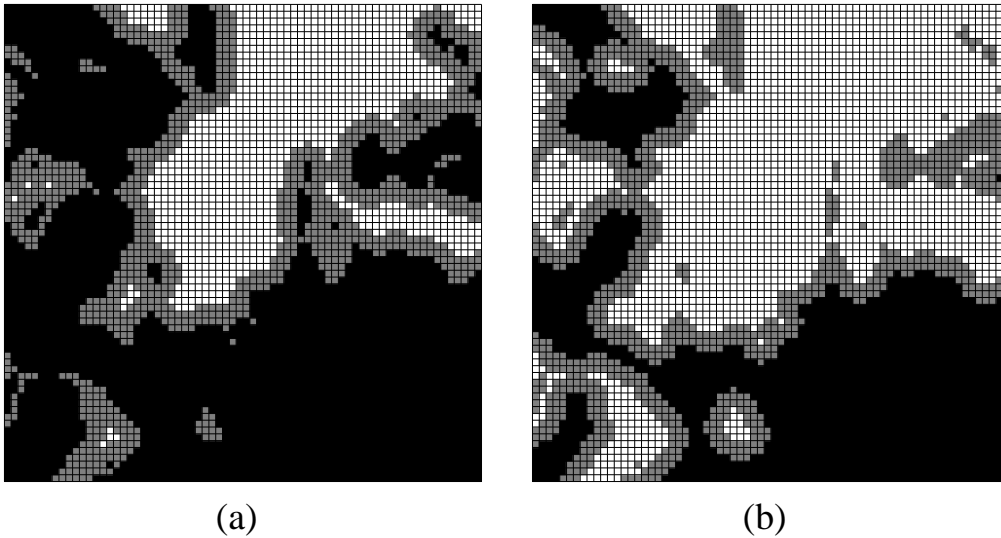


Bild 4.18: Grundlegende morphologische Operatoren für Binärbilder: (a) Erosion: Vom ursprünglichen Objekt (weiße und graue Bildpunkte) werden die grauen Bildpunkte entfernt; (b) Dilatation: Dem ursprünglichen Objekt (weiße Bildpunkte) werden die grauen Bildpunkte zugefügt.

Durch diesen Operator werden kleine dunkle Stellen eliminiert, während helle Bereiche an Größe zunehmen.

Die Anwendung der Dilatation auf binäre Signale $g_b(\mathbf{x})$ entspricht der Disjunktion der um die Vektoren ξ verschobenen Binärbilder:

$$g_b(\mathbf{x}) \oplus s(\mathbf{x}) = \bigvee_{\xi \in \mathcal{S}} g_b(\mathbf{x} + \xi) . \quad (4.75)$$

Bild 4.18 zeigt die Anwendung beider Operatoren auf ein Binärbild. Dazu wurde das in Bild 4.19 skizzierte SE mit

$$\mathcal{S} = \{ \mathbf{x} \mid x^2 + y^2 \leq r^2 \} \quad (4.76)$$

verwendet. In diesem Fall, wenn das SE symmetrisch zum Bezugspunkt $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ ist, sind Erosion und Dilatation äquivalent zu den Minkowski-Operatoren Subtraktion bzw. Addition [Ser82].

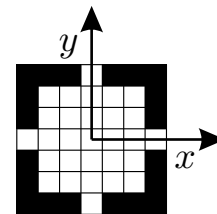


Bild 4.19: An eine Kreisform angenähertes SE nach Gl. (4.76) mit $r = 3$.

Die Wahl eines näherungsweise kreisförmigen SEs stellt sicher, dass — trotz unvermeidbarer Diskretisierungsfehler — bei einer gegebenen Strukturgröße ein möglichst isotropes Verhalten der morphologischen Operatoren erzielt wird. Das SE nach Gl. (4.76) besitzt mit $r = 3$ eine im Vergleich zu den Koordinatenrichtungen um 5,7% geringere Ausdehnung in einer um 45° geneigten Richtung.

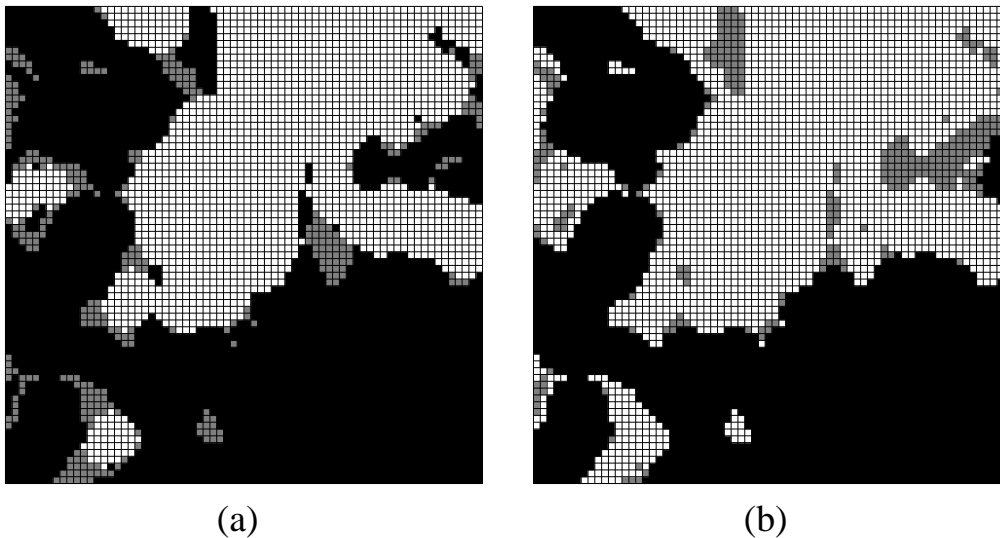


Bild 4.20: Morphologische Operatoren für Binärbilder: (a) Öffnung: Vom ursprünglichen Objekt (weiße und graue Bildpunkte) werden die grauen Bildpunkte entfernt; (b) Schließung: Dem ursprünglichen Objekt (weiße Bildpunkte) werden die grauen Bildpunkte zugefügt.

Öffnung und Schließung: Die Erosion eines Bildes führt aufgrund der Nichtlinearität der Transformation meist zu einer irreversiblen Änderung des Bildinhalts. Durch eine Dilatation des erodierten Bildes können jedoch die im Verhältnis zum SE groben hellen Strukturen des Originalbildes weitgehend wiederhergestellt werden. Dabei werden feine helle Strukturen unterdrückt, während dunkle Strukturen erhalten bleiben. Die entstehende Operation wird als morphologische Öffnung bezeichnet:

$$g(\mathbf{x}) \circ s(\mathbf{x}) := (g(\mathbf{x}) \ominus s(\mathbf{x})) \oplus s(-\mathbf{x}) . \quad (4.77)$$

Um das Originalbild möglichst genau wiederzugewinnen, ist bei der Dilatation für allgemeine SEe eine Punktspiegelung am Bezugspunkt erforderlich.

Als Komplement zur Öffnung ist die morphologische Schließung als Dilatation und nachfolgende Erosion definiert:

$$g(\mathbf{x}) \bullet s(\mathbf{x}) := (g(\mathbf{x}) \oplus s(\mathbf{x})) \ominus s(-\mathbf{x}) . \quad (4.78)$$

Die Wirkung der Schließung besteht in der Unterdrückung feiner dunkler Strukturen unter Beibehaltung heller Strukturen.

Bild 4.20 veranschaulicht die Anwendung beider Operatoren auf Binärbilder. Dabei wurde dasselbe strukturierende Element wie in Bild 4.18 verwendet.

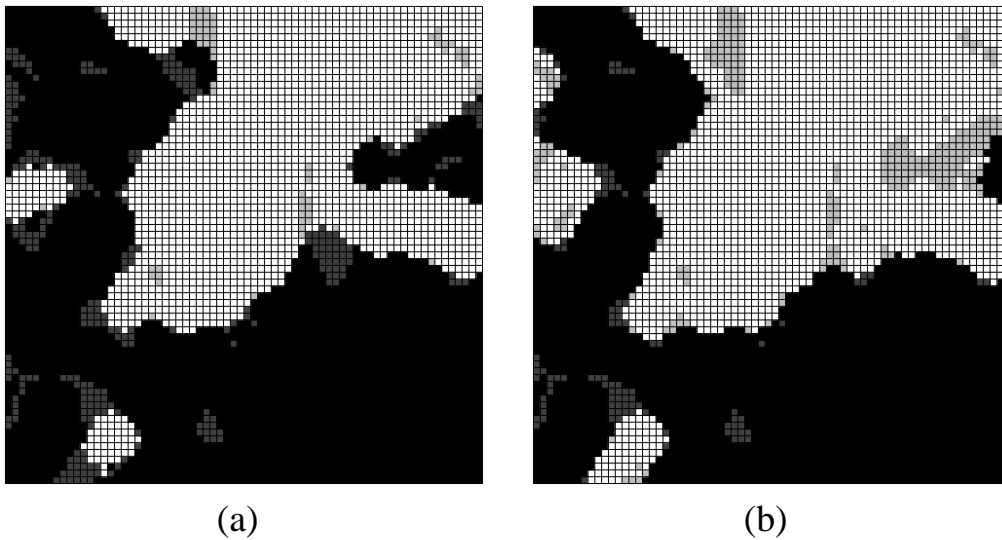


Bild 4.21: Sukzessive Öffnung und Schließung: (a) Schließung nach Öffnung; (b) Öffnung nach Schließung; Hinzugekommene Bildpunkte sind jeweils hellgrau, entfernte Bildpunkte dunkelgrau markiert.

Aufgrund der Eigenschaft, dass Öffnungen kleine helle Bereiche entfernen, während Schließungen durch Elimination kleiner dunkler Bereiche Bildpunkte hinzufügen, gehorchen diese Operatoren folgender Ordnungsbeziehung (Extensivität) [Soi98]:

$$g(\mathbf{x}) \circ s(\mathbf{x}) \leq g(\mathbf{x}) \leq g(\mathbf{x}) \bullet s(\mathbf{x}) . \quad (4.79)$$

Mit sukzessiven Öffnungen und Schließungen lassen sich sowohl kleine dunkle als auch kleine helle Bereiche entfernen. Durch geeignete Gestalt des SEs wird eine Art Abrundung der Strukturen erzielt. Abhängig von der zuerst ausgeführten Operation werden helle (Öffnung nach Schließung) oder dunkle (Schließung nach Öffnung) Bereiche stärker gewichtet, siehe Bild 4.21. Das erhaltene Signal kann als „oberer“ bzw. „unterer Mittelwert“ interpretiert werden [Sal90].

Flächenöffnung und -schließung: Dieser Ansatz beruht auf der Feststellung, dass Fehldetektionen häufig als kleine zusammenhängende Bereiche auftreten. Eine Nachbearbeitung kann daher auf der Bewertung der Größe von Gebieten basieren, die gleich klassifiziert worden sind. Diese Operation wird als Flächenöffnung bzw. -schließung [Soi98] oder Zusammenhanganalyse [Ser82] bezeichnet.

Für binäre Signale ist die Flächenöffnung $\gamma_n(\cdot)$ die Vereinigungsmenge aller zusammenhängenden Regionen \mathcal{A}_i mit mindestens der Größe n , in denen das Sig-

nal $g(\mathbf{x})$ nicht verschwindet:

$$\gamma_n(g(\mathbf{x})) = \bigcup_i \{ \mathbf{x} \mid \mathbf{x} \in \mathcal{A}_i, |\mathcal{A}_i| \geq n \} \quad (4.80)$$

mit

$$g(\mathbf{x}_1) \neq 0, \quad \mathbf{x}_1 \in \mathcal{A}_i \quad \wedge \quad (4.81)$$

$$g(\mathbf{x}_2) = 0, \quad \mathbf{x}_2 \notin \mathcal{A}_i, \quad \|\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1\| < 2. \quad (4.82)$$

Die komplementäre Operation ist die Flächenschließung $\phi_n(\cdot)$:

$$\phi_n(g(\mathbf{x})) = \bigcap_i \{ \mathbf{x} \mid \mathbf{x} \notin \check{\mathcal{A}}_i, |\check{\mathcal{A}}_i| \geq n \}, \quad (4.83)$$

wobei $\check{\mathcal{A}}_i$ zusammenhängende Regionen bezeichnet, in denen das Signal $g(\mathbf{x})$ verschwindet:

$$g(\mathbf{x}_1) = 0, \quad \mathbf{x}_1 \in \check{\mathcal{A}}_i \quad \wedge \quad (4.84)$$

$$g(\mathbf{x}_2) \neq 0, \quad \mathbf{x}_2 \notin \check{\mathcal{A}}_i, \quad \|\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1\| < 2. \quad (4.85)$$

Die sukzessive Ausführung beider Operationen eliminiert kleine helle und kleine dunkle Regionen. Im Gegensatz zur Kombination der Operatoren Öffnung und Schließung ist die Reihenfolge der Ausführung hier kommutativ. Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass bei der Flächenöffnung und -schließung Gebiete \mathcal{A}_i unverändert bleiben, die größer als das Mindestmaß n sind.

In Bezug auf die Zuordnung von Flächenöffnung und -schließung zu einer Klasse von Operatoren kann eine interessante Ambivalenz festgestellt werden: Während die oben dargestellten morphologischen Operatoren lokal sind, da sie auf den Umgebungsbereich des SEs beschränkt bleiben, kann die Flächenöffnung wegen ihrer Eigenschaft, den Zusammenhang von Bildsegmenten zu erhalten, der Klasse der topologischen Operatoren und somit den globalen Operatoren zugeordnet werden [Kle96].

Andererseits können die Flächenöffnung und -schließung auf eine Vereinigung aller Öffnungen bzw. Schnittmenge aller Schließungen mit zusammenhängenden SEs $s_i(\mathbf{x})$ zurückgeführt werden, deren Träger \mathcal{S}_i die Größe n aufweisen [Soi98]:

$$\gamma_n(g(\mathbf{x})) = \bigvee_i g(\mathbf{x}) \ominus s_i(\mathbf{x}), \quad |\mathcal{S}_i| = n. \quad (4.86)$$

Implementierung: Die Nachbearbeitung der Segmentierungsmasken gliedert sich in zwei Teilschritte:

- Zunächst werden kleine Gebiete im Riefenbereich und im Hintergrund durch Flächenöffnung und -schließung entfernt. Die Bilder 4.22(a) und (b) zeigen das Ergebnis am Beispiel der in den Bildern 4.16(e) und 4.17(e) abgebildeten Schätzungen des Riefenbereichs.
- Um die Kompaktheit des Riefenbereichs zu erhöhen, wird das Ergebnis anschließend mit einer Kombination von Schließung und Öffnung bearbeitet. Dazu wird ein ebenes SE in Form einer nach Gl. (4.54) um den mittleren Riefenwinkel $\bar{\vartheta}$ gedrehten Ellipse mit dem Träger

$$\mathcal{S} = \left\{ \mathbf{x} \mid \boldsymbol{\xi} = \mathbf{R}(\bar{\vartheta}) \cdot \mathbf{x}, \frac{\xi^2}{S_x^2} + \frac{\eta^2}{S_y^2} \leq 1 \right\} \quad (4.87)$$

verwendet. Durch die anisotrope Gestalt des SEs wird die Bildung zusammenhängender Strukturen senkrecht zur Riefenrichtung begünstigt. Dies verbessert die korrekte Klassifizierung von Bereichen der Riefentextur mit schwach ausgeprägten Riefen. Die Bilder 4.22(c) und (d) zeigen das Ergebnis dieses Schritts.

Die Anwendung der nachbearbeiteten Segmentierungsmasken ist beispielhaft in Bild 4.23 dargestellt. Besonders für die in der oberen Reihe gezeigte Spur ergibt die Segmentierung eine gute Trennung der Teiltexturen. Fehlstellen in der Riefenstruktur werden korrekt klassifiziert. Außerhalb des Riefenbereichs werden kleinere Bereiche fälschlich als Riefen klassifiziert, die allerdings ebenfalls eine riefenartige Textur aufweisen.

Um die Qualität der Verfahrensweise bewerten zu können, wurden die Spurenbilder von einem Experten segmentiert. Bild 4.24 zeigt die Unterschiede zur automatisierten Segmentierung. Differenzen treten bei der stark ausgeprägten Spur vor allem an den Rändern auf. Für die schwach ausgeprägte Spur sind die Unterschiede stärker, allerdings ist auch die visuelle Beurteilung dieser Spur nicht immer eindeutig.

Zur automatisierten Segmentierung sei abschließend erwähnt, dass die hier dargestellte Vorgehensweise der Segmentierung mittels Bildserien in kompakter Form als Aufgabe der Bildfusion auf einer Symbolebene dargestellt werden kann [Pue02]. Dazu werden die an die Maske gestellten Anforderungen als additive Energieterme formuliert und die Gesamtenergie minimiert. Die Energieterme werden derart gestaltet, dass der Wert jedes Terms abnimmt, je besser die jeweilige Eigenschaft dem gewünschten Ergebnis entspricht. Wünschenswerte Eigenschaften



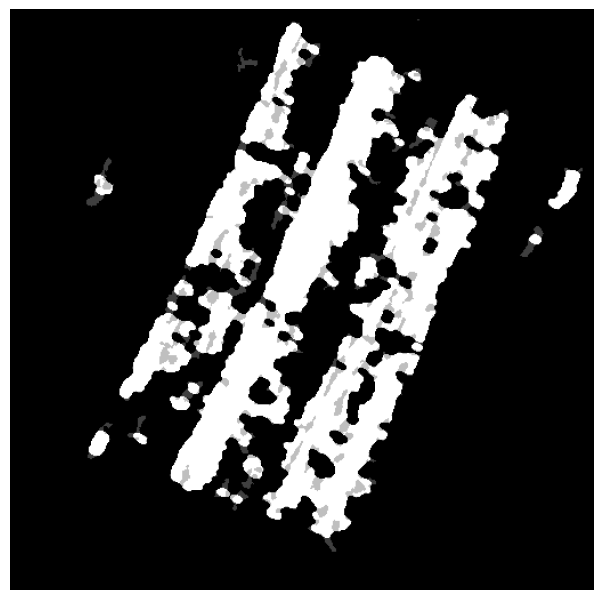
(a)



(b)

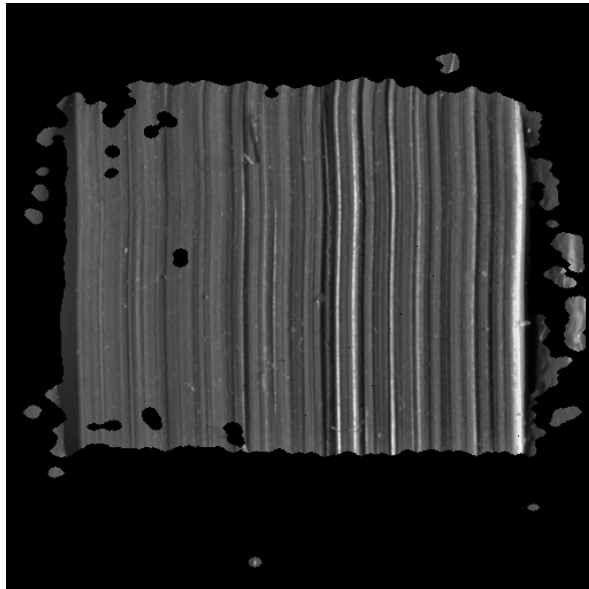


(c)

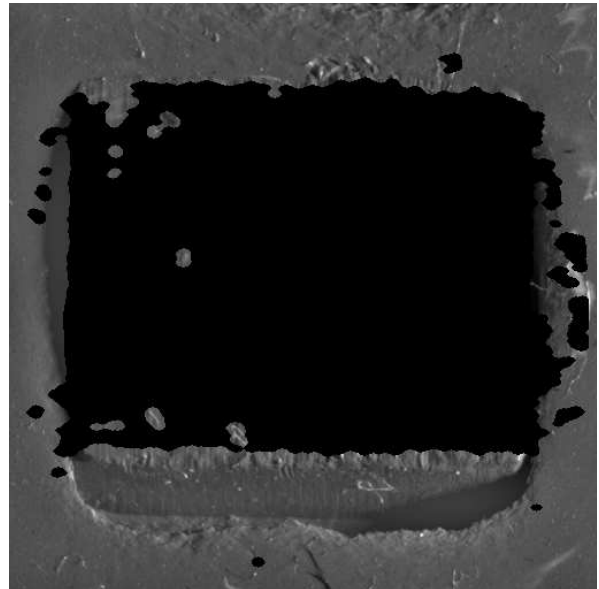


(d)

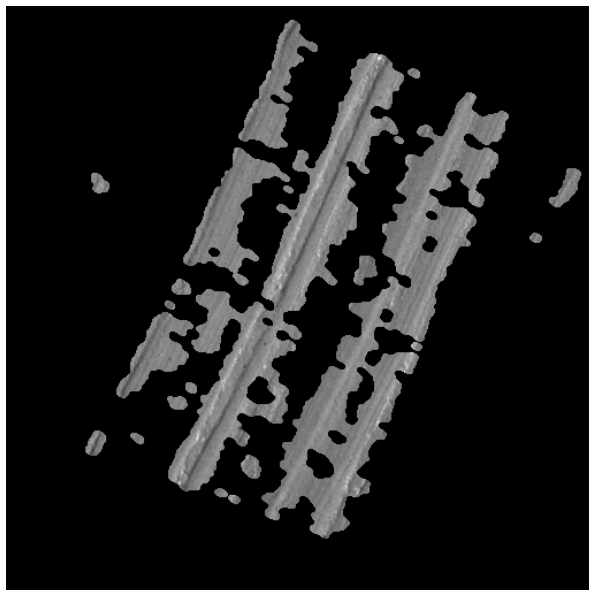
Bild 4.22: Nachbearbeitung der Masken 4.16(e) und 4.17(e): (a), (b) Flächenöffnung und -schließung mit $n = 100$; (c), (d) Schließung und Öffnung mit $S_x = 11$, $S_y = 7$; In den Verarbeitungsschritten hinzugekommene Bildpunkte sind jeweils hellgrau, entfernte Bildpunkte dunkelgrau markiert.



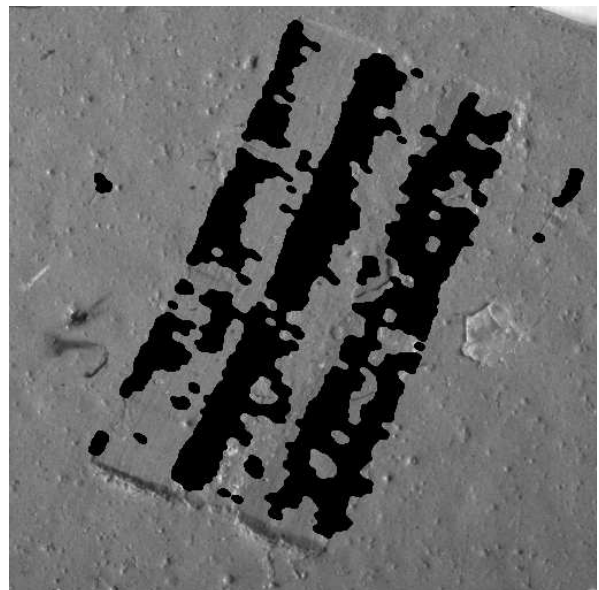
(a)



(b)



(c)



(d)

Bild 4.23: Segmentierungsergebnisse: (a), (b) Riefenbereich und Hintergrund der Werkzeugspur in Bild 4.2(a); (c), (d) Riefenbereich und Hintergrund der gedrehten Spur aus Bild 4.2(b).

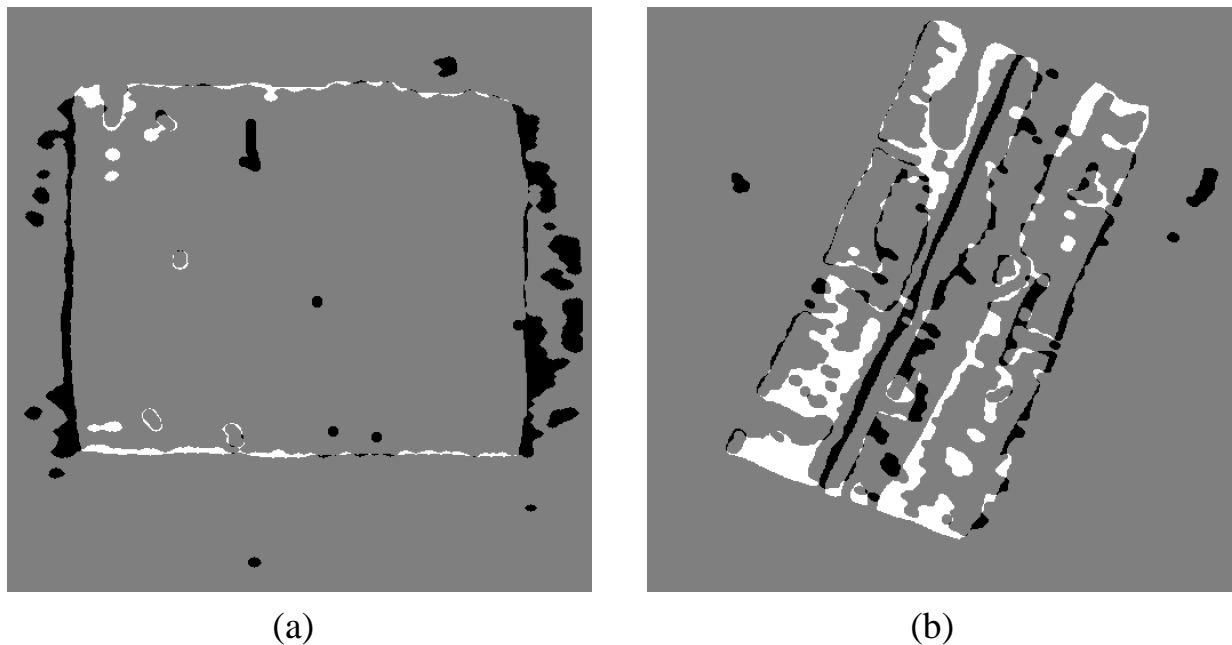


Bild 4.24: Differenzbilder der in Bild 4.23 abgebildeten automatisierten Segmentierung zu einer visuellen Beurteilung. Vom automatisierten Verfahren falsch segmentierte Punkte der Riefen- bzw. Hintergrundstruktur sind weiß bzw. schwarz markiert.

der Maske sind z. B. das fehlende Auftreten kleiner Riefen- bzw. Hintergrundbereiche sowie eine gewisse Kompaktheit des Riefenbereichs [Pue01a]. Die Lösung des Problems wird durch Minimierung der Gesamtenergie erhalten. Da die Methode der Energieminimierung in den Abschnitten 3.2.1 und 5.2.2.2 ausführlich dargestellt ist, wird hier auf die Vertiefung eines solchen Ansatzes verzichtet.

5 Merkmalsextraktion

Die Aufgabe der Merkmalsextraktion besteht darin, aus den segmentierten Riefenspuren für das einzelne Werkzeugexemplar charakteristische Merkmale in Form eines eindimensionalen Signals, der *Signatur*, zu gewinnen. Dieser Schritt der Signalverarbeitung hat dabei folgende Anforderungen zu erfüllen:

- Für den Spurenvergleich relevant ist das Profil der Individualmerkmale eines Werkzeugexemplars, das die Abbildung der Werkzeugschneide darstellt. Die Merkmalsextraktion hat daher die Aufgabe, diese für das Werkzeugexemplar charakteristische Signatur als eindimensionales Signal aus dem segmentierten Spurenbereich zu gewinnen.
- Die Extraktion von Signaturen aus dem gesamten segmentierten Spurenbereich bietet den Vorteil, dass lokale Störungen der Riefentextur unterdrückt werden können. Solche Störungen verfälschen die Spur nur in kleinen Teilbereichen, was durch geeignete Berücksichtigung der gesamten Riefenlänge erkannt und gedämpft werden kann.
- Auch aus Gründen der ressourcensparenden Speicherung und des effizienten Vergleichs der Daten soll nicht das zweidimensionale Bild der Spuren selbst für einen Vergleich herangezogen werden. Die Extraktion von Signaturen ermöglicht somit eine aufgabengerechte Datenreduktion.
- Die segmentierte Riefentextur enthält außer den Individualmerkmalen des Werkzeugs Systemmerkmale, die für einen Vergleich nicht verwendet werden dürfen. Diese Signalanteile müssen daher entfernt werden.

5.1 Gerade Riefen

Bei geraden Riefen, wie sie auf unverformten Geschossen auftreten, besteht der einzige Modellparameter im Riefenwinkel ϑ der Sekundärspuren, siehe Abschnitt 2.1. Aufgabe der Merkmalsextraktion ist hier, den globalen Riefenwinkel zu schätzen und eine Projektion der Intensitätswerte in Richtung der Riefen durchzuführen. Ein dazu geeignetes Verfahren beruht auf der Auswertung der radialen Projektion des Periodogramms des Riefenbildes [Bey94, Pue99a].

Durch geeignete Filterung der Grauwerte in Riefenrichtung erhält man die Projektion $p(\varrho)$ als mittleres Profil der Riefen. Für die Filterung kommen die gleichen Verfahren in Frage, die auch für die Störungsunterdrückung in Grauwertbildern verwendet werden. Die Auswahl geeigneter Verfahren hängt daher stark von der Art der auftretenden Störungen ab. Im Wesentlichen kommen die arithmetische Mittelung sowie die Bestimmung des Medians in Frage.

5.2 Begradigung gekrümmter Riefen

Schwieriger gestaltet sich die Verfolgung der Riefen, wenn die Riefenrichtung lokal variiert. Hier muss für jeden Bildpunkt der lokale Riefenwinkel bestimmt werden, um eine Begradigung der Riefen zu ermöglichen. Dazu kommen im Wesentlichen die lokale Orientierungsanalyse und modellbasierte Verfahren in Frage.

5.2.1 Lokale Orientierungsanalyse

In ähnlicher Weise wie bei der Segmentierung des Spurenbereichs in Abschnitt 4.2 kann die lokale Riefenrichtung anhand spezifischer lokaler Merkmale bestimmt werden. Der Vorteil solcher Verfahren liegt darin, dass keine Annahmen über die Entstehung der Riefentextur getroffen werden müssen. Für die Anwendbarkeit des Verfahrens müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein [Bey94]:

- Nur eine Riefenschar liegt vor.
- Die Riefen verlaufen knickfrei, d. h. die Riefenrichtung in einer betrachteten lokalen Umgebung ist hinreichend konstant.
- Die Riefen schneiden sich nicht.

Zur praktischen Umsetzung der lokalen Orientierungsanalyse muss die Riefentextur eine hinreichend ausgeprägte Anisotropie aufweisen, so dass sie durch Verfahren z. B. auf der Basis der Richtungsabhängigkeit der Grauwertvarianz, richtungsabhängiger Fourieranalysen oder Grauwertgradienten detektiert werden kann.

Eine lokale Orientierungsanalyse ist bei vielen technisch relevanten Texturen möglich. So kann z. B. die lokale Riefenrichtung einer stirnplangefrästen Oberfläche erkannt und darauf aufbauend eine Riefenbegradigung durch Anwendung einer Koordinatentransformation durchgeführt werden [Hel96].

Im Hinblick auf die Begradigung und Merkmalsextraktion bei Werkzeugspuren besitzen diese Verfahren allerdings einige Nachteile:

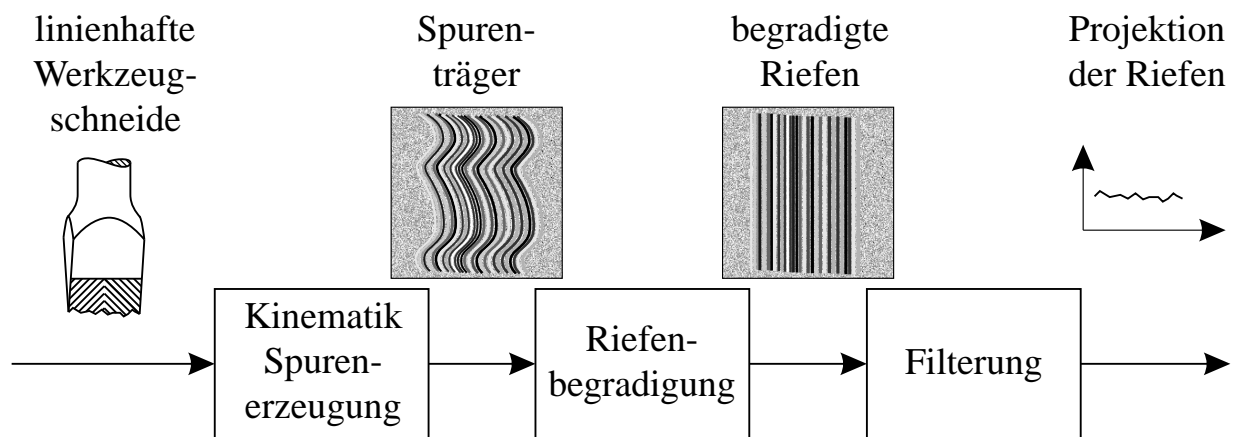


Bild 5.1: Modellgestützte Riefenbegradigung.

- Während die Riefenstruktur bei spanend erzeugten Oberflächen meist hinreichend gleichmäßig ist, sind Riefen von Werkzeugspuren häufig nicht im gesamten Riefenbereich gleich stark ausgeprägt. Dies führt zu Fehlern in der Detektion der lokalen Riefenrichtung und folglich zu einer fehlerhaften Begradigung.
- Die Voraussetzung knickfreier Riefen ist nicht immer erfüllt. Zusätzlich treten lokal starke Richtungsänderungen der Riefen auf, die zu einer unterschiedlich guten Schätzung der lokalen Riefenrichtung führen.
- Bei Werkzeugspuren ist ein hohes Maß an Vorwissen über die Spurentstehung vorhanden, das in der Form von Riefenmodellen formuliert werden kann, siehe Kapitel 2. Da die lokale Orientierungsanalyse keine Voraussetzungen bezüglich der Riefenentstehung macht, können solche Zusammenhänge nicht für eine Erhöhung der Zuverlässigkeit des Verfahrens berücksichtigt werden.

5.2.2 Modellgestützte Riefenverfolgung

Der Grundgedanke modellgestützter Verfahren ist, dass Riefenstrukturen von Werkzeugspuren kinematischen Regeln gehorchen, die in Abschnitt 2.2 zur Definition entsprechender Signalmodelle verwendet worden sind. Dabei bildet die Schneide einen starren, linienhaften Körper, der sich auf dem Spurenträger abbildet, siehe Bild 5.1. Das Profil der Werkzeugschneide wird gemäß Gl. (2.6) durch die mechanische Bewegung des Werkzeugs über die gesamte Riefentextur verteilt.

Kennt man umgekehrt die Trajektorie des Werkzeugs $m(l)$ und die zugehörige Ausrichtung der Schneide $e_\rho(l)$, so kann jedem Bildpunkt innerhalb der Riefen-

struktur ein bestimmter Punkt auf der Schneide zugeordnet werden. Diese Methode stellt gewissermaßen die Umkehrung der Zuordnung von Gl. (2.6) dar. Da jedoch die Kinematik der Spurenerzeugung — bis auf die Erstellung von Vergleichsspuren — nicht bekannt ist, müssen die genannten Modellparameter aus dem aufgenommenen Bild rekonstruiert werden.

Nach der Begradigung ergibt die Filterung der Grauwerte entlang einer Riefe einen Punkt der Projektion. Führt man die Riefenverfolgung systematisch für sämtliche Riefen der Textur durch, erhält man die Projektion der Riefen, die als Grundlage für die gesuchte Signatur des Werkzeuges dient.

Methodik: Die Anwendung eines modellbasierten Verfahrens erfordert zunächst die Auswahl eines für die Riefentextur des Bildes geeigneten Signalmodells, siehe Abschnitt 2.2. Im Folgenden wird das Signalmodell einer reinen Translation der Werkzeugschneide angewandt, das in zahlreichen Fällen zutreffend ist [Hei01a]. Die prinzipielle Methodik ist mit entsprechender Anpassung an die jeweiligen Modellparameter jedoch auch für alle anderen Signalmodelle anwendbar, die eine starre Schneide beinhalten.

Für die modellgestützte Riefenbegradigung wird vorausgesetzt, dass die Trajektorie des Werkzeuges $m(l)$ stetig ist. Diese Bedingung erscheint sinnvoll, da bei einer nicht stetigen Spur ein Abheben des Werkzeuges aufgetreten ist, so dass die Untersuchung der Spur als Ganzes wenig aussichtsreich erscheint. Im Gegensatz zur lokalen Orientierungsanalyse ist die Glattheit der Trajektorie nicht erforderlich, d. h. $\frac{dm(l)}{dl}$ muss nicht stetig sein.

Bild 5.2 zeigt die Methodik der modellbasierten Riefenverfolgung und -begradigung. Ausgehend von der segmentierten Riefentextur $t(x)$ werden die Modellparameter — Trajektorie $m(l)$ und Schneidenrichtung e_ρ — in einer initialen Schätzung interaktiv festgelegt.

Um bei der nachfolgenden Begradigung und Projektion entlang der Riefen eine gute Detailauflösung zu erhalten, muss speziell die Trajektorie möglichst exakt bestimmt werden. Eine ungenaue Beschreibung der Trajektorie würde hingegen dazu führen, dass durch die Projektion Details des Riefenprofils verschmiert werden und für den Spurenvergleich nicht mehr zur Verfügung stehen. Die Ausrichtung der Trajektorie wird daher optimiert.

Der letzte Schritt der modellbasierten Riefenbegradigung ist eine Koordinatentransformation. Damit lässt sich ein angepasstes Koordinatensystem $\{e_\xi(l), e_\rho\}$ definieren, bei dem die Riefenrichtung lokal mit $e_\xi(l)$ übereinstimmt und e_ρ als Schneidenrichtung konstant bleibt.

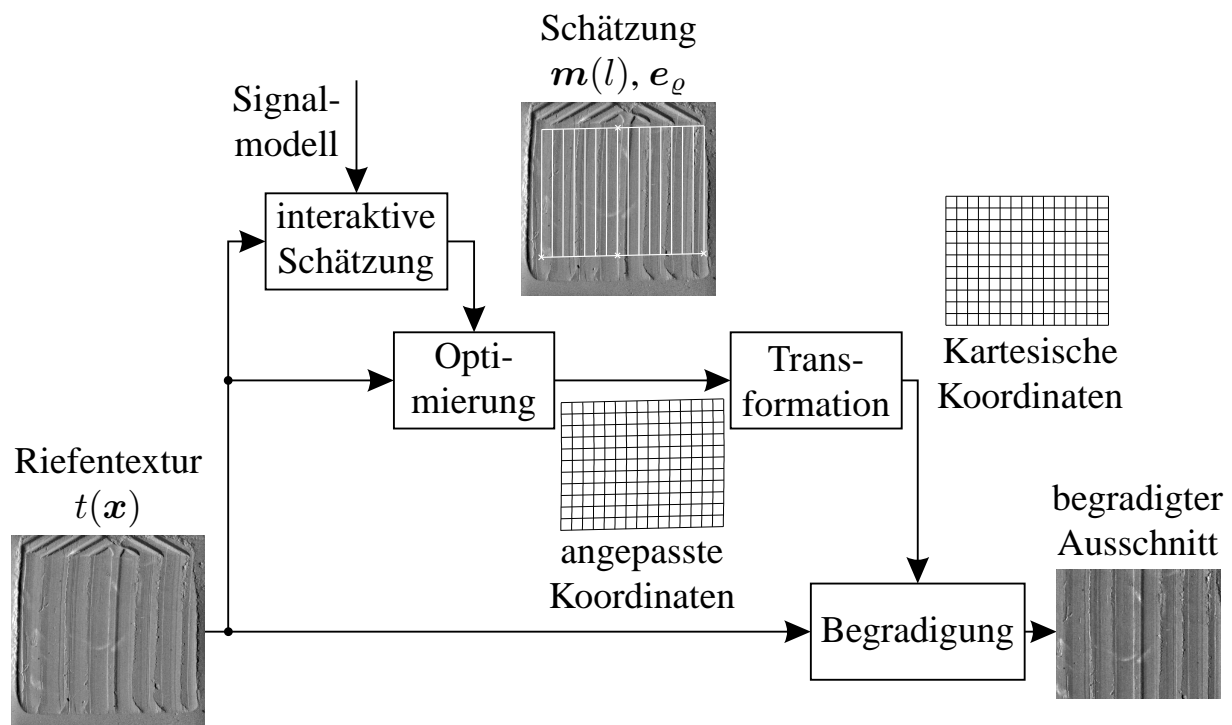


Bild 5.2: Methodik der modellbasierten Riefenbegradigung.

Durch Uminterpretation dieses Koordinatensystems in ein kartesisches Koordinatensystem wird der gewünschte begradigte Riefenbereich erhalten. Aus dem begradigten Bildausschnitt lässt sich die Projektion dann durch Filterung in vertikaler Richtung gewinnen.

Interaktive Schätzung der Modellparameter: Für die Initialwerte der benötigten Modellparameter wird eine interaktive Schätzung verwendet, siehe Bild 5.3. Die grobe Schätzung der Riefengeometrie durch den Experten bietet für den Algorithmus den Vorteil, dass der Suchumfang für die Modellparameter auf kleine Abweichungen beschränkt bleiben kann.

Die interaktive Schätzung umfasst die folgenden Modellparameter:

- Die Schneidenrichtung e_ρ wird zusammen mit der Schneidenbreite b definiert (Bild 5.3(a), Punkte 0, 1). Für den Fall, dass segmentierte Riefenspuren verwendet werden, ist eine Definition der Schneidenbreite nicht unbedingt erforderlich. Wie im hier dargestellten Fall unsegmentierter Riefen bietet sich dadurch jedoch der Vorteil, dass die weitere Spurenauswertung auf einen Ausschnitt der gesamten Riefenbreite beschränkt werden kann, in welchem die Riefenspuren durchgängig vorhanden sind.

Die Schneidenrichtung wird bei der Optimierung nicht verändert. Für das

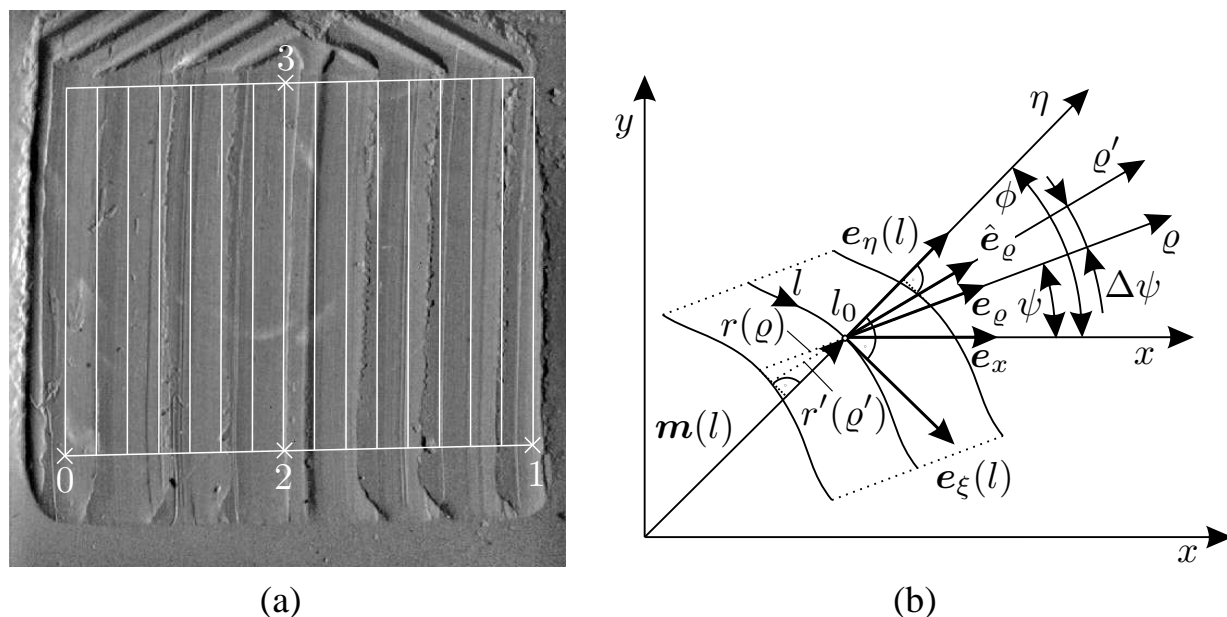


Bild 5.3: Interaktive Initialisierung: (a) Schätzung von Schneidenrichtung \hat{e}_ϱ (Punkte 0, 1) und Trajektorie $m(l)$ (Punkte 2, 3); (b) Verkippung der geschätzten Schneidenrichtung \hat{e}_ϱ .

hier dargestellte Signalmodell einer reinen Translation der Werkzeugschneide bewirkt eine Verkippung der geschätzten Schneidenrichtung \hat{e}_ϱ gegenüber der wahren Schneidenrichtung e_ϱ um einen kleinen Winkel $\Delta\psi$ eine Verzerrung des Riefenprofils, so dass mit den Bezeichnungen aus Bild 5.3(b) anstelle des wahren Profils $r(\varrho)$ das verzerrte Profil

$$r'(\varrho') \approx r(\varrho) \quad \text{mit} \quad \varrho' = \varrho \cdot \frac{\cos(\phi - \psi)}{\cos(\phi - \psi - \Delta\psi)} \quad (5.1)$$

gemessen wird. Für den Fall, dass die Richtung der Trajektorie $e_\xi(l)$ näherungsweise senkrecht auf der Schneidenrichtung e_ϱ steht, d. h. $\phi \approx \psi$, ist die durch eine kleine Verkippung $\Delta\psi$ verursachte Verzerrung wegen $\cos \Delta\psi \approx 0$ vernachlässigbar, was durch empirische Untersuchungen bestätigt wurde [Hei01a].

- Die Trajektorie $m(l)$ wird zusammen mit der Länge der Riefen initialisiert (Punkte 2, 3). Da die Trajektorie nachfolgend optimiert wird, ist eine exakte Lokalisierung des Riefenverlaufs durch den Experten nicht erforderlich.

Optimierung der Modellparameter: Ziel der automatischen Optimierung ist die robuste und exakte Schätzung der Trajektorie des Werkzeugs. Im Folgenden werden mehrere Ansätze vorgestellt, die für diese Aufgabe in Frage kommen:

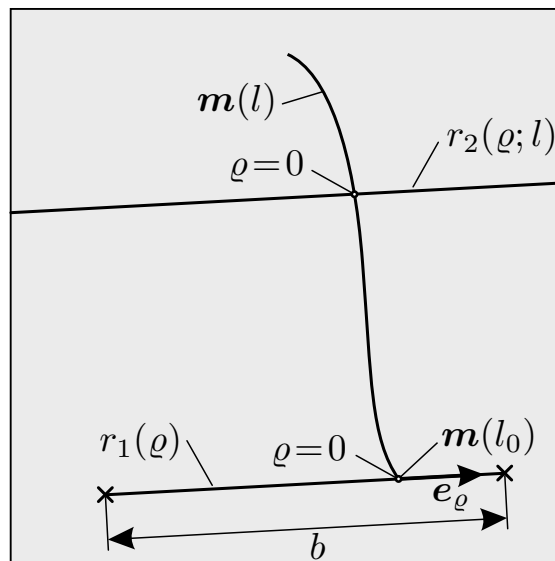


Bild 5.4: Extraktion der Signale $r_1(\varrho)$ und $r_2(\varrho)$.

- Bei der direkten Optimierung der Trajektorie durch Korrelation werden für diskrete Punkte der Trajektorie lokale Profile extrahiert, mit einem Referenzprofil korreliert und die ideale Ausrichtung durch Kreuzkorrelation bestimmt.
- Wird die Trajektorie als Aktive Kontur betrachtet, so lassen sich die Eigenschaften der Kurve mit Hilfe von Energiefunktionalen modellieren und gemäß der gewünschten Eigenschaften optimieren. Abhängig von der Kurvendefinition der Trajektorie lassen sich zwei Varianten unterscheiden:
 - Optimierung der Position von diskreten Punkten auf der Trajektorie mittels Aktiver Konturen.
 - Optimierung der Position von Kontrollpunkten der als Spline definierten Trajektorie mit Verfahren der Aktiven Konturen.

5.2.2.1 Korrelation von Riefenprofilen

Die Kreuzkorrelationsfunktion (KKF) dient der Detektion linearer Ähnlichkeit zwischen zwei Signalen, siehe Abschnitt 6.2. Als Referenzsignal $r_1(\varrho)$ wird das Intensitätsprofil an der Stelle $m(l_0)$ extrahiert, die auch zur interaktiven Festlegung der Schneidenrichtung verwendet worden ist, siehe Bild 5.4. Bei segmentierten Daten ist $r_1(\varrho)$ durch die Segmentierungsmaske ortsbegrenzt, bei unsegmentierten Daten wird der Definitionsbereich durch die Schneidenbreite b festgelegt. Der Ursprung $\varrho = 0$ wird so gesetzt, dass er mit dem Punkt $m(l_0)$ übereinstimmt.

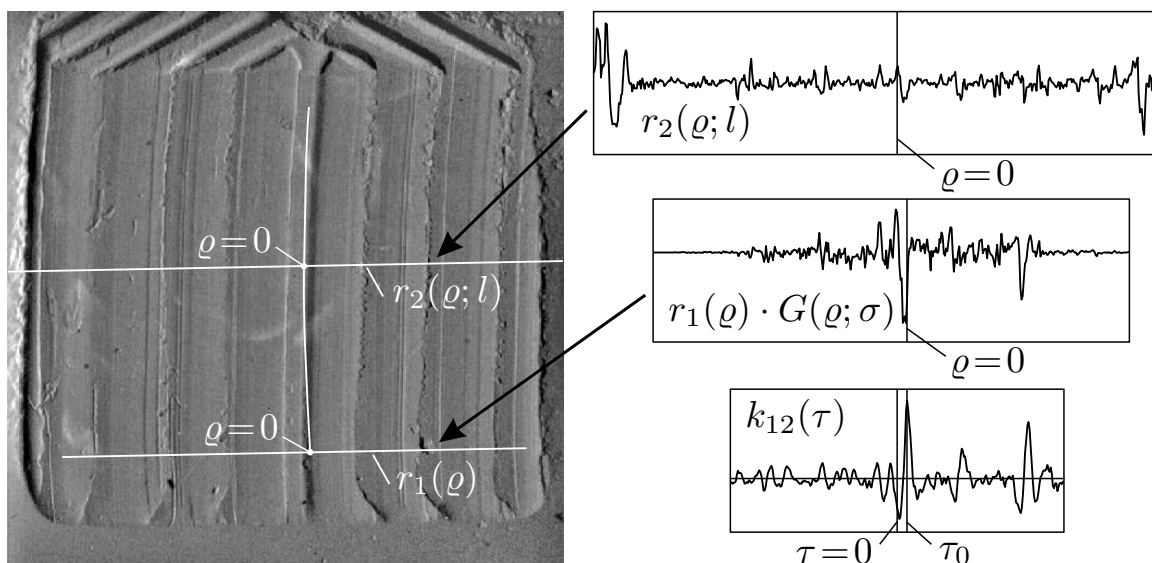


Bild 5.5: Korrelation zweier Riefenprofile.

Bei Riefenstrukturen, die in Teilbereichen nur schwach vorhanden sind, ist es sinnvoll, den Bereich um $\varrho = 0$ stärker zu gewichten. Dazu wird das Signal $r_1(\varrho)$ mit der eindimensionalen Gauß-Funktion

$$G(\varrho; \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{|\varrho|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5.2)$$

multipliziert. Der Parameter σ bestimmt dabei die Breite des zu berücksichtigenden Bereichs in Schneidenrichtung e_ϱ .

Für jeden diskreten Punkt $\mathbf{m}(l)$ auf der Trajektorie wird nun das zugehörige Signal $r_2(\varrho; l)$ als Intensitätsverlauf in Schneidenrichtung e_ϱ durch den Punkt $\mathbf{m}(l)$ bestimmt. Der Ursprung $\varrho = 0$ wird auf den Punkt $\mathbf{m}(l)$ gesetzt. $r_2(\varrho; l)$ ist für segmentierte Daten wie $r_1(\varrho)$ durch die Segmentierungsmaske begrenzt, bei unsegmentierten Daten sind die Bildkanten die Begrenzung.

Die Position des Maximums τ_0 der KKF der beiden Signale befindet sich an der Stelle mit der besten Übereinstimmung des Riefenprofils $r_2(\varrho; l)$ mit dem Referenzprofil $r_1(\varrho)$. Weicht das Maximum der KKF von $\tau = 0$ ab, so wird der entsprechende Punkt der Trajektorie $\mathbf{m}(l)$ um den Vektor $\tau_0 e_\varrho$ in Schneidenrichtung verschoben.

Bild 5.5 zeigt als Beispiel zwei aus einer vorverarbeiteten, unsegmentierten Werkzeugspur extrahierte Signale und die resultierende KKF. Das Signal $r_1(\varrho)$ wurde durch eine Gauß-Funktion mit $\sigma = b/6$ gewichtet. Die KKF der Signale zeigt ein ausgeprägtes Maximum mit $\rho_{12} = 0,43$. Dieser Wert, dessen kleiner Betrag auch auf die Fensterung mit der Gauß-Funktion zurückzuführen ist, mag für an-

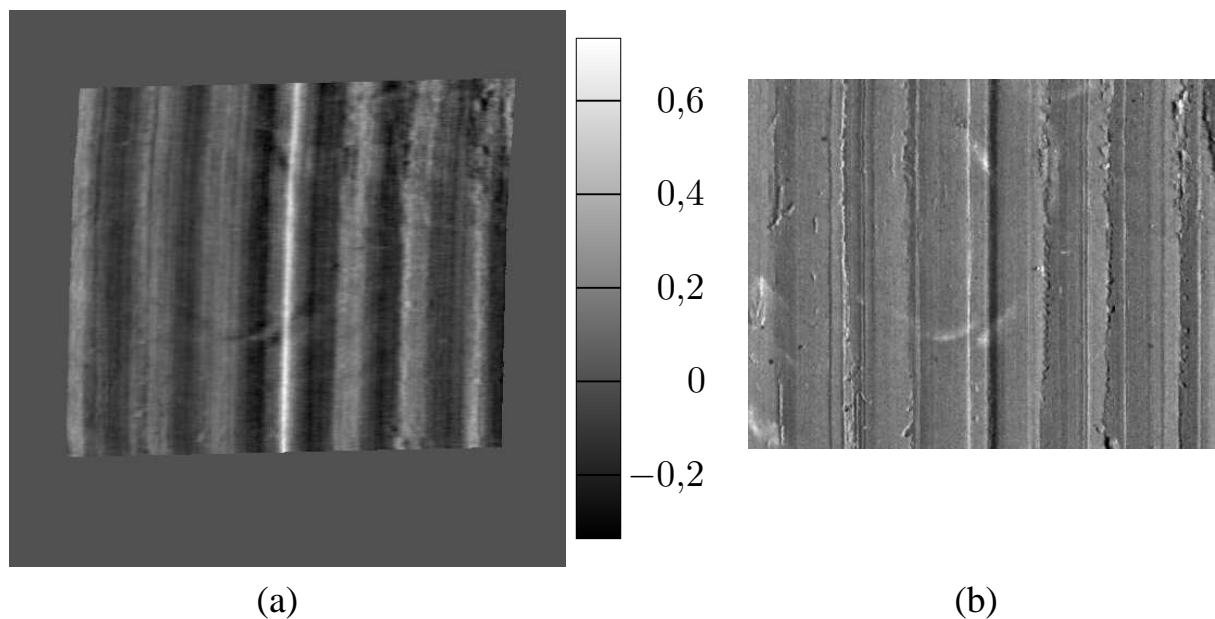


Bild 5.6: Ergebnis der Korrelation von Riefenprofilen: (a) Korrelationsbild; (b) Begradigter Bildausschnitt.

dere Anwendungen der KKF niedrig erscheinen; in diesem Zusammenhang ist jedoch allein die robuste Detektion des Maximums von Bedeutung.

Die an jeder Stelle der Trajektorie berechneten KKFen können als Grauwerte codiert in ein Korrelationsbild eingetragen werden, siehe Bild 5.6(a). Der Ursprung der jeweiligen KKF wurde dazu auf den entsprechenden Punkt der Trajektorie gesetzt und die Verschiebung τ in Schneidenrichtung e_ϱ aufgetragen. Im Korrelationsbild sind die Maxima ρ_{12} der Kreuzkorrelationsfunktionen als helle Linie sichtbar.

Trotz der nur groben interaktiven Vorgabe der Trajektorie zeigen die Maxima der KKFen den tatsächlichen Verlauf der Trajektorie gut an. Die dem Maximalwert ρ_{12} der KKF zugeordnete optimale Verschiebung τ_0 kann dann direkt für die Verschiebung des jeweiligen Riefenpunktes verwendet werden. Das Ergebnis der Koordinatentransformation in Bild 5.6(b) veranschaulicht die trotz zahlreicher Fehlstellen der Riefentextur erhaltene zuverlässige Begradigung der Riefen [Hei03c].

5.2.2.2 Aktive Konturen (Snakes)

Als *Aktive Konturen* (AKen) oder *Snakes* werden Kurven bezeichnet, die ihre Position und Form iterativ einem gewünschten Zustand nähern [Kas87b]. Diese Änderungen werden durch die Wirkung von internen und externen Kräften verursacht. Die Kräfte resultieren aus der Minimierung eines Energiefunktionals, das die ge-

wünschten Eigenschaften der Kurve modelliert. Vorteil einer solchen Formulierung ist die flexible Anpassbarkeit des Energiefunktional an die Optimierungsaufgabe. Üblicherweise werden AKen zur Detektion von Linien oder Kanten, aber auch zur Erkennung von Objektbewegungen und für stereoskopische Anwendungen eingesetzt [Cip95]. Für die modellgestützte Riefenverfolgung lässt sich die Definition des Energiefunktional passend modifizieren.

Vorteilhaft gegenüber der direkten Korrelation von Riefenprofilen ist die explizite Definition von Stetigkeits- und — falls sinnvoll und gewünscht — Glattheitsbedingungen für die Trajektorie. Dadurch besteht die Möglichkeit, die Riefenverfolgung unempfindlicher gegen lokale Störungen der Riefentextur zu machen. Nachteilig ist ein deutlich erhöhter Rechenaufwand des Verfahrens.

Energiefunktional: Grundlage für das Verhalten von AKen ist das Energiefunktional, das die Energie einer Kurve $\mathbf{m}(l)$ beschreibt:

$$\begin{aligned} E_{\text{AK}}^*(\mathbf{m}(l)) &= \int_l E_{\text{AK}}(\mathbf{m}(l)) \, dl \\ &= \int_l E_{\text{I}}(\mathbf{m}(l)) + E_{\text{M}}(\mathbf{m}(l)) + E_{\text{Z}}(\mathbf{m}(l)) \, dl . \end{aligned} \quad (5.3)$$

Hierin gehen folgende Energien ein:

Innere Energie: Die innere Energie ist durch

$$E_{\text{I}}(\mathbf{m}(l)) = \frac{1}{2} \left(\mu(l) \left\| \frac{\partial \mathbf{m}(l)}{\partial l} \right\|^2 + \nu(l) \left\| \frac{\partial^2 \mathbf{m}(l)}{\partial l^2} \right\|^2 \right) \quad (5.4)$$

definiert. Sie setzt sich zusammen aus Termen erster und zweiter Ableitung mit den entsprechenden ortsabhängigen Gewichtungsfaktoren $\mu(l)$ und $\nu(l)$. Der Term erster Ableitung sorgt für die Kontinuität der Kurve, der Term zweiter Ableitung bewertet Richtungsänderungen der Kurve. Die Vorfaktoren $\mu(l)$ und $\nu(l)$ ermöglichen eine relative Gewichtung der Terme. Mit $\nu(l) = 0$ werden Knicke der Kurve erlaubt, die bei Riefenspuren häufig anzutreffen sind.

Zur Vereinfachung der numerischen Optimierungsrechnung werden die Gewichtungsfaktoren als Konstanten μ_0 und ν_0 festgelegt. Die innere Energie wird dann erhalten zu

$$E_{\text{I}}(\mathbf{m}(l)) = \frac{1}{2} \left(\mu_0 \left\| \frac{\partial \mathbf{m}(l)}{\partial l} \right\|^2 + \nu_0 \left\| \frac{\partial^2 \mathbf{m}(l)}{\partial l^2} \right\|^2 \right) . \quad (5.5)$$

Merkmalsbezogene Energie: Um die Kurve gemäß der zu bewertenden Merkmale zu bewegen, wird ein Energiefunktional modelliert, das die Lage der Kurve relativ zu den Merkmalen beschreibt. Soll die Kurve z. B. auf eine Kante zu liegen kommen, kann die merkmalsbezogene Energie unter Berücksichtigung einer zweidimensionalen Umgebung zu

$$E_{\text{M,Kante}}(\mathbf{m}(l)) = - \left\| \nabla G(\mathbf{x}; \sigma) ** g(\mathbf{m}(l)) \right\|^2 \quad (5.6)$$

mit einer zweidimensionalen Gauß-Funktion $G(\mathbf{x}; \sigma)$ nach Gl. (4.28) gewählt werden [Cip95]. Die Standardabweichung σ kann als Skalenparameter den Suchraum für das Merkmal verändern, da mit zunehmendem σ der Einflussbereich von Intensitätsgradienten zunimmt und geglättet wird.

Für die Verfolgung von Riefen ist eine Anpassung dieses Energieterms erforderlich. Die merkmalsbezogene Energie wird so modelliert, dass sie mit sinkendem Abstand des Trajektorienpunktes $\mathbf{m}(l)$ zur wahren Trajektorie abnimmt. Dabei lassen sich je nach Definition der lokalen Umgebung zwei Fälle unterscheiden:

Eindimensionale Umgebung: Betrachtet man eine eindimensionale Umgebung des Riefenpunktes in Schneidenrichtung, so kann die merkmalsbezogene Energie zu

$$E_{\text{M,1D}}(\mathbf{m}(l)) = - \left| (r_1(\varrho) \cdot G(\varrho; \sigma)) \underset{\varrho}{\otimes} r_2(\varrho; l) \right|^2 \quad (5.7)$$

bestimmt werden, wobei $r_1(\varrho)$ und $r_2(\varrho; l)$ analog zu Abschnitt 5.2.2.1 die Intensitätsprofile in Schneidenrichtung an der Referenzposition $\mathbf{m}(l_0)$ bzw. am Punkt $\mathbf{m}(l)$ und $G(\varrho; \sigma)$ die Gaußfunktion nach Gl. (5.2) bezeichnen.

Bild 5.7 skizziert die Vorgehensweise für das Signalmodell der translatorisch bewegten Werkzeugschneide. Am Referenzpunkt $\mathbf{m}(l_0)$ wird das Intensitätsprofil $r_1(\varrho)$ in Schneidenrichtung bestimmt und gewichtet. An jeder Stelle der Trajektorie $\mathbf{m}(l)$ wird dann ein Intensitätsprofil $r_2(\varrho; l)$ extrahiert und mit dem gewichteten Referenzprofil korreliert. Die KKF der beiden Signale ergibt ein Maximum, falls die relative Position der beiden Profile in Richtung von e_ϱ identisch ist. An dieser Stelle ist dann das gewünschte Minimum der merkmalsbezogenen Energie erreicht.

Zweidimensionale Umgebung: Berücksichtigt man eine zweidimensionale Umgebung des Riefenpunktes, so können durch lokale Mittelung der Intensitäten in Riefenrichtung Störungen unterdrückt und die Robustheit des Verfahrens

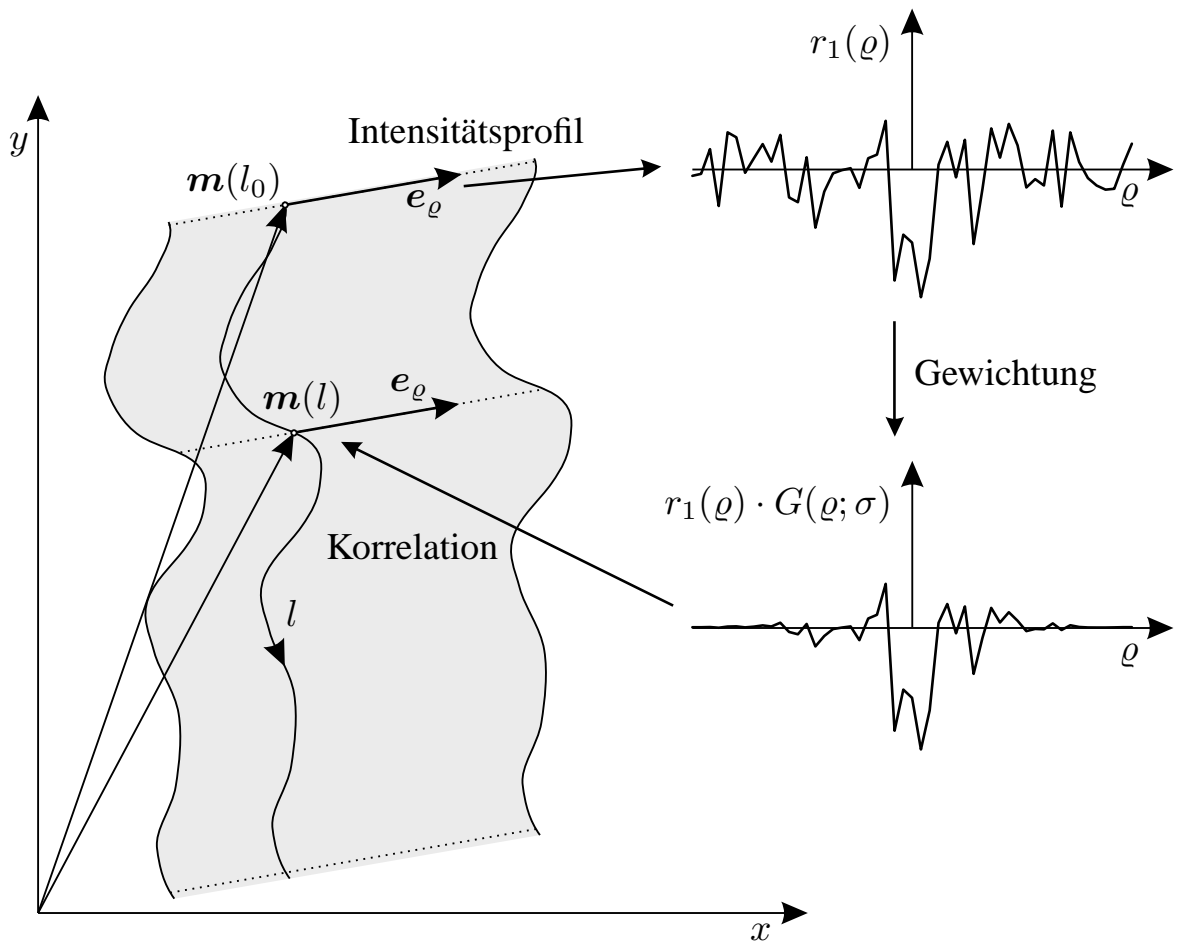


Bild 5.7: Bestimmung der merkmalsbezogenen Energie (eindimensionale Umgebung).

erhöht werden. Eine Möglichkeit zur Gewinnung der merkmalsbezogenen Energie ist durch

$$E_{M,2D}(\mathbf{m}(l)) = \left| \int_{\xi} \left(r_1(\varrho, \xi)_{LK(\mathbf{m}(l_0))} \cdot G(\varrho, \xi; \boldsymbol{\sigma}) \right) \otimes_{\varrho} r_2(\varrho, \xi; l)_{LK(\mathbf{m}(l))} d\xi \right|^2 \quad (5.8)$$

formuliert, wobei $r_1(\varrho, \xi)_{LK(\mathbf{m}(l_0))}$ und $r_2(\varrho, \xi; l)_{LK(\mathbf{m}(l))}$ die Intensitäten der Umgebungen der Punkte $\mathbf{m}(l_0)$ und $\mathbf{m}(l)$ in den jeweils der lokalen Riefenrichtung angepassten Koordinatensystemen $\{e_{\varrho}, e_{\xi}(l_0)\}$ und $\{e_{\varrho}, e_{\xi}(l)\}$ bezeichnen und

$$G(\varrho, \xi; \boldsymbol{\sigma}) = \frac{1}{2\pi\sigma_{\varrho}\sigma_{\xi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\varrho^2}{\sigma_{\varrho}^2} + \frac{\xi^2}{\sigma_{\xi}^2}\right)\right) \quad (5.9)$$

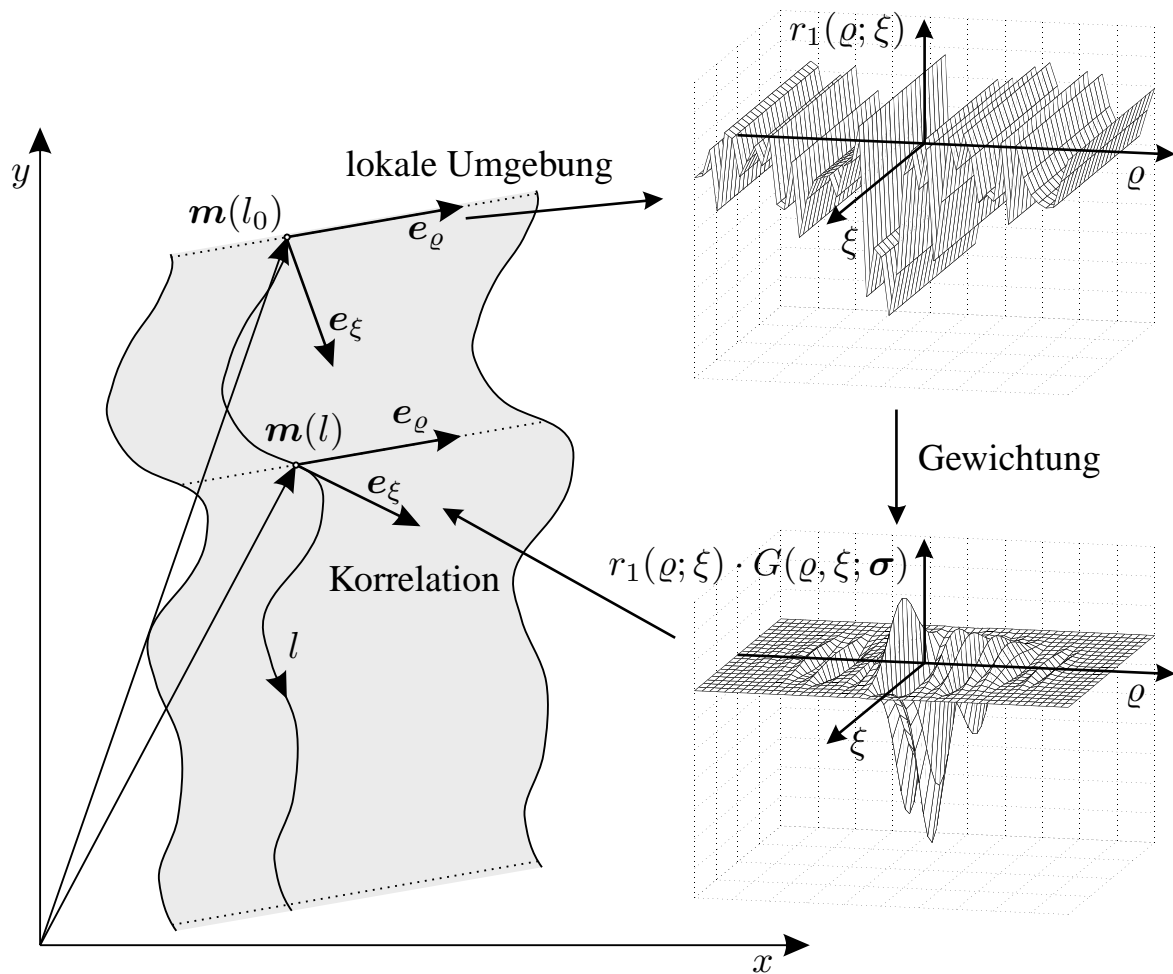


Bild 5.8: Bestimmung der merkmalsbezogenen Energie (zweidimensionale Umgebung).

eine zur Gewichtung der Umgebung um den Referenzpunkt $m(l_0)$ definierte zweidimensionale Gaußfunktion darstellt. Das Verhältnis σ_ξ/σ_ρ legt dabei die Stärke der Glättung in Riefenrichtung im Vergleich zur Breite der berücksichtigten Umgebung in Schneidenrichtung fest.

Für den zweidimensionalen Fall verdeutlicht Bild 5.8 die Berechnung der merkmalsbezogenen Energie. Wie bei Berücksichtigung einer eindimensionalen Umgebung erfolgt die Berechnung der KKF in Schneidenrichtung. Die anschließende Integration entlang der lokalen Riefenrichtung $e_\xi(l)$ setzt voraus, dass die Trajektorie knickfrei ist. Zusätzlich muss die mittels σ_ξ in Gl. (5.9) definierte Umgebung in Riefenrichtung klein gegenüber dem minimalen Krümmungsradius der Trajektorie sein.

Bei der Berechnung der merkmalsbezogenen Energie nach Gl. (5.8) benötigt man für alle l zumindest näherungsweise die lokale Riefenrichtung $e_\xi(l)$. Die merkmalsbezogene Energie ist daher im Gegensatz zum obigen Fall einer eindimensio-

nalen Umgebung nicht nur von $\mathbf{m}(l)$, sondern auch von deren Ableitung $\frac{\partial \mathbf{m}(l)}{\partial l}$ abhängig.

Um dennoch die Lösbarkeit von Gl. (5.8) sicherzustellen und numerische Instabilitäten zu vermeiden, kann ein stufenweises Verfahren angewendet werden. Dabei wird in einem ersten Schritt eine eindimensionale Umgebung zur Bestimmung der merkmalsbezogenen Energie nach Gl. (5.7) verwendet. Darauf aufbauend wird in einem zweiten Schritt die zweidimensionale Umgebung nach Gl. (5.8) verwendet.

Energie äußerer Zwänge: Über diesen Term lassen sich Bedingungen definieren, die zusätzliche Eigenschaften der Kurve modellieren. Beispiele sind:

- Einhaltung eines Mindestabstands zwischen benachbarten Punkten. Die explizite Formulierung einer solchen Bedingung kann für die numerische Stabilität des Verfahrens sinnvoll sein.
- Beibehaltung des Referenzpunktes $\mathbf{m}(l_0)$ bei der Optimierung.
- Vorzugsrichtung der Verschiebung der Kurve.

Energieminimierung: Grundlage der Optimierungsbewegung von AKen ist die Minimierung des Energiefunktional nach Gl. (5.3), wodurch die Positionen der Trajektorienpunkte $\mathbf{m}(l)$ verändert werden.

Setzt man die oben definierten Energietermine in Gl. (5.3) ein, erhält man mit den partiellen Ableitungen $\mathbf{m}_l(l)$ und $\mathbf{m}_{ll}(l)$ wegen

$$E_I(\mathbf{m}(l)) = f(\mathbf{m}_l(l), \mathbf{m}_{ll}(l)) , \quad (5.10)$$

$$E_M(\mathbf{m}(l)) = \begin{cases} f(\mathbf{m}(l)) , & \text{1D-Umgebung bzw.} \\ f(\mathbf{m}(l), \mathbf{m}_l(l)) , & \text{2D-Umgebung,} \end{cases} \quad (5.11)$$

$$E_Z(\mathbf{m}(l)) = f(\mathbf{m}(l)) \quad (5.12)$$

die auf den Kurvenparameter l bezogene Energie zu

$$E_{AK}(\mathbf{m}(l)) = f(\mathbf{m}(l), \mathbf{m}_l(l), \mathbf{m}_{ll}(l)) . \quad (5.13)$$

Die Optimierungsaufgabe kann damit als modifizierte *Aufgabe von Lagrange* [Bro91] formuliert werden:

$$E_{AK}^*(\mathbf{m}(l)) = \int_l f(\mathbf{m}(l), \mathbf{m}_l(l), \mathbf{m}_{ll}(l)) dl \stackrel{!}{=} \text{Extremum.} \quad (5.14)$$

Eine mögliche Lösung dieser Aufgabe ist im Anhang A.2 skizziert.

5.2.2.3 Kombination Aktiver Konturen und Splines

Splines sind Kurven, die durch Stützstellen definiert werden und deren Form durch bestimmte Stetigkeitsbedingungen für die Ableitungen der Kurve festgelegt ist [Jäh02]. Mit einer als Spline modellierten Trajektorie lässt sich ihre Stetigkeit sowie eine zu fordernde Glattheit implizit realisieren. Auf die innere Energie nach Gl. (5.4) kann dann verzichtet werden.

Ein weiterer Vorteil liegt in der kompakten Beschreibung der Trajektorie durch wenige Stützstellen. Folglich umfassen die zu optimierenden Parameter nur die Koordinaten der Stützstellen.

Kurvendefinition: Aus den zahlreichen Klassen von Splines werden im Folgenden *B-Splines* diskutiert [Fol97, Jäh02, Jai89, Leh99]. Ein B-Spline ist eine stückweise definierte, parametrische Kurve, welche durch die Polynomfunktion

$$\mathbf{m}(l) = \sum_{i=0}^N B_{i,k}(l) \cdot \mathbf{c}_i \quad (5.15)$$

mit dem Approximationskern $B_{i,k}(l)$ der Ordnung k und den $N + 1$ Stützstellen \mathbf{c}_i beschrieben wird. Die damit erhaltenen Kurven sind für $k > 1$ bis zu ihrer $(k - 2)$ -ten Ableitung stetig. Ab $k = 3$ sind die Kurven daher stetig und einfach ableitbar, so dass eine glatte Kurve vorliegt.

Anwendung der Energieterme Aktiver Konturen: Zur Definition der Trajektorie als B-Spline werden $N + 1$ Stützstellen äquidistant auf der Trajektorie verteilt. Grundlage der Optimierung ist die Minimierung des Energiefunktional nach Gl. (5.3). Da außer der inneren Energie auch weitere Energieterme nicht benötigt werden, ist für das Beispiel einer eindimensionalen Umgebung des Trajektorienpunktes die Gesamtenergie gleich der merkmalsbezogenen Energie nach Gl. (5.7):

$$E_{\text{spline}}(\mathbf{m}(l)) = E_{\text{M,1D}}(\mathbf{m}(l)) . \quad (5.16)$$

Die eigentliche Optimierungsrechnung kann mit dem *Prinzip der virtuellen Arbeit* durchgeführt werden [Cip95]. Grundlage dieses Verfahrens ist die Betrachtung einer virtuellen Energie, welche bei der Verschiebung von $P + 1$ Trajektorienpunkten durch virtuelle Kräfte aufgebracht werden muss. Aus der Minimierung der virtuellen Arbeit folgt iterativ die optimale Position der Stützstellen.

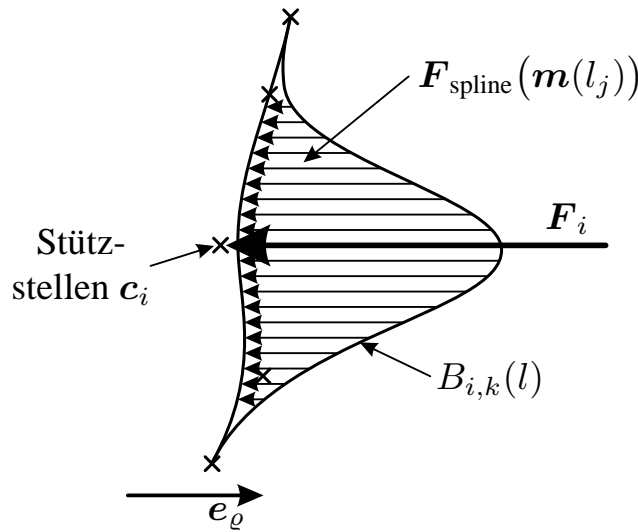


Bild 5.9: Kumulierte virtuelle Kraft auf eine Stützstelle.

Die virtuelle Kraft auf einen Trajektorienpunkt $\mathbf{m}(l)$ wird aus der negativen Ableitung der Gesamtenergie in Schnittenrichtung \mathbf{e}_ρ erhalten:

$$\mathbf{F}_{\text{spline}}(\mathbf{m}(l)) = -\frac{\partial}{\partial \rho} E_{\text{spline}}(\mathbf{m}(l)) \cdot \mathbf{e}_\rho. \quad (5.17)$$

Sie bewirkt, dass der Trajektorienpunkt $\mathbf{m}(l)$ in Richtung der optimalen Position des Punktes verschoben wird, an dem die Gesamtenergie $E_{\text{spline}}(l)$ minimal wird und die virtuelle Kraft $\mathbf{F}_{\text{spline}}(\mathbf{m}(l))$ verschwindet.

Eine Verschiebung der Stützstellen \mathbf{c}_i um $\Delta \mathbf{c}_i$ verursacht Positionsänderungen der Trajektorienpunkte $\mathbf{m}(l_j)$, $j \in \{0, 1, \dots, P\}$. Dabei wird an der Trajektorie die virtuelle Arbeit

$$\Delta E = -\sum_{j=0}^P \Delta \mathbf{m}(l_j)^T \cdot \mathbf{F}_{\text{spline}}(\mathbf{m}(l_j)) \quad (5.18)$$

verrichtet. Mit der Definition des B-Splines aus Gl. (5.15) folgt

$$\begin{aligned} \Delta E &= -\sum_{j=0}^P \left(\sum_{i=0}^N B_{i,k}(l_j) \cdot \Delta \mathbf{c}_i \right)^T \cdot \mathbf{F}_{\text{spline}}(\mathbf{m}(l_j)) \\ &= -\sum_{i=0}^N \Delta \mathbf{c}_i^T \cdot \mathbf{F}_i, \end{aligned} \quad (5.19)$$

wobei

$$\mathbf{F}_i = \sum_{j=0}^P B_{i,k}(l_j) \cdot \mathbf{F}_{\text{spline}}(\mathbf{m}(l_j)) \quad (5.20)$$

die kumulierte virtuelle Kraft auf die Stützstelle c_i darstellt.

Bild 5.9 veranschaulicht die Vorgehensweise: Die Kräfte $F_{\text{spline}}(m(l_j))$ auf die Trajektorienpunkte werden mit der B-Spline-Approximationsfunktion $B_{i,k}(l_j)$ gewichtet und der entsprechenden Stützstelle c_i zugeordnet.

Die virtuelle Arbeit wird iterativ minimiert, indem sich die Stützstellen um Δc_i in Richtung der kumulierten virtuellen Kräfte F_i bewegen. Die Verschiebungen der Stützstellen in einem Iterationsschritt werden daher mit

$$\Delta c_i = \alpha F_i \quad (5.21)$$

festgelegt. Die Dämpfungskonstante α wird zweckmäßigerweise so gewählt, dass die Berechnung ohne Schwingungen zügig zum Abschluss kommt.

5.3 Signaturgewinnung

An dieser Stelle der Spurenauswertung steht das Profil der Spur als Projektion der Riefentextur in Riefenrichtung zur Verfügung. Dieses Signal ist für einen direkten Vergleich allerdings noch nicht geeignet, da es aus zwei unterschiedlichen Komponenten besteht:

- Systemmerkmale wie z. B. die Breite der Spur stellen Störungen dar, die unterdrückt werden sollen. Große Archive können nach diesen Merkmalen vorklassifiziert werden, so dass die darin enthaltene Information zur Effizienzsteigerung des Vergleichs bereits ausgewertet ist.
- Individualmerkmale sind im Wesentlichen die feinen Riefen. Sie stellen das Nutzsinal dar, das die für den Vergleich charakteristischen Eigenschaften enthält.

Zur Trennung der Signalkomponenten wird eine selektive Signalaufbereitung eingesetzt, welche gezielt die Individualmerkmale herausarbeitet. Das entstehende Signal ist die Signatur $q(\varrho)$. Sie ist direkt für den Spurenvergleich geeignet und wird für die Datenbanksuche in Spurenarchiven abgelegt.

Für diesen Schritt hat sich eine morphologische Filterung der Projektion bewährt [Hei02a, Pue99a]. Dabei kommt eine Top-Hat-Transformation (Zylinderhut-Operator) zum Einsatz, die auf den morphologischen Operatoren Öffnung und Schließung aufbaut, siehe Abschnitt 4.5.2. Die Top-Hat-Transformation ist in den

Modifikationen

$$q_h(\varrho) := p(\varrho) - p(\varrho) \circ s(\varrho) \quad \text{und} \quad (5.22)$$

$$q_d(\varrho) := p(\varrho) \bullet s(\varrho) - p(\varrho) \quad (5.23)$$

definiert, wodurch feine helle bzw. dunkle Strukturen herausgearbeitet werden [Rus99, Ser82]. Durch Kombination beider Filtervarianten können gezielt feine Peaks in den Projektionen verstärkt werden:

$$q(\varrho) := q_h(\varrho) - q_d(\varrho) . \quad (5.24)$$

Die Top-Hat-Transformation stellt somit eine Art nichtlineares Hochpassfilter dar, das abhängig von der Größe des strukturierenden Elements $s(\varrho)$ grobe Strukturen unterdrückt. In Analogie zu linearen Hochpassfiltern kann dieser Filterparameter $|\mathcal{S}|$ als Grenzwellenlänge interpretiert werden.

6 Automatische Spurensuche

Das Ziel des eigentlichen Vergleichsschritts besteht darin, ein aussagekräftiges Maß zu erhalten, das die Quantifizierung der Ähnlichkeit zweier Spuren ermöglicht. Diese Detektionsaufgabe wird auf einer Merkmalsebene durchgeführt, bei der die charakteristischen Merkmale der Spuren — die mittels der in Kapitel 5 dargestellten Verfahren gewonnenen Signaturen — miteinander verglichen werden.

Beim praktischen Einsatz steht neben dem direkten Vergleich zweier Spuren eine Archivsuche im Vordergrund. Hier besteht die Aufgabe darin, eine neu aufgefundene Spur mit einer Sammlung vorhandener Spuren zu vergleichen und Übereinstimmungen festzustellen. Eine solche Spurenauswertung hat demnach eine Serie von Vergleichen zur Folge, wobei die neue Spur mit jedem Eintrag des Archivs zu vergleichen ist. Auf der Grundlage der Einzelvergleiche wird dann eine sortierte Liste erstellt, welche die Einträge des Archivs in der Abfolge der detektierten Ähnlichkeit enthält. Auf den ersten Plätzen dieser sog. Hitliste stehen somit die Spuren des Archivs mit der größten Ähnlichkeit.

In diesem Zusammenhang muss betont werden, dass die im Folgenden vorgestellten Strategien nicht die definitive Entscheidung zum Ziel haben, ob ein wahrer Spurenzusammenhang zwischen der neuen Spur und einer Spur des Archivs zu finden ist oder nicht. Die Beurteilung, ob die detektierte Ähnlichkeit zweier Spuren zur Feststellung eines Zusammenhangs ausreichend ist, verbleibt beim Kriminalexperten. Zweck der hier vorgestellten Verfahren ist lediglich die Unterstützung des Experten, indem das zu durchsuchende Archiv in einer Art Vorauswahl von offensichtlich unzutreffenden Einträgen befreit wird.

6.1 Vergleich von Signalen

Für die Detektion von Ähnlichkeiten sind zahlreiche Strategien entwickelt worden, die einen effizienten Vergleich ermöglichen. Auf diesem Gebiet stellen die Korrelationsverfahren einen der am besten bekannten und untersuchten Ansätze dar [Pap01]. Sie besitzen u. a. folgende Vorzüge:

- Aufgrund der weiten Verbreitung der Korrelationstechniken in der Literatur

der Signalverarbeitung sind diese Verfahren einer gründlichen theoretischen Untersuchung zugänglich.

- Da die Berechnung der Korrelationsfunktion durch eine Multiplikation im Frequenzbereich der Fourier-Transformation durchgeführt werden kann, verringern effiziente Implementierungen wie z. B. der FFT-Algorithmus [Bri88] die für den Vergleich benötigte Berechnungszeit.

Ungünstigerweise setzen Korrelationsverfahren eine lineare Ähnlichkeit zwischen den Signalen voraus. Da die ausschließliche Detektion linearer Ähnlichkeit aufgrund zahlreicher Einflüsse häufig nicht ausreichend ist, sind andersartige Ansätze notwendig. Allerdings verhindert der ausufernde Rechenaufwand vieler alternativer Strategien deren Implementierung.

Zur Auflösung dieses Dilemmas kann ein Ansatz verwendet werden, der den Einsatz von Korrelationsverfahren selbst für den Fall von nichtlinear ähnlichen Signalen ermöglicht. Zu diesem Zweck werden Strategien zur Vorverarbeitung angewandt, die auf der Manipulation der Signalstatistik beruhen. Durch diese Vorgehensweise kann die Zuverlässigkeit der Detektionsergebnisse signifikant verbessert werden, während die günstigen Eigenschaften der Korrelationsverfahren in Bezug auf die Recheneffizienz erhalten bleiben.

Die Grundlage von Korrelationsverfahren wird in Abschnitt 6.2 vorgestellt. Für die Anwendung von alternativen Strategien werden verallgemeinerte Arten von Ähnlichkeit in Abschnitt 6.3 eingeführt und darauf basierende Detektionsstrategien vorgestellt. Danach wird ein vielversprechender Ansatz zur Angleichung der Statistik erster Ordnung¹ zweier Signale in Abschnitt 6.3.4 beschrieben.

6.2 Detektion linearer Ähnlichkeit

Die *Energie-Kreuzkorrelationsfunktion* (KKF)

$$k_{12}(\tau) := \tilde{q}_1(\xi) \circledast \tilde{q}_2(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{q}_1(\xi) \cdot \tilde{q}_2(\xi - \tau) \, d\xi \quad (6.1)$$

¹Als *Statistik erster Ordnung* werden in dieser Arbeit Eigenschaften von Signalen bezeichnet, die sich aus punktweise definierten Merkmalen bestimmen lassen. Die Autokorrelationsfunktion bewertet beispielsweise Beziehungen zwischen zwei Signalwerten und gehört nach dieser Definition zur Statistik zweiter Ordnung.

ist ein erprobtes Hilfsmittel zur Detektion von Ähnlichkeiten zwischen den beiden endlichen Signalen endlicher Energie $q_1(\xi)$ und $q_2(\xi)$, wobei

$$\tilde{q}_1(\xi) := \frac{q_1(\xi) - \bar{q}_1}{s_{q_1}} \quad \text{und} \quad \tilde{q}_2(\xi) := \frac{q_2(\xi) - \bar{q}_2}{s_{q_2}} \quad (6.2)$$

die um ihre empirischen Mittelwerte \bar{q}_i zentrierten und auf ihre empirischen Standardabweichungen $s_{q_i} = \sqrt{\text{var}\{q_i(\xi)\}}$ bezogenen Signale bezeichnen [Bro91, Dem98, Gon02, Kre79]. Durch diese Normalisierung wird die KKF unabhängig von einer globalen Verschiebung des Wertebereichs sowie von einem globalen Skalierungsparameter.

Das Maximum der KKF liefert ein quantitatives Maß für die lineare Ähnlichkeit der beiden Signale:

$$\rho_{12} := \max \{k_{12}(\tau)\} . \quad (6.3)$$

Darüber hinaus entspricht die Position des Maximums der KKF derjenigen Verschiebung τ_0 , die zur bestmöglichen Übereinstimmung der beiden Signale führt:

$$\tau_0 := \arg \max_{\tau} \{k_{12}(\tau)\} . \quad (6.4)$$

Diese Distanz kann in geschickter Weise zur visuellen Überprüfung der durch ρ_{12} indizierten Ähnlichkeit verwendet werden, indem die beiden Signale mit der relativen Verschiebung τ_0 gegenübergestellt werden.

Bild 6.1 veranschaulicht die automatische Spurenauswertung anhand des Vergleichs zweier Werkzeugspuren. Im oberen Bereich sind die beiden Signaturen $q_1(\xi)$ und $q_2(\xi)$ dargestellt, die aus den vorverarbeiteten Spurenbildern $d_1(\mathbf{x})$ und $d_2(\mathbf{x})$ gewonnen wurden. In der Mitte ist die zugehörige KKF $k_{12}(\tau)$ abgebildet, deren Maximum die optimale Verschiebung der Signale τ_0 zueinander angibt. Der untere Bereich zeigt die beiden Spuren mit der entsprechenden Verschiebung. Deutlich zu erkennen ist die große Ähnlichkeit der Spuren, die tatsächlich von demselben Werkzeug verursacht wurden.

Bei der Anwendung von Korrelationsverfahren auf diskrete Signale kann Gl. (6.1) im Frequenzbereich der Fourier-Transformation effizient mittels der FFT implementiert werden [Bri88]. Ein wichtiger Vorteil des FFT-Algorithmus ist sein geringer Rechenaufwand, was der Erfordernis schneller Verfahren zur Spurenauswertung entgegenkommt. Die Rechenzeit für die Korrelation zweier Signale mit 512 Abtastwerten beträgt auf einem Standard-PC momentan ca. 1 ms, so dass eine vollständige Datenbanksuche in einem Archiv mit mehreren 1.000 Spuren in weniger als einer Minute durchgeführt werden könnte.

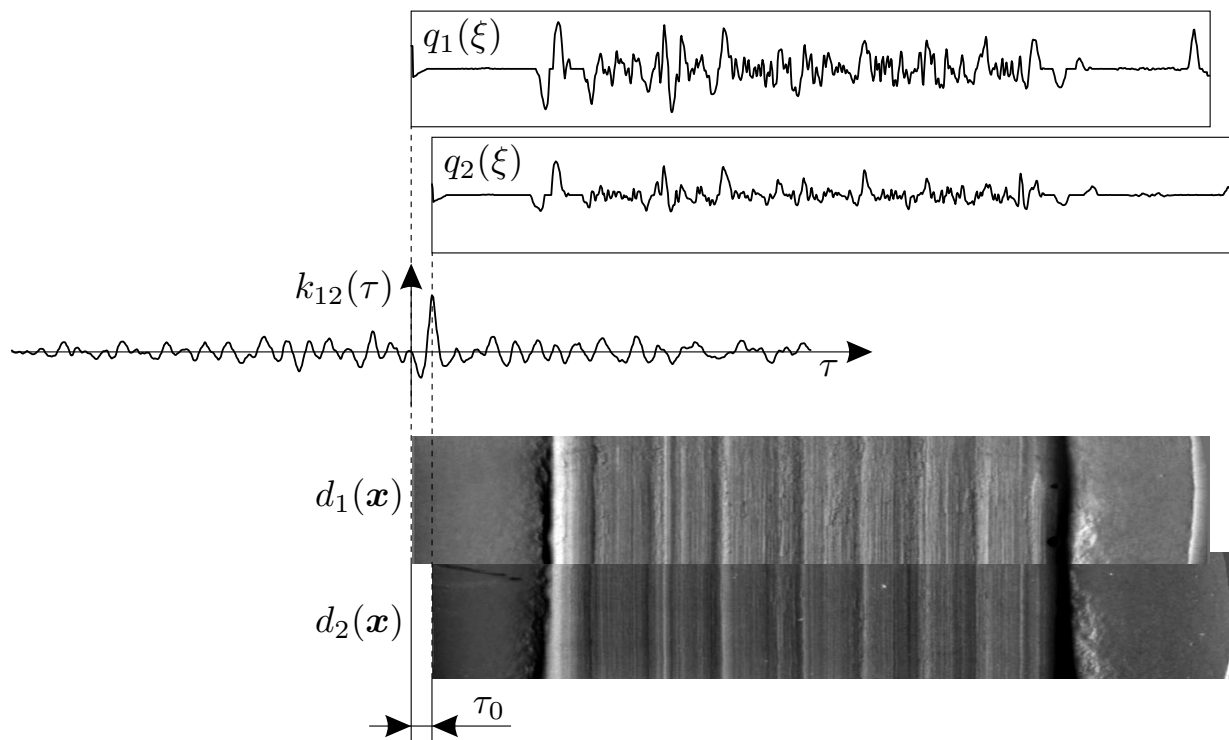


Bild 6.1: Detektion der Ähnlichkeit mittels der KKF: Vergleich zweier Werkzeugspuren, die vom selben Werkzeug stammen.

Die der diskreten Fourier-Transformation inhärente zyklische Fortsetzung der Signale ist nur bei der Auswertung von Projektilen erwünscht, da die Signale $q_1(\xi)$ und $q_2(\xi)$ in einem solchen Fall tatsächlich zyklisch sind. Bei der Anwendung der diskreten Fourier-Transformation auf nicht zyklische Signale wie z. B. Schraubendreher Spuren ist diese Eigenschaft hingegen schädlich, so dass die Zyklizität durch geeignete Vorverarbeitung beseitigt werden muss. Dies kann durch Ergänzung der Signale $\tilde{q}_1(\xi)$ und $\tilde{q}_2(\xi)$ mit dem Wert 0 auf die doppelte Signallänge bewerkstelligt werden [Rus99].

6.3 Detektion verallgemeinerter Ähnlichkeit

In vielen Fällen sind allgemeinere Hilfsmittel als die KKF erforderlich, um Ähnlichkeiten zwischen Signalen bewerten zu können. Die Gründe dafür sind unterschiedlich:

- Die Anwendbarkeit der KKF setzt voraus, dass die Signale auf einer metrischen Skala repräsentiert werden können [Bey99]. Bei zahlreichen Anwendungsfällen der automatischen Sichtprüfung ist diese Einschränkung jedoch aufgrund nichtlinearer Übertragungsfunktionen der zu untersuchenden

Systeme nicht immer erfüllt. Beispielsweise besitzen CMOS-Sensoren häufig näherungsweise logarithmische Kennlinien [Tu98] oder liefern Signale, welche durch im Sensor integrierte konfigurierbare Schaltungen aufbereitet sind [Men97].

- Falls die Signaleigenschaften nur durch eine Ordinalskala beschrieben werden können, ist die KKF nicht das Mittel der Wahl. Hier können Methoden zur Auswertung komparativer Merkmale wie z. B. der Spearmansche Rangkorrelationskoeffizient sinnvoller zur Anwendung kommen, als die Ordinalskala in eine metrische Skala zu transformieren [Har02].
- Für den allgemeineren Fall, dass die Signaleigenschaften selbst durch eine Ordinalskala nicht beschrieben werden können — wenn keine Ordnungsrelation zwischen zwei Ereignissen festgestellt werden kann —, ergibt die Zuordnung des Signals zu einer stochastischen Variablen keinen Sinn. Hier kann z. B. der Kontingenzkoeffizient zum Einsatz kommen [Bam02].

6.3.1 Arten der zu detektierenden Ähnlichkeit

Obwohl der Ausdruck „Ähnlichkeit“ häufig mit „linearer Ähnlichkeit“ gleichgesetzt wird, kann eine Verallgemeinerung des Begriffs der Ähnlichkeit geeigneter sein, um Zusammenhänge zwischen Signalen zutreffend zu beschreiben:

- (a) Die erste Stufe der Verallgemeinerung betrifft die Amplituden der Signale. Kennlinien von Sensoren können nichtlineare Verzerrungen aufweisen, wobei die Rangordnung der Signalwerte jedoch erhalten bleibt. Auf dieser Stufe der Verallgemeinerung werden die Abszissenwerte der Signale nicht verändert, siehe Bild 6.2(a).

Ein typisches Beispiel solcher Signalveränderungen ist die Erfassung von Bildern mit nicht reproduzierbarer Beleuchtung. Unterschiedliche Beleuchtungskonfigurationen sowie nichtlineare Sensorcharakteristika führen zu Verzerrungen der Signalamplituden.

- (b) Bei der folgenden Verallgemeinerung können die Abszissenskalierungen der Signale Verzerrungen aufweisen, siehe Bild 6.2(b). Solche Verhältnisse sind typisch für zeitabhängige Prozesse, bei der die Zeitbasis durch eine schlecht reproduzierbare Bewegung begründet wird. Zusätzlich können nichtlineare Amplitudenskalierungen wie in Punkt (a) auftreten.

Im Kontext der Bilderfassung treten Dehnungen der Abszisse durch Abbildungsfehler der Optik auf. Auch in der Merkmalsextraktion von Riefenspu-

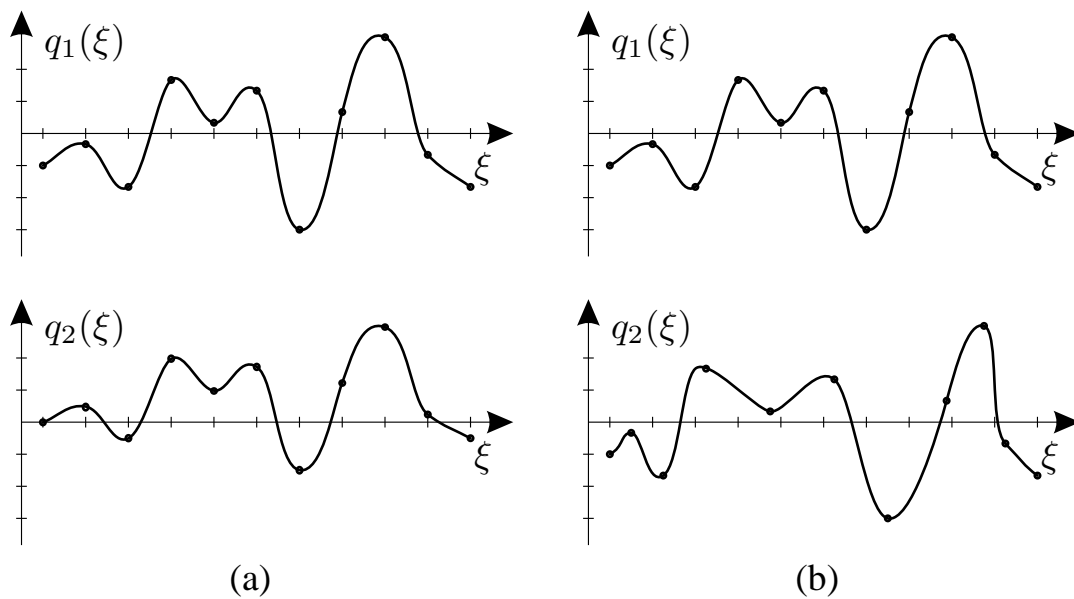


Bild 6.2: Signale, die unterschiedliche Arten von Ähnlichkeit aufweisen: (a) Nicht-lineare Amplitudenskalierung; (b) Verzerrung der Abszissenskalierung.

ren können Verzerrungen der Abszisse auftreten, wenn z. B. der Winkel der Schneidenlinie unzutreffend geschätzt wird, siehe Abschnitt 5.2.2.

- (c) Eine deutlich allgemeinere Definition von Ähnlichkeit verzichtet auf eine Ordinalskala zur Beschreibung der Ereignisse des betrachteten Prozesses. Eine geeignete Beschreibung verwendet lediglich die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Ereignisses. Im Gegensatz zu den beiden erstgenannten Verallgemeinerungen, bei denen Erweiterungen der Korrelationsverfahren zu geeigneten Detektionsstrategien führen können, sind hier andersartige Methoden der Informationstheorie wie z. B. die Kreuzentropieanalyse erforderlich, siehe Abschnitt 6.3.3.

Bezüglich der Aussagekraft der drei Definitionen kann leicht festgestellt werden, dass der Grad der von der KKF bestimmten Ähnlichkeit von (a) nach (c) abnimmt. Daraus lässt sich ableiten, dass in gleichem Maß unschärfere Detektionsverfahren benötigt werden.

6.3.2 Energieansätze

Methoden zur Energieminimierung stellen ein leistungsfähiges Werkzeug zur Formulierung einer Optimierungsaufgabe dar, selbst wenn mehrere Nebenbedingungen zu berücksichtigen sind [Cla90, Pel97]. Diese Eigenschaft prädestiniert sie zur

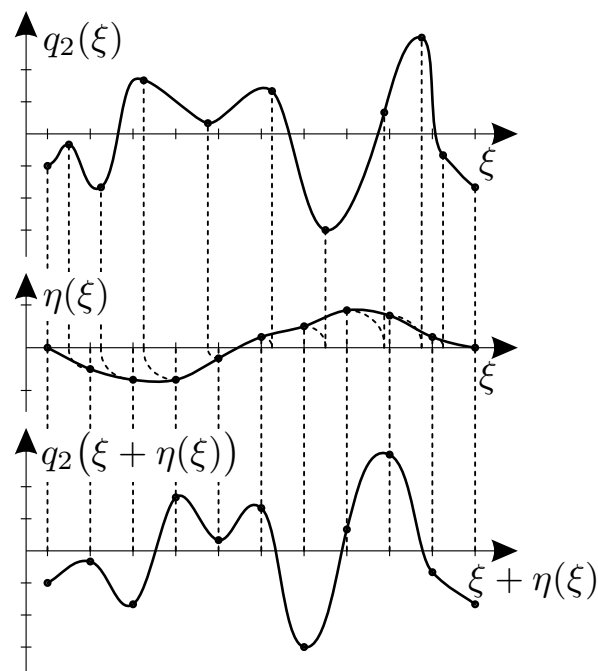


Bild 6.3: Ausgleich einer Abszissenskalierung.

Behandlung schlecht gestellter Probleme, zu denen die Detektion verallgemeinerter Ähnlichkeit gehört. Das Ergebnis der Optimierung erhält man durch Minimierung der verallgemeinerten Energiefunktion

$$E = \sum_i \lambda_i E_i \rightarrow \min, \quad (6.5)$$

wobei die gewünschten Eigenschaften des Optimierungsergebnisses durch die Energiefunktionale E_i modelliert werden und mit ihren jeweiligen Gewichtungsfaktoren λ_i zur Energiefunktion beitragen. Die Energiefunktionale E_i müssen daher so formuliert werden, dass sie das Vorwissen sowohl über das optimale Fusionsergebnis als auch in Bezug auf die Nebenbedingungen widerspiegeln.

Die Anwendung von Methoden der Energieminimierung für die Detektion von Ähnlichkeit wird im Folgenden anhand des Beispiels einer nichtlinearen Abszissenskalierung aus Bild 6.2(b) gezeigt. Ein möglicher Ansatz zum Ausgleich einer solchen Verzerrung ist die Anwendung einer Abszissen-Umskalierung $\eta(\xi)$ auf eines der beiden Signale. Bild 6.3 zeigt das gegenüber $q_1(\xi)$ verzerrte Signal $q_2(\xi)$, aus dem mittels einer geeigneten Skalierungsfunktion $\eta(\xi)$ als Ergebnis das korrigierte Signal $q_2(\xi + \eta(\xi))$ erhalten wird. Die Skalierung modifiziert lokal die Abtastperiode und stellt somit eine lineare Ähnlichkeit wieder her, die z. B. mittels der KKF ausgewertet werden kann.

Aus Stabilitätsgründen und zur Vermeidung von Artefakten muss die Skalierungs-

funktion kontinuierlich sein und der Bedingung

$$\frac{d\eta(\xi)}{d\xi} > -1 \quad (6.6)$$

genügen. Zusätzlich sollten bei der Optimierung kleine Funktionswerte von $\eta(\xi)$ bevorzugt werden. Diese erwünschten Eigenschaften können mit einer Energiefunktion aus drei Termen ausgedrückt werden:

$$\begin{aligned} E &= E_D(\eta) + \lambda_1 E_G(\eta) + \lambda_2 E_Q(q_1, q_2) \\ &= \int_{\xi} \eta^2(\xi) + \lambda_1 \int_{\xi} \left(\frac{d\eta(\xi)}{d\xi} \right)^2 \\ &\quad + \lambda_2 (-1) \left(q_1(\xi) \otimes q_2(\xi + \eta(\xi)) \right), \quad \lambda_i > 0. \end{aligned} \quad (6.7)$$

Der erste Term $E_D(\eta)$ sorgt für Datennähe des modifizierten Signals $q_2(\xi + \eta(\xi))$, indem der Abstand des modifizierten Signals vom Ursprungssignal quadratisch gewichtet und somit bestraft wird. Der zweite Term $E_G(\eta)$ bewertet die Steigung der Skalierungsfunktion $\eta(\xi)$. Der letzte Term $E_Q(q_1, q_2)$ beurteilt die lineare Ähnlichkeit zwischen dem modifizierten Signal $q_2(\xi + \eta(\xi))$ und $q_1(\xi)$. In diesem Term könnten auch andere Verfahren als die hier verwendete KKF zum Einsatz kommen, sofern mit steigender Ähnlichkeit ein niedrigerer Wert von $E_Q(q_1, q_2)$ erhalten wird.

Zur geeigneten Gewichtung der Energierme müssen die Regularisierungsparameter λ_i so gewählt werden, dass das Ergebnis der Optimierung die gewünschten Eigenschaften in hinreichendem Maß besitzt. Idealerweise führt die Optimierung zum globalen Minimum von E und ermöglicht damit die Bestimmung sowohl der Korrekturfunktion $\eta(\xi)$ als auch des letztendlich gesuchten deformationsinvarianten Ähnlichkeitsmaßes $E_Q(q_1, q_2)$.

Obwohl Energieminimierungsansätze ein flexibles Hilfsmittel zur Formulierung von Optimierungsaufgaben darstellen, wirft die Anwendung solcher Strategien beträchtliche Probleme auf:

- Die Minimierung der Energiefunktion von Gl. (6.5) erfolgt iterativ. Zur Vermeidung von Instabilitäten ist eine geeignete Wahl der Regularisierungsparameter λ_i von entscheidender Bedeutung. Im Beispiel von Gl. (6.7) spielt der Beitrag des Glattheitsterms $E_G(\eta)$ eine wichtige Rolle. Andererseits kann jedoch eine stärkere Glättung von $\eta(\xi)$ das Ähnlichkeitsmaß $E_Q(q_1, q_2)$ ungünstig beeinflussen.

- Das Ergebnis der Optimierung hängt von der Vorgabe der Regularisierungsparameter λ_i ab. Da diese innerhalb der Stabilitätsgrenzen weitgehend frei festgelegt werden können, stellt das Ergebnis nur das Optimum in Bezug auf den gewählten Parametersatz dar.
- Bei der praktischen Umsetzung des Verfahrens führt die iterative Optimierung der ausgedehnten Energiefunktion zu einem enormen Rechenaufwand. Aus diesem Grund vermeiden viele Strategien der Energieminimierung die explizite Berechnung der Energiefunktion von Gl. (6.5). Stattdessen wird eine Approximation des Minimums durchgeführt, indem die Komponenten der Energiefunktion getrennt optimiert werden [Pue99a].

6.3.3 Kreuzentropie-Analyse

Ein wesentlich allgemeinerer Ansatz, der aus der Informationstheorie stammt und die Bewertung beliebiger statistischer Zusammenhänge ermöglicht, beruht auf der *Kreuzentropiefunktion* (KEF) [Fan66, Kut89, Sha69]. Die Entropie H ist definiert als ein quantitatives Maß der Unsicherheit bezüglich des signalerzeugenden Prozesses Q , bei dem eine Anzahl von N diskreten Ereignissen q_i auftreten kann:

$$H(Q) := - \sum_{i=0}^{N-1} P(q_i) \log_2(P(q_i)) , \quad (6.8)$$

wobei $P(q_i)$ die diskreten Wahrscheinlichkeiten der Ereignisse q_i bezeichnet. Sie stellt ein Maß für den Informationsgewinn dar, den ein Beobachter beim Eintritt eines Ereignisses q_i im Mittel erwarten kann.

Wenn zwei Prozesse Q_1 und Q_2 betrachtet werden, kann die Verbundwahrscheinlichkeit $P(q_{1;i}, q_{2;j})$ für alle möglichen $N_1 \cdot N_2$ Kombinationen der Ereignisse $q_{1;i}$ und $q_{2;j}$ bestimmt werden. Entsprechend lässt sich eine Verbundentropie durch

$$H(Q_1, Q_2) := - \sum_{i=0}^{N_1-1} \sum_{j=0}^{N_2-1} P(q_{1;i}, q_{2;j}) \log_2(P(q_{1;i}, q_{2;j})) \quad (6.9)$$

definieren. Falls die Prozesse Q_1 und Q_2 statistisch unabhängig sind, d. h. wenn

$$P(q_{1;i}, q_{2;j}) = P(q_{1;i}) \cdot P(q_{2;j}) \quad (6.10)$$

gilt, lässt sich die Verbundentropie wegen der Additionseigenschaft des Logarithmus vereinfachen zu

$$H(Q_1, Q_2) = H(Q_1) + H(Q_2) . \quad (6.11)$$

Man kann zeigen, dass Gl. (6.11) eine obere Schranke für die Verbundentropie darstellt [Fan66, Sha69]. Die Abweichung der Verbundentropie von dieser Schranke kann daher als Ähnlichkeitsmaß für Q_1 und Q_2 interpretiert werden. Man erhält damit die übliche Definition der Kreuzentropiefunktion² (KEF):

$$I(Q_1; Q_2) := H(Q_1) + H(Q_2) - H(Q_1, Q_2) . \quad (6.12)$$

Im Speziellen zeigt die KEF folgende Eigenschaften:

- Die KEF ist symmetrisch in Bezug auf die Prozesse Q_1 und Q_2 :

$$I(Q_1; Q_2) = I(Q_2; Q_1) . \quad (6.13)$$

- Die Werte der KEF liegen zwischen 0 und der kleineren der beiden Einzelentropien $H(Q_1)$ und $H(Q_2)$. Die KEF wird zu 0 genau dann, wenn die beiden Prozesse statistisch unabhängig sind:

$$0 \leq I(Q_1; Q_2) \leq \min(H(Q_1); H(Q_2)) , \quad (6.14)$$

$$I(Q_1; Q_2) = 0 \iff P(q_{1;i}, q_{2;j}) = P(q_{1;i}) \cdot P(q_{2;j}) . \quad (6.15)$$

Für die Detektion von Ähnlichkeiten kann die KEF als Maß statistischer Ähnlichkeit aufgefasst werden. Dabei ist von großer Bedeutung, dass für die Anwendbarkeit der KEF nur geringe Voraussetzungen gelten: Die diskreten Wahrscheinlichkeiten $P(q_{1;i})$ und $P(q_{2;j})$ müssen definiert sein, außerdem müssen die Ereignisräume von Q_1 und Q_2 vollständig und disjunkt sein:

$$\sum_{i=0}^{N_1-1} P(q_{1;i}) = 1 , \quad \sum_{j=0}^{N_2-1} P(q_{2;j}) = 1 . \quad (6.16)$$

Dadurch repräsentiert die KEF ein sehr allgemeines Hilfsmittel, um die in Abschnitt 6.3.1 (c) beschriebenen Ähnlichkeiten auszuwerten.

Aus dem Fehlen der Notwendigkeit einer Ordnungsrelation der Signalwerte ergibt sich allerdings auch der wichtigste Nachteil der Kreuzentropie-Analyse: Bei Signalen, die eine Ordinalskala aufweisen, werden Signalamplituden $q(\xi)$ — z. B. die Höhe einzelner Signalspitzen — nicht bewertet. Die von der KEF detektierten Ähnlichkeiten müssen daher nicht notwendigerweise mit empirisch erkennbaren Zusammenhängen übereinstimmen. Der Preis für die Allgemeinheit dieses Ansatzes ist daher ein erheblich geringerer Informationsgewinn gegenüber einer Analyse durch die KKF, falls die zu untersuchenden Signale einen im Wesentlichen

²Die Kreuzentropiefunktion wird auch als Transinformation, Mutual Information, Synentropie oder Relative Entropie bezeichnet.

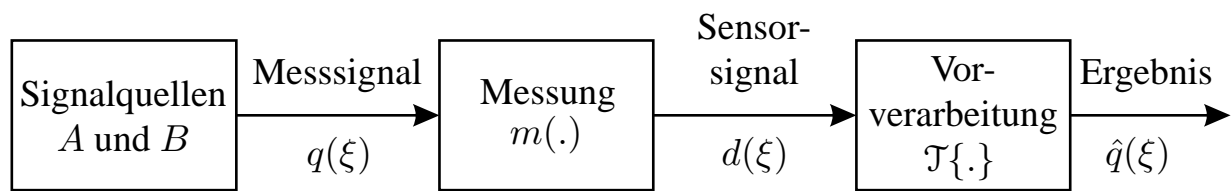


Bild 6.4: Vorverarbeitung zur Manipulation der Statistik erster Ordnung.

linearen Zusammenhang aufweisen. Gerade bei Bilddaten können durch die KEF indizierte Ähnlichkeiten nicht unbedingt auf visuell auffällige Merkmale zurückgeführt werden.

6.3.4 Nichtlineare Transformationen

Als Alternative zu den in den Abschnitten 6.3.2 und 6.3.3 vorgestellten Ansätzen sollen im Folgenden Strategien aufgezeigt werden, wie die in Abschnitt 6.2 vorgestellte Methodik auf Basis der KKF für statistisch nichtlinear abhängige Signale erweitert werden kann. Um den Grundgedanken dieser Strategien zu erläutern, ist in Bild 6.4 ein Signalverarbeitungsmodell skizziert. Zwei Signalquellen A und B emittieren die Messsignale $q_\alpha(\xi)$, $\alpha \in \{A, B\}$. Die Signalquellen sollen linear abhängige Musterfunktionen $q_{A,i}(\xi)$ und $q_{B,j}(\xi)$ erzeugen. Im Messsystem werden nun die Signale $q(\xi)$ durch die Messfunktion $m(\cdot)$ auf die Sensorsignale $d(\xi)$ abgebildet:

$$d(\xi) = m(q(\xi)) . \quad (6.17)$$

Selbst wenn eine perfekte Korrelation zwischen zwei Messsignalen $q_{A,i}(\xi)$ und $q_{B,j}(\xi)$ vorliegt, können unvermeidbare Nichtlinearitäten der Signalerfassung diese so verändern, dass die KKF nach Gl. (6.1) für die entsprechenden Sensorsignale $d(\xi)$ deutlich geringer ausfällt als vor der Messung.

Eine lineare Funktion $m(\cdot)$ bewirkt eine Verschiebung und/oder eine Änderung der Breite (und damit der Höhe) der Wahrscheinlichkeits-Dichtefunktion (WDF) $p_D(d)$ der Signale $d(\xi)$, siehe Bilder 6.5(a) und (b). Falls der Messvorgang jedoch durch eine nichtlineare Funktion beschrieben wird, kann sich die Gestalt der WDF $p_D(d)$ erheblich verändern, siehe Bild 6.5(c). Aus dieser Verzerrung resultiert dann eine deutlich reduzierte Korrelation der Sensorsignale $d_{A,i}(\xi)$ und $d_{B,j}(\xi)$ im Vergleich zu den ursprünglichen Messsignalen $q_{A,i}(\xi)$ und $q_{B,j}(\xi)$.

Um den Einfluss einer nichtlinearen Messfunktion aus der Datenerfassung zu reduzieren, wird nun eine nichtlineare Transformation $\mathcal{T}\{\cdot\}$ durchgeführt. Im Idealfall

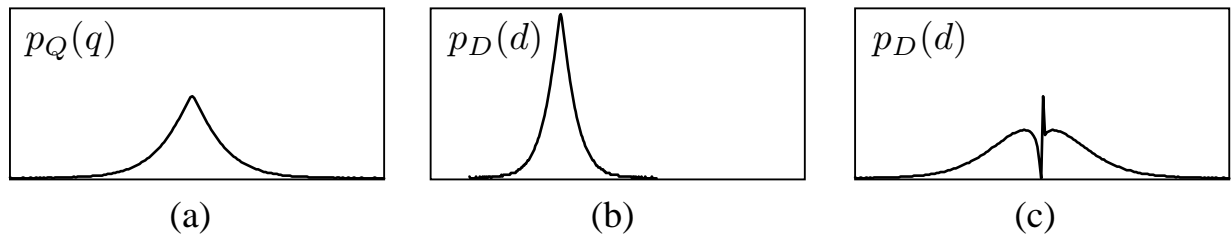


Bild 6.5: Beispiele von Wahrscheinlichkeits-Dichtefunktionen (WDFen): (a) WDF $p_Q(q)$ eines Quellsignals $q(\xi)$; (b) WDF $p_D(d)$ des mit einer linearen Messfunktion aus $q(\xi)$ erhaltenen Signals $d(\xi)$; (c) WDF $p_D(d)$ des mit einer nichtlinearen Messfunktion aus $q(\xi)$ erhaltenen Signals $d(\xi)$.

soll diese Transformation die Messfunktion von Gl. (6.17) invertieren:

$$\hat{q}(\xi) = \mathcal{T}\{d(\xi)\} \stackrel{!}{=} q(\xi) . \quad (6.18)$$

In vielen Fällen ist jedoch $m(\cdot)$ nicht bekannt oder keine umkehrbare Funktion, so dass eine geeignete Umkehr-Transformation $\mathcal{T}\{\cdot\}$ nicht direkt aus der Messfunktion $m(\cdot)$ bestimmt werden kann.

Eine alternative Strategie besteht darin, bei den zu vergleichenden Signalen gezielt bestimmte statistische Eigenschaften anzugleichen. Durch eine Histogramm-Transformation kann sichergestellt werden, dass die aufbereiteten Sensorsignale der beiden Signalquellen A und B identische WDFen und folglich die gleiche Statistik erster Ordnung aufweisen. Für den Fall, dass $m(\cdot)$ eine monotone Funktion ist, kann nach der Transformation eine höhere Korrelation erwartet werden.

Im Folgenden werden zwei Ansätze diskutiert, die eine Angleichung der Statistik erster Ordnung zweier Signale ermöglichen. Beide Strategien basieren auf der Vorgabe bestimmter statistischer Eigenschaften für die zu vergleichenden Signale. Die erste Strategie führt eine verschiebungsinvariante Transformation des globalen Histogramms durch. Eine Verfeinerung dieses Ansatzes wird in der zweiten Strategie vorgestellt, wobei die lokalen WDFen der Signale an eine vorgegebene globale WDF angeglichen werden.

6.3.4.1 Verschiebungsinvariante Transformation

Für eine verschiebungsinvariante Histogramm-Transformation müssen die Amplituden des Sensorsignals $d(\xi)$ so auf Werte $\hat{q}(d)$ abgebildet werden, dass $\hat{q}(d)$ gemäß $p_{\hat{Q}}(\hat{q})$ verteilt ist [Gon02]. Da die kumulativen Verteilungen $P_{\hat{Q}}(\hat{q})$ und $P_D(d)$ an jeder Stelle $\hat{q}(d)$ gleich sein müssen, folgt für die gewünschte Abbil-

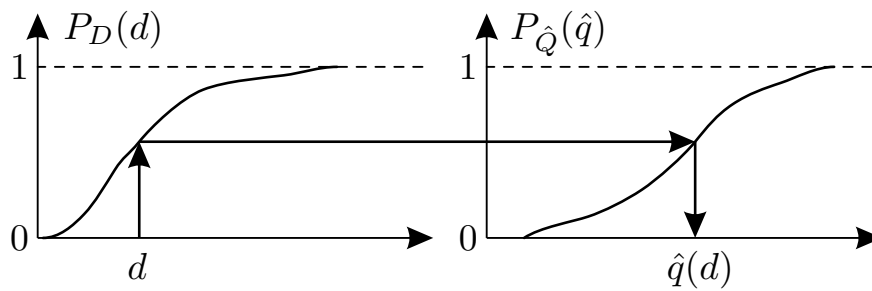


Bild 6.6: Abbildung der Signalamplituden d auf $\hat{q}(d)$.

dung

$$P_{\hat{Q}}(\hat{q}(d)) = \int_{-\infty}^{\hat{q}(d)} p_{\hat{Q}}(\beta) \, d\beta \stackrel{!}{=} \int_{-\infty}^d p_D(\beta) \, d\beta = P_D(d) \quad (6.19)$$

$$\Rightarrow \hat{q}(d) = P_{\hat{Q}}^{-1}(P_D(d)) . \quad (6.20)$$

Dabei transformiert $P_D(d)$ die Werte d in eine im Intervall $[0, 1]$ gleichverteilte Zufallsvariable, die mit Hilfe von $P_{\hat{Q}}^{-1}(\cdot)$ anschließend in eine gemäß $p_{\hat{Q}}(\hat{q})$ verteilte Zufallsvariable abgebildet wird, siehe Bild 6.6.

Für die Anwendung von Gl. (6.20) auf digitale Signale muss berücksichtigt werden, dass sowohl die Werte als auch der Ort ξ diskrete Größen sind. Ferner werden die WDF durch ein Histogramm $h(d)$ und das kumulative Histogramm $H(d)$ durch dessen Summation geschätzt:

$$h(d) = \frac{1}{|\mathcal{D}|} \sum_{\xi \in \mathcal{D}} \delta_{d(\xi)}^d, \quad H(d) = \sum_{\gamma=d_0}^d h(\gamma) \quad (6.21)$$

mit

$$d \in \{d_0, d_1, \dots, d_{|\mathcal{D}|-1}\}, \quad \delta_a^b = \begin{cases} 1, & a = b, \\ 0, & a \neq b, \end{cases} \quad (6.22)$$

wobei \mathcal{D} die diskrete Trägermenge des Sensorsignals $d(\xi)$ mit $|\mathcal{D}|$ Elementen ist und δ_a^b das Kronecker-Symbol bezeichnet. Eine Realisierung der in Gl. (6.20) formulierten Transformation kann näherungsweise durch

$$\mathcal{T}\{d(\xi); H_{\text{Ziel}}(d)\} = \arg \min_{\gamma \in \{d_0, \dots, d_{|\mathcal{D}|-1}\}} \{|H_{\text{Ziel}}(\gamma) - H(d)|\} \quad (6.23)$$

erhalten werden. Hier bezeichnet $H_{\text{Ziel}}(d)$ ein frei definierbares globales kumulatives Histogramm, das der globalen Intensitätsverteilung von $d(\xi)$ eingepägt

werden soll. Im Idealfall sollte bei der Wahl eines geeigneten kumulativen Histogramms $H_{\text{Ziel}}(d)$ die Statistik des Messsignals $q(\xi)$ der Signalquelle berücksichtigt werden. Da jedoch ausreichende Kenntnisse über die Eigenschaften von $q(\xi)$ häufig nicht vorliegen, besteht eine realisierbare Alternative darin, beispielsweise das Signal $d_2(\xi)$ so zu transformieren, dass es das Histogramm $H(d_1)$ von $d_1(\xi)$ aufweist. Das Signal $d_1(\xi)$ bleibt dabei unverändert:

$$\hat{q}_1(\xi) = d_1(\xi) , \quad \hat{q}_2(\xi) = \mathcal{T}\{d_2(\xi); H(d_1)\} . \quad (6.24)$$

Nach dieser Transformation wird die Kreuzkorrelation mittels der Gln. (6.1) und (6.2) bestimmt.

Beispiel: Die sinnvolle Anwendung einer verschiebungsinvarianten Histogramm-Transformation wird anhand eines Ortungssystems für Schienenfahrzeuge demonstriert [Pue01b]. Ein vielversprechender Ansatz zur fahrzeuggebundenen Positionsbestimmung besteht darin, bestimmte Merkmale der Strecke wie z. B. Weichen, Kreuzungen etc. mit Hilfe von am Fahrzeug angebrachten Sensoren zu erfassen und mit einer Datenbank in Form eines digitalen Streckenatlases zu vergleichen, der alle diese Ereignisse des Schienennetzes enthält [Eng02, Mes00].

Zur Erfassung charakteristischer Metallteile im Schienenbereich werden Wirbelstromsensoren in einem festgelegten Abstand z von der Schienenoberkante am Fahrzeug befestigt [Eng00]. Aufgrund der Sensorcharakteristik bewirken kleine Abweichungen von der kalibrierten Sensorposition nichtlineare Änderungen der Signalamplitude. Um dennoch eine robuste Identifizierung von Weichen mit Hilfe der KKF zu ermöglichen, müssen nichtlineare Verzerrungen zwischen den Sensordaten und dem entsprechenden Eintrag im digitalen Streckenatlas toleriert werden.

Für den häufig auftretenden Fall, dass die Sensordistanz z zur Schienenoberkante ungewollt variiert, können die Detektionsergebnisse durch eine verschiebungsinvariante Transformation signifikant verbessert werden. Bild 6.7 zeigt beispielhaft die Verbesserungen, welche durch die vorgestellte Strategie erzielt werden können: Während das in der digitalen Streckenkarte hinterlegte Signal $d_1(\xi)$ der Weiche mit einer Sensordistanz von $z_1 = 120$ mm aufgenommen worden ist, besitzt der Sensor bei einer weiteren Fahrt über dieselbe Weiche einen reduzierten Abstand von $z_2 = 80$ mm. Durch die verschiebungsinvariante Transformation wird das Sensorsignal $d_2(\xi)$ so auf das Signal $\hat{q}_2(\xi)$ abgebildet, dass sein Histogramm $h(\hat{q}_2)$ mit dem Histogramm $h(d_1)$ des in der digitalen Streckenkarte abgespeicherten Signals $d_1(\xi)$ der Weiche übereinstimmt. Die erzielte Verbesserung der Detektion zeigt sich im Maximum der KKF, dessen Wert um 9% ansteigt. \diamond

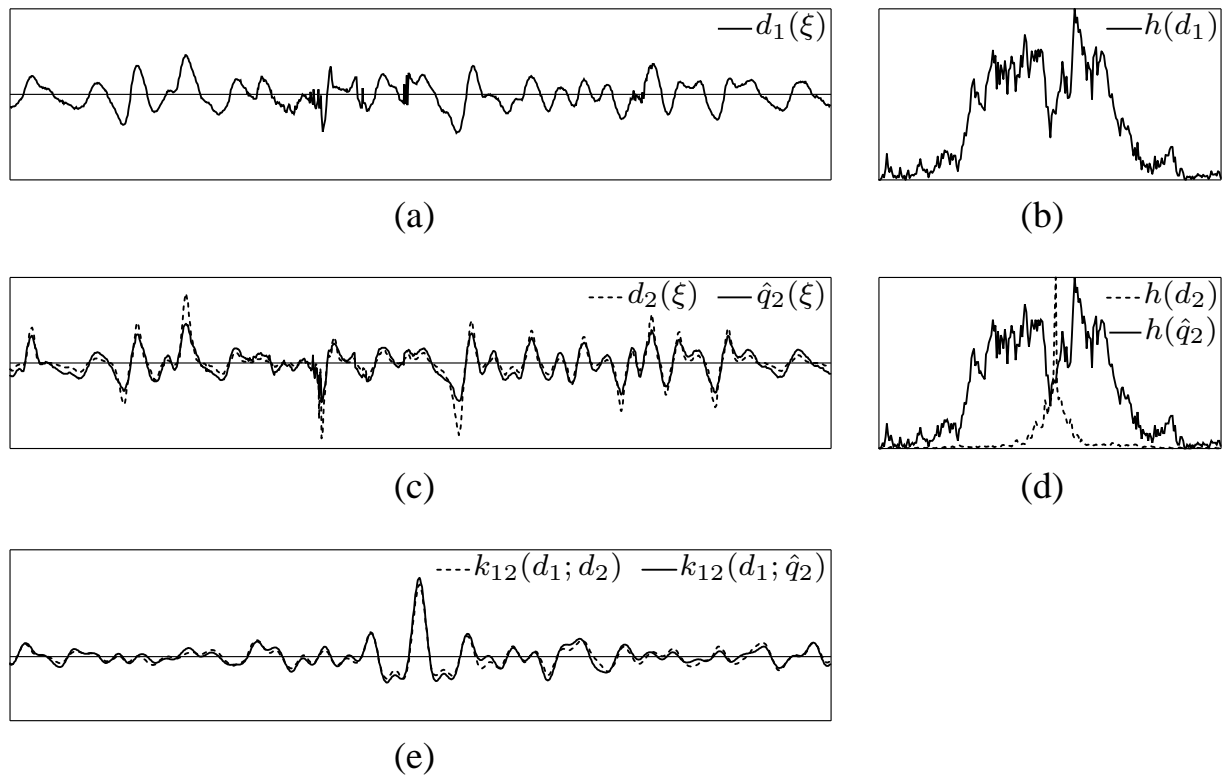


Bild 6.7: Detektionsergebnisse einer Weiche: (a) Eintrag $d_1(\xi)$ des digitalen Streckenatlasses, aufgenommen mit $z_1 = 120$ mm; (b) Histogramm $h(d_1)$; (c) Sensorsignal $d_2(\xi)$, aufgenommen mit $z_2 = 80$ mm und transformiertes Signal $\hat{q}_2(\xi)$; (d) Histogramme $h(d_2)$ und $h(\hat{q}_2)$ des Sensorsignals und des transformierten Signals (normiert auf das jeweilige Maximum); (e) Korrelationsergebnisse: $\max\{k_{12}(d_1; d_2)\} = 0,84$; $\max\{k_{12}(d_1; \hat{q}_2)\} = 0,92$.

6.3.4.2 Verschiebungsvariante Transformation

Ziel einer verschiebungsvarianten Histogramm-Transformation ist es, die Statistik erster Ordnung unabhängig von der Position ξ zu machen. Diese Forderung ist äquivalent mit der Bedingung, dass alle lokalen WDFen $p_D(d; \xi)$ identisch mit einer von ξ unabhängigen globalen WDF $p_{\hat{Q}}(\hat{q})$ sind. Die erforderliche Histogramm-Transformation kann daher durch Egalisieren aller lokalen WDFen erreicht werden.

Im Gegensatz zu der im vorausgegangenen Abschnitt erläuterten Methode ist die Transformation hier abhängig von der Position ξ und damit verschiebungsvariant. Die Signalamplituden d müssen dabei so auf die Werte $\hat{q}(d; \xi)$ abgebildet werden, dass $\hat{q}(d; \xi)$ gemäß dem globalen Histogramm $p_{\hat{Q}}(\hat{q})$ verteilt ist. Die kumulativen Verteilungen $P_{\hat{Q}}(\hat{q})$ und $P_D(d; \xi)$ müssen daher an der Stelle $\hat{q}(d; \xi)$ identisch

sein, so dass folgende Beziehung gelten muss:

$$P_{\hat{Q}}(\hat{q}(d; \xi)) = \int_{-\infty}^{\hat{q}(d; \xi)} p_{\hat{Q}}(\beta) \, d\beta \stackrel{!}{=} \int_{-\infty}^d p_D(\beta; \xi) \, d\beta = P_D(d; \xi) \quad (6.25)$$

$$\Rightarrow \hat{q}(d; \xi) = P_{\hat{Q}}^{-1}(P_D(d; \xi)) . \quad (6.26)$$

Zur Anwendung dieser Gleichung auf digitale Signale muss wie im Fall der verschiebungsinvarianten Transformation die Quantisierung der Signalwerte und die Diskretisierung des Ortes ξ berücksichtigt werden. Zusätzlich muss gefordert werden, dass die lokalen statistischen Eigenschaften ortsunabhängig sind. Zu diesem Zweck wird eine lokale Umgebung \mathcal{U} um die Position ξ so definiert, dass die lokalen Fluktuationen der Signaleigenschaften klein genug sind, um sie innerhalb dieser Umgebung vernachlässigen zu dürfen:

$$\mathcal{U}(\xi) := \{ \chi \mid |\chi - \xi| < \varepsilon \} . \quad (6.27)$$

Andererseits sollte \mathcal{U} groß genug sein, um Verfälschungen der größten Details des Nutzanteils von $d(\xi)$ zu vermeiden. Die lokalen WDFen werden mit Hilfe lokaler Histogramme $h(d; \xi, \mathcal{U})$ und lokaler kumulativer Histogramme $H(d; \xi, \mathcal{U})$ geschätzt:

$$h(d; \xi, \mathcal{U}) = \frac{1}{|\mathcal{U}|} \sum_{\varepsilon \in \mathcal{U}} \delta_{d(\xi + \varepsilon)}^d , \quad H(d; \xi, \mathcal{U}) = \sum_{\gamma=d_0}^d h(\gamma; \xi, \mathcal{U}) . \quad (6.28)$$

Dabei bezeichnet $|\mathcal{U}|$ die Größe der Umgebung \mathcal{U} . Für die diskrete Realisierung der Transformation kann die folgende Näherung

$$\mathcal{T}\{d(\xi); H_{\text{Ziel}}(d), \mathcal{U}\} = \arg \min_{\gamma \in \{d_0, \dots, d_{|\mathcal{D}|-1}\}} \{ |H_{\text{Ziel}}(\gamma) - H(d; \xi, \mathcal{U})| \} \quad (6.29)$$

verwendet werden, wobei $H_{\text{Ziel}}(d)$ ein frei definierbares globales kumulatives Histogramm bezeichnet, das dem Signal $d(\xi)$ eingepreßt werden soll.

Das in Abschnitt 6.3.4.1 erläuterte Problem, ein geeignetes globales kumulatives Histogramm $H_{\text{Ziel}}(d)$ zu finden, gilt auch im Fall einer verschiebungsvarianten Histogramm-Transformation. Eine zur dortigen Lösung analoge Strategie kann angewendet werden, falls keine ausreichenden Kenntnisse über die Statistik des Signals $q(\xi)$ vorliegen:

$$\hat{q}_1(\xi) = d_1(\xi) , \quad \hat{q}_2(\xi) = \mathcal{T}\{d_2(\xi); H(d_1), \mathcal{U}\} . \quad (6.30)$$

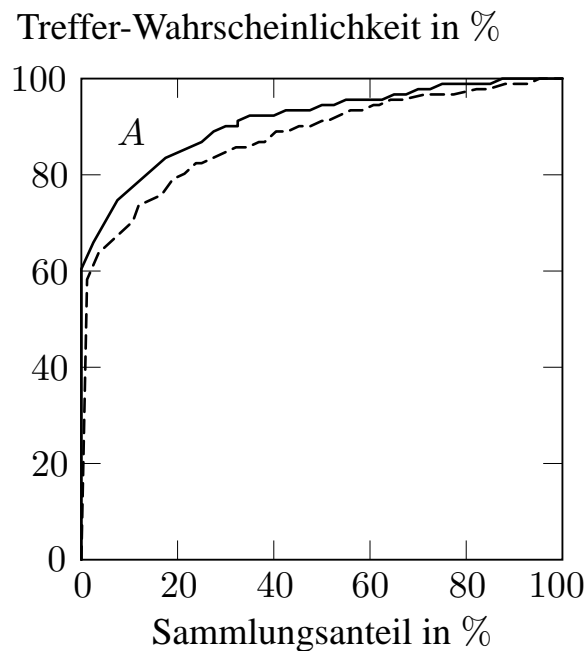


Bild 6.8: Verbesserung der Detektionsergebnisse durch Anwendung einer verschiebungsvarianten Histogramm-Transformation: Konzentrationskurve mit (durchgezogene Linie) und ohne (Strichlinie) Anwendung der Transformation.

Beispiel: Um den Nutzen des vorgestellten Ansatzes zu verdeutlichen, werden die Konzentrationskurven eines umfangreichen Datenbankvergleichs mit und ohne Anwendung der Transformation miteinander verglichen, siehe Abschnitt 6.5.1.

Als Ausgangsbasis zeigt die Strichlinie in Bild 6.8 die Konzentrationskurve bei direkter Kreuzkorrelation der Signaturen. Die Fläche A über der Kurve als Maß für den durchschnittlich zu untersuchenden Sammlungsanteil zum Auffinden eines vorhandenen Treffers besitzt die Größe $A = 14,7\%$.

Für die verschiebungsvariante Histogramm-Transformation wird die Statistik der Signaturen so manipuliert, dass eine für den Vergleich günstigere Verteilungsfunktion erhalten wird. Dazu wird eine verallgemeinerte Gauß-Funktion $p_X(x)$ [Lun63, Via83]

$$p_X(x) = \frac{1}{2(r\varsigma_r)^{\frac{1}{r}} \Gamma(1 + \frac{1}{r})} \exp\left(-\frac{|x|^r}{r\varsigma_r}\right) \quad (6.31)$$

jeder Signatur als lokale WDF eingepreßt. Der Exponent wird basierend auf empirischen Untersuchungen zu $r = 1,18$ gewählt. Die Größe ς_r ist das r -te zentrale Absolutmoment einer gemäß Gl. (6.31) verteilten Größe, sie wurde auf einen konstanten Wert festgelegt. Der Vorfaktor sorgt für die geeignete Skalierung des Exponentialterms, so dass die Fläche unter der WDF den Wert 1 besitzt [Sch01a].

Die Größe der Umgebung \mathcal{U} ist so gewählt, dass der Einfluss von Bereichen der Signaturen, die kein Nutzsignal enthalten, minimiert wird. Die modifizierten Signaturen werden in gleicher Weise wie die Vergleichsspuren mit der KKF nach Abschnitt 6.2 ausgewertet und in einer Konzentrationskurve zusammengefasst, siehe Bild 6.8 (durchgezogene Linie). Die nun erhaltene Fläche über der Konzentrationskurve ist mit $A = 11,6\%$ um mehr als 21% kleiner als ohne Anwendung der Transformation.

Dies belegt, dass diese Strategie der nichtlinearen Anpassung von Signaturen selbst im Fall umfangreicher Spurensammlungen zum Erfolg führt, bei denen die Wahrscheinlichkeit falsch erkannter Ähnlichkeiten besonders groß ist. \diamond

6.4 Vergleich unterschiedlich orientierter Spuren

Eine wesentliche Schwierigkeit der Auswertung von Werkzeugspuren ist die Unsicherheit bezüglich der Orientierung der Werkzeugschneide. Während bei Riefenspuren auf Geschossen die korrekte Orientierung der Spur allein durch die Gestalt des Geschosses und die Kinematik der Verfeuerung zweifelsfrei definiert ist, kann die richtige Ausrichtung bei Werkzeugspuren ohne solche eindeutigen Merkmale in der Regel nicht festgestellt werden.

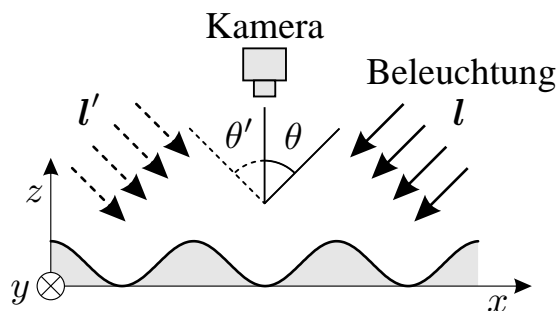
6.4.1 Gegensätzliche Beleuchtung

Zur Lösung dieses Problems wird jede Spur zweimal mit gegensätzlichen Beleuchtungsrichtungen erfasst [Hei02c], siehe Abschnitt 3.1.5. Die Merkmalsextraktion ergibt daher zwei Signaturen für jede Spur. Obwohl der Zusammenhang zwischen der Beleuchtungsrichtung und der reflektierten Strahlungsdichte nichtlinear ist und zudem stark von Abschattungseffekten abhängt, besteht zumindest eine qualitative Ähnlichkeit zwischen den beiden Signaturen.

Beispiel: Für den Spezialfall einer Oberfläche mit harmonischem Profil soll der Zusammenhang bestimmt werden. Die Riefenstruktur

$$z(\boldsymbol{x}) = Z \cdot \cos x + z_0 \quad (6.32)$$

wird von einer Kamera beobachtet, deren Blickrichtung senkrecht auf der Bezugsebene $z = 0$ steht. Bild 6.9 zeigt den Profilschnitt $y = \text{const}$. Zur Beleuchtung

**Bild 6.9:** Harmonisches Testprofil.

wird paralleles Licht verwendet, dessen Beleuchtungsvektor

$$\boldsymbol{l} = (-\sin \theta, 0, -\cos \theta)^T \quad (6.33)$$

senkrecht auf dem Riefenvektor $(0, y, 0)$ steht (durchgezogene Pfeile in Bild 6.9). Dabei bezeichnet θ den Elevationswinkel des von rechts einfallenden Lichts. Unter der Voraussetzung, dass keine Abschattung auftritt, d. h.

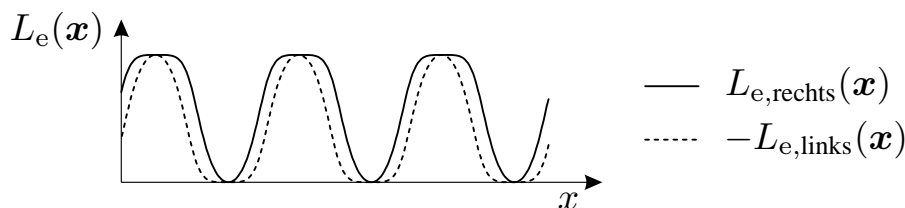
$$\theta \leq 90^\circ - \max \left\{ \arctan \frac{\partial z}{\partial x} \right\} = 90^\circ - |\arctan Z|, \quad (6.34)$$

erhält man die in Richtung der Kamera reflektierte Strahlungsdichte $L_{e,\text{rechts}}(\boldsymbol{x})$ für den Fall einer diffus reflektierenden Oberfläche (d. h. einer Lambertschen Reflexion) zu

$$L_{e,\text{rechts}}(\boldsymbol{x}) \propto \frac{Z \sin \theta \sin x + \cos \theta}{\sqrt{1 + Z^2 \sin^2 x}}. \quad (6.35)$$

Wird nun eine gegensätzliche Beleuchtung mit $\theta' = -\theta$ gewählt (gestrichelte Pfeile in Bild 6.9), gilt für die reflektierte Strahlungsdichte:

$$L_{e,\text{links}}(\boldsymbol{x}) \propto \frac{Z \sin \theta' \sin x + \cos \theta'}{\sqrt{1 + Z^2 \sin^2 x}} = \frac{-Z \sin \theta \sin x + \cos \theta}{\sqrt{1 + Z^2 \sin^2 x}}. \quad (6.36)$$

**Bild 6.10:** Qualitativer Verlauf der reflektierten Strahlungsdichten des harmonischen Testprofils von Bild 6.9 bei gerichteter Beleuchtung aus gegensätzlichen Richtungen mit $\theta = -\theta' = 45^\circ$.

Aus den Gln. (6.35) und (6.36) folgt

$$\frac{L_{e,\text{rechts}}(\boldsymbol{x})}{-L_{e,\text{links}}(\boldsymbol{x})} = \frac{Z \sin \theta \sin x + \cos \theta}{Z \sin \theta \sin x - \cos \theta}, \quad (6.37)$$

was einen Zusammenhang zwischen $L_{e,\text{rechts}}(\boldsymbol{x})$ und $-L_{e,\text{links}}(\boldsymbol{x})$ belegt. Bild 6.10 zeigt die reflektierten Strahlungsdichten des harmonischen Testprofils für beide Beleuchtungsfälle. Der qualitative Zusammenhang ist klar erkennbar. \diamond

Daraus kann für einen zuverlässigen Spurenvergleich die Notwendigkeit abgeleitet werden, dass bei gleich ausgerichteten Spuren beide Signaturen einer Spur verwendet werden müssen, wobei eine der beiden Signaturen an der x -Achse gespiegelt ist. Der Vergleich solcher Spuren beinhaltet folglich vier Einzelschritte, so dass jede Signatur $q_{1,\alpha}$, $\alpha \in \{r, l\}$ der einen Spur mit jeder Signatur $q_{2,\beta}$, $\beta \in \{r, l\}$ der anderen Spur verglichen wird. Als effektives Maß für die Ähnlichkeit der beiden Spuren kann dann z. B. das Maximum der jeweiligen Einzelvergleiche dienen. Das effektive Ähnlichkeitsmaß ergibt sich dann zu

$$\rho_{12,\text{eff}} := \max_{\alpha,\beta} \{\rho_{12,\alpha\beta}\} \quad (6.38)$$

mit

$$\rho_{12,\alpha\beta} := \begin{cases} \max\{q_{1,\alpha} \otimes q_{2,\beta}\}, & \alpha = r, \quad \beta = r, \\ \max\{q_{1,\alpha} \otimes (-q_{2,\beta})\}, & \alpha = r, \quad \beta = l, \\ \max\{(-q_{1,\alpha}) \otimes q_{2,\beta}\}, & \alpha = l, \quad \beta = r, \\ \max\{q_{1,\alpha} \otimes q_{2,\beta}\}, & \alpha = l, \quad \beta = l. \end{cases} \quad (6.39)$$

Bild 6.11(a) zeigt einen derartigen Vergleich zweier Spuren desselben Werkzeuges. Jede Spur wird durch ein Paar von Signaturen mit gegensätzlicher Beleuchtung repräsentiert, siehe Bild 6.11(a), obere Reihe. Die Signaturen werden nach der Strategie von Gl. (6.39) ausgewertet. Die resultierenden KKFen weisen alle ein ausgeprägtes Maximum bei derselben relativen Verschiebung τ_0 auf, siehe Bild 6.11(a), untere Reihe. Darüber hinaus ist die Varianz der Maxima mit $\text{var}\{\rho_{12,\alpha\beta}\} = 0,000825$ sehr niedrig.

Im Gegensatz dazu zeigt Bild 6.11(b) typische KKFen für Spuren unterschiedlicher Werkzeuge. Die dabei auftretenden Maxima sind bedeutend niedriger.

6.4.2 Unterschiedliche Orientierung

Zur Berücksichtigung unterschiedlicher Signalorientierungen kann eine Ergänzung der oben vorgestellten Vergleichsmethoden derart realisiert werden, dass eine

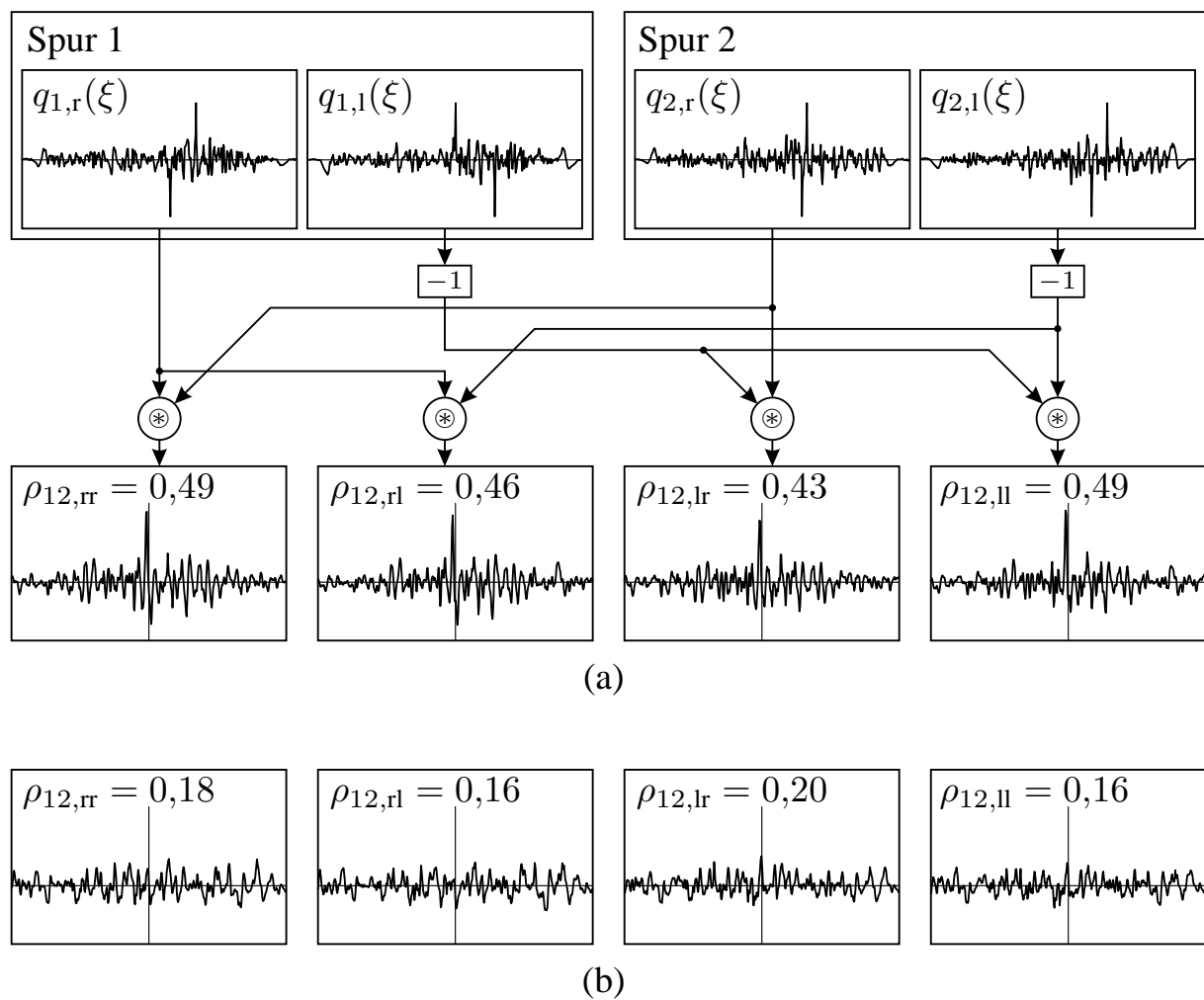


Bild 6.11: Vergleichsergebnisse mit gegensätzlicher Beleuchtung: (a) Obere Reihe: Signaturen von Spuren desselben Werkzeuges; Untere Reihe: Resultierende KKFen (die dünne vertikale Linie zeigt die Verschiebung $\tau = 0$); (b) KKFen für Spuren unterschiedlicher Werkzeuge.

zusätzliche Korrelation für ein gespiegeltes Signal $q_2^s(\xi)$ mit

$$S : q(\xi) \mapsto q^s(\xi) = q(-\xi) \quad (6.40)$$

bestimmt wird. Bild 6.12 skizziert den Vergleich zweier Spuren: Die zweite Spur, die möglicherweise mit gegensätzlicher Orientierung erfasst worden ist, wird gemäß Gl. (6.40) gespiegelt und in gleicher Weise mit der ersten Spur verglichen. Die erhaltenen quantitativen Ähnlichkeitsmaße können dann analog zu Gl. (6.39) in ein effektives Ähnlichkeitsmaß zusammengefasst werden.

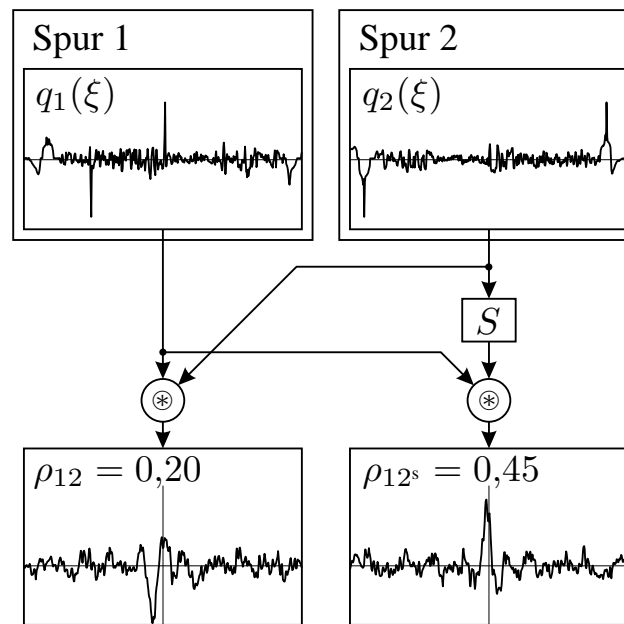


Bild 6.12: Vergleich von Spuren unterschiedlicher Orientierung.

6.5 Bewertung von Vergleichsverfahren

Um die Leistungsfähigkeit von Vergleichsverfahren beurteilen zu können, wird ein aussagekräftiges quantitatives Maß benötigt. Dazu wird die durch den automatischen Spurenvergleich vorgenommene Sortierung des Archivs in der Hitliste genutzt. Offensichtlich ist eine Häufung von zutreffenden Spurenzusammenhängen, d. h. von tatsächlich vorhandenen Spuren desselben Werkzeuges wie die zu untersuchende Spur, an den ersten Positionen der Hitliste erwünscht. Im Idealfall sind alle n im Archiv vorhandenen Einträge derselben Spur auf den ersten n Positionen der Hitliste einsortiert. Eine Beurteilung von Vergleichsverfahren kann daher auf der Basis von Konzentrationsmaßen erfolgen, indem ein Testarchiv mit bekannten Spurenzusammenhängen ausgewertet wird.

6.5.1 Konzentrationskurve

In der statistischen Literatur werden zahlreiche Ansätze beschrieben, um die Häufung von Objekten mit bestimmten Merkmalen in einem Datenbestand zu beschreiben [Bol01, Har02, Ken77, Pie75]. Eine in der Kriminaltechnik bekannte Repräsentation von Konzentration besteht darin, den Datenbestand in Form einer *Konzentrationskurve* aufzutragen.

Die Konzentrationskurve stellt die mittlere Wahrscheinlichkeit für das Finden eines wahren Spurenzusammenhangs — eines Treffers — zu einer gegebenen Spur

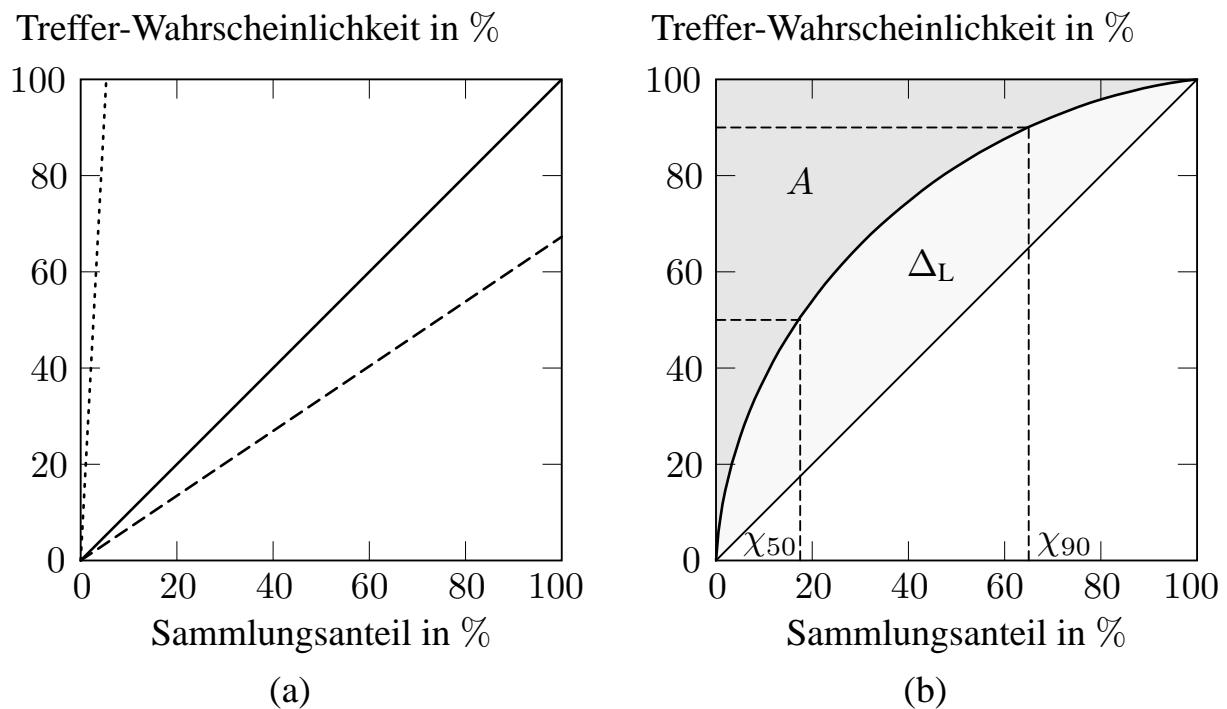


Bild 6.13: Konzentrationskurve: (a) Konzentrationskurven für den idealen Experten (durchgezogene Linie), für einen realen Experten (gestrichelte Linie) und für einen Experten, der ein mittels eines idealen automatischen Systems sortiertes Archiv durchsucht (punktierte Linie); (b) Definition von Kennzahlen.

in Abhängigkeit vom zu durchsuchenden Archivanteil dar, siehe Bild 6.13. Sie gibt für jede relative Position des Archivs die kumulative Wahrscheinlichkeit an, einen Treffer zu finden, wenn das Archiv bis zu dieser Position durchsucht wird. Da die Konzentrationskurve eine kumulative Verteilung darstellt, ist sie eine monoton steigende Funktion. Für den Regelfall, dass das unsortierte Archiv keine Häufung von Treffern aufweist, nähert sich die Konzentrationskurve der Winkelhalbierenden an. Je erfolgreicher eine Strategie zur gezielten Sortierung oder Durchforschung des Archivs ist, desto weiter entfernt sich die Kurve in Richtung der oberen linken Ecke. Bild 6.13(a) veranschaulicht die Bedeutung der Konzentrationskurve am Beispiel eines Spurenzusammenhangs im Archiv [Pue99b]:

- Der *ideale Experte* (durchgezogene Linie) führt eine fehlerfreie Suche durch und übersieht keinen vorhandenen Treffer. Die Wahrscheinlichkeit, den Treffer zu finden, steigt in gleichem Maß wie der durchsuchte Sammlungsanteil.
- Der *reale Experte* (gestrichelte Linie) übersieht vorhandene Spurenzusammenhänge. Die Trefferwahrscheinlichkeit ist folglich kleiner als für den idealen Experten. Selbst nach Durchsuchen des gesamten Archivs ist das

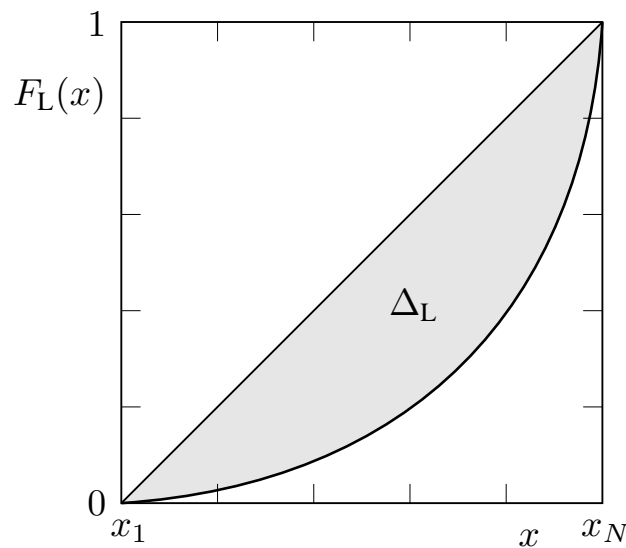


Bild 6.14: Lorenzkurve.

Auffinden des Treffers unsicher. Auch wenn eine exakte Spezifikation der Fehlerrate eines realen Experten schwer abzuschätzen ist, kann eine gegenüber dem idealen Experten erheblich reduzierte Erkennungsrate vermutet werden.

- Das *ideale automatische System* (gepunktete Linie) führt zu einer fehlerfreien Sortierung des Archivs, so dass der vorhandene Treffer stets auf den ersten Positionen der Hitliste platziert werden. Die Hitliste nimmt nun den Platz des unsortierten Archivs ein und wird vom Experten ausgewertet. Da der erste Eintrag bereits den Treffer enthält, erreicht die Konzentrationskurve den Trefferanteil von 100% bei demjenigen Sammlungsanteil, der einem Eintrag entspricht.

Für ein reales automatisches System, das einen vorhandenen Treffer nicht immer direkt auf der ersten Position der Hitliste platziert, ist zu beachten, dass die Auswertung der Hitliste durch einen realen Experten geschieht. Dadurch können auch hier Spurenzusammenhänge übersehen werden. In diesem Fall muss die Konzentrationskurve des realen automatischen Systems mit der Konzentrationskurve des realen Experten gewichtet werden.

Die hier verwendete Konzentrationskurve besitzt eine enge Verwandtschaft mit der *Lorenzkurve* [Ken77, Sta70], siehe Bild 6.14. Diese beschreibt die kumulative Verteilung $F_L(x)$ einer nach der Merkmalsausprägung $f_L(x)$ in aufsteigender Reihenfolge sortierten Liste $\mathcal{L} = \{x_1, \dots, x_N\}$:

$$f_L(x_i) \leq f_L(x_j) \quad \text{für} \quad i < j, \quad \sum_i f_L(x_i) = 1. \quad (6.41)$$

In der Folge ist die Lorenzkurve stets konvex zur Abszisse, siehe Anhang A.3.

Obwohl die Lorenzkurve durch eine sehr ähnliche Definition wie die Konzentrationskurve charakterisiert ist, bewirkt die unterschiedliche Anordnung der Abszissenwerte einen wichtigen Unterschied: Da die Einträge der Hitliste — die Abszissenwerte — durch ein Vergleichsverfahren sortiert sind, das eine *a posteriori* Information erzeugt, während die Konzentrationskurve die wahren, d. h. *a priori* vorhandenen Korrespondenzen bewertet, ist die Voraussetzung einer monoton fallenden — bzw. steigenden für den Fall der Lorenzkurve — Verteilungsdichte in der Regel nicht erfüllt. Dennoch ist die Charakterisierung der Konzentrationskurve durch einige von der Lorenzkurve bekannte Maßzahlen möglich und sinnvoll.

6.5.2 Maßzahlen

Da die Gesamtleistungsfähigkeit eines Vergleichsverfahrens von besonderer Praxisrelevanz ist, erscheinen Maßzahlen besonders geeignet, welche die Konzentrationskurve als Ganzes berücksichtigen. Eine solche Betrachtung kann in einfacher Weise aus dem Integral der Kurve erhalten werden und führt auf die Bewertung von Flächen im Diagramm der Konzentrationskurve.

- Das Lorenzsche Konzentrationsmaß, das auch als *Gini-Koeffizient* bezeichnet wird, ist definiert durch [Har02, Ken77]

$$C_G := 2 \cdot \Delta_L, \quad (6.42)$$

wobei Δ_L die Fläche zwischen der Diagonalen und der Lorenz-Kurve bedeutet, siehe Bild 6.14. Zur Anwendung auf die im vorliegenden Fall verwendeten Konzentrationskurven kann die Fläche Δ_L durch

$$\Delta_L := \int_0^1 F(x) \, dx - \frac{1}{2} \quad (6.43)$$

als vorzeichenbehaftete Fläche zwischen der Konzentrationskurve und der Diagonalen verallgemeinert werden, siehe Bild 6.13(b). Dabei bedeutet

$$F(x) = \int_0^x f(\xi) \, d\xi \quad (6.44)$$

die kumulative Verteilung von $f(x)$, die durch die Auswertung des Experten bzw. die Sortierung des automatischen Systems erzielt wird. Durch diese Verallgemeinerung erweitert sich der Wertebereich des Gini-Koeffizienten auf $-1 \leq C_G \leq 1$.

- Eine übliche Definition des *Herfindahl-Index*³ basiert auf dem Integral über der quadrierten Verteilungsdichtefunktion:

$$C_H := \int_0^1 f^2(x) \, dx . \quad (6.45)$$

Da in der Definition des Herfindahl-Index jedoch nicht berücksichtigt wird, an welcher Stelle des Definitionsbereichs von x eine Konzentration auftritt, kann diese Maßzahl nicht beurteilen, ob die Konzentration an der erwünschten Stelle auftritt.

- Die in der Kriminaltechnik bevorzugte Maßzahl zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Vergleichsverfahren ist der *Rosenbluth-Index*

$$C_R := \frac{1}{2A} , \quad (6.46)$$

wobei A die Fläche über der Konzentrationskurve bedeutet, siehe Bild 6.13(b):

$$A = \int_0^1 (1 - F(x)) \, dx . \quad (6.47)$$

Die Fläche A stellt darüber hinaus den durchschnittlich zu untersuchenden Archivanteil dar, der zum Auffinden eines vorhandenen Treffers durchsucht werden muss. Dadurch sind Maßzahlen auf der Basis dieser Fläche — oder des Komplements wie der Gini-Koeffizient — besonders intuitiv interpretierbar.

Beispiele: Drei Spezialfälle sollen im Folgenden die Maßzahlen und ihre Eignung verdeutlichen:

- Falls eine *Gleichverteilung* der Treffer über dem Archiv vorliegt, werden die kumulative Verteilung und die zugehörige Verteilungsdichte zu

$$F_I(x) := x \quad \text{und} \quad f_I(x) = \frac{dF_I(x)}{dx} = 1 , \quad x \in [0; 1] \quad (6.48)$$

erhalten. Aus den Gln. (6.42), (6.45) und (6.46) folgen die Maßzahlen $C_{G,I} = 0$, $C_{H,I} = 1$ und $C_{R,I} = 1$.

³Der Herfindahl-Index ist eng verwandt mit dem Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI), der z. B. in der Wirtschaftswissenschaft zur Bewertung von Marktkonzentration gebräuchlich ist.

- Wenn die Treffer am Anfang der Hitliste *ideal konzentriert* sind, wird die Sicherheit, einen vorhandenen Treffer zu finden, bereits für den kleinstmöglichen Archivanteil erreicht. Für den Fall einer kontinuierlichen Verteilungsdichtefunktion kann dies durch die Grenzwertbetrachtung

$$F_{\text{II}}(x) := \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} H(x - \varepsilon) \quad \text{und} \quad (6.49)$$

$$f_{\text{II}}(x) := \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \delta(x - \varepsilon), \quad x \in [0; 1] \quad (6.50)$$

beschrieben werden, wobei

$$H(x) := \begin{cases} 1, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (6.51)$$

den Einheitssprung bezeichnet und $\delta(x)$ die Diracsche Delta-Distribution mit den Eigenschaften [Pap62]

$$\delta(x \neq 0) := 0 \quad \text{und} \quad \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx := 1 \quad (6.52)$$

darstellt. Der Gini-Koeffizient besitzt hier den Wert $C_{\text{G,II}} = 1$. Mit der Näherung für die Diracsche Delta-Distribution

$$\delta(x) = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \frac{\sin \omega x}{\pi x} \quad (6.53)$$

ergibt die Integration der quadrierten Delta-Distribution [Bro91]

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta^2(x) dx = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin^2 \omega x}{(\pi x)^2} dx = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \frac{|\omega|}{\pi}, \quad (6.54)$$

so dass der Herfindahl-Index gegen unendlich strebt. Der Rosenbluth-Index wird zu

$$C_{\text{R,II}} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \frac{1}{2\varepsilon} \quad (6.55)$$

erhalten und strebt damit ebenfalls gegen unendlich.

- Im dritten Beispiel sind die Treffer *invers konzentriert*. Die Verteilungen sind hier durch

$$F_{\text{III}}(x) := \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} H(x + \varepsilon - 1) \quad \text{und} \quad (6.56)$$

$$f_{\text{III}}(x) := \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \delta(x + \varepsilon - 1), \quad x \in [0; 1] \quad (6.57)$$

Tabelle 6.1: Vergleich einiger Konzentrationsmaße.

	Gleich- verteilung	Ideale Konzentration	Inverse Konzentration
Gini	0	1	-1
Herfindahl	1	∞	∞
Rosenbluth	1	∞	$\frac{1}{2}$

gegeben, was zu den Maßzahlen $C_{G,III} = -1$ und $C_{R,III} = \frac{1}{2}$ führt. Der Herfindahl-Index verhält sich genauso wie im zweiten Beispiel, da das Ergebnis von Gl. (6.54) unabhängig vom Argument von $\delta(x)$ gilt.

Tabelle 6.1 fasst die Ergebnisse für die drei Beispiele zusammen. Der Gini-Koeffizient und der Rosenbluth-Index zeigen beide ein für die Bewertung von Vergleichsverfahren geeignetes Verhalten. Der Herfindahl-Index zeigt zwar die Existenz einer Konzentration an, allerdings ohne den Ort der Konzentration in der Hitliste zu bewerten. \diamond

Zur quantitativen Beurteilung von Vergleichsverfahren sind weitere Kennzahlen bekannt [Pue99a]. Beispiele dafür sind die Maßzahlen χ_{50} und χ_{90} , die den zu durchsuchenden Archivanteil für eine kumulative Trefferwahrscheinlichkeit von 50% bzw. 90% bezeichnen, siehe Bild 6.13(b). Zusätzlich werden die beiden Maßzahlen p_1 und p_5 für die Wahrscheinlichkeit verwendet, mit der ein Treffer an der ersten Position bzw. innerhalb der ersten fünf Positionen zu finden ist. Besonders die letztgenannten Maße p_1 und p_5 hängen stark vom Umfang des verwendeten Archivs ab, so dass ihre Eignung zur Bewertung von Vergleichsverfahren im Gegensatz zu global definierten Maßzahlen wie dem Gini-Koeffizienten und dem Rosenbluth-Index stark eingeschränkt ist.

6.6 Experimentelle Ergebnisse

Für die Erprobung der in dieser Arbeit erläuterten Verfahren standen mehrere Archive von Werkzeugspuren zur Verfügung [Hei04a]. Aus den dort abgelegten Spurenbildern wurden Signaturen extrahiert. Aufgrund der *a priori* bekannten Spurenzusammenhänge war die quantitative Bewertung der durch die dargestellte Verfahrensweise sortierten Archive mittels der Bewertungsmethoden von Abschnitt 6.5 möglich.

Ein solches Archiv besteht aus einer Menge \mathcal{A} von Spuren unterschiedlicher Werkzeuge

$$\mathcal{A} = \bigcup_q \mathcal{V}_q, \quad (6.58)$$

wobei \mathcal{V}_q die Menge der vom Werkzeug q verursachten Spuren bezeichnet.

Zur Bestimmung der Konzentrationskurve wird jede Spur $i \in \mathcal{A}$ mit sämtlichen anderen Spuren desselben Archivs verglichen und eine Hitliste in Form des nach absteigender Ähnlichkeit sortierten Archivs erstellt. Die Hitliste kann als Funktion $k = L_i(r)$ interpretiert werden, die für jede Position r — den sog. Rang — die entsprechende Spur k angibt. Durch Elimination sämtlicher Spuren desselben Werkzeuges q außer einer wird die modifizierte Hitliste $k = \tilde{L}_i(r)$ erhalten, die genau einen Treffer enthält. Der absolute und der relative Rang der Spur $k \in \mathcal{V}_q$ werden durch

$$r_{i,\text{abs}}(k) := \tilde{L}_i^{-1}(k) \quad \text{und} \quad r_{i,\text{rel}}(k) := \frac{\tilde{L}_i^{-1}(k)}{|\mathcal{A}| - |\mathcal{V}_q| + 1} \quad (6.59)$$

erhalten. Die empirische Verteilungsdichtefunktion $f(r)$ folgt aus

$$f(r) := \frac{\tilde{f}(r)}{Z} \quad \text{mit} \quad \tilde{f}(r) := \sum_q \sum_{\substack{i,k \in \mathcal{V}_q \\ i \neq k}} \delta_r^{r_{i,\text{rel}}(k)} \delta(r - r_{i,\text{rel}}(k)), \quad (6.60)$$

wobei die Anzahl der Kombinationen von Spuren desselben Werkzeuges durch

$$Z := \int_0^1 \tilde{f}(\xi) d\xi \quad (6.61)$$

$$= \sum_q 2 \binom{|\mathcal{V}_q|}{2} = \sum_q |\mathcal{V}_q| (|\mathcal{V}_q| - 1) \quad (6.62)$$

erhalten wird.

Gleichung (6.60) sorgt für die Normalisierung der Dichte $\tilde{f}(r)$ auf den Wert 1. Die Multiplikation mit der Diracschen Delta-Distribution stellt für die Integration in Gl. (6.61) sicher, dass Z reale Werte annimmt. Die kumulative Verteilungsfunktion $F(x)$ folgt aus der Integration von $f(x)$ nach Gl. (6.44).

Eine Alternative zur Bestimmung der Fläche A über der Konzentrationskurve nach Gl. (6.47) ist durch

$$A := \frac{1}{Z} \sum_q \sum_{\substack{i,k \in \mathcal{V}_q \\ i \neq k}} r_{i,\text{rel}}(k) \quad (6.63)$$

gegeben, da A den zum Finden eines vorhandenen Treffers durchschnittlich zu durchsuchenden Archivanteil angibt. Die Maßzahlen χ_{50} und χ_{90} lassen sich durch Invertierung der kumulativen Verteilungsfunktion $F(x)$ bestimmen:

$$\chi = F^{-1}(F(\chi)) . \quad (6.64)$$

p_1 und p_5 können ähnlich wie in Gl. (6.60) berechnet werden, wobei eine Summation über die absoluten Ränge $r_{i,\text{abs}}(k)$ vorgenommen wird:

$$p_n = \frac{1}{Z} \sum_q \sum_{\substack{i,k \in \mathcal{V}_q \\ i \neq k}} \sum_{r=1}^n \delta_r^{r_{i,\text{abs}}(k)} . \quad (6.65)$$

Zur Darstellung der erzielten Ergebnisse werden im Folgenden zwei Archive von Werkzeugspuren verwendet. Archiv \mathcal{A}_I enthält 54 Spuren, von denen jede Spur mit zwei unterschiedlichen Beleuchtungen (gerichtete Beleuchtung von links/rechts) erfasst worden ist. Die Spuren stammen von drei Schraubendrehern, wobei durch entsprechendes Ansetzen der Werkzeuge unterschiedliche Spuren von beiden Seiten der Schneide erzeugt worden sind. Für die Auswertung sind somit sechs unterschiedliche Spurenverursacher mit je neun Spuren vorhanden. Archiv \mathcal{A}_{II} besteht aus 46 Spuren von 5 Werkzeugen. Auch hier liegen für jede Spur zwei Bilder mit unterschiedlichen Beleuchtungen vor.

Für das Archiv \mathcal{A}_I zeigt Bild 6.15 beispielhaft das Vergleichsergebnis einer Testspur. Aus der erhaltenen Hitliste sind die den ersten neun Positionen zu Grunde liegenden Spurenbilder und die resultierenden KKKen dargestellt. Die ersten fünf Einträge der Hitliste sind tatsächliche Treffer, bei denen die visuelle Überprüfung des Identifikationsergebnisses gut möglich ist.

Bild 6.16 zeigt die mit dem automatisierten Verfahren gewonnenen Konzentrationskurven. Es ist klar erkennbar, dass die Strategie zu einer signifikanten Konzentration von Treffern auf den ersten Positionen der Hitlisten führen. Im Schnitt sind für das Auffinden eines Treffers im Archiv \mathcal{A}_I 10,79% und im Archiv \mathcal{A}_{II} 3,64% der Spuren zu durchsuchen. Die weiteren Maßzahlen sind in Tabelle 6.2 zusammengefasst.

Tabelle 6.2: Detektionsergebnisse.

Archiv	A	C_G	C_R	C_H	χ_{50}	χ_{90}	p_1	p_5
\mathcal{A}_I	10,8%	0,78	4,63	17,2	2,2%	32,6%	60,2%	88,9%
\mathcal{A}_{II}	3,64%	0,93	13,7	11,8	2,7%	2,9%	40,8%	94,4%

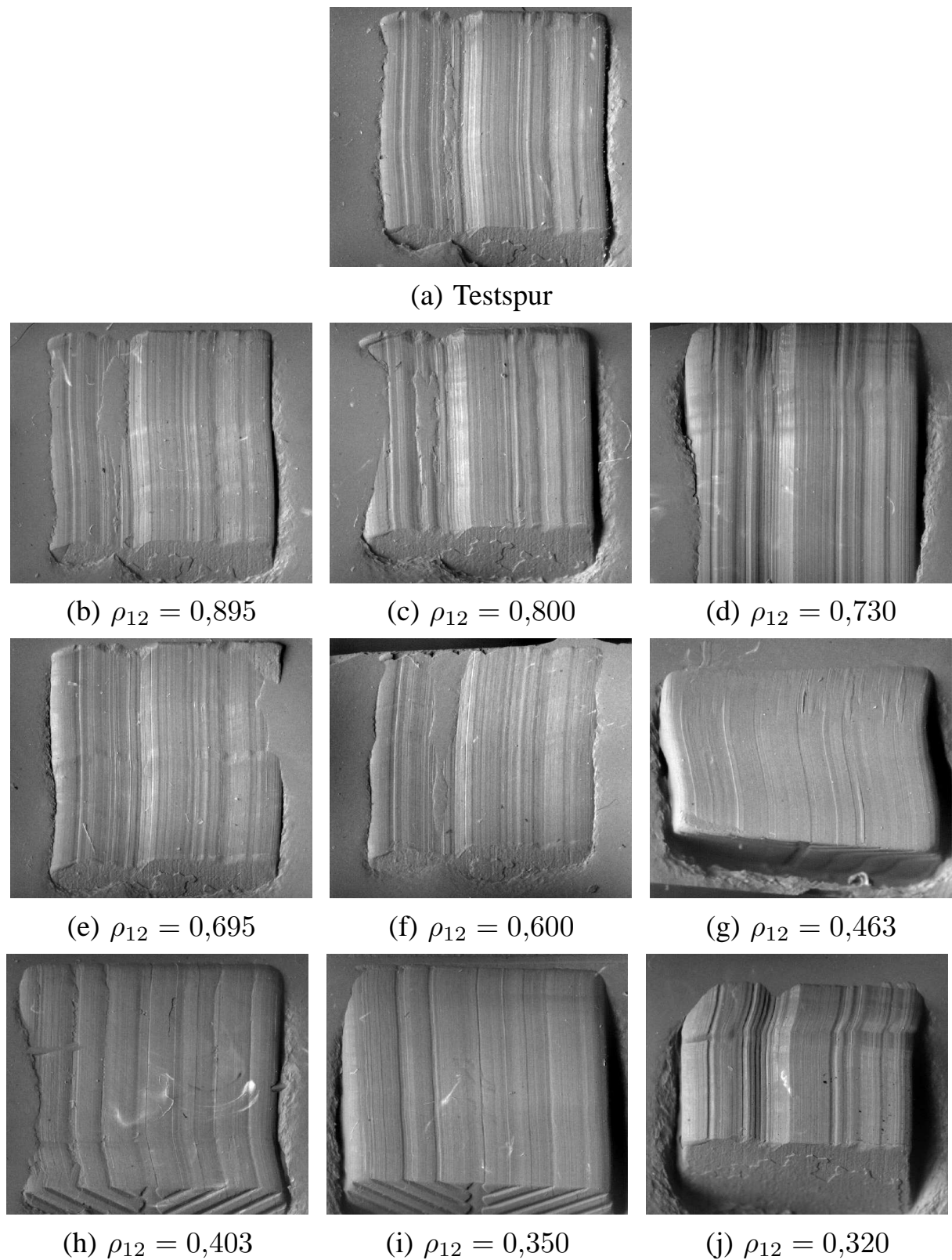


Bild 6.15: Beispiel des Spurenvergleichs im Archiv \mathcal{A}_I : Die Bilder (b) bis (j) zeigen die ersten neun Einträge der mit der Testspur (a) erhaltenen Hitliste und die jeweiligen KKKen. Bis auf (g), (h) und (i) stammen die Spuren vom selben Werkzeug.

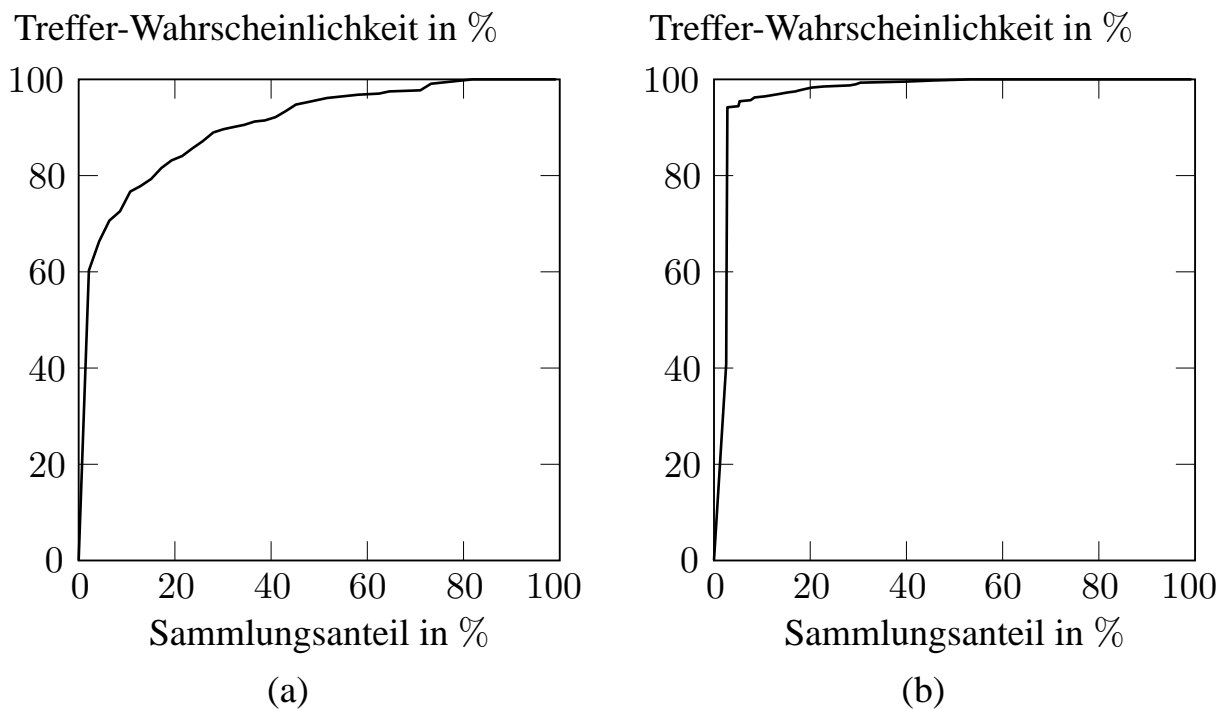


Bild 6.16: Detektionsergebnisse: (a) Archiv \mathcal{A}_I ; (b) Archiv \mathcal{A}_{II} .

Die unterschiedlich guten Ergebnisse mit den beiden Archiven sind darauf zurückzuführen, dass der Anstellwinkel der Werkzeuge bei der Erstellung der Spuren von Archiv \mathcal{A}_I absichtlich variiert worden ist. Damit bilden sich die dreidimensionalen Strukturen der Schneide in verschieden ausgeprägte Riefen ab, so dass der Vergleich erschwert wird.

Um die Optimierbarkeit der Verfahrensparameter zu demonstrieren, wird als Beispiel der Einfluss zweier Größen auf das Detektionsergebnis demonstriert:

- Der positive Einfluss einer verschiebungsvarianten Histogramm-Transformation auf das Detektionsergebnis wurde bereits in Abschnitt 6.3.4.2 gezeigt. Um den für die Transformation relevanten Exponenten r nach Gl. (6.31) gezielt festlegen zu können, wird dieser Parameter in einer Messreihe gezielt variiert. Bild 6.17(a) zeigt den qualitativen Verlauf der resultierenden Maßzahlen. Zum Vergleich sind auf der linken Seite die ohne Histogramm-Transformation erhaltenen Maßzahlen skizziert.

Es ist deutlich erkennbar, dass die aussagekräftigen Maßzahlen A , C_R und C_G bei $r \approx 1,0$ globale Extrema aufweisen. Dieser Wert von r kann daher als besonders geeignet gelten und in der Vergleichsalgorithmik festgelegt werden. Demgegenüber weist die Maßzahl C_H ein davon abweichendes Maximum auf, was die in Abschnitt 6.5.2 erzielte negative Einschätzung dieses Index zur Bewertung des Vergleichsergebnisses bestätigt.

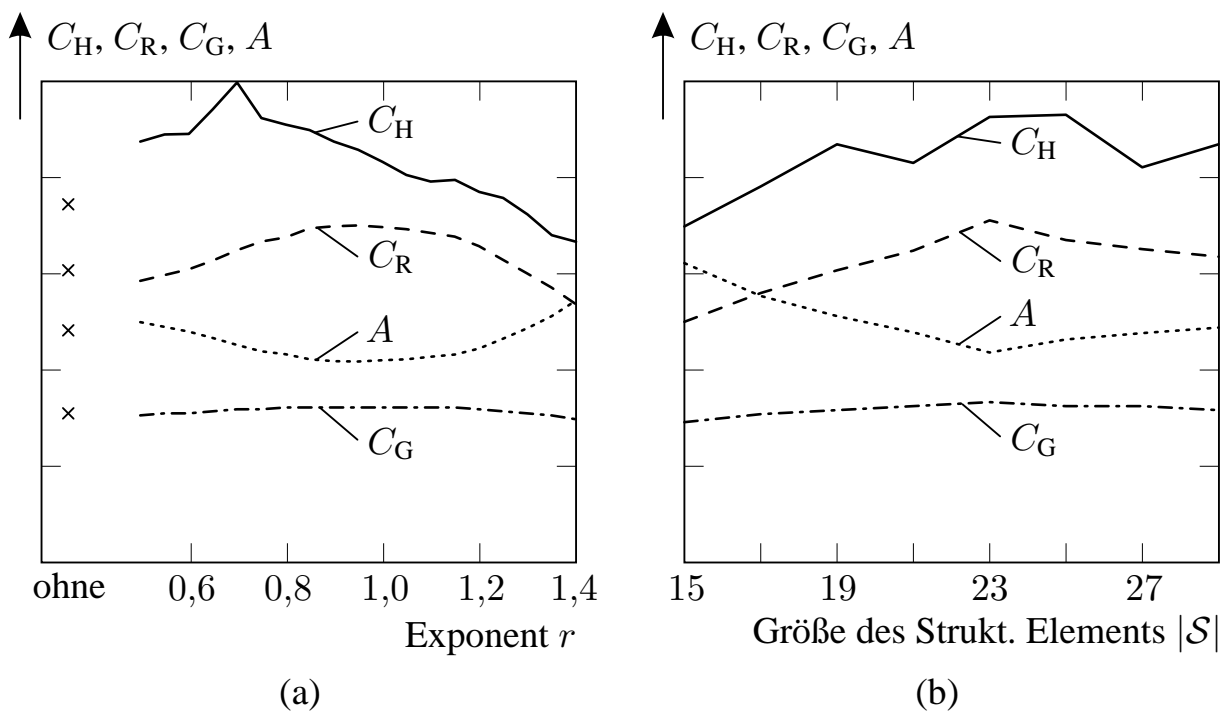


Bild 6.17: Einfluss bestimmter Verfahrensparameter: (a) Parameter der verschiebungsvarianten Histogramm-Transformation; (b) Größe des Strukturierenden Elements der Top-Hat-Transformation.

- Genauso kann die Größe $|\mathcal{S}|$ des Strukturierenden Elements der Top-Hat-Transformation, die gemäß Abschnitt 5.3 zur Nachbearbeitung der Riefenprofile dient, als Verfahrensparameter variiert werden. Bild 6.17(b) veranschaulicht die resultierenden Maßzahlen. Auch hier zeigen die relevanten Indizes A , C_R und C_G gemeinsame globale Extrema, die zur Festlegung des Wertes von $|\mathcal{S}|$ geeignet sind.

Schließlich sei angemerkt, dass die Diagramme von Bild 6.17 eine wichtige Eigenschaft der Verfahrensparameter für die praktische Eignung der gesamten Vorgehensweise aufzeigen: Obwohl ein merklicher Einfluss der Parameterwahl auf das Detektionsergebnis zu verzeichnen ist, sind die Extrema der relevanten Maßzahlen flach genug, um eine robuste Einstellbarkeit dieser Parameter sicherzustellen. Selbst bei deutlichen Abweichungen der Parameter von den optimalen Einstellwerten wird ein hinreichend gutes Detektionsergebnis erzielt. Umgekehrt bedeutet diese Unempfindlichkeit, dass auch bei andersartigen Spurenbildern (z. B. in Bezug auf Beleuchtung, Kontrast etc.) noch zufrieden stellende Erkennungsraten zu erwarten sind.

7 Realisierung eines Identifikationssystems

Um die in dieser Arbeit entwickelten Verfahren untersuchen und erzielte Erkenntnisse mit praktischen Anwendungsfällen testen zu können, wurde der Prototyp eines Bilderfassungs- und Identifikationssystems realisiert. Dieses System ist in mehreren Exemplaren sowohl in der Kriminaltechnik als auch zur Behandlung allgemeinerer Fragestellungen der automatischen Sichtprüfung im Einsatz [Hei03a, Hei04b].

Bild 7.1 zeigt schematisch das realisierte Erfassungs- und Identifikationssystem. Der Aufbau kombiniert die Bilderfassung und die Datenauswertung zu einem Arbeitsplatz. Diese Anordnung versetzt den Experten in die Lage, die aufgenommenen Daten unverzüglich zu beurteilen, auszuwerten und — falls erforderlich — Einstellungen der Bilderfassung schnell zu korrigieren.

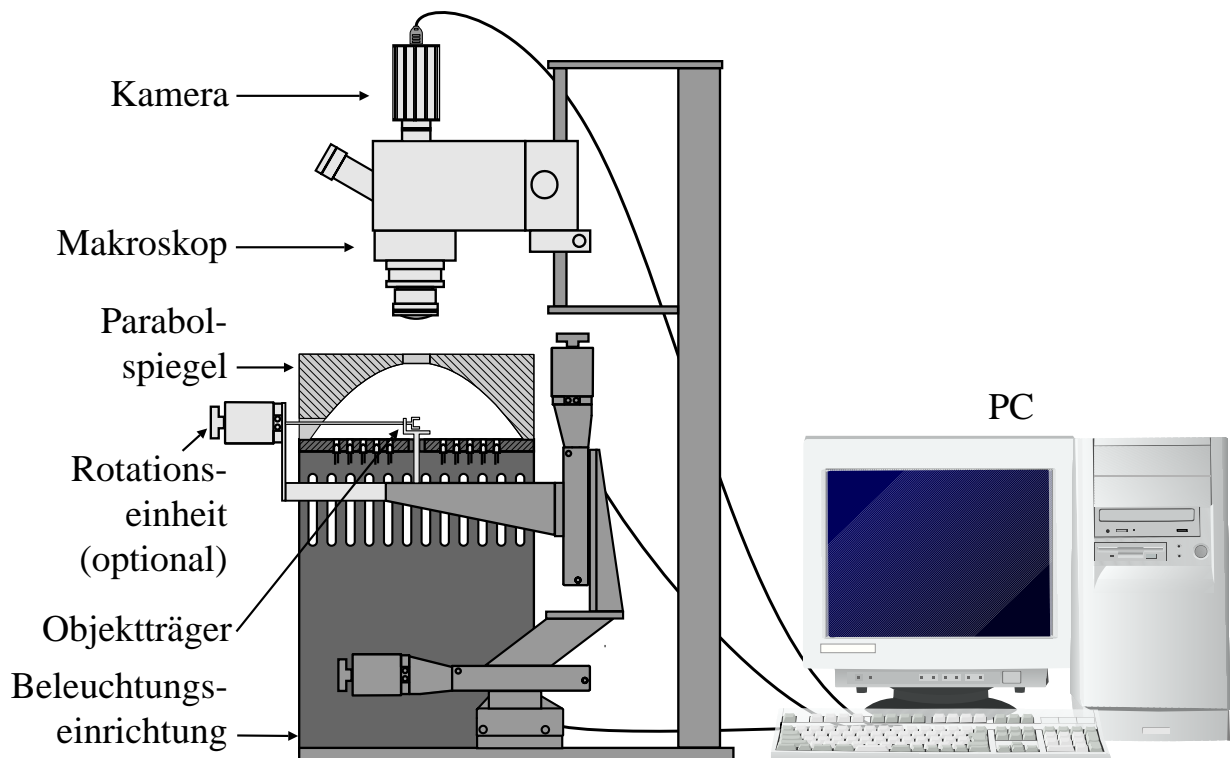


Bild 7.1: Aufbau des Bilderfassungs- und Identifikationssystems.

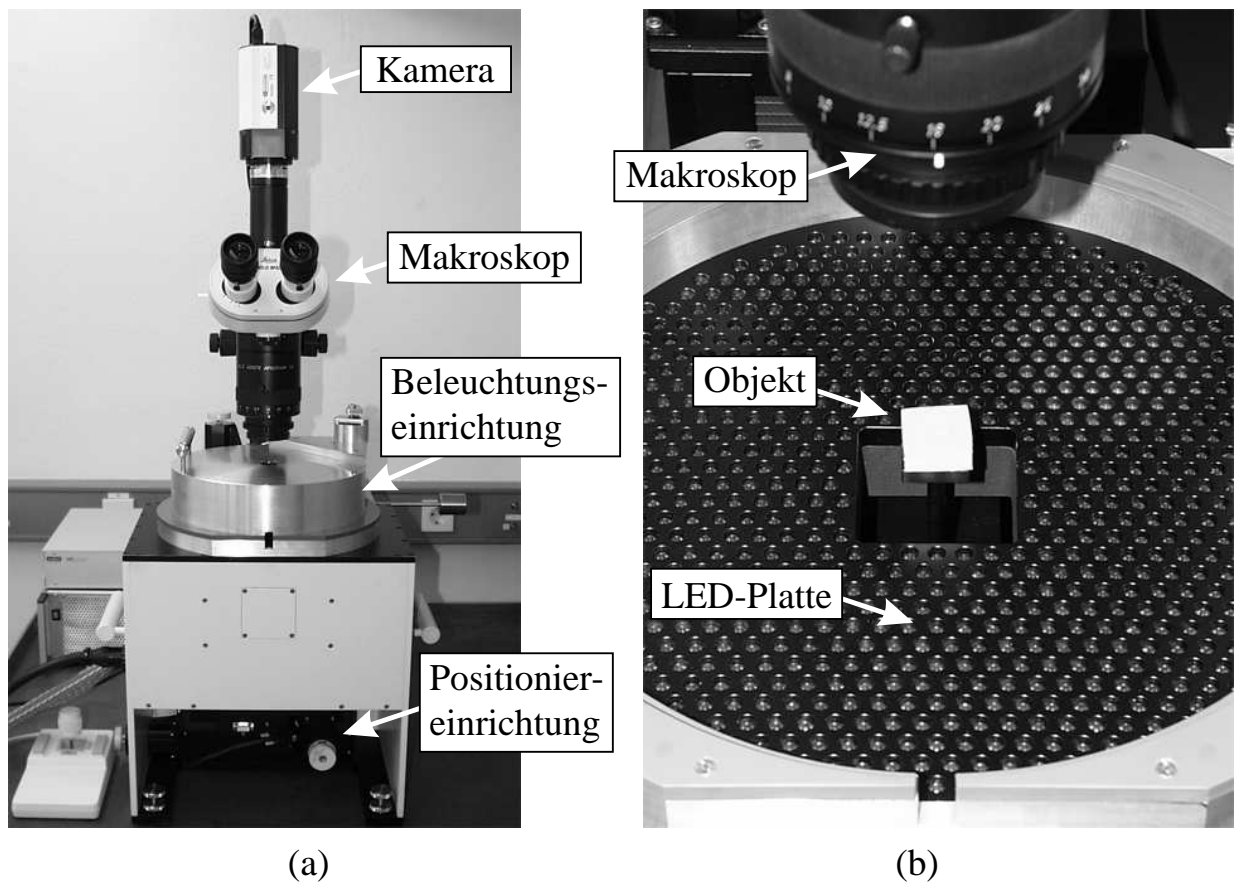


Bild 7.2: Datenerfassungsstation: (a) Gesamtansicht; (b) Beleuchtungseinrichtung (mit entferntem Parabolspiegel).

Zur Bildaufnahme dient die Datenerfassungsstation, die eine geeignete Beleuchtung und Positionierung des Untersuchungsobjekts sicherstellt [Meh01], siehe Bild 7.2. Ein hochwertiges Makroskop mit Videokamera sorgt für detailgetreue Bilder des Objekts.

Die digitalisierten Bilder werden anschließend an einen handelsüblichen PC übertragen, auf dem sämtliche Auswerte- und Vergleichsverfahren implementiert sind. Darüber hinaus dient der PC der Steuerung und Regelung der Datenerfassungsstation.

7.1 Datenerfassungsstation

Die realisierte Gestaltung der Datenerfassungsstation besitzt folgende Eigenschaften:

- Zur Sicherstellung einer möglichst hohen Qualität der erfassten Rohdaten

in Bezug auf die detailgetreue und unverfälschte Wiedergabe des Untersuchungsobjekts kommt ein hochwertiges Makroskop zum Einsatz, das auch für andere Aufgaben der Materialprüfung und der Kriminaltechnik verbreitet ist.

- Um einen zuverlässigen Spurenvergleich zu ermöglichen, muss die Datenerfassung gut reproduzierbar sein. Dies erfordert u. a. die mit der Datenerfassungsstation realisierbare exakte Einstellbarkeit der Beleuchtung und Positionierung.
- Die Datenerfassungsstation ist für unterschiedliche Spurenarten und Untersuchungsobjekte verwendbar. So können neben Originalspuren auf metallischen Trägern auch Abformungen aus unterschiedlichen Materialien erfasst werden. Besonders für die Schusswaffenidentifikation ist die Aufnahme von zylindrischen Objekten unabdingbar.
- Um die Ankopplung der Datenerfassungsstation an den PC flexibel zu halten, wird die Rechnersteuerung mittels der Standardschnittstellen *IEEE 1394 (FireWire)*, *USB 1.1* und *RS232* realisiert. Auf diese Weise besteht die Möglichkeit, die Datenerfassungsstation auch an tragbaren PCs ohne spezielle Hardware zu betreiben.

7.1.1 Beleuchtungseinrichtung

Aufgabe der Beleuchtungseinrichtung ist die Realisierung bestimmter Beleuchtungskonstellationen. Um eine hohe Flexibilität der Beleuchtung zu ermöglichen, kommt ein indirektes Beleuchtungsprinzip mit superhellen, gerichtet strahlenden LEDs zur Anwendung, siehe Bilder 7.2(b) und 7.3. Der gewählte LED-Typ stellt sicher, dass in Kombination mit der gegebenen spektralen Empfindlichkeit der Videokamera eine möglichst hohe Helligkeit der Bilder erzielt wird.

Das Licht wird von 768 LEDs erzeugt, die in einer Platte parallel zur optischen Achse des Gesamtsystems in einem hexagonalen Gitter angeordnet sind. Die parallelen Strahlen der LEDs treffen sich im Fokus des Parabolspiegels, in dem sich das Untersuchungsobjekt befindet. Die Lage einer LED in der Platte bestimmt dabei das Azimut φ und den Elevationswinkel θ des reflektierten Lichtstrahls. Die Helligkeit sämtlicher LEDs ist individuell in 2^8 Stufen einstellbar.

Sämtliche Parameter der Beleuchtung wie z. B. Intensität, Beleuchtungswinkel der aktiven LEDs, zeitliche Abfolge von Beleuchtungskonstellationen werden interaktiv oder automatisch vom PC gesteuert, siehe Abschnitt 7.2.

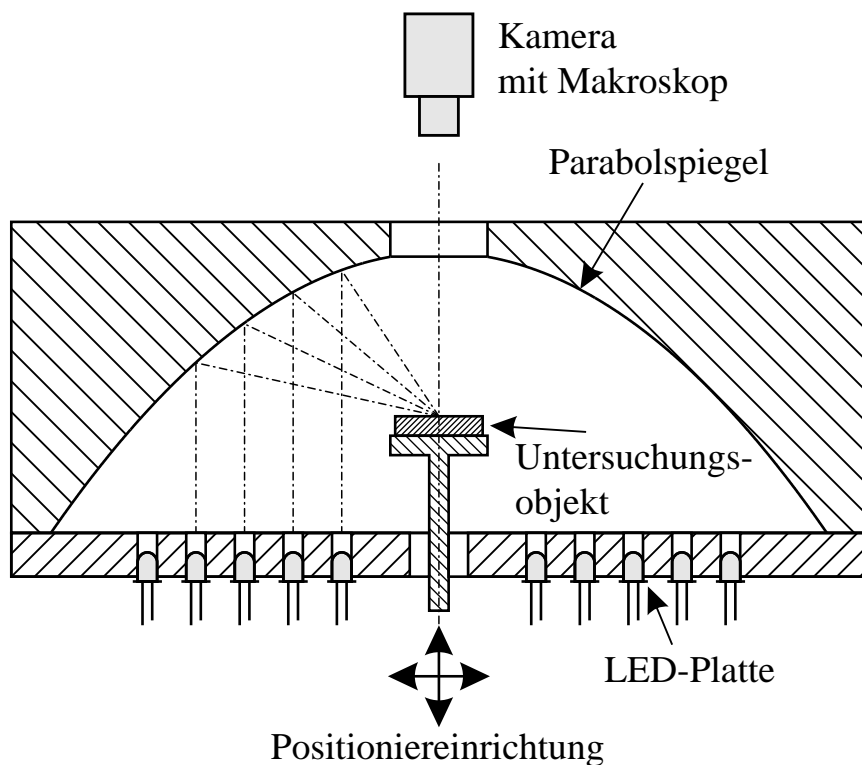


Bild 7.3: Indirektes Beleuchtungssystem.

7.1.2 Positioniereinrichtung

Die Positioniereinrichtung ermöglicht die rechnergesteuerte translatorische Positionierung des Untersuchungsobjekts in den drei Raumrichtungen mit einer Wiederholgenauigkeit von besser als $2\ \mu\text{m}$. Die verwendeten Linearachsen weisen eine hohe Steifigkeit auf, so dass nach Positionierfahrten keine Wartezeit für Ausschwingvorgänge eingehalten werden muss.

Zusätzlich ermöglicht eine optionale Rotationseinheit die rotatorische Positionierung von Objekten, siehe Bild 7.4. Die Rotationseinheit ist für die Fixierung von Objekten unterschiedlicher Abmessungen ausgelegt, so dass z. B. Projektile mit verschiedenen Kalibern oder verformte Projektile ohne weitere Anbauten gespannt werden können.

Die in Bild 7.3 skizzierte mechanische Trennung der Positionierung vom Rest der Bilderfassungsstation bietet die Möglichkeit, das Untersuchungsobjekt bei konstanter Beleuchtungs- und Makroskopeinstellung beliebig zu positionieren. Dadurch entstehen u. a. folgende günstige Auswirkungen auf die Bilderfassung [Hei02e]:

- Der Raumwinkel der Abstrahlung der LEDs ist auf einen kleinen Sektor

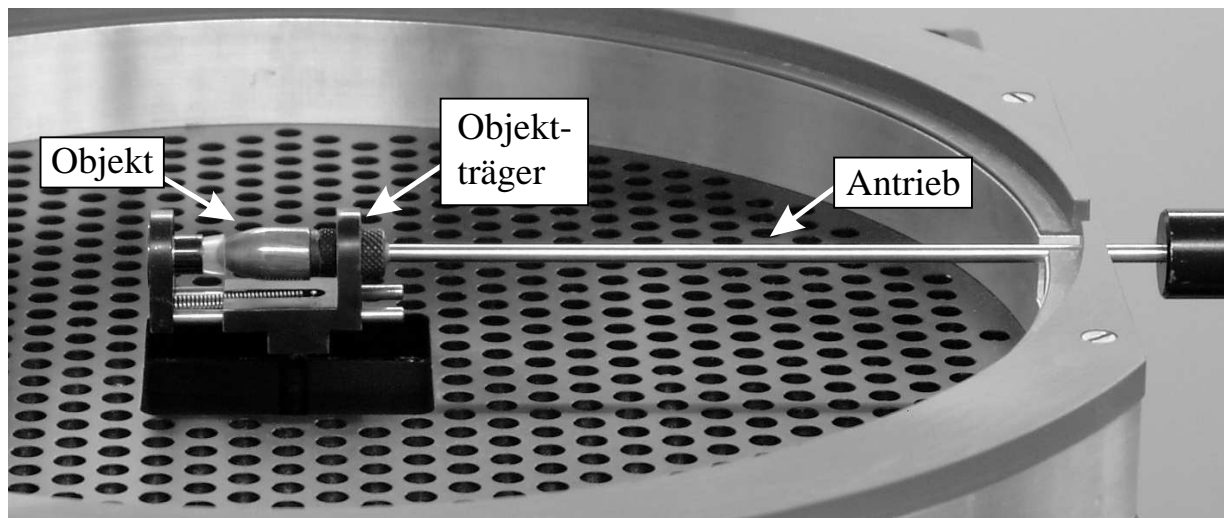


Bild 7.4: Rotationseinrichtung.

begrenzt. Die Anordnung der LEDs bedingt, dass nur ein begrenzter Raumbereich um den Fokuspunkt des Parabolspiegels herum ideal ausgeleuchtet werden kann. In diesem Bereich muss sich das Objekt vollständig befinden, um ein gut ausgeleuchtetes Bild zu erhalten. Es ist daher sinnvoll, das Makroskop mit der Beleuchtungseinrichtung mechanisch zu fixieren und die Fokussierung des Makroskops so festzulegen, dass das optische Zentrum des Parabolspiegels in der Fokusebene liegt. Die Trennung von Positionierung und Beleuchtung besitzt dadurch den Vorteil, dass die Fokussierung durch Veränderung des Objektabstands mit Hilfe der Positioniereinrichtung gleichzeitig die bestmögliche Ausleuchtung der Objektoberfläche sicherstellt. Der Fokussiervorgang kann dabei mit Hilfe des PCs automatisiert werden, der geeignete Merkmale der Bildqualität bestimmt und bewertet.

- Die gewählte Anordnung ermöglicht eine beliebige Abfolge von Positionierungen des Objekts bei gleicher Beleuchtung. Damit können unterschiedliche Oberflächenbereiche in den Raumbereich mit idealer Ausleuchtung verschoben und dort — evtl. nach einer Fokussierung mit dem eben beschriebenen Verfahren — erfasst werden. Derart gewonnene Einzelbilder können mit den in Abschnitt 3.2.2 gezeigten Verfahren verschmolzen werden und ergeben dann ein zusammengefügtes Gesamtbild. Auf diese Weise kann ein Bild der Oberfläche generiert werden, das mit der Beleuchtungseinrichtung physikalisch nicht in einer Aufnahme erfassbar ist. Wird die Positionierung in einem rechnergestützten Algorithmus automatisiert, so kann die Oberfläche mit einer optimalen Abfolge von Positionierungen z. B. zeilen- und spaltenweise in kurzer Zeit erfasst werden, wobei dann an jeder Stelle der Objektoberfläche näherungsweise dieselbe Beleuchtung herrscht.

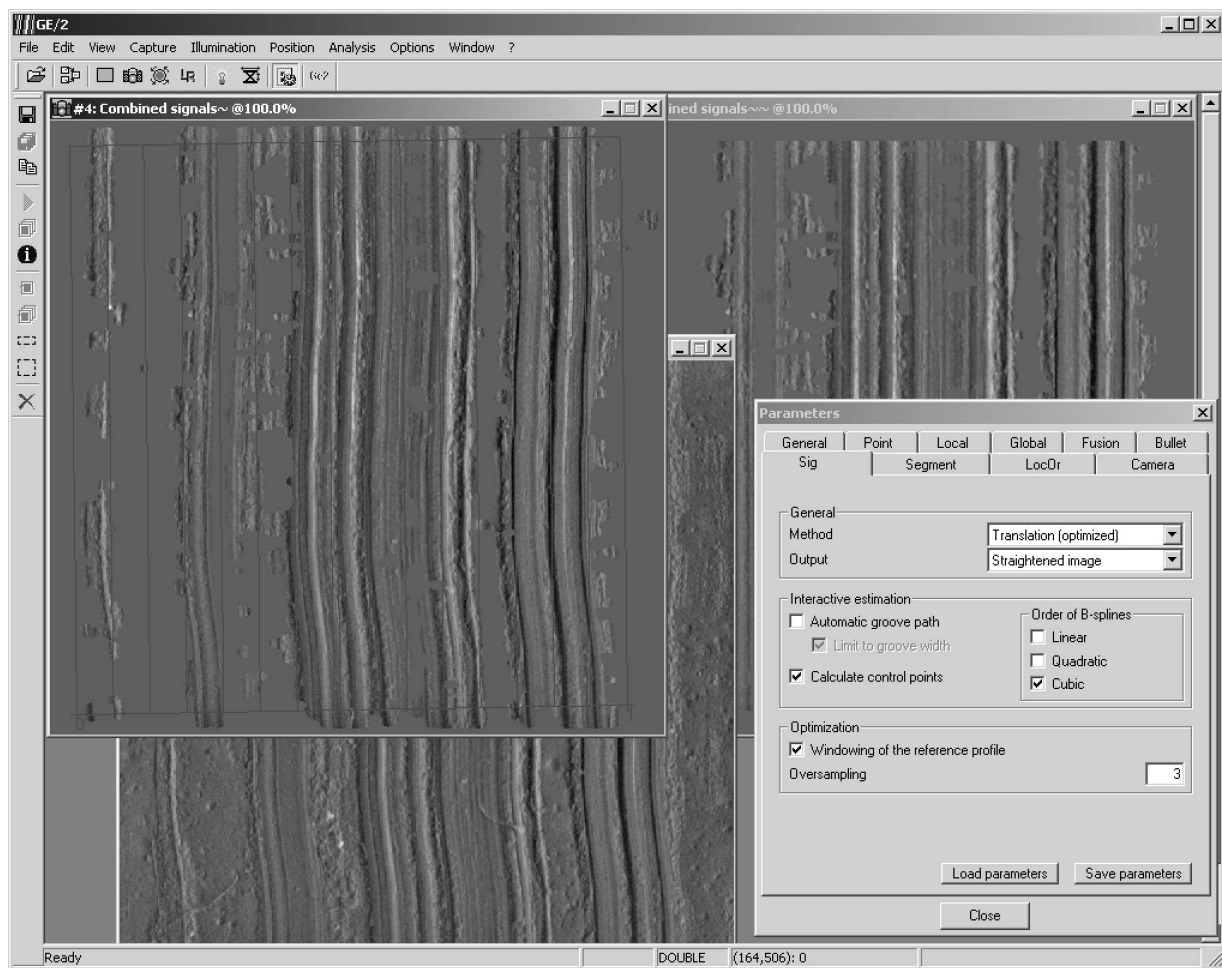


Bild 7.5: Programm zur Datenerfassung und -auswertung.

7.2 Software

Für die Bedienung der Datenerfassungsstation und die Auswertung von Spuren- bildern wurde ein Rechnerprogramm für die Betriebssysteme *Windows 2000* und *XP* entwickelt [Hei01b, Hei02a, Hei03a, Hei04b], siehe Bild 7.5. Das Programm gestattet die Ansteuerung der Hardwarekomponenten der Datenerfassungsstation, wobei eine weitgehende Modularisierung hardwarenaher Programmteile den einfachen Austausch von Komponenten, z. B. der Kamera, erlaubt. Erfasste Daten können anschließend auf vielfältige Weise ausgewertet werden. Durch entsprechende Import- und Exportfilter wird eine Datenübernahme aus anderen als der oben dargestellten Erfassungseinrichtung ermöglicht [Hei02d].

In einem groben Überblick bietet die entwickelte Software folgende Funktionen:

- Die Bedienung der Datenerfassungsstation kann interaktiv oder automatisiert erfolgen. Dazu lässt sich zunächst in einem rein manuellen Modus die

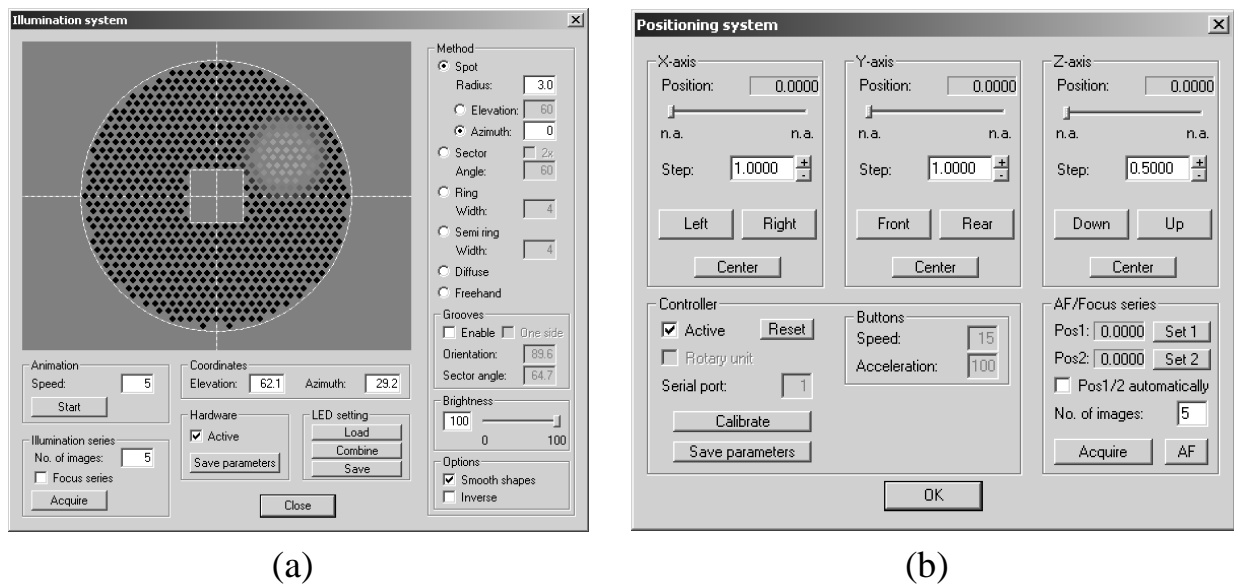


Bild 7.6: Dialoge zur Steuerung der Datenerfassungsstation: (a) Beleuchtungseinrichtung; (b) Positioniereinrichtung.

für einen gegebenen Anwendungsfall geeignete Erfassungskonstellation ermitteln. Falls gewünscht, lässt sich die eigentliche Bilderfassung mit diesen Parametern automatisiert durchführen.

- Zur Beleuchtung können die LEDs der Beleuchtungseinrichtung wahlfrei aktiviert werden, siehe Bild 7.6(a). Zahlreiche Beleuchtungskonstellationen stehen zur Verfügung, die reale Lichtquellen wie z. B. Punktlichtquellen, Ringleuchten, Stablichter oder diffuse Lichtquellen mit hoher räumlicher Quantisierung nachbilden. In einem interaktiven Modus können diese Konstellationen in Echtzeit beispielsweise mit der Maus eingestellt und variiert werden, so dass eine extrem variable und schnelle Beleuchtungseinrichtung für visuelle Untersuchungen zur Verfügung steht. Durch gezielte Aktivierung bestimmter Konstellationen lassen sich in Synchronisation mit der Kamera Bildserien mit variierter Beleuchtung erfassen.
- Die Ansteuerung der Positioniereinrichtung erfolgt mittels eines Dialogs, der eine interaktive Bedienung ermöglicht, siehe Bild 7.6(b). Die rechnergestützte Ansteuerung der Positionierung eröffnet vielfältige Möglichkeiten der automatisierten Bilderfassung: So lassen sich Fokussereien aufnehmen, bei denen zusätzlich die Beleuchtung als zweiter Parameter variiert werden kann. Mit einer Autofokus-Funktion steht eine Regelung der Objektposition auf den Objektstand mit der besten Abbildungsschärfe zur Verfügung.
- Zur Bildverbesserung sind die in Abschnitt 3.2 und Kapitel 4 vorgestellten

Fusions- und Vorverarbeitungsverfahren implementiert. Relevante Parameter der Algorithmen sind vom Anwender einstell- und speicherbar. Auch für weitere Verarbeitungsschritte wie z. B. Segmentierung, Merkmalsextraktion u. a. sind die in dieser Arbeit verwendeten Verfahren vorhanden und lassen sich durch zahlreiche Einstellmöglichkeiten an die Anforderungen des jeweiligen Datenmaterials anpassen.

- Schließlich ermöglicht das Programm die Auswertung von Spuren durch Signaturvergleiche mittels der Suchalgorithmen aus Kapitel 6. Spurensammlungen können angelegt und erweitert werden. Schnittstellen zu Datenbanksystemen (z. B. *Access*, *SQL*, *Oracle*) sind in Vorbereitung.

Zur Implementierung weitergehender Funktionalität steht eine Programmierschnittstelle zur Verfügung, die beliebige Operationen auf Bildern oder ähnlichen Datenobjekten erlaubt. Auf diese Weise konnten z. B. die im Anhang A.1 dargestellten Bildverarbeitungsverfahren zur Prüfung geschliffener Oberflächen flexibel integriert werden [Xin04].

8 Zusammenfassung

Thema der vorliegenden Arbeit ist die automatisierte Auswertung von Riefenspuren. Solche Spuren stellen eine wichtige Gattung von kriminaltechnisch relevanten Spuren dar, bei denen aufgrund von individuellen Merkmalen in der Riefenstruktur die Zuordnung verschiedener Spuren bzw. die Identifizierung des spurenverursachenden Werkzeuges möglich ist. Aufgabe der in dieser Arbeit entwickelten automatisierten Methodik zur Auswertung von Riefenspuren ist es daher, solche Individualspuren mittels einer geeigneten Beschreibung der rechnergestützten Verarbeitung zugänglich zu machen und in einer effizienten Strategie zu vergleichen.

Dazu wird in Kapitel 2 zunächst geeignetes Signalmodell für Riefenspuren eingeführt. Dieses Modell beschreibt die mechanischen Zusammenhänge bei der Spurenerzeugung. Das Werkzeug wird als linienhafter Starrkörper betrachtet, der in einer kombinierten translatorischen und rotatorischen Bewegung die Oberfläche des Spurenträgers bearbeitet. Auf diese Weise lassen sich sowohl streng geradlinige Spuren wie z. B. Spuren auf der Umfangsfläche von Geschossen als auch gekrümmte Riefen beschreiben, die von einer Vielzahl von Werkzeugen verursacht sein können.

Eine grundsätzliche Frage der Spurenauswertung betrifft die Datenakquisition: Neben lichtmikroskopischen Kameraaufnahmen zur Gewinnung schattenmodulierter Bilder können optische Topografie-Messverfahren verwendet werden, die das Höhenprofil der Oberfläche wiedergeben. Kapitel 3 beleuchtet Aspekte beider Strategien. Dabei zeigt sich, dass beide Ansätze zwar prinzipiell für eine detailgetreue Erfassung der Objekt Oberfläche geeignet sind. Durch angepasste Techniken der Beleuchtung sowie der Bildserienerfassung und -fusion stehen bei lichtmikroskopischen Aufnahmen jedoch zusätzliche Möglichkeiten für das Herausarbeiten von Spurendetails offen, welche diese Datenart besonders geeignet für die vorliegende Aufgabe erscheinen lassen.

Aufgabe der in Kapitel 4 dargestellten Vorverarbeitungsverfahren ist die Unterdrückung von Störungen in den Aufnahmen und die Segmentierung des Riefenbereichs aus dem Spurenbild. Zur Segmentierung werden unterschiedliche Methoden untersucht: Texturorientierte Strategien werten Einzelbilder aus, bei denen der Riefenbereich durch die Anisotropie der dort vorhandenen Textur charakterisiert ist. Die Überprüfung dieser lokalen Eigenschaft wird anhand unterschiedlicher Merkmale demonstriert. Eine alternative Strategie bietet die Fusion von Be-

leuchtungsserien, die auf der Analyse eines lokalen Varianzmaßes in Abhängigkeit vom Azimut der Beleuchtung beruht. Zur Unterstreichung der Allgemeinheit dieses Ansatzes wird im Anhang ein Inspektionsverfahren für geschliffene Oberflächen vorgestellt, das Beleuchtungsserien auf ähnliche Weise zur Detektion von Schleifdefekten auswertet. Um das Ergebnis der Segmentierung zu verbessern und von punktförmigen Ausreißern zu befreien, findet abschließend eine Nachbearbeitung der Segmentierungsmaske mittels morphologischer Operatoren statt.

Kapitel 5 zeigt die Extraktion aussagekräftiger Merkmale aus dem segmentierten Riefenbereich, wobei das in Kapitel 2 eingeführte Signalmodell als Grundlage dient. Durch Begradigung gekrümmter Riefen und Projektion der Bildintensitäten in Riefenrichtung lässt sich ein gemittelttes Profil des Riefenbereichs gewinnen, das robust gegen lokale Störungen der Riefentextur ist. Die eingesetzten Verfahren sind in der Lage, auch von schwach ausgeprägten und teilweise unterbrochenen Spuren charakteristische Profile zu extrahieren. Dadurch erhält man ein eindimensionales Signal, das die Struktur des Riefenbereichs kompakt beschreibt. Die anschließende Signaturgewinnung entfernt irrelevante Systemmerkmale aus dem Profil, so dass an dieser Stelle eine sog. Signatur als Gesamtheit der charakteristischen Individualmerkmale der Riefenspur zur Verfügung steht.

Zum Vergleich der Signaturen unterschiedlicher Spuren werden in Kapitel 6 Techniken zur Detektion von Ähnlichkeiten vorgestellt. Während Korrelationsverfahren für lineare Ähnlichkeiten von Signalen von vornherein besonders geeignet sind, erfordern nichtlineare Verzerrungen, die bei Werkzeugspuren häufig auftreten, eine Modifikation des Verfahrens. Dazu wird eine Transformation zur Egalisierung der lokalen Signalhistogramme durchgeführt, die für eine signifikante Verbesserung der Detektionsergebnisse sorgt. Da die korrekte Orientierung mehrerer Werkzeugspuren meist nicht sichergestellt werden kann, sorgt eine Erweiterung der Vergleichsprozedur auch in solchen Fällen für ein korrektes Ergebnis. Zur Evaluierung von Vergleichsverfahren dient eine Methodik, welche die Sortierung eines Spurenarchivs mit bekannten Zusammenhängen gemäß der detektierten Ähnlichkeit zu einer Testspur zur Grundlage hat. Damit lassen sich Maßzahlen ermitteln, die sowohl gesamte Identifikationssysteme in kompakter Form bewerten als auch zur Optimierung von Verfahrensparametern genutzt werden können. Die Bestimmung dieser Maßzahlen bei Testarchiven, die für diese Arbeit zur Verfügung standen, zeigt, dass die gewählten Ansätze zu einer guten Identifikation von übereinstimmenden Spuren führt.

Schließlich beschreibt Kapitel 7 die Realisierung eines Identifikationssystems, das die vorgestellten Verfahren der Signalerfassung und -auswertung umsetzt. Eine Datenerfassungsstation ermöglicht die rechnergesteuerte Bildaufnahme, wobei auch Bildserien mit variierter Beleuchtung und/oder Positionierung automatisiert

erfasst werden können. Damit steht ein Gesamtsystem zur Verfügung, bei dem eine optimale Abstimmung von Bilderfassung und -vorverarbeitung, modellgestützter Signalverarbeitung und Signaturlauswertung zum Ziel der Identifikation von Riefenspuren verwirklicht ist.

Insgesamt zeigt die dargestellte Vorgehensweise, dass mit entsprechend angepassten Verfahren eine automatisierte Auswertung von Riefenspuren erfolgreich möglich ist. Die speziellen Eigenschaften und Herausforderungen von Werkzeugspuren müssen dabei in Erwägung gezogen werden: Zunächst ist dies das Auftreten von gekrümmten Spuren, welche die Anwendung eines geeigneten Signalmodells notwendig macht, um in der Merkmalsextraktion charakteristische und robuste Merkmale zu erhalten. Zudem zeigen Werkzeugspuren oft Lücken der Riefenstruktur, so dass eine zuverlässige Segmentierung des Riefenbereichs unabdingbar ist. Schließlich erfordert die meist unsichere Ausrichtung der Spuren, dass geeignete Erweiterungen der Vergleichsmethodik auch in solchen Fällen die Anwendbarkeit von Korrelationsverfahren sicherstellen. Mit einer derartigen Auswertestrategie lässt sich dann ein leistungsfähiger Spurenvergleich automatisieren, der für den Kriminalexperten zu einer spürbaren Entlastung führt. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Identifikationssystem ermöglicht somit eine zuverlässige Automatisierung des Vergleichs von riefenartigen Werkzeugspuren.

A Anhang

A.1 Inspektion geschliffener Oberflächen

Für die Inspektion geschliffener Oberflächen kann eine Auswertung von azimutalen Beleuchtungsserien Anwendung finden, die dem in Abschnitt 4.4 gezeigten Verfahren ähnlich ist [Xin04]. Solche Oberflächen weisen häufig mehrere Riefenscharen mit örtlich variabler Anzahl von Orientierungen auf, siehe Bild A.1(a).

Zur Detektion funktionsrelevanter Defektstellen in den Dichtflächen besteht prinzipiell zwar die Möglichkeit, die Schleiftextur unter Einhaltung des Abtasttheorems messtechnisch zu erfassen und vergleichbar zu Abschnitt 4.3.1 durch Analyse lokaler Vorzugsrichtungen zu bewerten. Ein solches Vorgehen wäre jedoch aufgrund der erforderlichen Bildauflösung extrem aufwändig, zudem sind zahlreiche Schleifdefekte bei Auswertung nur einer Aufnahme schwer erkennbar.

Das hier gezeigte Inspektionsverfahren verwendet azimutale Beleuchtungsserien mit vergleichsweise geringer Auflösung. Durch Variation des Beleuchtungsazi-

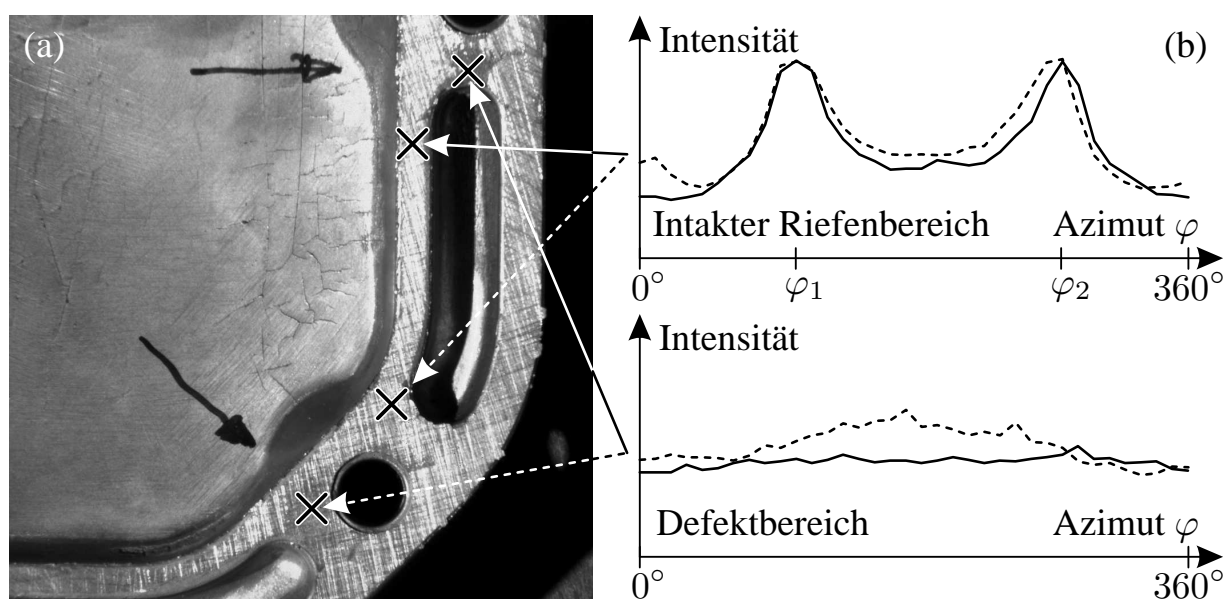


Bild A.1: Beispiel einer defektbehafteten Schleiftextur bei gerichteter Beleuchtung: (a) Aufnahme einer azimutalen Beleuchtungsserie; (b) Typische Verläufe der Intensitäten für Bildpunkte der intakten Riefentextur und des Defektbereichs.

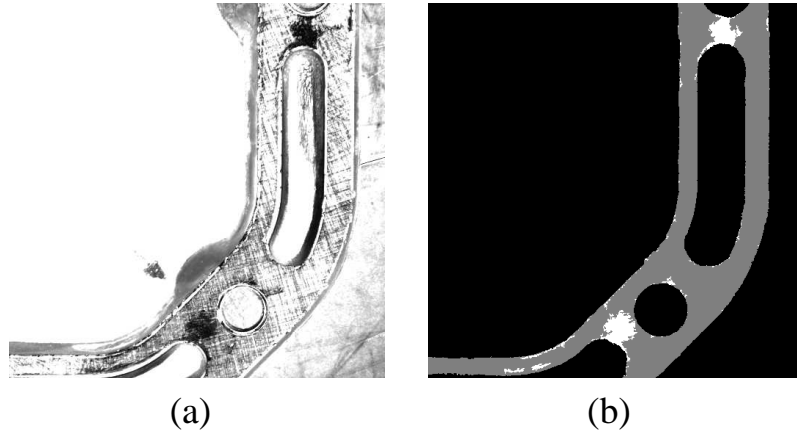


Bild A.2: Varianzanalyse: (a) Merkmal $m_{\text{var}}(\mathbf{x})$ (normierte Varianz der Intensitäten); (b) Ergebnis der Klassifikation (grau: intakter Riefenbereich, weiß: Riefendefekte).

muts wird die für Schleiftexturen typische Anisotropie der Reflektanz sichtbar und dient als Merkmal für die automatische Inspektion. Da die Reflektanz eine makroskopische Eigenschaft der Textur ist, kann die Schleiftextur unterabgetastet bleiben.

Eine Bildserie $D = \{d(\mathbf{x}; \varphi)\}$ mit K Bildern wird erfasst, bei der das Azimut φ systematisch variiert wird, vgl. Gl. (4.65). Im Bereich der Riefenstruktur kann ein Maximum der Intensität erwartet werden, wenn das Beleuchtungsazimut senkrecht auf der lokalen Riefenrichtung steht. Falls an einem Punkt eine einzige Riefenschar dominiert, weist die Intensität zwei starke lokale Maxima für φ_1 und $\varphi_2 = (\varphi_1 + 180^\circ) \bmod 360^\circ$ auf, siehe Bild A.1(b). Sind m Riefenscharen vorhanden, so finden sich im Intensitätsverlauf entsprechend $2m$ Maxima. Im Gegensatz dazu treten in Defektbereichen weniger starke lokale Maxima an unterschiedlichen Positionen auf. Ein Phasenzusammenhang der Maxima existiert nicht.

Zur Auswertung dieser Charakteristika werden im Folgenden drei Strategien vorgestellt:

Varianzanalyse: Diese Strategie wertet die stark unterschiedlichen Werte im Intensitätsverlauf des Riefenbereichs im Gegensatz zum eher flachen Intensitätsverlauf bei defekten Bildpunkten aus. Dazu dient die empirische Varianz der Intensitäten bezüglich des Beleuchtungsazimuts φ

$$s_{\varphi}^2(\mathbf{x}) = \frac{1}{K-1} \sum_{k=0}^{K-1} (d(\mathbf{x}; \varphi_k) - \bar{d}_{\varphi}(\mathbf{x}))^2 \quad (\text{A.1})$$

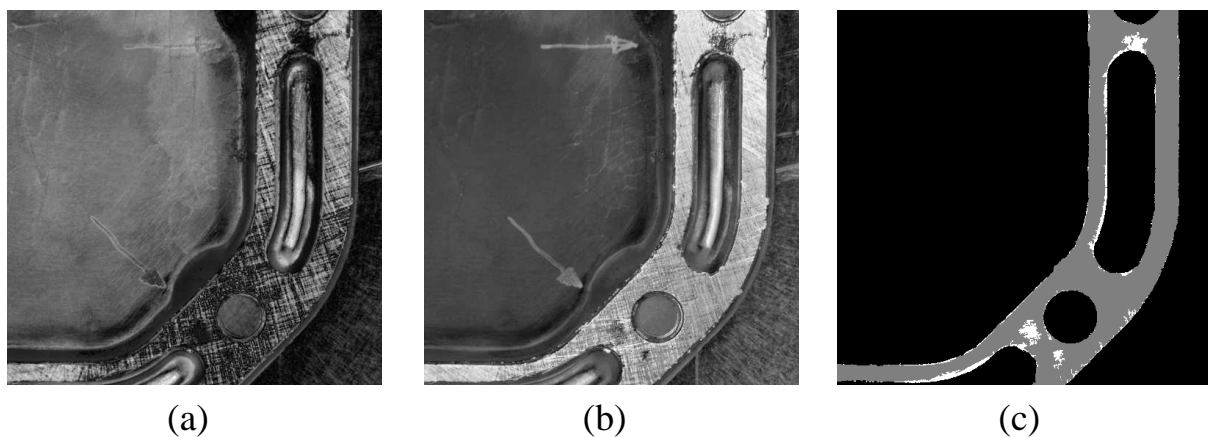


Bild A.3: Harmonische Analyse: (a) Spektralanteil $|D(\mathbf{x}; f_\varphi = 2)|$ nach Gl. (A.5); (b) Merkmal $m_{\text{harm}}(\mathbf{x})$ nach Gl. (A.6); (c) Ergebnis der Klassifikation von (b) (grau: intakter Riefenbereich, weiß: Riefendefekte).

mit dem empirischen Mittelwert der Intensitäten

$$\bar{d}_\varphi(\mathbf{x}) = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} d(\mathbf{x}; \varphi_k). \quad (\text{A.2})$$

φ_k kennzeichnet das Beleuchtungsazimut der k -ten Aufnahme, vgl. Gl. (4.65).

Als Merkmal wird der Ausdruck

$$m_{\text{var}}(\mathbf{x}) := \frac{s_\varphi^2(\mathbf{x})}{\tilde{s}_{\varphi, \mathcal{D}}^2} \quad \text{mit} \quad \tilde{s}_{\varphi, \mathcal{D}}^2 := \text{Median}_{\mathcal{D}}(s_\varphi^2(\mathbf{x})) \quad (\text{A.3})$$

verwendet, wobei die Normierung auf einen robusten Schätzwert für die Varianz in der Dichtfläche \mathcal{D} das Merkmal weitgehend unabhängig von den absoluten Intensitäten der Bildserie macht.

Bild A.2(a) zeigt das Merkmal $m_{\text{var}}(\mathbf{x})$. Wegen des Schattenwurfs auf tieferliegenden Teilen des Werkstücks treten auch dort große Werte der Varianz auf. Eine vorherige Segmentierung des interessierenden Bereichs der Dichtfläche ist daher unabdingbar. Das Ergebnis der Klassifikation ist in Bild A.2(b) dargestellt. Nach Maskierung der irrelevanten Bildbereiche werden die Riefendefekte durch Schwellwertbildung klassifiziert und in einer morphologischen Nachbearbeitung von punktförmigen Störungen befreit.

Harmonische Analyse: Hier wird die Existenz harmonischer Anteile in den Signalen $d(\mathbf{x}; \varphi)$ bewertet. Das 180° -periodische Auftreten von Intensitätsmaxima in

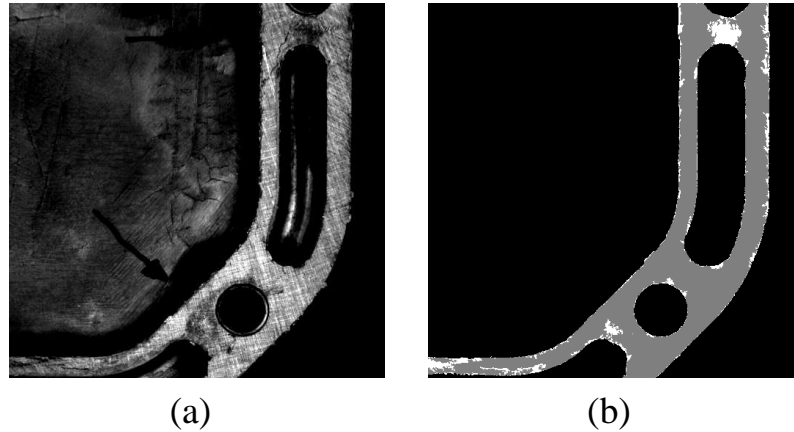


Bild A.4: Analyse der Periodizität: (a) Merkmal $m_{\text{per}}(\mathbf{x})$ nach Gl. (A.8); (b) Ergebnis der Klassifikation (grau: intakter Riefenbereich, weiß: Riefendefekte).

der intakten Riefenstruktur sorgt dafür, dass gerade harmonische Anteile überwiegen. Dagegen sind solche Spektralanteile in Defektbereichen deutlich schwächer ausgeprägt. Dort ist häufig feststellbar, dass die Intensität aufgrund von Abschattungen oder lokalen Verkippungen der Oberfläche einen starken Anteil der ersten harmonischen Komponente aufweist.

Für die harmonische Analyse wird die Fourier-Transformation der Intensität $d(\mathbf{x}; \varphi)$ bezüglich des Beleuchtungsazimuts φ gebildet:

$$D(\mathbf{x}; f_\varphi) = \mathcal{F}\{d(\mathbf{x}; \varphi)\} \quad (\text{A.4})$$

$$= \sum_{k=0}^{K-1} d(\mathbf{x}; \varphi_k) \cdot \exp\left(-j 2\pi \frac{k f_\varphi}{K}\right). \quad (\text{A.5})$$

Darin ist f_φ die diskrete Azimutfrequenz. Als Merkmal für die Dominanz der geraden harmonischen Anteile wird folgender Ausdruck verwendet:

$$m_{\text{harm}}(\mathbf{x}) := \frac{\sum_{f_\varphi \in \{2,4,6,8\}} |D(\mathbf{x}; f_\varphi)|}{\sum_{f_\varphi \in \{1,2,4,6,8\}} |D(\mathbf{x}; f_\varphi)|}. \quad (\text{A.6})$$

Höhere gerade harmonische Signalanteile mit $f_\varphi > 8$ besitzen schlechte Signal-zu-Rausch-Verhältnisse und werden nicht berücksichtigt.

Bild A.3 veranschaulicht das Verfahren. Das Klassifikationsergebnis in Bild A.3(c) wird wie oben durch Schwellwertbildung des Merkmalsbildes A.3(b), Maskierung und morphologische Nachbearbeitung erhalten.

Analyse der Periodizität: Die dritte Methode beruht auf der Bewertung der Phasenabstände der Intensitätsmaxima von 180° in einer intakten Riefenstruktur.

Dazu werden quadrierte Intensitätsdifferenzen aufsummiert, die zwischen jeweils zwei Bildern mit um 180° unterschiedlichen Beleuchtungsazimuten auftreten:

$$\Delta d(\mathbf{x}) = \sum_{k=0}^{\frac{\kappa}{2}-1} \left(d(\mathbf{x}; \varphi_k) - d(\mathbf{x}; \varphi_{k+\frac{\kappa}{2}}) \right)^2. \quad (\text{A.7})$$

Zur Gewinnung eines von der absoluten Intensität unabhängigen Merkmals wird $\Delta d(\mathbf{x})$ auf einen robusten Schätzwert für die mittlere Summe der quadrierten Intensitätsdifferenzen innerhalb der Dichtfläche \mathcal{D} bezogen:

$$m_{\text{per}}(\mathbf{x}) := \frac{\Delta d(\mathbf{x})}{\tilde{d}_{\mathcal{D}}} \quad \text{mit} \quad \tilde{d}_{\mathcal{D}} := \text{Median}_{\mathcal{D}}(\Delta d(\mathbf{x})). \quad (\text{A.8})$$

Das Ergebnis dieser Verfahrensweise ist in Bild A.4 dargestellt. Analog zu den anderen beiden Verfahren werden die klassifizierte Riefendefekte in Bild A.4(b) aus der Schwellwertbildung der Merkmale $m_{\text{per}}(\mathbf{x})$ in Bild A.4(a) zusammen mit einer morphologischen Unterdrückung punktförmiger Störungen gewonnen.

A.2 Lösung der Optimierungsaufgabe Aktiver Konturen

Als notwendige Bedingungen für ein Extremum des Energiefunktionals

$$E_{\text{AK}}^*(\mathbf{m}(l)) = \int_l f(\mathbf{m}(l), \mathbf{m}_l(l), \mathbf{m}_{ll}(l)) dl \quad (\text{A.9})$$

sind mit $\mathbf{m}(l) = (x(l), y(l))^T$ die *Euler-Lagrangeschen Differentialgleichungen*

$$f_x - \frac{\partial}{\partial l} f_{(x_l)} + \frac{\partial^2}{\partial l^2} f_{(x_{ll})} = 0, \quad (\text{A.10})$$

$$f_y - \frac{\partial}{\partial l} f_{(y_l)} + \frac{\partial^2}{\partial l^2} f_{(y_{ll})} = 0 \quad (\text{A.11})$$

zu erfüllen [Bro91].

Im Folgenden wird eine mögliche Lösung für den Fall skizziert, dass für die merkmalsbezogene Energie eine eindimensionale Umgebung berücksichtigt wird. Die auf den Kurvenparameter bezogene Energie vereinfacht sich mit Gl. (5.5) und

$$E_{\text{ext}}(\mathbf{m}(l)) = E_{\text{M,1D}}(\mathbf{m}(l)) + E_{\text{Z}}(\mathbf{m}(l)) \quad (\text{A.12})$$

zu

$$E_{\text{AK}}(\mathbf{m}(l)) = \frac{1}{2} \left(\mu_0 \|\mathbf{m}_l(l)\|^2 + \nu_0 \|\mathbf{m}_{ll}(l)\|^2 \right) + E_{\text{ext}}(\mathbf{m}(l)) . \quad (\text{A.13})$$

Für die Euler-Lagrangeschen Differentialgleichungen erhält man

$$-\mu_0 x_{ll}(l) + \nu_0 x_{llll}(l) + \frac{\partial E_{\text{ext}}(\mathbf{m}(l))}{\partial x} = 0 , \quad (\text{A.14})$$

$$-\mu_0 y_{ll}(l) + \nu_0 y_{llll}(l) + \frac{\partial E_{\text{ext}}(\mathbf{m}(l))}{\partial y} = 0 . \quad (\text{A.15})$$

Um die Berechnung auf einem Digitalrechner durchführen zu können, ist der Übergang auf die diskrete Darstellung sämtlicher Größen notwendig:

$$\mathbf{m}(l) = (x(l), y(l))^{\text{T}} \quad \rightarrow \quad \mathbf{m}(i) = (x(i), y(i))^{\text{T}} , \quad (\text{A.16})$$

$$\left(\frac{\partial E_{\text{ext}}(\mathbf{m}(l))}{\partial x}, \frac{\partial E_{\text{ext}}(\mathbf{m}(l))}{\partial y} \right)^{\text{T}} \quad \rightarrow \quad \left(f_x(\mathbf{m}(i)), f_y(\mathbf{m}(i)) \right)^{\text{T}} . \quad (\text{A.17})$$

Werden die auftretenden Ableitungen in Gl. (A.15) durch Differenzenquotienten ersetzt, erhält man die Vektorgleichungen

$$\begin{aligned} & \mu_0 (-\mathbf{m}(i-1) + 2\mathbf{m}(i) - \mathbf{m}(i+1)) \\ & + \nu_0 (\mathbf{m}(i-2) - 4\mathbf{m}(i-1) + 6\mathbf{m}(i) - 4\mathbf{m}(i+1) + \mathbf{m}(i+2)) \\ & + \left(f_x(\mathbf{m}(i)), f_y(\mathbf{m}(i)) \right)^{\text{T}} = 0 . \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

Diese können zu den Matrixgleichungen

$$\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{f}_x(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \mathbf{0} , \quad (\text{A.19})$$

$$\mathbf{A}\mathbf{y} + \mathbf{f}_y(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \mathbf{0} \quad (\text{A.20})$$

zusammengefasst werden, wobei \mathbf{A} eine pentadiagonale Matrix ist.

Die Lösung der Gln. (A.19) und (A.20) kann iterativ erfolgen. Dazu ersetzt man die rechten Seiten der Gleichungen durch das Produkt der Schrittweite γ und der Differenz zweier aufeinander folgender Iterationsschritte $t-1$ und t

$$\mathbf{A}\mathbf{x}_t + \mathbf{f}_x(\mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{y}_{t-1}) = -\gamma(\mathbf{x}_t - \mathbf{x}_{t-1}) , \quad (\text{A.21})$$

$$\mathbf{A}\mathbf{y}_t + \mathbf{f}_y(\mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{y}_{t-1}) = -\gamma(\mathbf{y}_t - \mathbf{y}_{t-1}) , \quad (\text{A.22})$$

was zu einer Iterationsvorschrift für die Berechnung der Kurvenpunkte $m(i)$ führt:

$$\mathbf{x}_t = (\mathbf{A} + \gamma \mathbf{I})^{-1} (\gamma \mathbf{x}_{t-1} - \mathbf{f}_x(\mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{y}_{t-1})) , \quad (\text{A.23})$$

$$\mathbf{y}_t = (\mathbf{A} + \gamma \mathbf{I})^{-1} (\gamma \mathbf{y}_{t-1} - \mathbf{f}_y(\mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{y}_{t-1})) . \quad (\text{A.24})$$

Da die Größe der quadratischen Matrix \mathbf{A} gleich der Anzahl der diskreten Punkte auf der Trajektorie ist, konvergiert dieses Verfahren langsam, wenn die Anzahl der Trajektorienpunkte groß ist und zur Vermeidung numerischer Instabilität die Schrittweite γ klein gewählt wird.

Weitergehende Lösungsmöglichkeiten bestehen in Verfahren der Dynamischen Programmierung [Ami88] und Greedy-Algorithmen [Ows94, Wil92].

A.3 Konvexität der Lorenzkurve

Für eine kontinuierliche Merkmalsausprägung $f_L(x) \geq 0$ wird die Lorenzkurve durch die kumulative Verteilung

$$F_L(x) = \int_0^x f_L(\xi) \, d\xi \quad (\text{A.25})$$

beschrieben. Aufgrund der Abfolge der Merkmalsausprägungen in steigender Reihenfolge gilt

$$\frac{df_L(x)}{dx} \geq 0 . \quad (\text{A.26})$$

Wegen

$$\frac{dF_L(x)}{dx} = f_L(x) \geq 0 \quad \text{und} \quad \frac{d^2 F_L(x)}{dx^2} = \frac{df_L(x)}{dx} \geq 0 \quad (\text{A.27})$$

ist der Winkel zwischen der Lorenzkurve und der Abszisse immer positiv und spitz, außerdem nimmt der Winkel mit steigendem x zu. Dies ist gleichbedeutend mit der Konvexität der Lorenzkurve.

Literaturverzeichnis

- [Abe82] L. Abele: *Statistische und strukturelle Texturanalyse mit Anwendungen in der Bildsegmentierung*. Dissertation, Technische Universität München, Lehrstuhl für Nachrichtentechnik, München, 1982.
- [Abm86] W. Abmayr: *Einführung in die digitale Bildverarbeitung*. B. G. Teubner, Stuttgart, 1986.
- [Ahl00] T. Ahlhorn, H. Katterwe, M. Braune, A. Lisounkin, G. Schreck und F. Drews: „Computerized Comparison of Toolmarks“. *Information Bulletin for Shoeprint/Toolmark Examiners* **6** (1), S. 29–37, 2000.
- [AJ01] A. Al-Janobi: „Performance evaluation of cross-diagonal texture matrix method of texture analysis“. *Pattern Recognition* **34** (1), S. 171–180, 2001.
- [Ami88] A. A. Amini, S. Tehrani und T. E. Weymouth: *Using Dynamic Programming for Minimizing the Energy of Active Contours in the Presence of Hard Constraints*. In: *Second International Conference on Computer Vision*, S. 95–99, IEEE, 1988.
- [Bäh85] H.-P. Bähr (Hrsg.): *Digitale Bildverarbeitung: Anwendung in Photogrammetrie und Fernerkundung*. Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1985.
- [Bam89] R. Bamler: *Mehrdimensionale lineare Systeme: Fourier-Transformation und δ -Funktionen*. Springer-Verlag, Berlin, 1989.
- [Bam02] G. Bamberg und F. Baur: *Statistik*. R. Oldenbourg Verlag, München, 12. Aufl., 2002.
- [Bäs98] H. Bässmann und J. Kreyss: *Bildverarbeitung Ad Oculos*. Springer-Verlag, Berlin, 3. Aufl., 1998.
- [Bas02] M. Basu: „Gaussian-Based Edge-Detection Methods—A Survey“. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part C: Applications and Reviews* **32** (3), S. 252–260, 2002.
- [Bey94] J. Beyerer: *Analyse von Riefentexturen*. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994.

- [Bey97] J. Beyerer und F. Puente León: „Suppression of inhomogeneities in images of textured surfaces“. *Optical Engineering* **36** (1), S. 85–93, 1997.
- [Bey99] J. Beyerer: *Verfahren zur quantitativen Bewertung von Zusatzwissen in der Meßtechnik*. Habilitationsschrift, Universität Karlsruhe (TH), VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999.
- [Bod00] H. Bodschwinn: *Oberflächenmeßtechnik zur Beurteilung und Optimierung technischer Funktionsflächen*. Habilitationsschrift, Universität Hannover, Shaker Verlag, Aachen, 2000.
- [Bol01] G. Bol: *Deskriptive Statistik*. R. Oldenbourg Verlag, München, 5. Aufl., 2001.
- [Bra70] J. W. Brackett: „A Study of Idealized Striated Marks and their Comparisons using Models“. *Journal of the Forensic Science Society* **10** (1), S. 27–56, 1970.
- [Bri88] E. O. Brigham: *The fast Fourier transform and its applications*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1988.
- [Bro91] I. N. Bronstein, K. A. Semendjajew, G. Musiol und H. Mühlig: *Taschenbuch der Mathematik*. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart, 25. Aufl., 1991.
- [Can86] J. Canny: „A Computational Approach to Edge Detection“. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **8** (6), S. 679–698, 1986.
- [Can02] A. Can, C. V. Stewart, B. Roysam und H. L. Tanenbaum: „A Feature-Based, Robust, Hierarchical Algorithm for Registering Pairs of Images of the Curved Human Retina“. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **24** (3), S. 347–364, 2002.
- [Cip95] R. Cipolla: *Active Visual Inference of Surface Shape*. Springer-Verlag, Berlin, 1995.
- [Cla90] J. J. Clark und A. L. Yuille: *Data Fusion for Sensory Information Processing Systems*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1990.
- [Dei78] W. Deinet: „Entwicklung eines Verfahrens zur Erfassung, Auswertung und zum Vergleich von Schartenspuren mit einem Digitalrechner“. *Archiv für Kriminologie* **162** (5–6), S. 147–161, 1978.

- [Dei81] W. Deinet: „Studies of Models of Striated Marks Generated by Random Processes“. *Journal of Forensic Sciences* **26** (1), S. 35–50, 1981.
- [Dem98] C. Demant, B. Streicher-Abel und P. Waszkewitz: *Industrielle Bildverarbeitung*. Springer-Verlag, Berlin, 1998.
- [Dre92] T. Dresel, G. Häusler und H. Venzke: „Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar“. *Applied Optics* **31** (7), S. 919–925, 1992.
- [Ebd94] T. Ebding: „Spurennachweis und Spurenrecherche“. *Kriminalistik* **48** (11), S. 732–734, 1994.
- [Eng00] T. Engelberg und F. Mesch: *Eddy current sensor system for non-contact speed and distance measurement of rail vehicles*. In: *Computers in Railways VII*, J. Allan, R. J. Hill, C. A. Brebbia, G. Sciutto und S. Sone (Hrsg.), S. 1261–1270, WIT Press, Southampton, 2000.
- [Eng02] T. Engelberg und F. Puente León: „Erkennung streckenspezifischer Charakteristika zur Ortung im spurgebundenen Verkehr“. *Technisches Messen* **69** (11), S. 453–460, 2002.
- [Fan66] R. M. Fano: *Informationsübertragung: Eine statistische Theorie der Nachrichtenübertragung*. R. Oldenbourg Verlag, München, 1966.
- [Fol97] J. D. Foley, A. van Dam, S. K. Feiner und J. F. Hughes: *Computer Graphics: Principles and Practice*. Addison-Wesley, Reading, 2. Aufl., 1997.
- [Fra93] G. Frankowski: „Schnelle Mikroprofil- und Rauheitsinspektion auf der Basis mikroskopischer Streifenprojektionsverfahren“. *Technisches Messen* **60** (5), S. 176–184, 1993.
- [Gar78] G. Y. Gardner: „Computer Identification of Bullets“. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* **8** (1), S. 69–76, 1978.
- [Ger94] Z. Geradts, J. Keijzer und I. Keereweer: „A New Approach to Automatic Comparison of Striation marks“. *Journal of Forensic Sciences* **39** (4), S. 974–980, 1994.
- [Ger95] Z. Geradts, J. Keijzer und I. Keereweer: *Automatic comparison of striation marks and automatic classification of shoe prints*. In: *Investigative and Trial Image Processing*, L. I. Rudin und S. K. Bramble (Hrsg.), Bd. 2567, S. 151–164, SPIE, 1995.

- [Ger02] Z. Geradts: *Content-Based Information Retrieval from Forensic Image Databases*. Dissertation, Universität Utrecht, Verlag Ipskamp, Delft, 2002.
- [Ger04] C. Gerthsen: *Gerthsen Physik*. Springer-Verlag, Berlin, 22. Aufl., 2004.
- [Gon02] R. C. Gonzalez und R. E. Woods: *Digital Image Processing*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, 2. Aufl., 2002.
- [Got90] C. C. Gotlieb und H. E. Kreyszig: „Texture Descriptors Based on Co-occurrence Matrices“. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* **51**, S. 70–86, 1990.
- [Haf03] H. Haferkorn: *Optik*. Wiley, Weinheim, 4. Aufl., 2003.
- [Har73] R. M. Haralick, K. Shanmugam und I. Dinstein: „Textural Features for Image Classification“. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* **3** (6), S. 610–621, 1973.
- [Har79] R. M. Haralick: „Statistical and Structural Approaches to Texture“. *Proceedings of the IEEE* **67** (5), S. 786–804, 1979.
- [Har85] R. M. Haralick und L. G. Shapiro: „Survey: Image Segmentation Techniques“. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* **29**, S. 100–132, 1985.
- [Har02] J. Hartung, B. Elpelt und K.-H. Klösener: *Statistik*. R. Oldenbourg Verlag, München, 13. Aufl., 2002.
- [He91] D.-C. He und L. Wang: „Texture features based on texture spectrum“. *Pattern Recognition* **24** (5), S. 391–399, 1991.
- [Hec01] E. Hecht: *Optik*. R. Oldenbourg Verlag, München, 3. Aufl., 2001.
- [Hei01a] M. Heizmann: *Bilderfassung von Werkzeugspuren*. Berichte und Bildmaterial zum Kooperationsvertrag zwischen dem Bundeskriminalamt und dem Institut für Mess- und Regelungstechnik, AV 1/99, 7/00 u. 3/01, Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 1999–2001.
- [Hei01b] M. Heizmann und F. Puente León: *Automated analysis and comparison of striated toolmarks*. In: *Proceedings of the Fourth European Meeting for Shoeprint/Toolmark Examiners (SPTM 2001)*, H. Katterwe und A. Körschgen (Hrsg.), S. 121–132, BKA, Wiesbaden, 2001.

- [Hei01c] M. Heizmann und F. Puente León: *Model-based analysis of striation patterns in forensic science*. In: *Enabling Technologies for Law Enforcement and Security*, S. K. Bramble, E. M. Carapezza und L. I. Rudin (Hrsg.), Bd. 4232, S. 533–544, SPIE, 2001.
- [Hei02a] M. Heizmann: *Automated comparison of striation marks with the system GE/2*. In: *Investigative Image Processing II*, Z. J. Geradts und L. I. Rudin (Hrsg.), Bd. 4709, S. 80–91, SPIE, 2002.
- [Hei02b] M. Heizmann: *Automatische Auswertung von Riefenspuren in der Kriminaltechnik*. In: *Sensoren und Meßsysteme 2002*, S. 375–378, VDE-Verlag, Berlin, 2002.
- [Hei02c] M. Heizmann: *Strategies for the automated recognition of marks in forensic science*. In: *Investigative Image Processing II*, Z. J. Geradts und L. I. Rudin (Hrsg.), Bd. 4709, S. 68–79, SPIE, 2002.
- [Hei02d] M. Heizmann: *Untersuchung der Möglichkeit zur Kombination von GE/2 und CONDOR*. Bericht für das Bundeskriminalamt, AV 4/02, Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2002.
- [Hei02e] M. Heizmann: *Vorrichtung zur Bilderfassung von Objekten mit angepasster Beleuchtung und Positionierung*. Gebrauchsmuster Nr. 202 16 913.8, Deutsches Patent- und Markenamt, 2002.
- [Hei03a] M. Heizmann: *Operating Manual for the Illumination and Positioning Device*. Dokumentation, AV 1/03, Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2003.
- [Hei03b] M. Heizmann: *Segmentierung von Werkzeugspuren*. Berichte zum Kooperationsvertrag zwischen dem Bundeskriminalamt und dem Institut für Mess- und Regelungstechnik, AV 5/03 u. 10/03, Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2003.
- [Hei03c] M. Heizmann und F. Puente León: „Imaging and analysis of forensic striation marks“. *Optical Engineering* **42** (12), S. 3423–3432, 2003.
- [Hei04a] M. Heizmann: *Automatischer Werkzeugspurenvergleich — Ergebnisse mit einer Testdatenbank*. Bericht für das Bundeskriminalamt, AV 3/04, Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2004.

- [Hei04b] M. Heizmann: *MRT GE/2 — Datenerfassungsstation und Software*. Dokumentation, AV 1/04, Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2004.
- [Hel96] T. Hellstern: *Lokale Orientierungsanalyse und Riefenbegradigung für den automatischen Vergleich von Projektilen*. Studienarbeit am Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 1996.
- [Hor89] B. K. P. Horn und M. J. Brooks (Hrsg.): *Shape from Shading*. MIT Press, Cambridge, 1989.
- [Hor03] M.-H. Horng: „Texture feature coding method for texture classification“. *Optical Engineering* **42** (1), S. 228–238, 2003.
- [Jäh02] B. Jähne: *Digitale Bildverarbeitung*. Springer-Verlag, Berlin, 5. Aufl., 2002.
- [Jai89] A. K. Jain: *Fundamentals of Digital Image Processing*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1989.
- [Jai95] R. Jain, R. Kasturi und B. G. Schunck: *Machine Vision*. McGraw-Hill, New York, 1995.
- [Jor00] H.-J. Jordan und R. Brodmann: *Highly accurate surface measurement by means of white light confocal microscopy*. In: *X. International Colloquium on Surfaces, Chemnitz, Proceedings & Posters*, M. Dietzsch und H. Trumpold (Hrsg.), S. 296–301, Shaker Verlag, Aachen, 2000.
- [Jul75] B. Julesz: „Experiments in the Visual Perception of Texture“. *Scientific American* **232** (4), S. 34–43, 1975.
- [Jul78] B. Julesz, E. N. Gilbert und J. D. Victor: „Visual Discrimination of Textures with Identical Third-Order Statistics“. *Biological Cybernetics* **31**, S. 137–140, 1978.
- [Kag02] B. Kagerer, R. Brodmann, J. Valentin, J. Filzek und U. Popp: *3D-confocal microscopy for surface analysis of micro-structured materials*. In: *Optical Scanning 2002*, S. F. Sagan, G. F. Marshall und L. Beiser (Hrsg.), Bd. 4773, S. 52–62, SPIE, 2002.
- [Kas87a] M. Kass und A. Witkin: „Analyzing Oriented Patterns“. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* **37**, S. 362–385, 1987.
- [Kas87b] M. Kass, A. Witkin und D. Terzopoulos: „Snakes: Active Contour Models“. *International Journal of Computer Vision* **1** (4), S. 321–331, 1987.

- [Kat88] H. Katterwe, K.-D. Groß, T. Gast und T. Mielke: „Über Gesichtspunkte zur Mustererkennung von Feldereindrücken an Projektilen mit optischen Verfahren“. *Archiv für Kriminologie* **181**, S. 65–75, 1988.
- [Kat89] H. Katterwe: „Moderne Aspekte bei Werkzeugspurenuntersuchungen“. *Deutsches Polizeiblatt* **7** (5), S. 7–9, 1989.
- [Kat92] H. Katterwe: „Forensische Werkstofftechnik — Untersuchungsmethoden und -ziele dieses kriminaltechnischen Fachbereichs —“. *Neue Zeitschrift für Strafrecht* **12** (1, 4), S. 18–21, 160–166, 1992.
- [Kat94] M. Katona: „Kriminaltechnische Untersuchungen“. *Kriminalistik* **48** (11), S. 727–731, 1994.
- [Kat96] H. Katterwe: „Modern Approaches for the Examination of Toolmarks and Other Surface Marks“. *Forensic Science Review* **8** (1), S. 45–72, 1996.
- [Ken77] M. G. Kendall und A. Stuart: *The Advanced Theory of Statistics*, Bd. 1. Griffin, London, 4. Aufl., 1977.
- [Kep03] D. Keppler: *Automatisierte Bilderfassung großer Objektbereiche aus Einzelbildern*. Studienarbeit am Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2003.
- [Kle88] M. V. Klein und T. E. Furtak: *Optik*. Springer-Verlag, Berlin, 1988.
- [Kle96] R. Klette und P. Zamperoni: *Handbook of Image Processing Operators*. Wiley, Chichester, 1996.
- [Koc98] A. W. Koch, M. Ruprecht, O. Toedter, G. Häusler, S. Blossey, H. Schoenfeld und V. Windbichler: *Optische Meßtechnik an technischen Oberflächen*. expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1998.
- [Kor88] A. F. Korn: „Towards a Symbolic Representation of Intensity Changes in Images“. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **10** (5), S. 610–625, 1988.
- [Kre79] E. Kreyszig: *Statistische Methoden und ihre Anwendungen*. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, 7. Aufl., 1979.
- [Kut89] S. Kutscha: *Statistische Bewertungskriterien für die Entropieanalyse dynamischer Systeme*. Dissertation, Technische Hochschule Aachen, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989.

- [Leh99] T. M. Lehmann, C. Gönner und K. Spitzer: „Survey: Interpolation Methods in Medical Image Processing“. *IEEE Transactions on Medical Image Processing* **18** (11), S. 1049–1075, 1999.
- [Lun63] G. Lunetta: „Di una generalizzazione dello schema della curva normale“. *Annali della Facolta di Economia e Commercio di Palermo* **17** (2), S. 235–244, 1963.
- [Mat67] G. Matheron: *Éléments pour une théorie des milieux poreux*. Masson, Paris, 1967.
- [Meh01] C. Mehne: *Konstruktion einer Positionier- und Beleuchtungseinrichtung für die Bilderfassung von Werkzeugspuren*. Studienarbeit am Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2001.
- [Men97] S. K. Mendis, S. E. Kemeny, R. C. Gee, B. Pain, C. O. Staller, Q. Kim und E. R. Fossum: „CMOS Active Pixel Image Sensors for Highly Integrated Imaging Systems“. *IEEE Journal of Solid-State Circuits* **32** (2), S. 187–197, 1997.
- [Mes00] F. Mesch, F. Puente León und T. Engelberg: *Train-based location by detecting rail switches*. In: *Computers in Railways VII*, J. Allan, R. J. Hill, C. A. Brebbia, G. Sciutto und S. Sone (Hrsg.), S. 1251–1260, WIT Press, Southampton, 2000.
- [Neu02] U. Neuschaefer-Rube: *Optische Oberflächenmesstechnik für Topografie und Material*. Habilitationsschrift, Gesamthochschule Kassel, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002.
- [Oja99] T. Ojala und M. Pietikäinen: „Unsupervised texture segmentation using feature distributions“. *Pattern Recognition* **32** (3), S. 477–486, 1999.
- [Ows94] B. Owsnicki-Klewe: *Algorithmen und Datenstrukturen*. Verlag Wißner, Augsburg, 1994.
- [Pah90] W. Pahlke, T. Gast, H. Röck und H. Katterwe: *Optoelektronische Streuverfahren zur Messung geometrischer Größen bei Oberflächenspuren*. In: *Rastermikroskopie in der Materialprüfung*, S. 101–117, Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung, Berlin, 1990.
- [Pap62] A. Papoulis: *The Fourier Integral and its Applications*. McGraw-Hill, New York, 1962.

- [Pap01] A. Papoulis: *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. McGraw-Hill, New York, 4. Aufl., 2001.
- [Pel97] M. Pelillo und E. R. Hancock (Hrsg.): *Energy Minimization Methods in Computer Vision and Pattern Recognition*. Springer-Verlag, Berlin, 1997.
- [Pér96] J.-P. Pérez: *Optik*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1996.
- [Pie75] W. Piesch: *Statistische Konzentrationsmaße*. Verlag J. C. B. Mohr, Tübingen, 1975.
- [Pue97] F. Puente León und J. Beyerer: „Datenfusion zur Gewinnung hochwertiger Bilder in der automatischen Sichtprüfung“. *Automatisierungstechnik* **45** (10), S. 480–489, 1997.
- [Pue99a] F. Puente León: *Automatische Identifikation von Schußwaffen*. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999.
- [Pue99b] F. Puente León und J. Beyerer: *Automatic comparison of striation information on firearm bullets*. In: *Intelligent Robots and Computer Vision XVIII: Algorithms, Techniques, and Active Vision*, D. P. Casasent (Hrsg.), Bd. 3837, S. 266–277, SPIE, 1999.
- [Pue01a] F. Puente León: *Model-based inspection of shot peened surfaces using fusion techniques*. In: *Machine Vision and Three-Dimensional Imaging Systems for Inspection and Metrology*, K. G. Harding, J. W. Miller und B. G. Batchelor (Hrsg.), Bd. 4189, S. 41–52, SPIE, 2001.
- [Pue01b] F. Puente León und M. Heizmann: *Strategies to detect non-linear similarities by means of correlation methods*. In: *Intelligent Robots and Computer Vision XX: Algorithms, Techniques, and Active Vision*, D. P. Casasent und E. L. Hall (Hrsg.), Bd. 4572, S. 513–524, SPIE, 2001.
- [Pue02] F. Puente León: „Komplementäre Bildfusion zur Inspektion technischer Oberflächen“. *Technisches Messen* **69** (4), S. 161–168, 2002.
- [Rao90] A. R. Rao: *A Taxonomy for Texture Description and Identification*. Springer-Verlag, New York, 1990.
- [Res03] J. Restle: „Optimierung der Weißlichtinterferometrie für die Vermessung zylindrischer Objekte“. *Technisches Messen* **70** (10), S. 482–488, 2003.

- [Rön99] G. Rönneberg: *Ein passives Fokusverfahren zur Vermessung von Mikrostrukturen*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999.
- [Rus99] J. C. Russ: *The Image Processing Handbook*. Springer-Verlag, Heidelberg, 3. Aufl., 1999.
- [Sal90] P. Salembier: *Comparison of some morphological segmentation algorithms based on contrast enhancement—Application to automatic defect detection—*. In: *Signal Processing V: Theories and Applications*, L. Torres, E. Masgrau und M. A. Lagunas (Hrsg.), Bd. 2, S. 833–836, Elsevier Science Publishers, 1990.
- [Sch01a] S. C. Scheid: *Die verallgemeinerte Lognormalverteilung*. Diplomarbeit, Universität Dortmund, 2001.
- [Sch01b] G. Schreck: *Computerised Comparison of Toolmarks by the PAMIR System*. In: *Proceedings of the Fourth European Meeting for Shoeprint/Toolmark Examiners (SPTM 2001)*, H. Katterwe und A. Körschgen (Hrsg.), S. 97–104, BKA, Wiesbaden, 2001.
- [Sch02] G. Schröder und H. Treiber: *Technische Optik*. Vogel Verlag, Würzburg, 9. Aufl., 2002.
- [Sel82] K. Sellier: *Schußwaffen und Schußwirkungen I — Ballistik, Medizin und Kriminalistik*. Verlag Schmidt-Römhild, Lübeck, 2. Aufl., 1982.
- [Ser82] J. Serra: *Image Analysis and Mathematical Morphology*. Academic Press, London, 1982.
- [Sha69] C. E. Shannon und W. Weaver: *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, Urbana, 4. Aufl., 1969.
- [Soi98] P. Soille: *Morphologische Bildverarbeitung*. Springer-Verlag, Berlin, 1998.
- [Sta70] K. Stange: *Angewandte Statistik*. Springer-Verlag, Berlin, 1970.
- [Sze96] R. Szeliski: „Video Mosaics for Virtual Environments“. *IEEE Computer Graphics and Applications* **16** (2), S. 22–30, 1996.
- [Tiz99] H. J. Tiziani, R. Windecker, M. Wegner, K. Leonhardt, D. Steudle und M. Fleischer: „Messung und Beschreibung von Mikrostrukturen unter Berücksichtigung materialspezifischer Eigenschaften“. *Technisches Messen* **66** (11), S. 429–436, 1999.

- [Tu98] N. Tu, R. Hornsey und S. G. Ingram: „CMOS Active Pixel Image Sensor with Combined Linear and Logarithmic Mode Operation“. *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering* **2**, S. 754–757, 1998.
- [Via83] S. Vianelli: „The family of normal and lognormal distributions of order r “. *Metron* **41**, S. 3–10, 1983.
- [Wah84] F. M. Wahl: *Digitale Bildsignalverarbeitung*. Springer-Verlag, Berlin, 1984.
- [Wan03] S.-Y. Wan und W. E. Higgins: „Symmetric Region Growing“. *IEEE Transactions on Image Processing* **12** (9), S. 1007–1015, 2003.
- [Weg02] M. Wegner: *Konfokale Mikroskopie zur Topografiebestimmung technischer Oberflächen*. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Technische Optik, Stuttgart, 2002.
- [Whi94] D. J. Whitehouse: *Handbook of Surface Metrology*. Institute of Physics Publishing, Bristol, 1994.
- [Wil92] D. J. Williams und M. Shah: „A Fast Algorithm for Active Contours and Curvature Estimation“. *CVGIP: Image Understanding* **55** (1), S. 14–26, 1992.
- [Xin04] B. Xin, M. Heizmann, S. Kammel und C. Stiller: „Bildfolgenauswertung zur Inspektion geschliffener Oberflächen“. *Technisches Messen* **71** (4), S. 218–226, 2004.
- [Zam91] P. Zamperoni: *Methoden der digitalen Bildsignalverarbeitung*. Vieweg, Braunschweig, 2. Aufl., 1991.