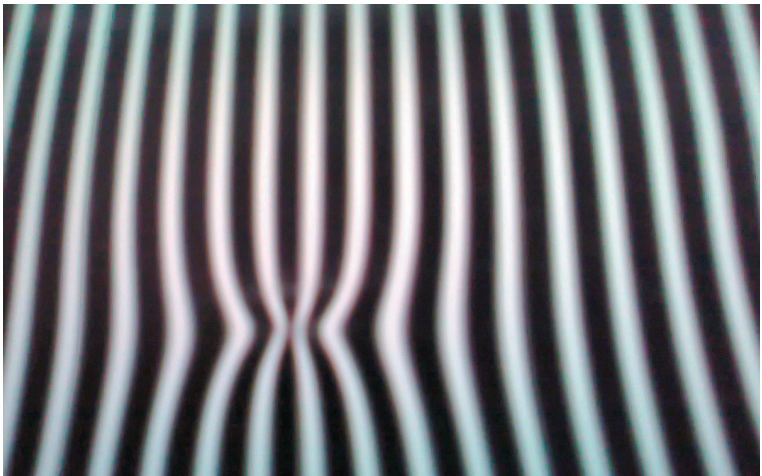

Mathias Ziebarth

Wahrnehmungsgrenzen kleiner Verformungen auf spiegelnden Oberflächen



Schriftenreihe Automatische Sichtprüfung und Bildverarbeitung | Band 14

Mathias Ziebarth

**Wahrnehmungsgrenzen kleiner Verformungen
auf spiegelnden Oberflächen**

Schriftenreihe Automatische Sichtprüfung und Bildverarbeitung
Band 14

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Beyerer

Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme
am Karlsruher Institut für Technologie

Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik
und Bildauswertung IOSB

Wahrnehmungsgrenzen kleiner Verformungen auf spiegelnden Oberflächen

von
Mathias Ziebarth

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie
KIT-Fakultät für Informatik

Tag der mündlichen Prüfung: 22. Oktober 2018

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyerer

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Michael Heizmann

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

KIT Scientific Publishing

Straße am Forum 2

D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.

Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2019 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 1866-5934

ISBN 978-3-7315-0890-8

DOI 10.5445/KSP/1000090271

Wahrnehmungsgrenzen kleiner Verformungen auf spiegelnden Oberflächen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
von der KIT-Fakultät für Informatik des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation

von

Dipl.-Inform. Mathias Ziebarth

Tag der mündlichen Prüfung: 22. Oktober 2018
1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyerer
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Michael Heizmann

Kurzfassung

Bei Oberflächen, die industriell eingesetzt und genutzt werden oder einfach nur ästhetisch „schön“ aussehen sollen wie z. B. lackierte Karosserieteile, spielt die spiegelnde (gerichtete) Reflexion oft die entscheidende Rolle. Die visuelle Prüfung spiegelnder Oberflächen stellt jedoch die Qualitätskontrolle bisher vor große Herausforderungen. Mit der Deflektometrie hat sich ein optisches Messprinzip etabliert, das für die Inspektion spiegelnder und teilspiegelnder Oberflächen genutzt wird. Dabei wird das Spiegelbild eines bekannten Musters in der spiegelnden Reflexion der Oberfläche betrachtet. Sichtbare Verzerrungen des Musters erlauben Rückschlüsse auf die Gestalt der Oberfläche. Obwohl dieses Vorgehen dem eines menschlichen Prüfers sehr ähnlich ist, sind nicht alle messbaren Verformungen gegenüber einem Referenzmuster auch Defekte, also für den Menschen sichtbar.

Prinzipiell unterscheidet man zwischen der Form einer Oberfläche, die durch das Design vorgegeben ist und unerwünschten Abweichungen von dieser Form. Eine unerwünschte Abweichung kann einen Defekt darstellen, der sich negativ auf die Qualität auswirkt. Für technische Oberflächen sind die Anforderungen oft durch die Anwendung festgelegt, beispielsweise die Abbildungsqualität eines Teleskopspiegels. Für spiegelnde Oberflächen, deren Nutzen hauptsächlich ästhetischer Natur ist, gibt es bisher keine allgemeingültigen Bewertungsmaße.

In dieser Arbeit werden zwei Modelle entwickelt und evaluiert, die Wahrnehmungsgrenzen kleiner Formabweichungen auf spiegelnden Oberflächen beschreiben. Es wird ein Modell erster Ordnung entwickelt, welches die maximale Auslenkung eines Flächenelements der Oberfläche beschreibt, die zu einer sichtbaren Änderung eines reflektierten Punktes führt. Außerdem wird ein Modell

entwickelt, welches die durch kleine Formabweichungen der Oberfläche hervorgerufene Verschiebung eines Punktes auf der Bildebene (spekularer Fluss) durch die partiellen Ableitungen der Oberfläche bis zur zweiten Ordnung approximiert. Speziell für gaußförmige Formabweichungen ebener Oberflächen werden Wahrnehmungsgrenzen in Abhängigkeit der lateralen und vertikalen Ausdehnung der Formabweichung sowie ihres Abstandes zum Beobachter angegeben. Beide Modelle berücksichtigen die Eigenschaften des reflektierten Musters und führen die Sichtbarkeit auf die Winkelauflösung des menschlichen Auges zurück.

Neben den geometrischen Einflussgrößen verändern auch Eigenschaften der Oberfläche sowie der Umgebung die Sichtbarkeit einer Formabweichung. Ein Ziel dieser Arbeit war daher die Erweiterung der Modelle um Oberflächenrauheiten, die den Kontrast reflektierter Muster verringern. Außerdem werden die Modelle um Welligkeiten der Oberfläche erweitert, die das reflektierte Muster verzerren und damit kleine Defekte maskieren.

Die Modelle werden anschließend mit realen und simulierten Daten evaluiert. Zuerst werden Rauheit und Welligkeit auf lackierten Oberflächen analysiert und Kennzahlen abgeleitet, die eine Synthese ähnlicher Oberflächen ermöglichen. Anhand der Kennzahlen werden die Wahrnehmungsgrenzen an diese Oberflächen angepasst. Die Approximation des spekularen Flusses wird für kleine Formabweichungen mit simulierten und deflektometrisch gemessenen Daten überprüft. Anschließend werden die vorhergesagten Wahrnehmungsgrenzen für bekannte Formabweichungen mit den Daten zweier Wahrnehmungsstudien verglichen. Dabei zielt die erste Studie speziell auf die Gültigkeit des geometrischen Modells für sehr kleine Formabweichungen auf hochspiegelnden Oberflächen ab, während im Rahmen der zweiten Studie auch Rauheiten und Welligkeiten der Oberfläche mit in Betracht gezogen wurden.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme (IES) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) in enger Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildverarbeitung (IOSB). Die Arbeit an der Dissertation wurde in weiten Teilen durch die Finanzierung der Projekte MID-WAVE und Mosyko3D durch die Baden-Württemberg Stiftung ermöglicht.

Ich danke Herrn Professor Dr.-Ing. Jürgen Beyerer für die fundierte Betreuung der Arbeit. Bei den intensiven und kritischen Gesprächen im Rahmen der wöchentlichen Gesprächsrunden und des jährlichen Sommerseminars habe ich viel gelernt. Außerdem möchte ich Professor Dr.-Ing. Michael Heizmann für das entgegengebrachte Vertrauen und für die Betreuung meiner wissenschaftlichen Projekte, sowie für die Übernahme des Korreferats danken.

Einen wichtigen Beitrag zu dieser Arbeit leisteten meine Kollegen, wofür ich mich recht herzlich bedanke. Besonders hervorzuheben ist Alexey Pak, der meinem Thema mit seinen Ideen einen neuen Schwung gegeben hat. Weiterhin möchte ich mich bei meinen ehemaligen und gegenwärtigen Kollegen der Abteilung MRD insbesondere Jan Burke, Peter Frühberger, Sebastian Höfer, Christian Kühnert, Mahsa Mohammadi Kaji, Masoud Roschani, Thomas Stephan, Markus Vogelbacher und Stefan Werling für die familiäre Arbeitsatmosphäre und die vielen konstruktiven Diskussionen bedanken.

Ein besonderer Dank gilt auch meinen Korrekturlesern, ohne die wohl noch der eine oder andere Fehler mehr in der Arbeit wäre. Außerdem geht ein großer Dank an die von mir betreuten Studenten Philipp Häusser, Benjamin Krüger und Sabine

Olawsky, deren Beiträge für diese Arbeit sehr wertvoll waren. Zudem möchte ich Gaby Gross für ihr Engagement und ihre Hilfsbereitschaft als Sekretärin des Lehrstuhls danken.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Ehefrau Ines bedanken, die mich mit ihren aufbauenden Worten immer wieder motiviert und mich gerade in der letzten Zeit sehr entlastet hat. Ohne Dich hätte ich diese Arbeit wohl nicht fertig gestellt!

Karlsruhe, im Oktober 2018

Mathias Ziebarth

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemstellung	2
1.3 Wissenschaftliche Beiträge	3
2 Grundlagen	5
2.1 Qualität und Kundenzufriedenheit	5
2.1.1 Kano-Modell der Kundenzufriedenheit	8
2.2 Normung von Oberflächenunvollkommenheiten	11
2.2.1 Gestaltabweichungen nach DIN 4760	11
2.2.2 Oberflächenunvollkommenheit nach ISO 8785	13
2.2.3 Oberflächenbeschaffenheit nach ISO 25178	17
2.2.4 Erscheinungsbild nach ISO 4618	19
2.2.5 Orangenschaleneffekt	21
2.2.6 Glanzeinheiten nach ISO 2813	22
2.2.7 Ästhetische Qualitätsanforderungen nach VDI 3414	23
2.2.8 Zusammenfassung zur Normung	24
2.3 Physikalische Grundlagen	24
2.3.1 Radiometrische Größen	25
2.3.2 Lichttransport	27
2.3.3 Kontrastübertragung	28
2.4 Grundlagen der visuellen Wahrnehmung	32
2.4.1 Aufbau des Auges	33

2.4.2	Photometrie	37
2.4.3	Optik des menschlichen Auges	38
2.4.4	Schärfentiefe	42
2.4.5	Winkelauflösung	43
2.4.6	Bestimmung der Winkelauflösung	46
2.4.7	Anpassung des Auges	51
2.4.8	Alterung des Auges	52
2.5	Visuelle Wahrnehmung von Tiefe	53
2.5.1	Visuelle Hinweisreize	54
2.6	Wahrnehmung spiegelnder Oberflächen	63
2.6.1	Texturgradient	65
2.6.2	Stereopsis	73
2.6.3	Spekularer Fluss	75
2.6.4	Anwenderstudien	82
2.6.5	Kratzer	85
2.6.6	Messunsicherheit Deflektometrie	88
2.7	Zusammenfassung	89
3	Modelle zur Wahrnehmung spiegelnder Oberflächen	93
3.1	Oberflächenrauheiten	94
3.2	Oberflächenwelligkeiten	96
3.2.1	Unsichtbare Normalenabweichungen	99
3.2.2	Welligkeit als additive Überlagerung von lokalen Ver- formungen	109
3.2.3	Analyse im Ortsfrequenzbereich	118
3.3	Formabweichung nach Elementarspiegelmodell	119
3.3.1	Auflösung auf der Oberfläche	120
3.3.2	Auflösung auf dem Schirm	122
3.3.3	Ablenkung auf dem Schirm	123
3.3.4	Defektmodell	124
3.3.5	Sichtbarkeit	124
3.4	Spekularer Fluss kleiner Formabweichung	129
3.4.1	Beschreibung des Modells	129

3.4.2	Definition spekularer Fluss	130
3.4.3	Analytische Lösung für kleine Formabweichungen . .	133
3.4.4	Skalierungsinvarianz	135
3.4.5	Gaußförmige Formabweichung auf einem Planspiegel	136
4	Evaluation der Modelle	143
4.1	Testoberflächen	144
4.1.1	Simulierte Oberflächen	144
4.1.2	Lackierte Stahlbleche	146
4.1.3	Diamantgedrehte Oberflächenspiegel	149
4.2	Messverfahren	153
4.2.1	Topographiemessung	153
4.2.2	Zusammengesetzte Messungen	156
4.2.3	Messunsicherheit für zusammengesetzte Messungen .	159
4.2.4	Deflektometrische Registrierung	161
4.2.5	Transformation in die Einheitskamera	165
4.2.6	MTF Messung	168
4.3	Eigenschaften der Testoberflächen	170
4.3.1	Analyse des Defektmodells	170
4.3.2	Analyse der Rauheit	171
4.3.3	Analyse der Welligkeit	176
4.4	Plausibilitätsprüfung des SF-Modells	180
4.4.1	Vergleich mit Simulationsdaten	180
4.4.2	Vergleich mit realen Daten	181
4.4.3	Kleine gaußförmige Verformungen	184
4.5	Studien zur Wahrnehmung	186
4.5.1	Studie mit lackierten Oberflächen	186
4.5.2	Studie mit gedrehten Oberflächen	188
4.6	Evaluation der Modelle	195
4.6.1	Evaluation des Elementarspiegelmodells	195
4.6.2	Evaluation SF-Modell	201
4.6.3	Diskussion und Vergleich der Modelle	204
4.7	Zusammenfassung der Evaluation	210

5 Zusammenfassung	213
5.1 Faustregeln	215
5.2 Ausblick	217
A Anhang	221
Literaturverzeichnis	227
Eigene Veröffentlichungen	240

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Konventionen

\bar{x}, \bar{y}, \dots	Mittelwert
\hat{x}, \hat{y}, \dots	Schätzwert
$\mathcal{X}, \mathcal{Y}, \dots$	Menge
$\tilde{x}, \tilde{y}, \dots$	Einheitsvektor
$\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \dots$	Matrix
$\mathbf{x}, \mathbf{y}, \dots$	Vektor
x, y, \dots	Skalar

Formelzeichen

α	Normalenabweichung, S. 124	rad
β_r	Winkel zwischen Sichtstrahl und Schirmtangente, S. 122	rad
β_s	Winkel zwischen Sichtstrahl und Oberflächentangente, S. 120	rad
Δg_{\min}	Tiefensehschärfe, S. 53	m
$\dot{\alpha}$	Folgebewegung des Auges, S. 59	rad s ⁻¹
$\dot{\vartheta}$	Parallaxenänderung, S. 59	rad s ⁻¹
\dot{c}	Bewegung des Beobachters, S. 76	m s ⁻¹
\dot{p}	Spekularer Fluss auf der Oberfläche, S. 76	m s ⁻¹
$\lambda_{\text{abta\text{st}}}$	Abtastintervall, S. 101	m
λ_c	Grenzwellenlänge der skalenbegrenzten Oberfläche, S. 18	m
λ_M	Lagrange-Multiplikator, S. 157	1

λ_s	Wellenlänge des Streifenmusters auf dem Schirm, S. 29	m
Ω_C	Raumwinkel, S. 26	sr
Φ	Strahlungsfluss, S. 25	W
ρ	Differenzieller Reflexionsfaktor, S. 31	1
σ_α	Messunsicherheit der Oberflächennormalen, S. 102	rad
σ_z	Messunsicherheit der Höhe, S. 102	m
θ_{eye}	Winkelauflösung, S. 43	rad
θ_{max}	Maximaler Schwinkel des SF, S. 137	rad
θ_f	Schwinkel des SF, S. 132	rad
ϑ	Stereowinkel, S. 58	rad
μ	Position auf der Oberfläche, S. 110	m
A	Matrix der Anzahl sich überlappender Messpunkte, S. 156	1
c	Bildseitiger Knotenpunkt des Beobachters, S. 79	m
D	Grad-Matrix, S. 158	1
f	Spekularer Fluss, S. 132	m
h	Vektor der absoluten Höhen der Einzelmessungen, S. 156	m
k	Gewichtete Höhenunterschiede, S. 159	
M	Matrix der Höhenunterschiede, S. 156	m
n	Normalenvektor der Oberfläche, S. 79	1
r_s	Richtungsvektor eines reflektierten Sichtstrahls, S. 79	1
s	Richtungsvektor eines Sichtstrahls auf die Oberfläche, S. 79	1
W	Weingartenabbildung der Oberfläche, S. 76	
<i>a</i>	Höhe einer Oberflächenunvollkommenheit, S. 100	m
<i>a_{max}</i>	Obere Schranke unsichtbarer Verformungen, S. 137	m
<i>a_{min}</i>	Untere Schranke sichtbarer Verformungen, S. 125	m
<i>b</i>	Auslenkung eines Sichtstrahls auf dem Schirm, S. 124	m
<i>c</i>	Kontrast, S. 32	1

c_z	Höhe der Einheitskamera, S. 130	m
D	Durchmesser der Aperturblende, S. 27	m
d	Verschiebung (lateral) einer Formabweichung, S. 136	m
E	Bestrahlungsstärke, S. 25	W m^{-2}
g	Gegenstandsweite, S. 42	m
g	Intensität, S. 28	1
I	Strahlstärke, S. 26	W sr^{-1}
k	Ortsfrequenz, S. 29	m^{-1}
L	Strahldichte, S. 27	$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$
l_r	Abstand des Schirms zur Oberfläche, S. 122	m
l_s	Abstand des Beobachters zur Oberfläche, S. 120	m
m	Modulation, S. 29	1
n	Anzahl der Messungen, S. 156	1
o	Mittlere Intensität, S. 29	1
p	Parallaxe, S. 57	m
q	Knotenpunktastand der Augen, S. 57	m
r	Breite einer Oberflächenunvollkommenheit, S. 100	m

Funktionen

Γ_o	Charakteristische Funktion der Welligkeit, S. 108	
\mathcal{P}	Wahrscheinlichkeit	1
ρ	Registrierung, S. 162	m
F	Verteilungsfunktion	1
F^{-1}	Quantilfunktion	
f_{AKF}	Autokorrelationsfunktion, S. 19	
f_{APS}	Winkelleistungsdichtespektrum, S. 19	
f_{CSF}	Kontrastempfindlichkeitsfunktion, S. 48	

f_{LDS}	Leistungsdichtespektrum, S. 103	
f_{MTF}	Modulationstransferfunktion, S. 30	
f_{OTF}	Optische Transferfunktion, S. 29	
f_{PSF}	Punktspreizfunktion, S. 29	
h	Bezugsoberfläche, S. 99	m
h'	Istoberfläche, S. 99	m
o	Bezugsoberfläche mit Welligkeit, S. 99	m
p	Wahrscheinlichkeitsdichte	1

Koordinatensysteme

$\mathbf{p} = (x, y, z)^{\text{T}}$	Punkt in der Objektebene	m
$\mathbf{v} = (v_x, v_y)^{\text{T}}$	Punkt in der Schirmebene	m
$\mathbf{w} = (u, v)^{\text{T}}$	Punkt in der Bildebene	m
$\mathbf{x} = (x, y)^{\text{T}}$	Stelle in der Objektebene	m

Konstanten

e	Eulersche Zahl
i	Imaginäre Einheit $\sqrt{-1}$

Abkürzungen

AKF	Autokorrelationsfunktion, S. 19
APS	Winkelleistungsdichtespektrum, S. 118
BPS	Integral über alle Richtungen des Winkelleistungsdichtespektrums in einem Bandpassbereich, S. 119
BRDF	bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktion, S. 30
CSF	Kontrastempfindlichkeitsfunktion, S. 48
MTF	Modulationstransferfunktion, S. 30

PSF Punktpreisfunktion, S. 28

SF Spekularer Fluss, S. 75

Operatoren

\dot{f} Ableitung der Funktion f nach der Zeit t

\exists Existenzquantor, S. 99

\forall Allquantor, S. 157

\mathcal{F} Fourier-Transformation, S. 18

f_x Partielle Ableitung der Funktion f nach x

Mengen

\mathcal{A} Menge der Parameter der Höhenauslenkung, S. 111 m

\mathcal{B} Menge der Parameter der Breite, S. 111 m

\mathcal{D} Definitionsbereich auf der Bezugsoberfläche, S. 18 m

\mathcal{L}_o Wellenlängenbereich des Orangenschaleneffekts, S. 21 m

\mathcal{M} Menge der Parameter der Position auf der Oberfläche, S. 111 m

\mathcal{R} Menge der reellen Zahlen

\mathcal{S}^2 Einheitssphäre, S. 26

\mathcal{V} Menge der Schirmpunkte, S. 162 m

\mathcal{W} Menge der Bildpunkte, S. 162 m

\mathcal{C} Fläche auf der Einheitssphäre, S. 26 sr^2

Subskripte

\square_h' Größe auf der Istoberfläche, S. 99

\square_h Größe auf der Bezugsoberfläche, S. 99

\square_{img} Größe auf der Bildebene, S. 27

\square_{max} Maximum einer Größe, S. 102

\square_{\min}	Minimum einer Größe, S. 32
\square_o	Größe auf der Bezugsoberfläche mit Welligkeit, S. 99
\square_{scr}	Größe auf der Schirmebene, S. 27
\square_{srf}	Größe auf der Oberfläche, S. 27
\square_t	Größe eines Elementarspiegels, S. 124
\square_i	Index, i -te Komponente

Einheiten

'	Winkelminute, 1/60 eines Grads
"	Winkelsekunde, 1/60 einer Winkelminute
cd	Candela, Basiseinheit der Lichtstärke, S. 38
°	Grad, Winkelmaß: 1/360 eines Vollwinkels
Lp mm ⁻¹	Linienpaare pro Millimeter, Maßeinheit der Ortsfrequenz
m	Meter, Basiseinheit der Länge
rad	Radian, Winkelmaß: Länge eines Kreisbogens im Einheitskreis
s	Sekunde, Basiseinheit der Zeit
sr	Steradian, Raumwinkelmaß: Flächeninhalt auf der Einheitskugel
W	Watt, Maßeinheit der Leistung
cpd	Wellenzahl pro Winkelgrad, Maßeinheit der Ortsfrequenz, S. 48
GU	Glanzwert, Maßeinheit des Glanzes, S. 22

1 Einleitung

Durch die fortschreitende Automatisierung in der Produktion werden zunehmend komplexe Aufgaben durch Maschinen übernommen. Eine wichtige Aufgabe ist die Qualitätskontrolle, die häufig durch eine Sichtprüfung der Produkte erfolgt. Die optische Oberflächenmesstechnik erlaubt heute eine automatisierte Prüfung spiegelnder Oberflächen, die oftmals die Erkennungsleistung menschlicher Prüfer übertrifft. Bei der Sichtprüfung von Konsumgütern mit spiegelnden Oberflächen (z. B. Automobile, Sanitärtechnik, Haushaltsgeräte, Schmuck usw.) müssen jedoch neben technischen auch rein ästhetische Eigenschaften geprüft werden. Die Schwierigkeit hierbei ist es, geeignete Kriterien zu definieren, die sowohl eine fehlerfreie, d. h. ästhetisch einwandfreie Oberfläche sicherstellen, als auch das Aussortieren von Gutteilen vermeiden, die zwar messbare, aber nicht sichtbare Verformungen enthalten.

In diesem Kapitel wird eine Einleitung in die Wahrnehmung von spiegelnden Oberflächen gegeben. Zunächst wird motiviert, welche Anwendungen sich durch eine systematische Beschreibung der Wahrnehmungsgrenzen auf spiegelnden Oberflächen eröffnen. Anschließend wird das Thema auf die konkrete Problemstellung eingegrenzt und das Ziel dieser Arbeit definiert. Darauf folgt eine Übersicht über den Lösungsansatz und die wissenschaftlichen Beiträge.

1.1 Motivation

Das Design ist ein wichtiges Merkmal von Konsumgütern und trägt wesentlich zur Kaufentscheidung bei. Gerade bei hochwertigen Produkten wie Autos oder Haushaltsgeräten erwartet der Kunde eine hohe Qualität des Produkts. Der erste

Eindruck, den sich ein Kunde von der Qualität eines Produkts macht, hängt dabei wesentlich von der Beschaffenheit der Oberfläche ab; diese sollte den Erwartungen des Kunden entsprechen, also insbesondere keine sichtbaren Störungen aufweisen. Daher erfolgt in der Produktion in der Regel eine strenge Qualitätskontrolle. Hierbei wird unter anderem sichergestellt, dass meist hausinterne Mindestanforderungen an die Qualität eingehalten werden.

Die Metrik, mit der diese Qualität gemessen wird, dient dabei der Abbildung von Eigenschaften des Produkts in einen Zahlenwert, anhand dessen sich Toleranzbereiche festlegen lassen. Dabei muss unterschieden werden zwischen Eigenschaften, die einen funktionalen Nutzen haben, und solchen, die einen ästhetischen Nutzen haben. Wird gefordert, dass eine Oberfläche frei von sichtbaren Fehlern sein soll, muss zunächst eine Metrik für die Sichtbarkeit der Fehler definiert werden. Diese ist gegenwärtig meist implizit aufgrund von Erfahrungen festgelegt. Beispielsweise ist eine Metrik in der Automobilbranche für die Bewertung von Oberflächendefekten die relative Zahl der Kunden, die in der Lage sind den Fehler zu finden. Umgesetzt werden kann eine solche Metrik nur von menschlichen Prüfern, die im Laufe der Zeit lernen, wie solche Fehler gesucht und bewertet werden können.

Soll die Inspektion automatisiert werden, muss zunächst eine Metrik definiert werden, die sich aus maschinell messbaren Eigenschaften ableiten lässt. Für Teilbereiche der Oberflächenprüfung wurden solche Metriken bereits entwickelt.

1.2 Problemstellung

Für eine automatisierte Bewertung von Verformungen auf spiegelnden Oberflächen wird eine Metrik benötigt, welche die Sichtbarkeit der Verformungen für den Menschen abbildet. Es sollen Kriterien für die Sichtbarkeit gegeben und mithilfe eines Experiments evaluiert werden. Die Sichtbarkeit kleiner Verformungen in dieser Arbeit sei wie folgt definiert:

Definition 1.1: Sichtbarkeit kleiner Verformungen

Kleine Verformungen auf einer spiegelnden Oberfläche sind sichtbar, wenn sie gegenüber der fehlerfreien Oberfläche zu einer sichtbaren Änderung des Spiegelbilds einer bekannten Umgebung führen.

Die Wahrnehmungsmodelle in dieser Arbeit berücksichtigen demzufolge nur diejenigen Gestaltabweichungen, die zu einer Verzerrung der reflektierten Umgebung führen. Verformungen der Oberfläche mit sehr kleiner lateraler Ausdehnung (beispielsweise Kratzer) werden nicht durch diese Definition beschrieben, da diese durch Schattenwurf oder Farbänderungen direkt auf der Oberfläche sichtbar werden.

1.3 Wissenschaftliche Beiträge

Der Hauptbeitrag dieser Arbeit sind Modelle, mit denen sich konkrete Wahrnehmungsgrenzen für kleine Verformungen ableiten lassen und die Evaluation dieser Modelle in zwei Wahrnehmungsstudien. In Kapitel 2 wird der Stand der Forschung zum Thema dieser Arbeit aus Sicht der Wahrnehmungspsychologie und der Ingenieurwissenschaft aufgearbeitet. Da sich das Thema in der Schnittmenge beider Disziplinen befindet, gibt es zwar viele Arbeiten, die sich mit Teilaspekten des Themas beschäftigen, aber keine Arbeiten, die ein mathematisches Modell speziell für die menschliche Wahrnehmung angeben, mit dem sich auch numerische Werte ableiten lassen. Im Folgenden werden die wesentlichen wissenschaftlichen Beiträge dieser Arbeit zusammengefasst:

- Vergleich der Unsicherheit von Hinweisreizen zur Tiefenwahrnehmung des Menschen (Abschnitt 2.5).
- Beschreibung eines Modells zur Bestimmung der Winkelauflösung von Mustern, die über teilspiegelnde Oberflächen abgebildet werden (Abschnitt 3.1).
- Beschreibung von drei Modellen für die Analyse von Welligkeiten auf der Oberfläche (Abschnitt 3.2). Das erste Modell basiert auf einer Verteilung

der Normalenabweichungen gegenüber einer Bezugsoberfläche, die entweder direkt über die Ableitung der Oberfläche oder basierend auf einem stochastischen Prozess aus den Momenten der Oberfläche abgeleitet werden. Für das zweite Modell wird die Oberfläche in lokale Verformungen zerlegt und die Eigenschaften der Oberfläche über den Parameterraum der lokalen Verformungen beschrieben. Das dritte Modell beschreibt die Oberfläche im Frequenzbereich der Fourier-Transformation und kann sowohl zur Analyse als auch zur Synthese der Oberfläche verwendet werden.

- Beschreibung eines Modells erster Ordnung zur Wahrnehmung kleiner Normalenabweichungen spiegelnder Oberflächen (Abschnitt 3.3).
- Beschreibung eines Modells zweiter Ordnung zur Approximation des spekularen Flusses durch kleine Verformungen gegenüber einer Bezugsoberfläche. Aufbauend darauf werden Wahrnehmungsgrenzen für kleine Verformungen mit einem gaußförmigen Verlauf abgeleitet (Abschnitt 3.4).
- Vergleich von drei Möglichkeiten für das Erzeugen von Testoberflächen mit sehr kleinen Verformungen (Abschnitt 4.1). Die Testoberflächen wurden mit einem höhenmessenden Sensor erfasst und mit einem angepassten Algorithmus (Abschnitt 4.2.2) zusammengesetzt. Die Messunsicherheiten wurden untersucht und ein Datensatz zur Evaluation der Modelle erstellt (Abschnitt 4.3).
- Beschreibung einer Methode zur Messung eines dichten spekularen Flusses einer verformten Oberfläche gegenüber ihrer Bezugsoberfläche mithilfe eines deflektometrischen Messaufbaus (Abschnitt 4.2.4) und Transformation der Messungen in den Modellraum des spekularen Fluss-Modells (Abschnitt 4.2.5).
- Plausibilitätsprüfung der Approximation des spekularen Flusses mit simulierten und realen Daten sowie der Approximation für kleine Verformungen mit gaußförmigem Verlauf (Abschnitt 4.4).
- Durchführung von zwei Wahrnehmungsstudien zur Sichtbarkeit kleiner Verformungen auf spiegelnden Oberflächen (Abschnitt 4.5) und Evaluation der vorgestellten Modelle anhand der Studienergebnisse (Abschnitt 4.6).

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden zunächst grundlegende Begriffe zu den Themen Qualität und Kundenzufriedenheit definiert. Anschließend wird ein Überblick über die Normung der Form von Produktoberflächen gegeben. Dabei werden die Begriffe „Gestaltabweichung“, „Oberflächenunvollkommenheit“, „Oberflächenbeschaffenheit“ und „Erscheinungsbild von beschichteten Oberflächen“ definiert. Es folgt ein Überblick über die visuelle Wahrnehmung des Menschen. Dazu werden der Aufbau und die grundlegende Funktionsweise des Auges sowie Modelle zur Wahrnehmung von Tiefe im Allgemeinen und der Wahrnehmung spiegelnder Oberflächen im Speziellen vorgestellt. Dabei werden Ähnlichkeiten zum maschinellen Sehen aufgezeigt und, wenn möglich, Unsicherheiten und Auflösungsgrenzen für die Wahrnehmung angegeben. Abschließend folgt ein Überblick über den Stand der Forschung zur Wahrnehmung spiegelnder Oberflächen. Dazu gehören die Abschätzung von Messunsicherheiten der Deflektometrie, dem maschinellen Analogon zur Erfassung der Form spiegelnder Oberflächen, Bewertungsmaße von ästhetischen Oberflächenunvollkommenheiten auf spiegelnden Oberflächen und der spekulare Fluss zur Beschreibung von Bewegungen der spiegelnden Reflexion auf der Oberfläche.

2.1 Qualität und Kundenzufriedenheit

Wie bereits in Abschnitt 1.1 motiviert, ist das Design von Produkten ein wichtiges Merkmal. Unvollkommenheiten auf der Oberfläche, die als störender Fehler empfunden werden, können die wahrgenommene Qualität eines Produkts mindern, was letztendlich der Kundenzufriedenheit schaden kann. Die hier

verwendeten Begriffe Merkmal, Kundenzufriedenheit, Anforderung, Qualität und Fehler sind nach [ISO9000] definiert und werden im Folgenden vorgestellt und kurz diskutiert. Zunächst wird ein Merkmal benötigt, anhand dessen sich Eigenschaften von Produkten beschreiben lassen.

Definition 2.1: Merkmal [ISO9000]

Ein Merkmal ist eine kennzeichnende Eigenschaft.

Anmerkungen: Es gibt verschiedene Klassen von Merkmalen:

- physikalisch (z. B. mechanisch, elektrisch, chemisch, biologisch)
- sensorisch (z. B. Geruch, Berührung, Geschmack, Gehör)
- verhaltensbezogen (z. B. Höflichkeit, Ehrlichkeit, Aufrichtigkeit)
- zeitbezogen (z. B. Pünktlichkeit, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit)
- ergonomisch (z. B. physiologisch, Sicherheit für den Menschen)
- funktional (z. B. Spitzengeschwindigkeit eines Fahrzeugs)

Das Design ist hier nicht als eigenständige Klasse von Merkmalen aufgeführt. Es kann sich, je nach Ausprägung, um ein physikalisches, sensorisches, ergonomisches oder funktionales Merkmal handeln. Den Schwerpunkt dieser Arbeit stellen die davon auf den Menschen bezogenen sensorischen und ergonomischen Merkmale dar.

Zentraler Begriff und Ziel der Qualitätssicherung ist die Kundenzufriedenheit, also die Erfüllung der Erwartungshaltung des Kunden.

Definition 2.2: Kundenzufriedenheit [ISO9000]

Wahrnehmung des Kunden zu dem Grad, in dem die Erwartungen des Kunden erfüllt worden sind.

Anmerkungen: Es kann sein, dass die Kundenerwartung der Organisation oder sogar dem besagten Kunden unbekannt ist, bis das Produkt geliefert oder die Dienstleistung erbracht wird.

Zum Erreichen hoher Kundenzufriedenheit kann es erforderlich sein, eine Kundenerwartung zu erfüllen, auch wenn sie weder festgelegt noch üblicherweise vorausgesetzt oder verpflichtend ist.

Die Erfüllung der Erwartungen muss also nicht immer explizit formuliert sein. Trotzdem sollte es das Ziel eines Herstellers sein, die Erwartungshaltung des Kunden anhand messbarer Anforderungen festzuhalten, um das Risiko von späteren Reklamationen und unzufriedenen Kunden zu minimieren.

Definition 2.3: Anforderung [ISO9000]

Erfordernis oder Erwartung, das oder die festlegt, was üblicherweise vorausgesetzt oder verpflichtend ist.

Im Kontext dieser Arbeit wäre beispielsweise die Anforderung an die Realisierung des Designs einer spiegelnden Oberfläche, dass dieses nicht durch sichtbare Formabweichungen gestört wird. Mit der Sichtbarkeit von Formabweichungen wird später eine messbare Größe vorgestellt, mit der diese Anforderung, idealerweise durch eine automatisierte Inspektion, sichergestellt werden kann. Der Begriff Qualität ist weiter gefasst und bezieht sich auf die Erfüllung aller Anforderungen.

Definition 2.4: Qualität [ISO9000]

Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt.

Damit ist die Inspektion der Oberfläche ein Teil der Qualitätssicherung. Die Relevanz der Qualitätssicherung bringt folgendes Zitat auf den Punkt.

Qualität bedeutet, dass der Kunde und nicht die Ware zurückkommt.
(Hermann Tietz)

Je nach Zielsetzung des Herstellers kann auch eine (gegenüber der Konkurrenz) geringere Qualität ausreichen. Ein Grund, dass dies dennoch vom Kunden toleriert wird, kann ein entsprechend geringerer Preis des Produkts sein. Einhergehend damit sind geringere Anforderungen an die Merkmale des Produkts. Daher sollte ein Maß, mit welchem die Einhaltung einer Anforderung überwacht wird, auch Anpassungen zulassen. Beispielsweise wird bei der Anforderung an

tolerierbare Formabweichungen auf lackierten Oberflächen im Automobilbereich nach dem späteren Einsatzgebiet unterschieden. Für Karosserieteile, die auffällig sind und sehr häufig betrachtet werden, sind diese Anforderungen deutlich höher. So ist beispielsweise die ästhetische Anforderung an die Oberfläche einer Motorhaube deutlich höher als an die eines Türschwellers.

Wird eine Anforderung nicht erfüllt, wird dies als Fehler bezeichnet.

Definition 2.5: Fehler [ISO9000]

Nichterfüllung einer Anforderung.

Was ein Fehler ist, wird also erst durch die Anforderung definiert. Jeder Fehler bzw. Mangel beeinträchtigt nach deutschem Recht (§434 BGB) die Verwendbarkeit eines Produkts. Auf manche Unvollkommenheiten trifft dies jedoch nicht zu, da sie durchaus gewollt sind. Beispielsweise ist der Orangenschaleneffekt eine gewollte Unvollkommenheit der Oberfläche; siehe Abschnitt 2.2.5. Daher wird in dieser Arbeit stets der Begriff „Oberflächenunvollkommenheiten“ und spezieller „Oberflächenverformungen“ verwendet, solange nicht klar ist, ob diese aufgrund der Anforderung tatsächlich einen Fehler darstellen. Bei den in dieser Arbeit betrachteten ästhetischen Unvollkommenheiten setzt dies eine Verformung der Oberfläche voraus, die tatsächlich die Verwendbarkeit beeinträchtigt, was in diesem Zusammenhang die Sichtbarkeit nach Definition 1.1 voraussetzt.

2.1.1 Kano-Modell der Kundenzufriedenheit

Das Kano-Modell der Kundenzufriedenheit stellt den Zusammenhang zwischen dem Grad der Anforderungserfüllung und der daraus resultierenden Kundenzufriedenheit für verschiedene Leistungsattribute her.

Definition 2.6: Leistungsattribut

Ein Leistungsattribut ist gleichbedeutend mit einer Anforderung und wird nach dem Kano-Modell [Mat+96] in drei wesentliche Leistungsattribute unterteilt:

- **Basisanforderungen** (must-be quality): Anforderungen, bei denen Erfüllung die Zufriedenheit nicht erhöht, während Nichterfüllung überproportional zu Unzufriedenheit führt. Basisanforderungen werden als selbstverständlich vorausgesetzt und daher nicht explizit geäußert.
- **Leistungsanforderungen** (one-dimensional quality): Anforderungen, bei denen die Kundenzufriedenheit proportional zum Grad der Erfüllung steigt oder fällt. Leistungsanforderungen werden vom Kunden normalerweise explizit verlangt.
- **Begeisterungsanforderungen** (attractive quality): Anforderungen, deren Erfüllung die Kundenzufriedenheit überproportional steigert, während Nichterfüllung keine Unzufriedenheit zur Folge hat. Begeisterungsanforderungen werden vom Kunden weder explizit verlangt noch erwartet.

In Abbildung 2.1 ist das Kano-Modell der Kundenzufriedenheit schematisch nach [Höl08] dargestellt. Abweichend von [Höl08] wird hier der Grad der Erwartungserfüllung auf der Abszisse gleichbedeutend als Qualität bezeichnet.

Für ein neues Merkmal, hier am Beispiel eines Autoradios, ändert sich im Laufe der Zeit die Erwartungshaltung des Kunden. Während ein Kunde anfänglich alleine mit dem Vorhandensein eines Autoradios zufrieden ist (Begeisterungsanforderung), wird der Kunde beim Kauf eines neuen Autos bereits auf die Qualität des Autoradios achten (Leistungsanforderung). Schließlich setzt die Gewöhnung ein, womit ein Autoradio so selbstverständlich wird, dass jegliche Abweichungen von der Erwartungshaltung zu Unzufriedenheit führen (Basisanforderung).

Die in dieser Arbeit betrachtete ästhetische Oberflächenqualität ist beispielsweise im Automobilbereich eine Basisanforderung [Özk09], bei der man davon

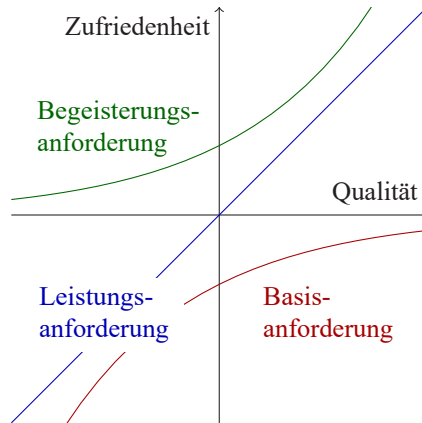


Abbildung 2.1: Kano-Modell der Kundenzufriedenheit nach [Höl08] für unterschiedliche Leistungsattribute.

ausgehen kann, dass die Hersteller ihre Prozesse soweit optimiert haben, dass keine Fehler in der Fertigung mehr auftreten. Auch in einer durch die Universität Ulm durchgeführten Kundenbefragung wurde festgestellt, dass „nahezu 50% der Kunden [...] Lackfehler, falls vorhanden, nicht akzeptieren“ [KT97]. Folglich müssen alle Oberflächenunvollkommenheiten, die in der Automobilproduktion auftreten und vom Kunden erkannt werden könnten, auch behoben werden. Hieraus leitet sich auch das Ziel dieser Arbeit ab, jede sichtbare Oberflächenunvollkommenheit als Fehler zu klassifizieren. Der Versuch, Oberflächenunvollkommenheiten danach zu beurteilen, wie störend diese empfunden werden könnten, verlagert das Problem auf eine unscharf definierte Anforderung, die nicht nur von messbaren Eigenschaften der Oberfläche abhängt, sondern auch von einer unvorhersehbaren Erwartungshaltung des Kunden. Daher kann im Allgemeinen für eine Verformung nur angegeben werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit diese sichtbar ist, nicht jedoch wie störend sie ist.

2.2 Normung von Oberflächenunvollkommenheiten

Welche Arten von Oberflächenunvollkommenheiten auftreten können und wie schwerwiegend diese sind, hängt stark von der jeweiligen Anwendung und den Eigenschaften der Oberfläche ab. Im Folgenden wird ein Überblick über die Normung von Oberflächenunvollkommenheiten gegeben und zusammengefasst, in welchen Anwendungen und unter welchen Umständen diese auftreten. Außerdem werden Normen vorgestellt, die der Typisierung und Bewertung von Oberflächeneigenschaften dienen. Anschließend wird in Abschnitt 2.2.7 eine Norm für Qualitätsanforderungen an Holzoberflächen vorgestellt, die sich als einzige Industrienorm mit ästhetischen Qualitätsanforderungen auseinandersetzt.

2.2.1 Gestaltabweichungen nach DIN 4760

In [DIN4760] werden Gestaltabweichungen definiert und klassifiziert. Zunächst werden dafür verschiedene Definitionen der Oberfläche eingeführt, die wirkliche, geometrische und die Istoberfläche.

Definition 2.7: Wirkliche Oberfläche [DIN4760]

Die wirkliche Oberfläche ist die Oberfläche, die den Gegenstand von dem ihn umgebenden Medium trennt.

Definition 2.8: Geometrische Oberfläche [DIN4760]

Die geometrische Oberfläche ist eine ideale Oberfläche, deren Nennform durch die Zeichnung und/oder andere technische Unterlagen definiert wird.

Definition 2.9: Istoberfläche [DIN4760]

Die Istoberfläche ist das messtechnische erfasste, angenäherte Abbild der wirklichen Oberfläche eines Formelementes.

Es folgt die Definition der Gestaltabweichungen als Unterschiede zwischen gemessener und spezifizierter Oberfläche.

Definition 2.10: Gestaltabweichungen [DIN4760]

Gestaltabweichungen sind die Gesamtheit aller Abweichungen der Istoberfläche von der geometrischen Oberfläche.

Sie werden nach ihrem Verhältnis von Wellenlänge zu Wellenamplitude in Ordnungen klassifiziert: Gestaltabweichungen 1. Ordnung werden Formabweichung, Gestaltabweichungen 2. Ordnung werden Welligkeit und Gestaltabweichungen 3. bis 5. Ordnung werden Rauheit genannt und sind wie folgt definiert.

Definition 2.11: Formabweichungen [DIN4760]

Formabweichungen sind solche Gestaltabweichungen, die bei der Betrachtung der gesamten Istoberfläche eines Formelementes feststellbar sind.

Definition 2.12: Welligkeit [DIN4760]

Welligkeit sind überwiegend periodisch auftretende Abweichungen der Istoberfläche eines Formelementes, bei denen das Verhältnis der Wellenabstände zur Wellentiefe im Allgemeinen zwischen 1000:1 und 100:1 liegt. Meistens sind mehrere Wellenperioden erkennbar.

Definition 2.13: Rauheit [DIN4760]

Rauheit sind solche regelmäßig oder unregelmäßig wiederkehrenden Abweichungen der Istoberfläche eines Formelementes, bei denen das Verhältnis der Abstände zur Tiefe im Allgemeinen zwischen 100:1 und 5:1 liegt.

Zwischen Rauheit und Welligkeit wird hier aufgrund von Größen, die auf Beschränkungen des verwendeten Messgeräts zurückzuführen sind, unterschieden. Als funktionales Merkmal hat sich diese Definition als nützlich erwiesen. Werden jedoch ästhetische Eigenschaften einer spiegelnden Oberfläche betrachtet, ist eine Unterscheidung aufgrund der Auswirkung auf das Erscheinungsbild sinnvoller. Diese Unterscheidung wird in Abschnitt 2.2.4 nach [ISO4618] getroffen.

Obwohl sich die Begriffe nach [DIN4760] von denen neuerer Normen [ISO8785; ISO25178] unterscheiden, hat das dort definierte Ordnungssystem aufgrund seiner Anschaulichkeit weiterhin Gültigkeit. Bemerkenswert bei der Definition von Gestaltabweichungen ist, dass klar zwischen der wirklichen Oberfläche und der Istoberfläche, also dem, was messtechnisch davon erfasst wird, unterschieden wird. Nur weil auf einer Istoberfläche keine Gestaltabweichungen auftreten, bedeutet dies beispielsweise nicht, dass es auch keine Abweichungen der wirklichen von der geometrischen Oberfläche gibt. Erst wenn ein geeignetes Messverfahren gewählt wird, kann eine Aussage über die Gestaltabweichungen getroffen werden. Ob ein Messverfahren geeignet ist, hängt dabei von der jeweiligen Anforderung ab.

2.2.2 Oberflächenunvollkommenheit nach ISO 8785

In [ISO8785] werden im Gegensatz zu den nach [DIN4760] definierten globalen Gestaltabweichungen (Form, Welligkeit und Rauheit) lokale Abweichungen als Oberflächenunvollkommenheiten definiert. Zunächst wird ergänzend zu [DIN4760] eine Bezugsoberfläche definiert, die an Stelle der geometrischen Oberfläche nach Definition 2.8 verwendet wird.

Definition 2.14: Bezugsoberfläche [ISO8785]

Eine Oberfläche, die die Form einer geometrischen Oberfläche hat und von der ausgehend die Kenngrößen von Oberflächenunvollkommenheiten bestimmt werden.

Die Bezugsfläche hat gegenüber der geometrischen Oberfläche den Vorteil, dass für diese keine Zeichnung oder ähnliches als Referenz herangezogen werden muss. Stattdessen kann die Bezugsfläche zum Beispiel durch Messung eines Kalibriernormals, durch Mittelung mehrerer Messungen oder Messung eines fehlerfreien Bereichs der zur prüfenden Oberfläche bestimmt werden. Das erleichtert die Auswertung, da sonst zunächst die Messung zum Modell der geometrischen Oberfläche registriert werden muss, bevor Gestaltabweichungen bestimmt werden können. Auf das Konzept der Bezugsfläche wird in dieser Arbeit zurückgegriffen, da sich auch die sichtbaren Verformungen nach Definition 1.1 aus den Abweichungen zu einem benachbarten, fehlerfreien Bereich oder einer Referenzoberfläche berechnen lassen.

Zusätzlich wird die Oberflächentextur definiert, die alle globalen Gestaltabweichungen, ähnlich der Welligkeit und Rauheit, umfasst.

Definition 2.15: Oberflächentextur [ISO8785]

Wiederholte oder zufällige Abweichungen von der geometrischen Oberfläche in dreidimensionaler Topographie der Oberfläche.

Abweichend von dieser strukturellen Textur der Oberfläche wird im Bereich der Computergraphik mit der Oberflächentextur häufig die Reflektanztextur, also die Reflexionseigenschaft der Oberfläche bezeichnet. In dieser Arbeit wird mit einer texturierten Oberfläche ebenfalls eine Oberfläche mit sichtbarer Reflektanztextur bezeichnet, also eine zumindest teilweise diffus reflektierende Oberfläche, auf der ein oberflächliches Muster erkennbar ist. Es folgt die Definition einer Oberflächenunvollkommenheit.

Definition 2.16: Oberflächenunvollkommenheiten [ISO8785]

Element oder Unregelmäßigkeit oder Gruppe von Elementen und Unregelmäßigkeiten der wirklichen Oberfläche, die unbeabsichtigt oder zufällig durch die Bearbeitung, Lagerung oder Funktion der Oberfläche entstanden sind.

Eine Oberflächenunvollkommenheit wird in Vertiefungen, Buckel, kombinierte und stellenweise Unvollkommenheiten unterteilt, für die im Anhang in den Definitionen A.1 bis A.4 Beispiele zusammen mit typischen Entstehungsursachen aufgelistet werden. In Abbildung 2.2 sind alle Beispiele schematisch anhand von Zeichnungen dargestellt.

An der vielfältigen Auflistung von Beispielen ist die Komplexität der Charakterisierung von Oberflächenunvollkommenheiten zu erkennen, die sich kaum durch ein einheitliches Modell beschreiben lassen. Des Weiteren werden hier beispielsweise noch keine typischen Oberflächenunvollkommenheiten auf lackierten oder Holzoberflächen berücksichtigt.

Neben der Form variiert auch das Auftreten auf der Oberfläche. Von den Oberflächenunvollkommenheiten sind im Rahmen dieser Arbeit nur solche relevant, die nach Definition 1.1 zu einer sichtbaren Verzerrung der reflektierten Umgebung führen. Daher sind Unvollkommenheiten des Aussehens zwar relevante Fehler auf spiegelnden Oberflächen, werden jedoch nicht durch die später in Kapitel 3 vorgestellten Modelle beschrieben, da sie entweder nur Kontrast oder Farbe des reflektierten Bilds der Umgebung verändern. Auch Unvollkommenheiten mit großen Gradienten oder sehr kleiner lateraler Ausdehnung in mindestens einer Richtung, wie Kratzer, Risse, Poren und Krater, sind zwar sichtbare Fehler, führen aber nicht zu sichtbaren Verzerrungen der Umgebung, sondern zu Schattierungen oder Schattenwurf auf der Oberfläche.

Für die Oberflächenunvollkommenheiten sind in [ISO8785] unter anderem die Kenngrößen Höhe und Breite definiert, die in Kapitel 3 zur vereinfachten Beschreibung der Fehler verwendet und dort genauer definiert werden.

Definition 2.17: Profilkenngrößen für einzelne Oberflächenunvollkommenheiten [ISO8785]

- **Breite** r gemessen parallel zur Bezugsoberfläche
- **Höhe** a gemessen senkrecht zur Bezugsoberfläche

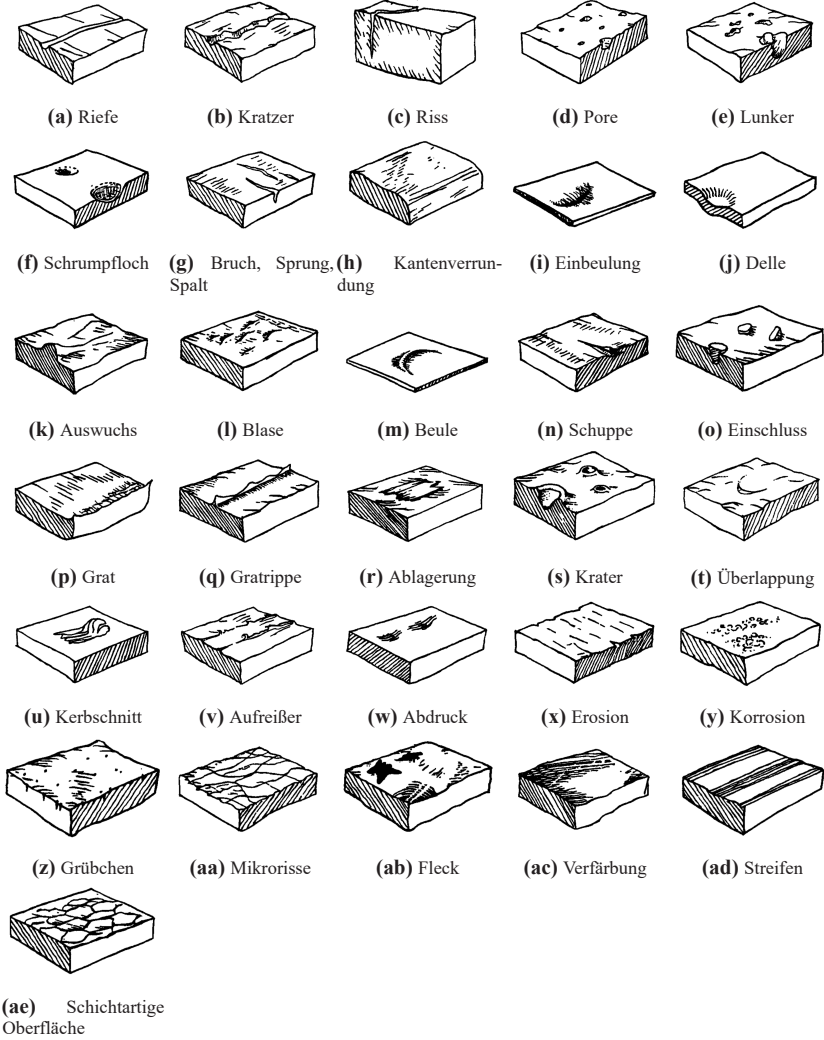


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung von Oberflächenunvollkommenheiten (aus [ISO8785]).

2.2.3 Oberflächenbeschaffenheit nach ISO 25178

Mit der Entwicklung flächenhafter Messungen von Oberflächen wurden zunächst Profilkenngrößen auf flächige Messungen erweitert. Außerdem konnten neue Kenngrößen zur Beschreibung von Oberflächen aus flächenhaften Messungen abgeleitet werden. Beides ist Bestandteil der [ISO25178] für eine flächenhafte Oberflächenbeschreibung, die selbst Bestandteil der geometrischen Produktspezifikation (GPS) ist [Bla13]. Die GPS ist ein System, das technische Spezifikationen für geometrische Anforderungen an Werkstücke und Anforderungen an deren Verifizierung festlegt. Zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit ist [ISO25178] noch nicht vollständig abgeschlossen: die Teile 4 und 5 sind noch nicht veröffentlicht.

Teil 2 der Norm legt Definitionen und Kenngrößen für die Ermittlung der Oberflächenbeschaffenheit durch ein flächenhaftes Verfahren fest. Zunächst wird die skalenbegrenzte Oberfläche eingeführt, die durch Anwendung von Oberflächenfiltern aus der Istoberfläche berechnet wird.

Definition 2.18: Skalenbegrenzte Oberfläche [ISO25178]

Eine Oberfläche, die durch Anwendung von Filtern und Operatoren aus der Istoberfläche hervorgeht.

Die Höhe der Oberfläche bezieht sich nun immer auf die Differenz der skalenbegrenzten und der Bezugsoberfläche.

Definition 2.19: Höhe [ISO25178]

Vorzeichenbehafteter Abstand $z(x, y)$ von der Bezugsoberfläche zur skalenbegrenzten Oberfläche an der Position x, y .

Anmerkungen: Das Koordinatensystem beruht auf der Bezugsoberfläche.

Für die Berechnung der skalenbegrenzten Oberfläche werden generische Filter für das Entfernen lateraler Anteile kleiner Skala (S-Filter) und großer Skala (L-Filter), sowie ein generischer Operator (F-Operator) zur Entfernung von

Formanteilen von der Istoberfläche definiert. In [ISO16610] werden dann spezifische lineare und morphologische Oberflächenfilter definiert, unter anderem das Gauß-Filter nach [ISO16610-21], welches als S- und L-Filter verwendet wird.

Definition 2.20: Gauß-Filter [ISO16610-21]

Gauß-Filter mit Grenzwellenlänge λ_c .

$$s(x) = \frac{1}{\alpha_c \lambda_c} e^{-\pi \left(\frac{x}{\alpha_c \lambda_c}\right)^2} \quad (2.1)$$

Die Konstante $\alpha_c = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}}$ dient dazu, eine Übertragungscharakteristik von 50% bei der Grenzwellenlänge sicher zu stellen.

Ein F-Operator ist beispielsweise die Schätzung einer Ausgleichsebene mit Algorithmus 4 (siehe Anhang). Auf der skalenbegrenzten Oberfläche werden dann flächenhafte Kenngrößen und -kurven definiert, die zur Charakterisierung der Oberflächenbeschaffenheit in Rauheit, Welligkeit und Form dienen. Zunächst wird mit der Fourier-Transformation ein wichtiger Operator eingeführt.

Definition 2.21: Fourier-Transformation

Operator, welcher die skalenbegrenzte Oberfläche in den Fourier-Raum mit den Ortsfrequenzen k_x und k_y transformiert, wobei \mathcal{D} der Definitionsbereich ist.

$$\mathcal{F}\{z\}(k_x, k_y) = \int \int_{\mathcal{D}} z(x, y) e^{-i2\pi k_x x + i2\pi k_y y} dx dy \quad (2.2)$$

Mithilfe der Fourier-Transformation lässt sich beispielsweise das Winkelleistungsdichtespektrum berechnen, das zur Charakterisierung der Isotropie der Oberflächentextur dient.

Definition 2.22: Winkelleistungsdichtespektrum (APS) [ISO25178]

Leistungsspektrum für eine vorgegebene Richtung ϑ in der Ebene der Bezugsfläche, in der K_1 bis K_2 den Integrationsbereich in radialer Richtung festlegen.

$$f_{\text{APS}}(\vartheta) = \int_{K_1}^{K_2} k |\mathcal{F}\{z\}(k \sin(\vartheta), k \cos(\vartheta))|^2 dk \quad (2.3)$$

Eine Funktion, mit der sich statistische Eigenschaften der Oberfläche beschreiben lassen, ist die Autokorrelationsfunktion.

Definition 2.23: Autokorrelationsfunktion (AKF) [ISO25178]

Funktion, welche die Korrelation zwischen einer Oberfläche und derselben um τ_x, τ_y verschobenen Oberfläche beschreibt, wobei \mathcal{D} der Definitionsbereich ist.

$$f_{\text{AKF}}(\tau_x, \tau_y) = \int_{\mathcal{D}} \int z(x, y) z(x - \tau_x, y - \tau_y) dx dy \quad (2.4)$$

Für die Berechnung ist die vorherige Begrenzung der Oberfläche auf die relevante Skala unverzichtbar. Im Verlauf dieser Arbeit wird daher meist zunächst die skalenbegrenzte Oberfläche mithilfe des Gauß-Filters berechnet, bevor Kennwerte der Oberfläche berechnet werden.

2.2.4 Erscheinungsbild nach ISO 4618

Die Norm für Beschichtungsmittel [ISO4618] beschreibt im Gegensatz zu den Oberflächenunvollkommenheiten nach [ISO8785] speziell solche Oberflächenunvollkommenheiten, die auf beschichteten Oberflächen auftreten. Dazu wird der Begriff des Erscheinungsbildes definiert, der ähnlich wie die Oberflächen-

textur sowie die Welligkeit und Rauheit eine globale, also über die gesamte Oberfläche auftretende, regelmäßige Abweichung der Oberfläche beschreibt.

Definition 2.24: Erscheinungsbild, Appearance [ISO4618]

Visueller Eindruck einer Oberfläche (dies umfasst Farbe, Glanz, Bildschärfe, Schleier, Oberflächenstruktur, Struktur, Orangenhaut usw.).

Im Unterschied zu den anderen Normen ist der Begriff hier nicht technisch, sondern speziell im Hinblick auf die menschliche Wahrnehmung definiert. Die Oberflächenstruktur ist nach [ISO4618] sowohl über die wirkliche Oberfläche als auch über den Betrachtungsabstand definiert.

Definition 2.25: Oberflächenstruktur [ISO4618]

Profil oder Form der Oberfläche.

Anmerkungen: Die Oberflächenstruktur hängt von der Topographie der Beschichtung, dem Betrachtungsabstand und dem Fokus auf das Bild auf der Oberfläche ab. Die Oberflächenstruktur wird zum Beispiel durch den Verlauf des flüssigen Beschichtungsstoffes sowie das Substrat beeinflusst.

Diese Definition legt die Vermutung nahe, dass hier ähnlich zu [DIN4760] zwischen wirklicher und Istoberfläche unterschieden wird. Die skalenbegrenzte Oberfläche wurde nach [ISO25178] eingeführt, um die berechneten Kenngrößen mit den zu beschreibenden Eigenschaften der Oberfläche in Zusammenhang zu bringen. Hier wird nur angedeutet, dass der Betrachtungsabstand und der Fokus auf die Oberfläche als skalenbegrenzende Filterfunktion auf die Topographie der Oberfläche wirken. Außerdem wird der Orangenschaleneffekt, der häufig auf lackierten Oberflächen auftritt und teilweise zur Kaschierung kleinerer Unvollkommenheiten dient, wie folgt definiert.

Definition 2.26: Orangenschaleneffekt [ISO4618]

Oberflächenstruktur eines Films oder einer Beschichtung ähnlich einer Orangenschale.

In [ISO4618] werden zusätzlich zu den in Abbildung 2.2 aufgelisteten Beispielen für Oberflächenunvollkommenheiten viele weitere Unvollkommenheiten für Beschichtungsstoffe aufgezählt. Auch diese sind nur zum Teil durch die in dieser Arbeit verwendete Definition 1.1 der Sichtbarkeit abgedeckt, da obige Definition des Erscheinungsbilds viele weitere Eigenschaften umfasst, die das reflektierte Muster nicht verzerren.

Da in dieser Arbeit in Abschnitt 3.2 ein Modell zur Beschreibung des Orangenschaleneffekts vorgestellt wird, wird dieser im Folgenden genauer beschrieben.

2.2.5 Orangenschaleneffekt

Beim Auftragen von flüssigen Beschichtungsstoffen entsteht ein Nassfilm, der zunächst starke Unebenheiten der Oberfläche aufweist, beispielsweise ein Tröpfchengebirge nach der Spritzapplikation. Die Tröpfchen müssen zunächst miteinander verfließen und sich anschließend eibnen (verlaufen). Dieser Prozess wird durch die Oberflächenspannung des Films und die Viskosität während der Härtung beeinflusst [Mis07]. Das Erscheinungsbild, das als Folge der Unebenheiten auftritt, wird als Orangenschaleneffekt bezeichnet.

Die für den Orangenschaleneffekt verantwortliche Welligkeit liegt im Wellenlängenbereich von 0,2–10 mm, wobei der Bereich je nach Quelle unterschiedlich angegeben wird [Mis07]. Wellenabstände über 30 mm sind jedoch selten und praktisch nicht relevant, während Wellenabstände von 0,1 mm oder weniger für Normalsichtige erst bei sehr kleinen Beobachtungsabständen unter 172 mm erkannt werden; siehe Abschnitt 2.4.5. Das Verhältnis von Wellenabstand zu Wellentiefe liegt nach Definition 2.12 zwischen 100:1 bis 1000:1. Der Orangenschaleneffekt weist nach [Mir+12] keine Vorzugsrichtung auf. In der Industrie wird die Wellenlänge des Orangenschaleneffekts im Wellenlängenbereich $\mathcal{L}_o = \{\lambda_o \mid 0,1 \text{ mm} \leq \lambda_o \leq 10 \text{ mm}\}$ analysiert [Zie+14].

2.2.6 Glanzeinheiten nach ISO 2813

Eine weitere Oberflächeneigenschaft, die später zur Charakterisierung der Oberfläche verwendet wird und Einfluss auf die Wahrnehmung kleiner Verformungen auf spiegelnden Oberflächen hat, ist der Glanz. Glanz bewirkt eine visuelle Wahrnehmung, die bei der Betrachtung von Oberflächen entsteht. Der Begriff Glanz und die Messung von Glanzeinheiten sind nach [ISO2813] definiert.

Definition 2.27: Glanz [ISO2813]

Optische Eigenschaft einer Oberfläche, Licht gerichtet zu reflektieren.

Der Glanz ist umso ausgeprägter, je gerichteter das Licht von der Oberfläche reflektiert wird. Perfekt spiegelnde bzw. hochglänzende Oberflächen reflektieren nur in eine Richtung. Matte Oberflächen hingegen reflektieren diffus in einen breiten Bereich. Je gleichmäßiger das Licht von der Oberfläche in den Raum gestreut wird, umso geringer ist der Glanz und umso matter erscheint die Oberfläche. Der Glanzwert (GU) beschreibt den Glanz einer Oberfläche und ist über die Messung des gerichtet reflektierten Lichtes bezüglich einer Referenzoberfläche definiert.

Definition 2.28: Glanzwert [ISO2813]

Mit 100 multipliziertes Verhältnis der von einer Probe und einer Glasoberfläche mit der Brechzahl 1,567 bei einer Wellenlänge von 587,6 nm in Spiegelrichtung reflektierten Lichtströme, wobei der Reflexionswinkel sowie die Aperturwinkel von Lichtquelle und Empfänger festgelegt sind.

Anmerkungen: Zur Definition der Glanzwertskala wird für poliertes Schwarzwglas der Wert 100 für eine 20°-, 60°- oder 85°-Messgeometrie festgelegt.

Bei unterschiedlichen Betrachtungswinkeln kann der Glanzeindruck stark variieren, beispielsweise können matte Oberflächen bei streifendem Lichteinfall und flacher Beobachtung glänzend erscheinen, da unter diesen Reflexionsbe-

dingungen viel Licht gerichtet reflektiert wird und die relative Intensität der Streuung gering ist.

Der Glanzwert wird später zur Bezeichnung der Testoberflächen verwendet (beispielsweise bezeichnet 60 GU einen Glanzwert von 60). Zur Analyse der Reflektanzeigenschaften wird in Abschnitt 2.3.3 die Kontrastübertragung eingeführt, die eine detaillierte Beschreibung zulässt.

2.2.7 Ästhetische Qualitätsanforderungen nach VDI 3414

Die noch in der Entwurfsphase befindliche Richtlinie [VDI3414] befasst sich mit Qualitätsanforderungen an Holzoberflächen, die in der Möbelindustrie verwendet werden. In der Richtlinie wird explizit zwischen funktionellen und ästhetischen Qualitätsanforderungen unterschieden. Zu den funktionellen Anforderungen gehören beispielsweise die Maßhaltigkeit und Rauheit eines Werkstücks, also Eigenschaften, die für eine technische Nutzung relevant sind und sich dafür klar spezifizieren lassen. Im Gegensatz dazu sind ästhetische Qualitätsanforderungen durch individuelles Empfinden bestimmt und lassen sich daher nicht so einfach spezifizieren.

Ästhetische Anforderungen werden lediglich verbal und dabei oft im Vergleich mit bekannten Oberflächen formuliert. Sie sind vielfach sehr schwer numerisch zu quantifizieren. Versuche hierzu greifen auf bekannte funktionelle Beschreibungen zurück, die möglichst gut mit den ästhetischen Anforderungen korrelieren.

(aus [VDI3414])

Die Richtlinie [VDI3414] ist der einzige dem Autor bekannte Standard, der Empfehlungen für ästhetische Anforderungen an Oberflächen gibt. Allerdings werden keine Metriken angegeben, um solche ästhetischen Anforderungen auch numerisch zu quantifizieren.

2.2.8 Zusammenfassung zur Normung

Die vorgestellten Normen zur Charakterisierung von Oberflächen legen die grundlegenden Begrifflichkeiten fest, stellen einige Hilfsmittel zur Verfügung und legen teilweise den Stand der Forschung zu dieser Arbeit dar. Die zuletzt im Jahr 1982 aktualisierte Norm für Gestaltabweichungen [DIN4760] wird größtenteils durch die neue Norm [ISO25178] ersetzt. Dass sie trotzdem weiterhin Bestand hat, liegt an dem guten Denkmodell, das sie mit der Einteilung der Gestaltabweichungen in Ordnungen und der Unterscheidung in wirkliche, geometrische und Istoberfläche einführt. In [ISO8785] werden ergänzend lokale Formabweichungen bzw. Oberflächenunvollkommenheiten eingeführt, grundlegende Kenngrößen definiert und eine Klassifikation und Übersicht über typische Oberflächenunvollkommenheiten geliefert. In [ISO25178] wird das in der Praxis wichtige Konzept der skalenbegrenzten Oberfläche und zudem grundlegende flächenhafte Operatoren, Funktionen, Filter und Kenngrößen eingeführt. Die anwendungsspezifischen Normen [ISO4618] und [ISO2813] dienen der Charakterisierung beschichteter Oberflächen im Hinblick auf die menschliche Wahrnehmung und definieren den Orangenschaleneffekt und den Glanz einer Oberfläche. Die im Entwurf befindliche Richtlinie [VDI3414] wurde aufgenommen, da diese als erste Norm Empfehlungen für ästhetische Anforderungen an (Holz-)Oberflächen gibt. Die ästhetischen Anforderungen werden jedoch nur exemplarisch gezeigt, ohne quantitative Maße anzugeben.

2.3 Physikalische Grundlagen

In diesem Abschnitt werden Größen zur Beschreibung von Licht und die Beschreibung der Übertragung von Licht eingeführt. Anschließend wird mit dem Kontrast und der Modulation ein allgemeines Konzept zur Beschreibung von Mustern vorgestellt. Aufbauend darauf wird mit der Modulationstransferfunktion ein Modell zur Beschreibung der Kontrastübertragung und somit der Abbildung eines Musters über eine spiegelnde Oberfläche entwickelt.

2.3.1 Radiometrische Größen

Die radiometrischen Größen dienen der Beschreibung der „Stärke“ elektromagnetischer Strahlung. Da sichtbares Licht ein Bestandteil des elektromagnetischen Spektrums ist, lässt sich dieses ebenfalls mit radiometrischen Größen charakterisieren. Neben den radiometrischen Größen gibt es die photometrischen Größen, die Strahlung bezogen auf die Wahrnehmung durch das menschliche Auge beschreiben. Die photometrischen Größen werden später in Abschnitt 2.4.2 aus den radiometrischen Größen abgeleitet.

Die gesamte Strahlungsleistung, die eine Lichtquelle aussendet, wird als Strahlungsfluss [Ste16] bezeichnet.

Definition 2.29: Strahlungsfluss

Die von der Strahlung transportierte Energie Q pro Zeit, die durch eine Fläche \mathcal{C} hindurchgeht.

$$\Phi = \dot{Q}, [\Phi] = 1 \text{ W} \quad (2.5)$$

Alle anderen radiometrischen Größen werden vom Strahlungsfluss abgeleitet. Die Bestrahlungsstärke beschreibt die Leistung der Strahlung auf einem Flächenelement.

Definition 2.30: Bestrahlungsstärke

Die Flächendichte des Strahlungsflusses am Punkt $\mathbf{x} \in \mathcal{R}^3$ für ein Flächenelement $d\mathcal{C}$.

$$E(\mathbf{x}) = \frac{d\Phi}{d\mathcal{C}(\mathbf{x})}, [E] = 1 \text{ W m}^{-2} \quad (2.6)$$

Für die weiteren abgeleiteten Größen wird zunächst mit dem Raumwinkel eine dimensionslose Größe eingeführt, die einen Winkel im dreidimensionalen Raum beschreibt. Der Raumwinkel ist auf der Einheitssphäre definiert.

Definition 2.31: Einheitssphäre

Die Menge der normierten Richtungsvektoren \mathbf{r} im \mathcal{R}^3 .

$$\mathcal{S}^2 = \{\mathbf{r} \in \mathcal{R}^3 \mid \|\mathbf{r}\| = 1\} \quad (2.7)$$

Der Raumwinkel selbst ist kann als eine Menge von Richtungsvektoren verstanden werden, mit der die richtungsabhängige Strahlungscharakteristik beschrieben wird.

Definition 2.32: Raumwinkel

Der Raumwinkel $\Omega_{\mathcal{C}}$ einer Fläche \mathcal{C} aus Sicht eines Punktes $\mathbf{x} \in \mathcal{R}^3$ ist der Flächeninhalt der Projektion von \mathcal{C} auf die Einheitssphäre um \mathbf{x} . Der Raumwinkel wird in der Einheit Steradian sr angegeben und beträgt für die gesamte Einheitssphäre $4\pi\text{sr}$.

Anmerkungen: Der Raumwinkel $\Omega_{\mathcal{C}}$ kann somit als Maß der Menge der normierten Richtungsvektoren innerhalb eines Teils der Einheitssphäre verstanden werden [Stel16].

Die Strahlstärke ist ähnlich wie die Bestrahlungsstärke eine Ableitung des Lichtstroms, mit dem Unterschied, dass diese nach dem Raumwinkel statt einem Flächenelement abgeleitet ist.

Definition 2.33: Strahlstärke

Die Raumwinkeldichte des Strahlungsflusses an der Stelle $\mathbf{x} \in \mathcal{R}^3$ in Richtung $\mathbf{r} \in \mathcal{S}^2$.

$$I(\mathbf{r}, \mathbf{x}) = \frac{d\Phi}{d\Omega(\mathbf{x}, \mathbf{r})}, [I] = 1 \text{ W sr}^{-1} \quad (2.8)$$

Die Strahldichte ist die Ableitung des Lichtstroms sowohl nach dem Raumwinkel als auch der Fläche.

Definition 2.34: Strahldichte

Die in Richtung $\mathbf{r} \in \mathcal{S}^2$ zur Normale \mathbf{n} eines Oberflächenelements $d\mathcal{C}$ am Punkt $\mathbf{x} \in \mathcal{R}^3$ ein- bzw. ausgestrahlte Flächendichte des Strahlungsflusses.

$$L(\mathbf{r}, \mathbf{x}) = \frac{d^2\Phi}{d\Omega(\mathbf{x}, \mathbf{r})\mathbf{r}^T\mathbf{n}d\mathcal{C}(\mathbf{x})}, [L] = 1 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \quad (2.9)$$

Damit sind die wesentlichen Größen zur Beschreibung von Strahlung eingeführt. Für diese Arbeit ist relevant, wie Licht, das von einem Schirm bzw. der Umwelt ausgeht, über die Reflexion an einer spiegelnden Oberfläche zum Auge gelangt. Es folgt daher eine kurze Beschreibung des Lichttransports, also der Übertragung von Strahlung von einer Lichtquelle in das menschliche Auge. Dafür werden im Folgenden die Subskripte \square_{scr} , \square_{srf} und \square_{img} verwendet, wenn die entsprechende Größe dem Schirm (oder der Umgebung), der Oberfläche bzw. der Bildebene zugeordnet ist.

2.3.2 Lichttransport

Einzelne Punkte der Umgebung emittieren Licht L_{scr} in Abhängigkeit ihrer Oberflächeneigenschaften. Teile dieses Lichts gelangen über eine spiegelnde Oberfläche zur Pupille des Auges, werden dann auf die Netzhaut abgebildet und dort wahrgenommen. Durch Wechselwirkungen mit Materie wird das Licht gestreut. Exemplarisch wird der Lichttransport von der Oberfläche zur Bildebene betrachtet. Die Bestrahlungsstärke E_{img} der Bildebene ist proportional zur Strahldichte L_{srf} der Objektoberfläche, dem Winkel β_H zwischen Hauptstrahl und der optischen Achse, dem Durchmesser der Aperturblende D und der Bildweite b [BPF12]. Der Hauptstrahl ist der Strahl, der einen Objekt- und seinen zugehörigen Bildpunkt verbindet und die optische Achse in der Ebene der Aperturblende schneidet.

$$E_{\text{img}} \propto \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{b}\right)^2 \cos(\beta_H)^4 L_{\text{srf}} \quad (2.10)$$

Ein Muster auf dem Schirm (ortsabhängige Strahldichte) wird somit als Bestrahlungsstärke auf die Bildebene abgebildet. Bei einer idealen Abbildung wird die ausgehende Strahldichte eines Punktes auf dem Schirm nach Gleichung (2.10) auf eine Bestrahlungsstärke E_{img} des entsprechenden Punktes auf der Bildebene abgebildet. Vereinfachend wird hier nach [Ped+07] angenommen, dass die Strahldichte des Schirms L_{scr} für jeden Punkt auf dem Schirm der Bestrahlungsstärke der Bildebene im zugehörigen Bildpunkt entspricht. Die Strahldichte wird als (einheitenlose) Intensität des Schirmmusters g_{scr} bezeichnet und entspricht für eine ideale Abbildung der entsprechenden Intensität auf der Bildebene g_{img} .

2.3.3 Kontrastübertragung

Die beim Lichttransport durch eine reale Abbildungsoptik auftretenden Streuungen wirken sich auf den Kontrast abgebildeter Muster aus. Im Folgenden wird die Abbildung über eine spiegelnde Oberfläche, genauso wie die einer Abbildungsoptik, mit der Kontrastübertragungsfunktion im Ortsfrequenzbereich beschrieben. Die Kontrastübertragung stellt somit eine alternative Beschreibung der Reflexionseigenschaften zu den in Abschnitt 2.2.6 vorgestellten Glanzeinheiten dar.

Bei der Abbildung durch reale optische Systeme treten Bildfehler auf, beispielsweise durch Streuung und Beugung. Diese Bildfehler überlagern sich bei optischen Abbildungen mit inkohärentem Licht linear auf der Bildebene. Die Abbildung wird daher als lineares System durch seine Impulsantwort, die Punktspreizfunktion (PSF), beschrieben. Sie entspricht der Abbildung einer punktförmigen Lichtquelle auf die Bildebene und wird als ortsinvariant über das gesamte abbildende System angenommen. Damit kann die Bildverschlechterung von g_{scr} auf g_{img} als Faltung der Objektpunkte mit der PSF dargestellt werden.

$$\begin{aligned}
 g_{\text{img}}(x_{\text{img}}) &= \int f_{\text{PSF}}(x_{\text{img}} - x_{\text{scr}}) \cdot g_{\text{scr}}(x_{\text{scr}}) dx_{\text{scr}} \\
 &= (f_{\text{PSF}} * g_{\text{scr}})(x_{\text{img}})
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Anstatt die PSF zur Beschreibung der Abbildung im Ortsraum zu verwenden, kann die Abbildung auch in Abhängigkeit der Ortsfrequenz auf der Bildebene k_{img} im Ortsfrequenzraum der Fourier-Transformation betrachtet werden. Ein einfaches Muster ist beispielsweise ein Streifenmuster g mit kosinusförmiger Intensitätsverteilung über den Ort $x_{\text{img}} \in \mathcal{R}$. Es wird durch die Ortsfrequenz k_{img} , durch die mittlere Intensität $o > 0$ und eine Modulation $0 < m \leq o$ beschreiben.

$$g(x_{\text{img}}) = o + m \cos(2\pi k_{\text{img}} x_{\text{img}}) \tag{2.12}$$

Die Ortsfrequenz $k = \lambda_s^{-1}$ ist dabei Kehrwert der Wellenlänge λ_s , also der Streifenbreite des Musters.

An die Stelle der PSF tritt im Ortsfrequenzbereich die optische Transferfunktion f_{OTF} , die durch eine Fourier-Transformation aus der PSF hervorgeht. Die komplexwertige optische Transferfunktion kann auch als zwei reellwertige Transferfunktionen, die Modulationstransferfunktion (MTF) f'_{MTF} und die Phasentransferfunktion f_{PTF} , dargestellt werden.

$$f_{\text{OTF}}(k_{\text{img}}) = f'_{\text{MTF}}(k_{\text{img}}) e^{i f_{\text{PTF}}(k_{\text{img}})} \tag{2.13}$$

Eine weitere Vereinfachung stellt die Normierung des Gleichanteils der MTF dar, womit die normierte MTF f_{MTF} erhalten wird.

$$f_{\text{MTF}}(k_{\text{img}}) = \frac{f'_{\text{MTF}}(k_{\text{img}})}{f'_{\text{MTF}}(0)} \quad (2.14)$$

Die ortsfrequenzabhängige Modulation der Schirmintensitäten $m_{\text{scr}}(k_{\text{img}})$ und der Bildintensitäten $m_{\text{img}}(k_{\text{img}})$ ergibt sich aus dem Amplitudenspektrum der Intensitäten, also dem Betrag der Fourier-Transformierten von $g_{\text{scr}}(x_{\text{img}})$ bzw. $g_{\text{img}}(x_{\text{img}})$. Durch die Beschreibung im Ortsfrequenzraum kann die Abbildung der Frequenzspektren von Schirmintensitäten m_{scr} und Bildintensitäten m_{img} nun durch Multiplikation mit der MTF dargestellt werden.

$$m_{\text{img}}(k_{\text{img}}) = m_{\text{scr}}(k_{\text{img}}) \cdot f_{\text{MTF}}(k_{\text{img}}) \quad (2.15)$$

Der Zusammenhang der Ortsfrequenzen des Schirmmusters k_{scr} und der Netzhaut k_{img} ergibt sich über den Abbildungsmaßstab des gesamten optischen Systems, zu dem auch eine spiegelnde Oberfläche zählt. Diese Betrachtung impliziert, dass sich die Streueigenschaften einer spiegelnden Oberfläche, die ein Muster in der Umgebung über die Optik des Auges auf die Netzhaut abbildet, in Abhängigkeit der Entfernung des Betrachters und der Umgebung zur spiegelnden Oberfläche ändern.

Für eine Beschreibung der Streuung von Licht durch Reflexion an Oberflächen wird in der Computergrafik die bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktion (BRDF) verwendet. Es wird kurz auf den Zusammenhang der MTF und der (allgemeineren) Beschreibung der Streueigenschaften durch die BRDF eingegangen. Die in dieser Arbeit betrachteten kleinen Verformungen der Oberfläche verändern nur die Form der Oberfläche, während die Streueigenschaften unverändert bleiben. Daher wird die BRDF im Folgenden als ortsinvariant angenommen. Die BRDF wird über einen differenziellen Reflexionsfaktor ρ definiert, der die

eingehende Strahldichte L_{in} und abgestrahlte Strahldichte L_{out} in Beziehung setzt [Gru13].

$$L_{\text{out}}(\theta_{\text{out}}) = \int_{\Omega} \rho(\theta_{\text{in}}, \theta_{\text{out}}) L_{\text{in}} \cos(\theta_{\text{in}}) d\Omega_{\text{in}} \quad (2.16)$$

Nimmt man auf der Beleuchtungsseite eine punktförmige Lichtquelle $L_{\text{in}} = \delta(\theta_{\text{in}})$ an, vereinfacht sich die Gleichung wie folgt.

$$\begin{aligned} L_{\text{out}}(\theta_{\text{out}}) &= \int_{\Omega} \rho(\theta_{\text{in}}, \theta_{\text{out}}) \delta(\theta_{\text{in}} - \theta_{\text{out}}) \cos(\theta_{\text{in}}) d\Omega_{\text{in}} \\ &= \rho(\theta_{\text{out}}, \theta_{\text{out}}) \cos(\theta_{\text{out}}) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Die PSF ergibt sich nun über die Verteilung der ausgehenden Strahldichte variiert um einen Winkel α um die Richtung der spiegelnden Reflexion θ .

$$f_{\text{PSF}}(\theta, \alpha) = \rho(\theta, \theta - \alpha) \cos(\theta) \quad (2.18)$$

Über die PSF aus Gleichung (2.11) wird die MTF aus der BRDF abgeleitet. Dabei entspricht die MTF, wie bereits in Gleichung (2.13) beschrieben, dem Betrag der Fourier-Transformierten der PSF.

$$f_{\text{MTF}} = |f_{\text{OTF}}| = |\mathcal{F}\{f_{\text{PSF}}\}| \quad (2.19)$$

Für eine weitere Variante zur Bestimmung der MTF, die später in dieser Arbeit verwendet wird, muss zunächst der Begriff Kontrast eingeführt werden.

Definition 2.35: Kontrast

Der Kontrast ist ein Maß für die Unterschiede der Bildintensitäten zeitlich oder örtlich benachbarter Bildpunkte. Sei g_{\max} die maximale Bildintensität und g_{\min} die minimale Bildintensität, dann ist der Kontrast c folgendermaßen definiert.

$$c = \frac{g_{\max} - g_{\min}}{g_{\max} + g_{\min}} \quad (2.20)$$

Nach Gleichung (2.20) kann der Kontrast des Streifenmusters aus Gleichung (2.12) einfach berechnet werden.

$$c = \frac{o + m - (o - m)}{o + m + (o - m)} = \frac{m}{o}. \quad (2.21)$$

Damit entspricht der Kontrast einer auf die mittlere Intensität normierten Modulation. Die MTF lässt sich auch direkt über das Verhältnis des Bildkontrasts c_{img} zum Kontrast auf dem Schirm c_{scr} bestimmen [Ped+07].

$$f_{\text{MTF}}(k_{\text{img}}) = \frac{m_{\text{img}}(k_{\text{img}})/o_{\text{img}}(k_{\text{img}})}{m_{\text{scr}}(k_{\text{img}})/o_{\text{scr}}(k_{\text{img}})} = \frac{c_{\text{img}}(k_{\text{img}})}{c_{\text{scr}}(k_{\text{img}})} \quad (2.22)$$

2.4 Grundlagen der visuellen Wahrnehmung

Die visuelle Wahrnehmung des Menschen ist ein sehr komplexer Prozess, der bis heute Gegenstand der Forschung ist. Als gesichert gilt das Wissen über Aufbau und Funktionsweise des Auges, also bis zur Bildentstehung auf der Netzhaut. Dieses Bild wird anschließend im Occipitallappen des menschlichen Gehirns weiterverarbeitet, sodass unter anderem eine räumliche Vorstellung der Umgebung entsteht. Wie genau diese Verarbeitung im Gehirn aussieht, ist bisher nur in Ansätzen erforscht, obwohl bereits vor 150 Jahren vieles über die visuelle Wahrnehmung des Menschen bekannt war. So beschäftigte sich

beispielsweise Hermann von Helmholtz [Hel67] im Handbuch der physiologischen Optik ausführlich mit diesem Thema. Er beschrieb unter anderem die Kontrastabhängigkeit des kleinsten Winkels, unter dem zwei Punkte gerade noch unterschieden werden können [Hel67, S. 217]. Auch zu weiteren Einflussfaktoren auf die menschliche Wahrnehmung stellte Helmholtz bereits erste Untersuchungen an, wie etwa dem Einfluss der Erfahrung [Hel67, S. 437, 586] oder dem binokularen Sehen [Hel67, S. 695]. Er bemerkte jedoch, dass eine Untersuchung der Wahrnehmung immer schwierig ist, da sie ein komplexes Zusammenspiel aus optischer Wahrnehmung und anschließender Mustererkennung im Gehirn sei. Im folgenden Abschnitt wird zunächst kurz der Aufbau des Auges beschrieben und wichtige Größen zur Beschreibung der Optik angegeben. Im Anschluss werden die Winkelauflösung des Auges, die Kontrastempfindlichkeit und die menschliche Wahrnehmung von Tiefe vorgestellt.

2.4.1 Aufbau des Auges

Der schematische Aufbau des Auges nach [Ick07] ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Das menschliche Auge besteht aus durchsichtigen und undurchsichtigen Teilen. Zu den durchsichtigen, also den abbildenden Teilen, gehören die Flüssigkeit, mit der die vordere Augenkammer gefüllt ist, die Linse und der Glaskörper, der die hintere Augenkammer bildet. Das Auge wird begrenzt durch eine feste Kapsel, die im hinteren Teil aus der undurchsichtigen Lederhaut und im vorderen Teil aus der durchsichtigen Hornhaut besteht. Auf der hinteren Seite wird der Glaskörper durch die Netzhaut eingeschlossen, die an der Linse endet. Zwischen der Netz- und Lederhaut liegt die Aderhaut, die zusammen mit dem Ziliarkörper und der Iris zur sogenannten Uvea gehört und Netzhaut sowie Linse umschließt.

Lederhaut und Hornhaut Die Lederhaut (Sclera) umschließt den größten Teil des Auges. Sie ist weiß, biegsam und fast unausdehnbar. Im vorderen Teil des Auges nimmt die Lederhaut die Hornhaut (Cornea) in sich auf, im hinteren Teil befindet sich ein Loch für den Sehnerv in der Lederhaut (blinder Fleck).

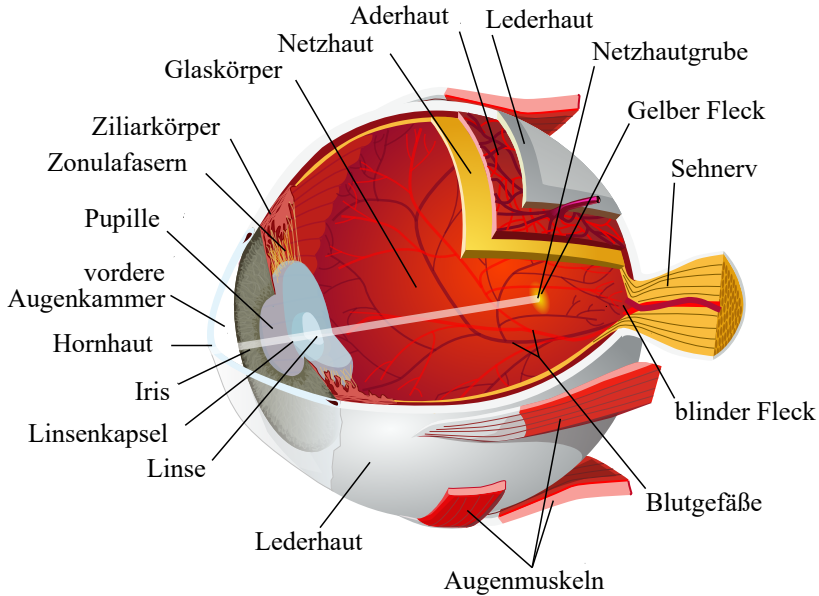


Abbildung 2.3: Schematischer Aufbau des menschlichen Auges nach [Ick07].

Uvea Das System der Uvea umschließt im hinteren Teil des Auges die Netzhaut, im vorderen Teil die Linse. Alle Bestandteile der Uvea sind auf der Innenseite von Pigmentzellen bedeckt und reflektieren nur wenig Licht. Die Uvea ist hinten an den Eintrittstellen der Sehnerven und vorn am Rand zur Hornhaut fest mit der Lederhaut verbunden. Der hintere Teil der Uvea, der zwischen Netzhaut und Lederhaut liegt, wird Aderhaut genannt, der vordere Teil, der zwischen Hornhaut und Linse liegt, wird Regenbogenhaut (Iris) genannt. Die Iris bildet die Aperturblende des Auges und lässt sich durch einen Ringmuskel zusammenziehen bzw. durch einen zweiten Muskel erweitern. Die Öffnung der Iris wird Pupille genannt.

Netzhaut Die Netzhaut (Retina) ist eine flächenförmige Ausbreitung von Nerven im Hintergrund des Auges. Sie besteht aus Nervenfasern und Photozellen,

den Stäbchen (Bacilli) und den Zapfen (Coni). Die Stäbchen sind über die gesamte Netzhaut verteilt. Zwischen den Stäbchen stehen Zapfen, die eine geringere Höhe als die Stäbchen besitzen. Sie weisen damit eine geringere Empfindlichkeit für seitlich eintreffendes Licht auf. Dies führt zum Stiles-Crawford Effekt, der zu einer Dämpfung des von den Randbereichen der Pupille einfallenden Lichts (Apodisation) führt [GBA08]. Dadurch werden sphärische Abbildungsfehler bei großer Pupillenöffnung unterdrückt.

Ein besonderer Bereich auf der Retina ist der gelbe Fleck (Makula) mit einem Durchmesser von 3 mm [KFN17], was einem Sichtfeld von 10° entspricht (alle Werte sind ungefähr angegeben und können großen Schwankungen unterliegen). Dieser Bereich erscheint gelb, da hier energiereiches blaues Licht stärker absorbiert wird, um Schäden der Zapfen zu verhindern und gleichzeitig chromatische Aberration zu unterdrücken, die für blaues Licht verstärkt am Rand der Optik des Auges entstehen. Inmitten dieses Bereichs befindet sich die Netzhautgrube (Fovea) mit einem Durchmesser von 1,5 mm, entsprechend einem Sichtfeld von 5° . In ihr befinden sich nahezu keine Stäbchen, aber dafür Zapfen in einer sehr hohen Dichte mit einem Abstand von $3,2 \mu\text{m}$. Im Bereich der Netzhautgrube befindet sich wiederum die Foveola mit einem Durchmesser von $400\text{--}600 \mu\text{m}$, entsprechend einem Sichtfeld von $1,4^\circ$ bis 2° . In diesem Bereich beträgt der Abstand der Zapfen etwa $2,3 \mu\text{m}$. Die Ausdehnung eines Zapfens entspricht also einem Sichtfeld von $0,5'$ (Winkelminuten, siehe Abschnitt 2.4.5). Da die Bedingungen für Abbildung, Erregung und Leitung hier am besten sind, wird ein Objektpunkt meist innerhalb dieses Bereichs fixiert. Die Dichte der Stäbchen nimmt erst zum Rand der Netzhautgrube zu, erreicht ihr Maximum außerhalb der Netzhautgrube und nimmt dann bis zum Rand der Netzhaut langsam wieder ab. Die Dichte der Photo- und Nervenzellen über die Netzhaut ist in Abbildung 2.4 dargestellt.

Stäbchen können bereits geringe Lichtintensitäten wahrnehmen (Dämmerungssehen) und sind jeweils zu ungefähr hundert mit einer Nervenfaser verbunden bzw. zusammengefasst. Das ist vergleichbar mit dem Binning auf Kamerasensoren, um die Empfindlichkeit auf Kosten der Ortsauflösung zu erhöhen. Die Zapfen nehmen nur größere Lichtintensitäten wahr und sind entweder für rotes,

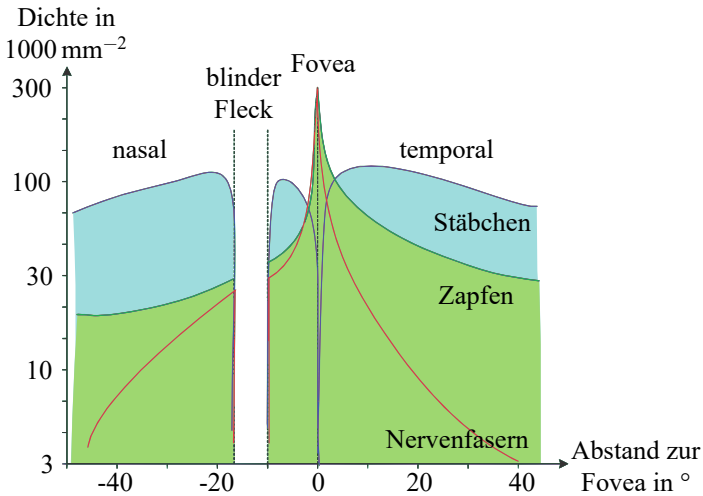


Abbildung 2.4: Dichte der Stäbchen, Zapfen und Nervenfasern auf der Netzhaut entlang der Querachse (nasenseitig bis schläfenseitig) nach [GBA08].

grünes oder blaues Licht empfindlich. Sie sind mit jeweils einer Nervenfaser verbunden. Alle Photozellen sind mit einem Pigment bedeckt, das durch einfallendes Licht ausbleicht, dabei elektrische Energie erzeugt und anschließend wieder regeneriert wird. Diese wird als elektrisches Signal über die Nervenfasern zum Gehirn transportiert.

Linse Die Linse ist ein durchsichtiger, farbloser, beidseitig konvexer und elastischer Körper, dessen vordere Fläche weniger stark gekrümmt ist als die hintere. Ihr Brechungsindex ist mit 1,4 etwas höher als der von Wasser. Sie wird umhüllt von einer Membran, der Linsenkapsel. Durch die Zonulafasern ist die Linse mit dem Ziliarkörper verbunden, der den Ziliarmuskel enthält.

Vordere Augenkammer Als vordere Augenkammer wird der Raum zwischen Hornhaut und Linse bezeichnet. Er wird durch eine wässrige Flüssigkeit ausgefüllt, die den gleichen Brechungsindex wie Wasser besitzt.

Glaskörper Die hintere Augenkammer liegt zwischen Linse und Netzhaut und ist vom Glaskörper „ausgefüllt“, welcher von der Glashaut umschlossen wird. Der Glaskörper hat eine gallertartige Konsistenz und einen minimal höheren Brechungsindex als Wasser.

Augenhöhle Das Auge liegt, in lockeres Fettzellengewebe eingebettet, in der Augenhöhle. Es ist mit sechs Muskeln mit der Augenhöhle verbunden und kann um alle drei Achsen rotiert werden.

2.4.2 Photometrie

Die photometrischen Größen dienen der Beschreibung von sichtbarem Licht und beziehen sich auf das Helligkeitsempfinden des Menschen. Sie werden aus den radiometrischen Größen aus Abschnitt 2.3.1 abgeleitet. Dazu werden die radiometrischen Größen mit der spektralen Empfindlichkeitskurve V bzw. V' aus Abbildung 2.5 multipliziert und über das sichtbare Spektrum integriert.

Ist $X_\lambda(\lambda)$ eine radiometrische Größe in Abhängigkeit der Wellenlänge des Lichts λ , dann ergibt sich die entsprechende photometrische Größe X_v für das Tagsehen (fotopisch) und X'_v für das Nachtsehen (skotopisch).

$$\begin{aligned} X_v &= K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} X_\lambda(\lambda) V(\lambda) d\lambda \\ X'_v &= K'_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} X_\lambda(\lambda) V'(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (2.23)$$

Da die Empfindlichkeitskurven meist normiert angegeben werden, müssen die radiometrischen Größen noch mit einer Konstante, dem photometrischen Strahlungsäquivalent, multipliziert werden. Nach [DIN5031] sind die photometrischen Strahlungsäquivalente $K_m = 683 \text{ lm W}^{-1}$ für das Tagsehen und $K'_m = 1699 \text{ lm W}^{-1}$ für das Nachtsehen.

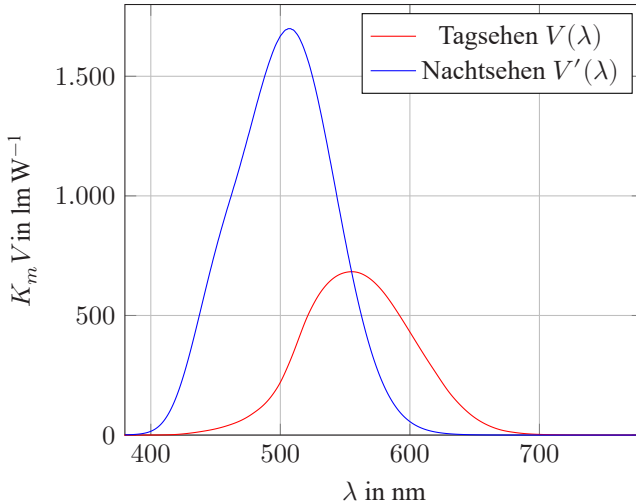


Abbildung 2.5: Spektrale Empfindlichkeitskurve (nicht normiert) für das Tagsehen $V(\lambda)$ und das Nachtsehen $V'(\lambda)$ nach [WS82].

Die photometrische Basisgröße ist historisch bedingt die Lichtstärke mit der Einheit Candela. Sie ist das photometrische Äquivalent zur Strahlstärke. Früher entsprach 1 cd (lat. candela) der Lichtstärke einer Kerze. Die heutige Definition nach [DIN5031] bezieht sich auf eine monochromatische Lichtquelle, die eine definierte Strahlstärke aussendet.

2.4.3 Optik des menschlichen Auges

In der Praxis werden idealisierte Modellaugen zur Berechnung der Optik des menschlichen Auges verwendet, obwohl diese teilweise erheblichen natürlichen Schwankungen unterliegt. Ein häufig verwendetes Modellauge ist das schematische Auge nach Gullstrand, welches auch in der DIN-Norm zur physiologischen Optik [DIN5340] Verwendung findet. Für die Beschreibung der optischen Abbildung durch das Auge sind im Folgenden die Begriffe Fixationspunkt, optische Achse, Sehachse und die Knotenpunkte wichtig.

Definition 2.36: Fixationspunkt

Angeblickter Objektpunkt.

Anmerkungen: Bei monokularer Fixation wird der Fixationspunkt im Normalfall innerhalb der Foveola abgebildet.

Definition 2.37: optische Achse

Diejenige Normale auf die Hornhautvorderfläche, deren Verlängerung in das Augennere von den Krümmungsmittelpunkten der übrigen brechenden Flächen des Auges den geringsten Abstand hat.

Definition 2.38: Sehachse

Verbindungsgerade des zentral abgebildeten Objektpunktes und seines Bildpunkts.

Definition 2.39: Fixierlinie

Verbindungsgerade zwischen dem zentral abgebildeten Objektpunkt und der Mitte der Eintrittspupille des Auges.

Anmerkungen: Die Fixierlinie fällt angenähert mit dem objektseitigen Teil der Sehachse zusammen.

Definition 2.40: Knotenpunkte

Punkte auf der optischen Achse, für die gilt: Ein Strahl im Objektraum, der durch den objektseitigen Knotenpunkt geht, geht im Bildraum durch den bildseitigen Knotenpunkt und behält seine Richtung bei, d. h. Objekt- und Bildraumstrahl sind parallel.

Die Begriffe sind in den Abbildungen 2.6 und 2.7 schematisch dargestellt.

In Tabelle 2.1 sind alle wesentlichen Eigenschaften aufgelistet, die die Optik des menschlichen Auges quantitativ beschreiben.

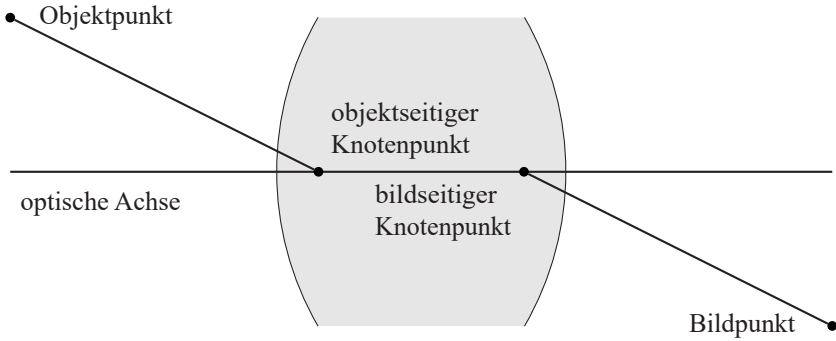


Abbildung 2.6: Zu einem Strahl, der durch den bildseitigen Knotenpunkt verläuft, verläuft ein paralleler Strahl durch den objektseitigen Knotenpunkt. Beide Knotenpunkten liegen auf der optischen Achse.

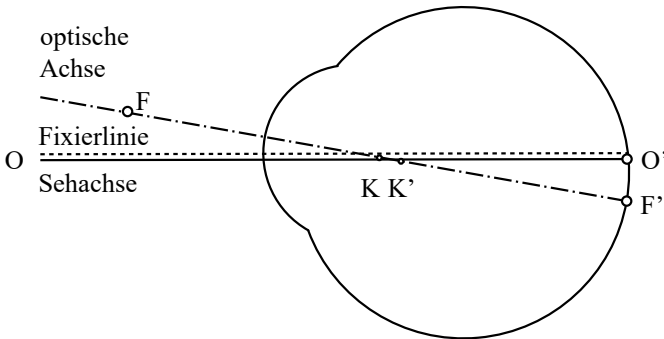


Abbildung 2.7: Vereinfachtes Modell des schematischen Auges nach Gullstrand (nach [DIN5340]). Die Sehachse verbindet den angeblickten Objektstrahl O und seinen Bildpunkt O'. Die optische Achse verläuft durch den objektseitigen Brennpunkt F und bildseitigen Brennpunkt F'. Der objektseitige Knotenpunkt K hat zum bildseitigen Knotenpunkt K' einen sehr kleinen Abstand, sodass die Sehachse annähernd durch beide Knotenpunkte (die beide auf der optischen Achse liegen) verläuft. Da die Foveola, mit der ein Punkt fixiert wird, meist nicht im Brennpunkt liegt, ist die Sehachse in der Regel gegenüber der optischen Achse geneigt.

Tabelle 2.1: Eigenschaften des menschlichen Auges als optisches Instrument nach [GBA08].

Parameter	Wert	Einheit
Optik		
Durchmesser Augapfel	24	mm
Bildseitige Brennweite	19–23	mm
Objektseitige Brennweite	14–17	mm
Durchmesser Pupille	1,5–8	mm
Aperturblenzahl	2,4–6,8	1
Nahpunkt	70	mm
Stäbchen		
Anzahl	110–125	$1 \cdot 10^6$
Abstand	2,5–4,5	μm
Sichtfeld Retina	108°	
Zapfen		
Anzahl	6,4	$1 \cdot 10^6$
Abstand	2,3–3,2	μm
Sichtfeld Netzhautgrube	5°	
Minimale Leuchtdichte		
fotopisch	> 10	cd m^{-2}
skotopisch	$< 5 \cdot 10^{-3}$	cd m^{-2}

Ein weiterer in dieser Arbeit häufig verwendeter Begriff ist der des Sichtstrahls.

Definition 2.41: Sichtstrahl

Ein Strahl im Objektraum, der durch einen Bildpunkt und den objektseitigen Knotenpunkt geht.

2.4.4 Schärfentiefe

Die Schärfentiefe ist ein Intervall entlang eines Sichtstrahls, in dem Punkte scharf abgebildet werden. Für die Bestimmung der Schärfentiefe wird das menschliche Auge mithilfe der geometrischen Optik beschrieben. Nach der Abbildungsgleichung werden Punkte mit Gegenstandsweite g von einem optischen System mit einer Linse, die eine Brennweite f besitzt, auf Punkte mit einer Bildweite b scharf abgebildet, wenn $g = bf/(b - f)$ [BPF12]. Punkte mit abweichender Gegenstandsweite werden unscharf in Form von Unschärfescheiben abgebildet. Wird der maximale Durchmesser ϵ einer Unschärfescheibe auf der Bildebene vorgegeben (beispielsweise durch die Größe der Zapfen und Stäbchen), kann die vordere g_v und hintere Grenze g_h des Schärfentiefebereichs berechnet werden. Für eine Optik mit Brennweite f , Pupillendurchmesser D und Aperturbblendenzahl $f_D = f/D$, die auf einen Punkt mit Gegenstandsweite g fokussiert ist, lässt sich der Schärfentiefebereich nach [Ped+07, S. 175] bestimmen.

$$\begin{aligned}g_v &= \frac{gf^2}{f^2 - \epsilon f_D(g + f)} \\g_h &= \frac{gf^2}{f^2 + \epsilon f_D(g + f)}\end{aligned}\tag{2.24}$$

Punkte außerhalb der Schärfentiefe erscheinen kontrastarm [HCB12; LS15].

2.4.5 Winkelauflösung

Die wesentliche Größe, um die Leistungsfähigkeit des menschlichen Auges zu beschreiben, ist die Winkelauflösung. Sie ist nach [DIN5340] über den Schwinke, also den Winkelabstand zweier Objektpunkte, definiert.

Definition 2.42: Schwinkel [DIN5340]

Der Schwinkel θ_{eye} ist der Winkel, unter dem Objektpunkte mit gegenseitigem Abstand a und einer Entfernung g zum objektseitigen Knotenpunkt des Auges erscheinen.

$$\theta_{\text{eye}} = 2 \arctan \left(\frac{a}{2g} \right) \quad (2.25)$$

Der Schwinkel wird meist in Winkelminuten angegeben. Ein Winkelgrad $1^\circ = 2\pi/360$ entspricht einem Bogenwinkel von ungefähr 17 mrad (Objektgröße 17 mm in 1 m Entfernung). Eine Winkelminute $1' = 1^\circ/60$ entspricht ungefähr 0,29 mrad. Eine Winkelsekunde $1'' = 1'/60$ entspricht ungefähr 4,85 μrad . Es folgt die Definition der Winkelauflösung des menschlichen Auges.

Definition 2.43: Winkelauflösung

Schwinkel θ_{eye} zweier Punkte, die gerade noch als getrennt wahrgenommen werden können.

Anmerkungen: In [DIN5340] werden die Begriffe Sehschärfe und Visus für die Winkelauflösung verwendet.

Die Winkelauflösung wird in der Regel für das monokulare Sehen getestet. In Sehtests werden die kleinsten Winkelauflösungen im Bereich 0,5–1' beim Tagsehen bei einer Leuchtdichte von $3 \cdot 10^3 \text{ cd m}^{-2}$ erreicht [Cur+90; GBA08; Wes79]. Beim Nachtsehen verschlechtert sich die Winkelauflösung auf 10–50' [Cur+90; GBA08]. Beim binokularen Sehen verbessert sich die Winkelauflösung auf etwa 25 % [Lap14] der monokularen Winkelauflösung. Helmholtz [Hel67, S. 216] berechnete die Übereinstimmung damaliger Untersuchungen zur Winkelauflösung und der rechnerischen Winkelauflösung des Auges, die durch Größe und

Abstand der lichtempfindlichen Elemente im Auge und die optischen Eigenschaften bestimmt ist. Geht man von einem Abstand der Zapfen von $r = 3 \mu\text{m}$ in der Netzhautgrube und einer bildseitigen Brennweite des Auges von $f = 22 \text{ mm}$ aus, so ergibt sich geometrisch ungefähr die Winkelauflösung des Auges.

$$\begin{aligned}\theta_{\text{eye}} &\approx 2 \arctan\left(\frac{r}{2f}\right) \\ &\approx 0,5'\end{aligned}\tag{2.26}$$

Gleichzeitig wird die Winkelauflösung durch die Beugung des Lichts am Rand der Pupille begrenzt. Die Auflösung bei einer Wellenlänge von $\lambda = 550 \text{ nm}$, einem Pupillendurchmesser von $D = 2\text{--}8 \text{ mm}$ und bildseitiger Brennweite von $f = 22 \text{ mm}$ entspricht dem Radius r der Beugungsmuster (Airy-Scheibchen) gemessen bis zum ersten Minimum.

$$\begin{aligned}r &\approx 1.22 \frac{\lambda f}{D} \\ &\approx 2\text{--}7 \mu\text{m}\end{aligned}\tag{2.27}$$

Da der Abstand der Zapfen in der Netzhautgrube in etwa mit dieser Größe übereinstimmt, würde selbst eine dichtere Anordnung der Zapfen keine höhere Auflösung mehr erzielen. Da der Pupillendurchmesser beim Tagsehen kleiner als 4 mm [GBA08] ist, ergibt sich nach dem Rayleigh-Kriterium sogar eine etwas schlechtere beugungsbegrenzte Winkelauflösung.

$$\begin{aligned}\theta_{\text{eye}} &\approx 1.22 \frac{\lambda}{D} \\ &\approx 0,58'\end{aligned}\tag{2.28}$$

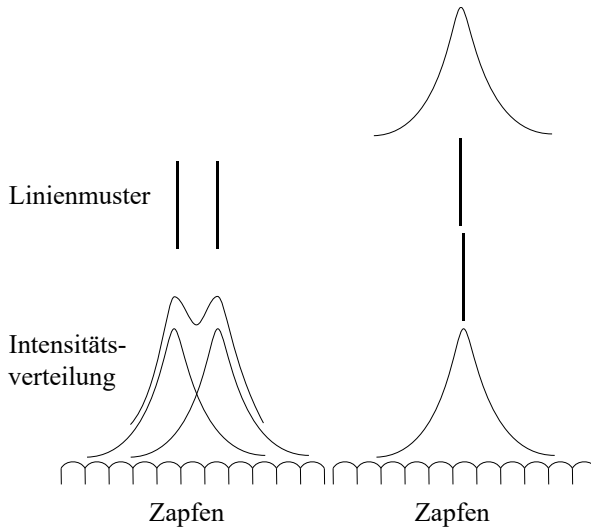


Abbildung 2.8: Gegenüber dem absoluten Abstand zweier Linien (Sichtbarkeit, links) kann der relative Positionsunterschied von zwei Linien (Unterscheidbarkeit, rechts) deutlich genauer unterschieden werden (Vernier Acuity). Da Positionsunterschiede unterhalb der Auflösungsgrenze wahrgenommen werden, spricht man hier von Hyperacuity.

Unter besonderen Umständen können aber noch deutlich kleinere Winkelaufösungen erzielt werden. Dieser Effekt wird als Hyperacuity¹ bezeichnet. So lassen sich Verschiebungen zweier Linien zueinander ab einem Abstand von 10'' erkennen (Vernier Acuity, siehe Abbildung 2.8).

Hier wird, ähnlich der Phasendetektion, die Position der Muster bis auf eine Grenze, die unterhalb der Auflösungsgrenze liegen kann, geschätzt. Ähnlich dazu erscheinen Buchstaben auch dann noch sichtbar, wenn deren Größe zwar unterhalb der Auflösungsgrenze liegt, sich der Buchstabe aber aus dem Kontext ergibt. Die Winkelauflösung kann sich also, je nachdem wie das aufzulösende Muster aussieht, unterscheiden.

Zwei Kriterien, um den Sehwinkel zu messen, wenn keine Kontextinformationen vorhanden sind, sind die Sichtbarkeit und die Unterscheidbarkeit.

¹ Im Deutschen wird auch der Begriff Oberschärfe für Hyperacuity verwendet.

Definition 2.44: Sichtbarkeit

Kleinste Größe eines gerade noch sichtbaren Punktes.

Anmerkungen: Die Sichtbarkeit wird im Wesentlichen durch den Kontrast beeinflusst. Sehr kleine Objekte mit großer Leuchtdichte können damit auch unterhalb der Auflösungsgrenze noch wahrgenommen werden. Beispiele dafür sind Fixsterne bzw. auch dunkle Objekte unterhalb der Auflösungsgrenze auf sehr hellem Grund.

In Abschnitt 2.4.6 wird die Kontrastempfindlichkeit eingeführt, die einen funktionalen Zusammenhang zwischen der Auflösungsgrenze und dem Kontrast definiert.

Definition 2.45: Unterscheidbarkeit

Kleinster Abstand zweier Punkte, die gerade noch voneinander unterschieden werden können.

Anmerkungen: Die Unterscheidbarkeit wird auch durch einen Sehtest mit Landoltringen getestet; siehe Abschnitt 2.4.6. Sie wird im Wesentlichen durch die abbildenden Eigenschaften des Auges und den Abstand der Zapfen in der Netzhautgrube begrenzt.

2.4.6 Bestimmung der Winkelauflösung

Die Winkelauflösung des Auges wird experimentell nach [ISO8596] bestimmt. In dieser ist der Landoltring als Normschzeichen definiert; siehe Abbildung 2.9. Die gerade noch erkennbare Lückenbreite des Landoltrings entspricht der Winkelauflösung des Auges (gemessen in Winkelminuten).

Der Landoltring wird bei einem Sehtest in acht verschiedenen Orientierungen dargestellt, damit ist $p = 1/8$ die Wahrscheinlichkeit eine richtige Orientierung zu raten. Wird die Richtung der Lücke in mindestens drei von fünf Darbietungen ($k \geq 3, n = 5$) richtig erkannt, gilt eine Aufgabe A als gelöst. Die Wahrscheinlichkeit $\mathcal{P}(A)$, die Aufgabe durch Raten zu lösen kann nun über die Binomialverteilung bestimmt werden.

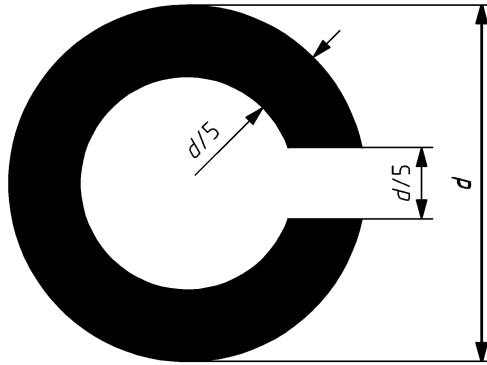


Abbildung 2.9: Der Landoltring ist das nach [ISO8596] definierte Normsehzeichen zur Bestimmung der Winkelauflösung des Auges. Eine Auflösung von einer Winkelminute entspricht einem Landoltring, dessen Betrachtungsabstand so gewählt ist, dass die Lückenbreite von $d/5$ unter einem Winkel von einer Winkelminute erscheint.

$$\begin{aligned} \mathcal{P}(A) &= \sum_{k=3}^5 \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k} \\ &= 1,6 \% \end{aligned} \quad (2.29)$$

Dabei darf die Leuchtdichte des Landoltrings maximal 15 % der Leuchtdichte auf dem Prüffeld ($80\text{--}320 \text{ cd m}^{-2}$) betragen und der Versuch muss in einem abgedunkelten Raum mit einem weiß leuchtenden Prüffeld stattfinden.

Kontrastempfindlichkeit

Die Kontrastempfindlichkeit beschreibt die Fähigkeit des Auges, kleine Helligkeitsunterschiede wahrzunehmen. Sie ergibt sich aus der Kontrastübertragung, die für das menschliche Auge wie auch für andere optische Systeme durch die MTF beschrieben wird, der Sensierung im Auge und der anschließenden

Signalverarbeitung [GBA08] im Gehirn. Wie auch in Kamerasystemen sind der minimal und der maximal wahrnehmbare Kontrast begrenzt.

Die Kontrastempfindlichkeitsfunktion (CSF) stellt einen funktionalen Zusammenhang zwischen der Ortsfrequenz eines Musters und dem für den Menschen gerade noch sichtbaren Kontrast her. Sie ist damit eine Verallgemeinerung der Winkelauflösung, da sich diese aus der Kontrastempfindlichkeit für einen gegebenen Kontrast ableiten lässt. Die Ortsfrequenz eines Musters k_{img} wird als Wellenzahl pro Winkelgrad (cpd, cycles per degree) angegeben und verhält sich reziprok zum Sehwinkel θ_{eye} .

$$k = 1/\theta_{\text{eye}} \quad (2.30)$$

Im besten Fall [GBA08] können Ortsfrequenzen bis zu 60 cpd aufgelöst werden. Eine Periode, bestehend aus jeweils einem schwarzen und weißen Streifen (Abstand zweier gleichfarbiger Streifen), erscheint bei 60 cpd unter einem Sehwinkel von $1/60^\circ = 1'$.

Definition 2.46: Kontrastempfindlichkeitsfunktion

Die Kontrastempfindlichkeitsfunktion f_{CSF} eines menschlichen Auges gibt in Abhängigkeit der Ortsfrequenz eines Musters den Kontrast an, für den das Muster gerade noch gesehen werden kann.

Anmerkungen: In dieser Arbeit wird die CSF nach [WA05, EmG-Modell] verwendet.

$$f_{\text{CSF}}(k_{\text{img}}) = \frac{1}{g \cdot (\mathrm{e}^{-(k_{\text{img}}/k_0)} - a\mathrm{e}^{-(k_{\text{img}}/k_1)^2})} \quad (2.31)$$

Sie hat für ein helladaptiertes, gesundes Auge eines durchschnittlichen Erwachsenen die Parameter $k_0 = 7,5237$, $k_1 = 1,8972$, $a = 0,8155$, $g = 360,24$ und ist in Abbildung 2.10 dargestellt. Sie ändert sich in Abhängigkeit der Adaption.

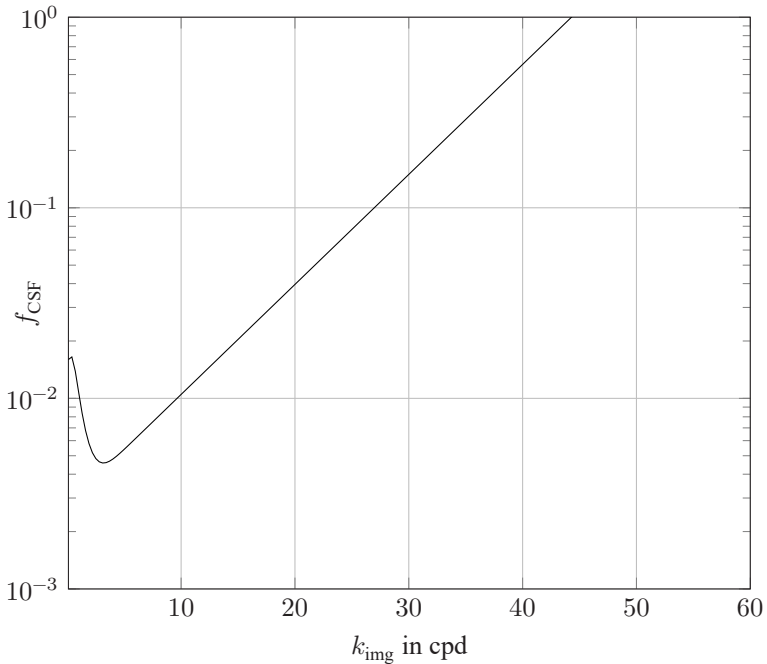


Abbildung 2.10: Kontrastempfindlichkeitsfunktion $f_{\text{CSF}}(k_{\text{img}})$ nach [WA05, EmG-Modell]. Ein Muster mit einem Kontrast unterhalb der der Kontrastempfindlichkeit kann nicht mehr wahrgenommen werden.

Eine Visualisierung der Kontrastempfindlichkeit ist in Abbildung 2.11 dargestellt.

Auf der Abszisse ist die Ortsfrequenz als Wellenzahl pro Winkelgrad für einen Betrachtungsabstand von 1 m aufgetragen, wenn die Breite der Abbildung 95 mm beträgt. Auf der Ordinate ist der Kontrast logarithmisch aufgetragen. Man sieht, wie sich der gerade noch wahrnehmbare Streifenkontrast in Abhängigkeit der Ortsfrequenz ändert.

Die CSF ist zudem abhängig von der zeitlichen Frequenz eines Musters, zum Beispiel verursacht durch Flackern oder Bewegung des Musters. Während be-

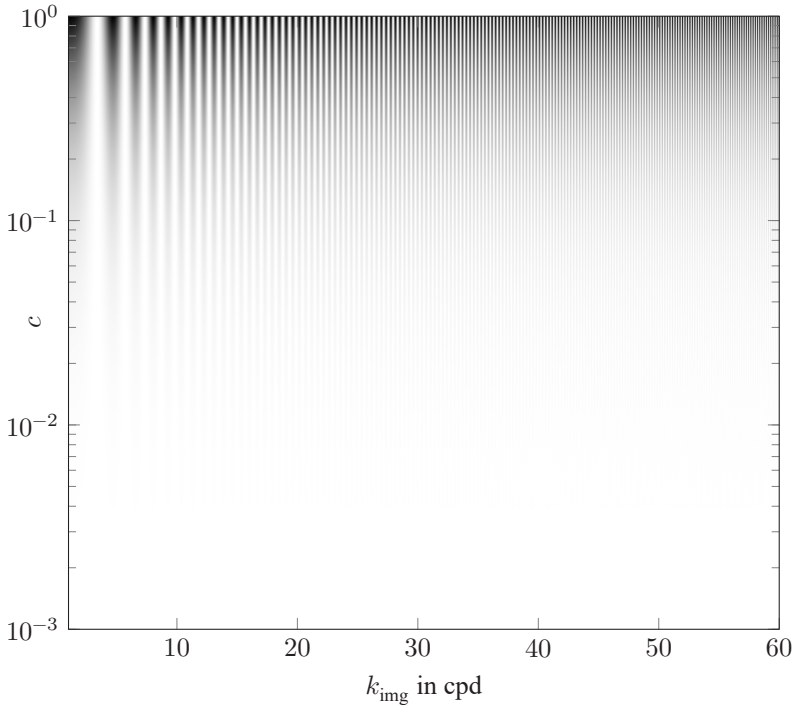


Abbildung 2.11: Linienmuster mit einer Ortsfrequenz von 0–60 cpd für einen Betrachtungsabstand von 1 m. In Abhängigkeit des Kontrasts c ist eine Grenze erkennbar, bei der das Muster gerade noch aufgelöst werden kann.

reits kleine Flackerfrequenzen die ortsfrequenzabhängige Kontrastempfindlichkeit deutlich verschlechtern, ist der Einfluss von Bewegung auf die CSF gering [Kel79; Lai+06]. Da der Mensch in der Lage ist, bewegte Objekte durch Augen- und Kopfbewegung zu verfolgen, verschlechtert sich die CSF nur unwesentlich bei kleinen Bewegungen.

Das binokulare Sehen beeinflusst neben der Winkelauflösung auch die Kontrastempfindlichkeit. Gegenüber der CSF für das monokulare Sehen verbessert sich die binokulare Kontrastempfindlichkeit um 4 cpd [CHA93].

2.4.7 Anpassung des Auges

Das menschliche Auge ist kein statisches optisches System, sondern passt sich dynamisch den Umgebungsbedingungen an. Es passt sich durch die im Folgenden definierten Vorgänge „Adaption“, „Konvergenz“ und „Akkommodation“ an die Leuchtdichte und die Gegenstandsweite der Umgebung an.

Definition 2.47: Adaption

Als Adaption bezeichnet man den Vorgang, bei dem sich das Auge der Beleuchtung anpasst.

Anmerkungen: Die Adaption erfolgt durch Anpassung des Pupillendurchmessers und durch Prozesse auf der Netzhaut. Bei der Helladaption bleichen die lichtempfindlicheren Stäbchen aus, bis sie unempfindlich sind und Licht nur noch durch die Zapfen wahrgenommen wird. Bei der Dunkeladaption regenerieren sich die Pigmente auf den Stäbchen innerhalb von 5–10 Minuten. Die vollständige Adaption dauert bis zu 45 Minuten. Die Lichtempfindlichkeit der Stäbchen ist um den Faktor 10^6 größer als die der Zapfen.

Definition 2.48: Konvergenz

Bewegung (Vergenz) der Augen, bei der die Fixierlinien zueinander in Überschneidung gebracht werden.

Definition 2.49: Akkommodation

Elastische Formabweichung der Linse durch das Zusammenziehen oder Entspannen des Ziliarmuskels, die der Fokussierung eines Objekts auf die Netzhautgrube dient.

Anmerkungen: Bei der Nahakkommodation wird der Ziliarmuskel kontrahiert, wodurch die Brechkraft der Linse zunimmt. Bei der Fernakkommodation wird der Ziliarmuskel entspannt, wodurch die Linse ihre ursprüngliche Form wieder annimmt. Die vollständige Akkommodation dauert etwa eine Sekunde. Ist die Helligkeit unterhalb von $0,01 \text{ cd m}^{-2}$, findet keine Akkommodation statt, da die Akkommodation auf einer Auswertung des durch die Zapfen wahrgenommenen Kontrasts beruht.

2.4.8 Alterung des Auges

Mit dem Alter verschlechtert sich die Leistungsfähigkeit des menschlichen Auges, was sich auf die CSF des Auges auswirkt. Ab dem 40. Lebensjahr verschlechtert sich die CSF für Ortsfrequenzen ab 1 cpd und damit insbesondere die Winkelauflösung von $0,6'$ auf $2,5'$ [OSS83]. Damit lässt auch das stereoskopische Sehen nach und die Stereowinkelunsicherheit nach Definition 2.55 erhöht sich von $\vartheta_{\min} = 10''$ auf $\vartheta_{\min} > 340''$ [HSB99]. Die Gründe dafür sind vielfältig. So lässt beispielsweise die Akkommodationsfähigkeit aufgrund der nachlassenden Elastizität der Linse nach, wodurch sich die Nahpunktweite mit dem Alter, am schnellsten zwischen dem 40. und 60. Lebensjahr, von 7 cm auf 120 cm erhöht [Ped+07], was sich jedoch recht einfach durch eine Sehhilfe korrigieren lässt. Auch die Adaptionfähigkeit, insbesondere die Dunkeladaption, lässt mit dem Alter nach. Zum einen nimmt der maximale Pupillendurchmesser mit dem Alter ab, zum anderen sinkt die Regenerationsfähigkeit der Pigmente auf der Netzhaut [GBA08]. Durch Trübung der Linse verschlechtert sich die

Kontrastübertragung der Linse linear mit dem Alter und erreicht theoretisch mit 120 Jahren ein Strehlverhältnis² von 0 [Gui+99].

2.5 Visuelle Wahrnehmung von Tiefe

Eine wichtige Aufgabe der visuellen Wahrnehmung ist die Schätzung der Tiefe. Im Kontext dieser Arbeit ist diese Fähigkeit besonders interessant für die Wahrnehmung der Form von Objekten. Die Tiefensehschärfe quantifiziert nach [DIN5340] die Fähigkeit, bis zu welchem Abstand kleine Entfernung Unterschiede unterschieden werden können.

Definition 2.50: Tiefensehschärfe [DIN5340]

Schwellenwert Δg_{\min} der Fähigkeit, im relativen Tiefensehen kleine Entfernung Unterschiede (angegeben in m) wahrzunehmen.

Der Mensch bedient sich zur Tiefenschätzung einer Reihe visueller Hinweisreize, deren gemeinsame Auswertung eine Schätzung der Tiefe ergibt.

Definition 2.51: Hinweisreiz

Ein Stimulus, entweder bewusst oder unbewusst wahrgenommen, der eine Art von Verhalten auslöst oder signalisiert.

Wie eingangs erwähnt, hat bereits Helmholtz [Hel67, S.622] herausgestellt, dass die Erfahrung neben der „natürlichen“ Empfindung eine wesentliche Rolle bei der Tiefenwahrnehmung einnimmt.

Hierbei sind zweierlei Hilfsmittel zu trennen, die einen gehören der Erfahrung über die besondere Natur der gesehenen Objekte an und geben also nur Vorstellungen des Abstandes, die andern gehören der Empfindung an und geben eine wirkliche Wahrnehmung des Abstandes. (Hermann von Helmholtz)

² Das Strehlverhältnis ist das Verhältnis der Maximalintensität der PSF eines realen und des zugehörigen beugungsbegrenzten Systems.

Tabelle 2.2: Visuelle Hinweisreize für die Tiefenwahrnehmung nach [Daw12].

Klasse	Hinweisreiz	Seite
Okularmoto- risch	Akkommodation	52
	Konvergenz	51
Binokular	Stereopsis	57
Bewegung	Bewegungsparallaxe	59
	Optischer Fluss	60
	Interokularer Geschwindigkeitsunterschied	61
Bildlich	Linearperspektive	62
	Größe	61
	Texturgradient	61
	Kontur	62
	Verdeckung	62
	Schattierung	62
	Schärfentiefe	42

Zu den „natürlichen“ Empfindungen gehören die okularmotorischen Hinweisreize und die Stereopsis, die weiter unten erklärt werden. Zu den „erlernten“ Empfindungen zählt man beispielsweise die bildlichen Hinweisreize.

2.5.1 Visuelle Hinweisreize

Die visuellen Hinweisreize, derer sich der Mensch bedient, werden grob in vier Klassen eingeteilt: okularmotorische, bildliche und stereoskopische Hinweisreize sowie Hinweisreize aus Bewegungen. Eine Übersicht aller visuellen Hinweisreize sowie eine Seitenangabe ihrer Definition ist in Tabelle 2.2 dargestellt.

Zunächst wird das Konzept der frontparallelen Ebene benötigt.

Definition 2.52: Frontparallele Ebene

Eine Oberfläche wird als frontparallel bezeichnet, wenn diese parallel zur Bildebene des Beobachters liegt.

Die Wahrnehmung der Tiefe wird anhand der Tiefenstruktur in Ordnungen eingeteilt [Koe86; Orb11].

Definition 2.53: Tiefenstruktur

Als Tiefenstruktur werden die wahrgenommenen Variationen einer Oberfläche entlang einer frontparallelen Ebene zum Beobachter bezeichnet.

Anmerkungen: Sie wird in Ordnungen eingeteilt, die den jeweiligen Ableitungen der Tiefenstruktur entsprechen:

- **0. Ordnung:** Abstand relativ zum Beobachter.
- **1. Ordnung:** Neigung relativ zum Beobachter.
- **2. Ordnung:** Krümmung relativ zum Beobachter.

Die verschiedenen Hinweisreize werden vermutlich unabhängig voneinander im Gehirn verarbeitet und anschließend mit einer ihrer Zuverlässigkeit entsprechenden Gewichtung linear kombiniert [Wel+05]. Es wurde beispielsweise gezeigt, dass ein Training einzelner Hinweisreize deren Zuverlässigkeit erhöhen kann. In Folge dessen wird auch deren relative Gewichtung bei der Tiefenschätzung erhöht und andere Hinweisreize stärker unterdrückt. Dies wurde am Beispiel der stereoskopischen Tiefenwahrnehmung gezeigt: ein Training der Stereopsis verändert die, aus mehreren Hinweisreizen kombinierte, Tiefenwahrnehmung und führt insgesamt zu einer erhöhten Tiefensehschärfe [Ved+16]. In neueren Arbeiten werden durch funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT) die beteiligten Gehirnareale identifiziert, die zur Lösung visueller Aufgaben verwendet werden. Murphy et al. [MBW13] untersuchten beispielsweise die beteiligten Hirnareale bei der Schätzung von Oberflächenneigungen nur durch Texturgradienten oder Stereopsis sowie der kongruenten und inkongruenten Kombination

beider. Sie stellten fest, dass gegenüber den Einzelergebnissen bessere Ergebnisse bei der kongruenten Fusion erzielt werden, während widersprüchliche Hinweisreize zu schlechteren Ergebnissen führen. Außerdem stellten sie fest, dass es eine Gehirnregion gibt, die nur dann beteiligt wird, wenn eine Fusion der Hinweisreize stattfindet. Sun et al. [Sun+16] untersuchten mithilfe der fMRT die beteiligten Gehirnbereiche für die Unterscheidung von spiegelnd und diffus reflektierenden Oberflächen sowie rauhen und texturierten Oberflächen. Sie konnten alleine aufgrund der beteiligten Gehirnbereiche auf den Typ der Oberfläche schließen, es werden also abhängig von der Oberfläche andere Bereiche für die Auswertung der visuellen Signale verwendet.

Okularmotorisch

Okularmotorische Hinweisreize hängen von der Form der Linse (Akkommodation) oder der Drehung des Auges (Konvergenz) ab und werden unbewusst über die Spannung der Augenmuskeln ausgewertet.

Akkommodation Die Akkommodation erfolgt, wenn aufgrund der begrenzten Tiefensehschärfe des Auges ein Bild mit geringem Kontrast auf die Netzhaut abgebildet wird. Außerdem werden chromatische Aberrationen im Auge zur Tiefenschätzung und Akkommodation verwendet, die hier jedoch nicht weiter behandelt werden. Setzt man den durchschnittlichen Zapfenabstand $\epsilon = 2,3 \mu\text{m}$ in der Foveola, die Brennweite des Auges $f = 22 \text{ mm}$ und einen Pupillendurchmesser $D = 2\text{--}8 \text{ mm}$ in Gleichung (2.24) ein, so erhält man für einen Objektabstand von $g = 1 \text{ m}$ eine Schärfentiefe von $27\text{--}107 \text{ mm}$. Eine Änderung des Objektabstands von mindestens 27 mm bei weit geöffneter Pupille führt also zu einer Akkommodation des Auges und entspricht damit der unteren Schranke für die Tiefensehschärfe durch die Akkommodation.

Konvergenz Eine Konvergenz erfolgt durch Drehung der Augen, bis diese einen gemeinsamen Punkt fixieren. Die Unsicherheit wird über die Stereo-

winkelunsicherheit $\vartheta_{\min} = 4^\circ$ angegeben [VCT01]. Für eine Entfernung zum Fixationspunkt $g = 1 \text{ m}$ und den Augenabstand $q \approx 60 \text{ mm}$ lässt sich die Tiefenschärfe Δg_{\min} der Konvergenz berechnen [GBA08].

$$\begin{aligned}\Delta g_{\min} &= \frac{\vartheta_{\min} \cdot g^2}{q} \\ &= \frac{4^\circ \cdot (1 \text{ m})^2}{60 \text{ mm}} = 1,16 \text{ m}\end{aligned}\quad (2.32)$$

Die Konvergenz ist bereits ab einem Abstand von 1 m sehr unzuverlässig. Für kleinere Abstände ist die Konvergenz jedoch ein verlässlicher Hinweisreiz.

Binokular

Die binokularen Hinweisreize für die Tiefe beruhen auf der Auswertung unterschiedlicher Bildinhalte für unterschiedliche Blickwinkel (Stereopsis). Die Auswertung der Stellung der Augen zueinander (Konvergenz) zählt sowohl zu den okularmotorischen als auch zu den binokularen Hinweisreizen.

Stereopsis Bei der Stereopsis wird die Parallaxe zur unbewussten Tiefenschätzung verwendet. Als Parallaxe bezeichnet man die relative seitliche Verschiebung von Objekten unterschiedlicher Entfernung, wenn diese aus verschiedenen Blickrichtungen betrachtet werden.

Definition 2.54: Parallaxe [DIN5340]

Abstand p zwischen den auf einen Objektpunkt gerichteten Sichtstrahlen beider Augen, gemessen in einer frontparallelen Ebene mit anderer Entfernung; siehe Abbildung 2.12.

Die Unsicherheit der binokularen Tiefenschätzung wird über den Stereowinkel beschrieben.

Definition 2.55: Stereowinkel [DIN5340]

Schinkel ϑ , unter dem die stereoskopische Parallaxe von einem hypothetischen Mittelaue aus erscheint; siehe Abbildung 2.12. Für kleine Tiefenunterschiede, also kleine Abstände zwischen Objekt und Fixationspunkt $\Delta g \ll g$, berechnet sich der Stereowinkel für einen Augenabstand q folgendermaßen.

$$\vartheta \approx \frac{q \cdot \Delta g}{g^2} \quad (2.33)$$

Anmerkungen: Der kleinste Stereowinkel beschreibt die Tiefensehschärfe für die binokulare Tiefenschätzung und wird als Stereowinkelunsicherheit ϑ_{\min} bezeichnet.

In Abbildung 2.12 ist der Zusammenhang der Parallaxe und des Stereowinkels dargestellt.

Die Tiefensehschärfe Δg_{\min} der Stereopsis ist relativ zu einem fixierten Objektpunkt und damit ein Hinweisreiz 1. Ordnung [Blo+08]. Die Stereopsis hat im Vergleich zur Konvergenz eine deutlich kleinere Stereowinkelunsicherheit $\vartheta_{\min} = 10''$ [GBA08]. Damit ergibt sich nach Gleichung (2.32) auch eine sehr geringe Unsicherheit in der Tiefensehschärfe.

$$\begin{aligned} \Delta g_{\min} &= \frac{\vartheta_{\min} \cdot s^2}{q} \\ &= \frac{10'' \cdot (1 \text{ m})^2}{60 \text{ cm}} = 0,8 \text{ mm} \end{aligned} \quad (2.34)$$

Bewegungsinduziert

Bewegungsinduzierte Hinweisreize beruhen auf der Auswertung einer zeitlichen Änderung der Entfernung.

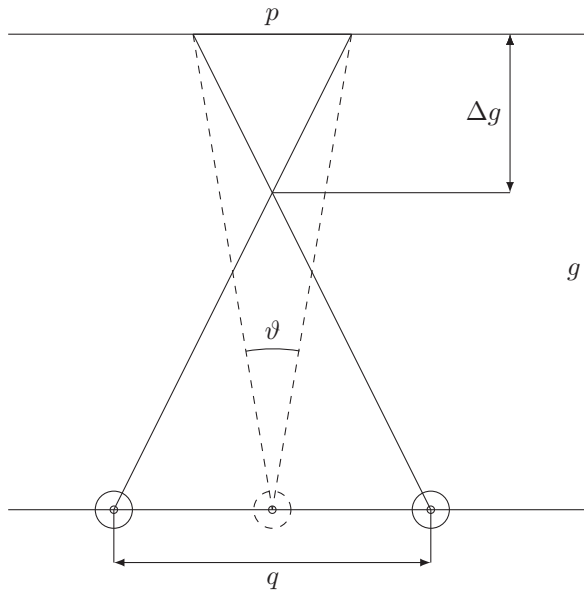


Abbildung 2.12: Die stereoskopische Parallaxe p und der Stereowinkel ϑ hängen über den Objekt-abstand g , den Tiefenunterschied zwischen Objekt- und Fixationspunkt Δg und den Augenabstand q voneinander ab.

Bewegungsparallaxe Die Bewegungsparallaxe ist die monokulare Parallaxe, die durch seitliche Bewegung \dot{x} des Beobachters zum Fixationspunkt entsteht. Wird ein Objekt in mittlerer Entfernung fixiert, bewegen sich nähere Objekte entgegen der Bewegungsrichtung, während sich weiter entfernte Objekte mit der Bewegungsrichtung bewegen. Die Geschwindigkeit nimmt dabei mit dem Entfernungsabstand zum Fixationspunkt zu. Für die Beschreibung der Bewegungsparallaxe wird das Motion-Pursuit-Verhältnis [NS12] verwendet; siehe Abbildung 2.13.

Es beschreibt das Verhältnis der Bewegungsparallaxe $\dot{\vartheta}$ zur Folgebewegung des Auges $\dot{\alpha}$ für einen Fixationspunkt im Abstand g und einen zweiten Punkt mit Abstand Δg zum Fixationspunkt. Experimentell wurde ein minimales Motion-Pursuit-Verhältnis von $\frac{\dot{\vartheta}}{\dot{\alpha}} = 0.01$ für eine Folgebewegung von 10°s^{-1} be-

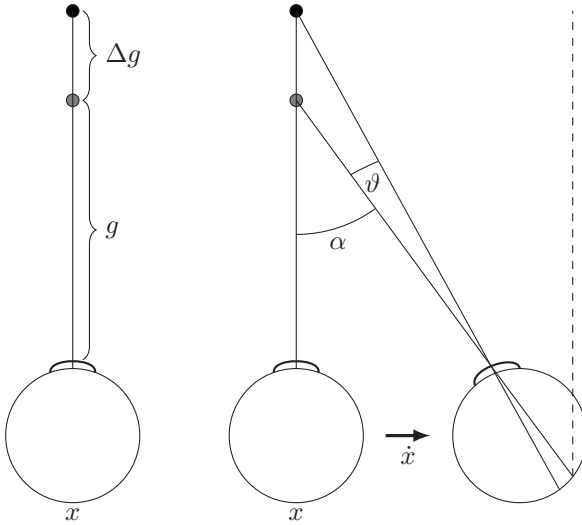


Abbildung 2.13: Motion-Pursuit-Verhältnis zur Beschreibung der Bewegungsparallaxe.

stimmt [HN15]. Damit ergibt sich die Tiefenschärfe 1. Ordnung für einen Fixationspunkt mit 1 m Abstand.

$$\frac{\Delta g_{\min}}{g} \approx \frac{\dot{\vartheta}}{\dot{\alpha}}$$

$$\Delta g_{\min} \approx 10 \text{ mm} \tag{2.35}$$

Die Bewegungsparallaxe ist also im Vergleich zur binokularen Parallaxe mit 0,8 mm ungenauer, wobei das Motion-Pursuit-Verhältnis für eine relativ schnelle Folgebewegung ermittelt wurde.

Optischer Fluss Nach Gibson [Gib50] ist der optische Fluss die wahrgenommene Bewegung einer Umgebung bei einer Bewegung relativ zu dieser. Die

Umgebung wird während dieser Bewegung als unveränderlich angenommen. Wird dabei ein Punkt in der Umgebung mit dem Auge fixiert, entspricht der optische Fluss der Bewegungsparallaxe [WH90]. Für die Schätzung der Bewegung und der Tiefe genügen der optische Fluss sowie dessen erste beide Ableitungen. Es wird vermutet, dass der Mensch einfache Filter besitzt, mit deren Hilfe die ersten beiden Ableitungen geschätzt werden [LP80].

Interokularer Geschwindigkeitsunterschied Die Geschwindigkeit der (binokularen) Parallaxe, wenn sich der Beobachter relativ zu einem Objekt bewegt [Daw12].

Bildliche Hinweisreize

Die bildlichen Hinweisreize nutzen ausschließlich monokulare, statische Informationen, die auch auf einer Fotografie vorhanden wären. Sie beruhen auf der Auswertung des Bildinhalts. Oftmals sind die bildlichen Hinweisreize erlernt, auf spezielle Szenen angepasst und mehrdeutig. Im Gegensatz zur Stereopsis vermitteln die bildlichen Hinweisreize keinen „lebendigen“ dreidimensionalen Bildeindruck.

Im Normalfall ergänzen sich mehrere Hinweisreize zur Schätzung der Tiefe. Widersprechen sich die Hinweisreize, werden bildliche Hinweisreize vorrangig verwendet. In diesem Abschnitt werden die häufigsten in der Literatur genannten bildlichen Hinweisreize kurz diskutiert.

Größe Objekte bekannter Größe erscheinen kleiner mit größer werdendem Abstand [Daw12].

Texturgradient Es gibt verschiedene Hinweisreize, die den Texturgradienten verwenden.

Definition 2.56: Texturgradient

Wahrgenommene Änderungsgeschwindigkeit der Musterfrequenz auf der Oberfläche.

Dazu gehören die lokale Anisotropie der Textur, die Vorzugsrichtung der Textur und der Betrag des Texturgradienten [Daw12; MBW13]. Die Hinweisreize werden sowohl in der direkten Nachbarschaft (lokal) als auch zwischen verschiedenen Bildbereichen (global) angewendet. Ivanov et al. [IKM14] haben die Unsicherheit für die Wahrnehmung von Neigungsunterschieden einer Oberfläche untersucht und festgestellt, dass diese für kleine Neigungen relativ zum Beobachter bei 20° und bei großen Neigungen relativ zum Beobachter bei 5° liegt.

Linearperspektive Durch die Zentralprojektion laufen (Raum-)parallele Linien an einem Fluchtpunkt auf dem Horizont zusammen [Daw12].

Kontur und Kanten Linien entlang der Konturen und Kanten geben Aufschluss über die Neigung der Oberfläche [BT81] und sind somit eine Tiefenwahrnehmung 1. Ordnung.

Verdeckung Ein Objekt verdeckt ein dahinter liegendes Objekt [Daw12].

Schattierung Außer bei spiegelnden Oberflächen wird das einfallende Licht an der Oberfläche in mehrere Richtungen gestreut reflektiert. Abhängig vom Winkel des einfallenden Lichts ändert sich die Helligkeit (Schattierung) der Oberfläche. Die Schattierungen sind mehrdeutig, wenn die Richtung des Lichts und der Beobachtung nicht bekannt sind. Der Mensch trifft a priori einfache Annahmen, um die Mehrdeutigkeiten aufzulösen (Licht kommt von oben, Oberfläche ist konvex). Trotzdem sind Schattierungen ein zuverlässiger Hinweisreiz 1. Ordnung. In einer Studie war die Unsicherheit der Entfernungsschätzung bei

Tabelle 2.3: Unsicherheit in der Tiefenschätzung bei gegebenem Objektabstand für verschiedene visuelle Hinweisreize geordnet nach der Ordnung (O) der Tiefenstruktur.

O	Hinweisreiz	Messwert / Unsicherheit	Quelle
0	Akkommodation	$1 \text{ m} \pm 13 \text{ mm}$	S. 56
0	Konvergenz	$0,5 \text{ m} \pm 291 \text{ mm}, 1 \text{ m} \pm 1,16 \text{ m}$	[VCT01]
0	Größe	$1 \text{ m} \pm 10 \text{ mm}$	[HN15]
1	Stereopsis	$1 \text{ m} \pm 0,8 \text{ mm}$	[GBA08]
1	Bewegungsparallaxe	$1 \text{ m} \pm 10 \text{ mm}$	[HN15]
1	Texturgradient	$0^\circ \pm 20^\circ, 60^\circ \pm 3^\circ$	[IKM14]
2	Schattierung	$1 \text{ m} \pm 10,4 \text{ mm}$	[LBH12]

der Schattierung lediglich 30 % größer als die der Stereopsis [LBH12] (bei einem Objektabstand von 810 mm). Die Änderungen der Schattierung sind außerdem ein Hinweisreiz 2. Ordnung, also für die Krümmung der Oberfläche.

Unsicherheiten und Tiefenstruktur der Hinweisreize

In Tabelle 2.3 sind für einige der oben genannten Hinweisreize die jeweilige Ordnung der Tiefenstruktur und eine Unsicherheit für die Tiefenschätzung zugeordnet.

2.6 Wahrnehmung spiegelnder Oberflächen

Eine perfekt spiegelnde Oberfläche ist nicht direkt sichtbar. Stattdessen ist ein Bild der Umgebung auf der Oberfläche zu sehen. Dieses Bild erscheint gegenüber der Umgebung entsprechend der Form der Oberfläche verzerrt. Befindet sich keine Struktur in der Umgebung, erscheint die Oberfläche flach. Andererseits können auch Eigenschaften der Umgebung fälschlicherweise als Verformung

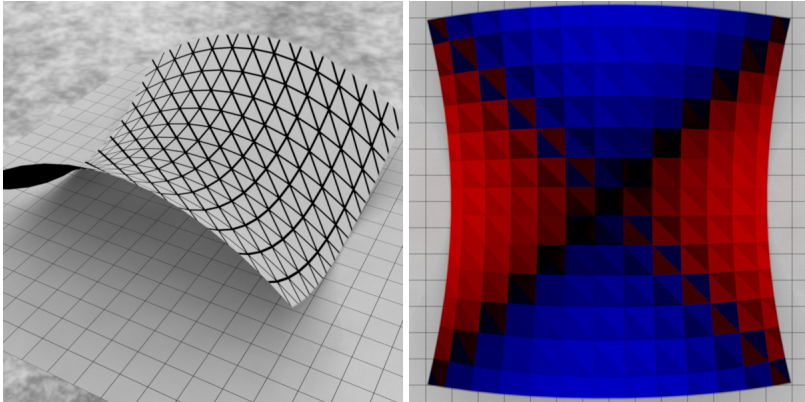


Abbildung 2.14: Bild der Gitterstruktur einer sattelförmigen Fläche (links) und Visualisierung der Krümmungen (blau = konvex, rot = konkav) (rechts).

der Oberfläche interpretiert werden. In den Abbildungen 2.14 und 2.15 sind die Gitterstruktur und Krümmung einer sattelförmigen Oberfläche sowie die Reflexionen verschiedener Muster an der Oberfläche dargestellt.

Obwohl eine spiegelnde Oberfläche selbst nicht sichtbar ist, entsteht oftmals eine räumliche Wahrnehmung ihrer Form. Viele der dabei verwendeten Hinweisreize sind die gleichen, die auch auf texturierten Oberflächen zu einer Tiefenwahrnehmung führen. Diese müssen jedoch anders interpretiert werden, um auf die richtige Form der Oberfläche zu schließen. Da eine perfekt spiegelnde Oberfläche selbst nicht fokussiert werden kann, sind die in Abschnitt 2.5.1 vorgestellten okularmotorischen Hinweisreize nur auf zumindest teilweise texturierten Oberflächen brauchbar. In Abschnitt 2.6.2 wird erläutert, warum die in Abschnitt 2.5.1 vorgestellten stereoskopischen Hinweisreize im besten Falle falsche Informationen liefern und in den meisten Fällen nicht auswertbar sind. Damit bleiben die bildlichen und die bewegungsinduzierten Hinweisreize auf spiegelnden Oberflächen, für die in diesem Abschnitt ein Überblick über den Stand der Forschung gegeben wird.

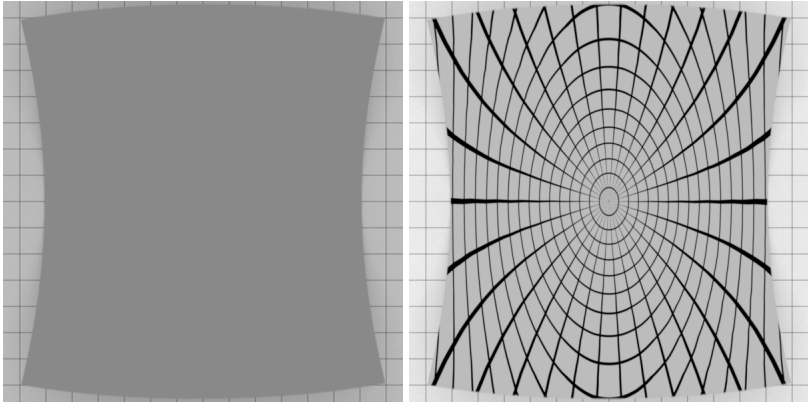


Abbildung 2.15: Reflexion eines Musters an einer sattelförmigen Fläche. Eine spiegelnde Oberfläche erscheint in einer Umgebung ohne erkennbares Muster flach (links). Erst durch ein Muster der Umgebung wird die Form der Oberfläche erkennbar. Da das Muster der Umgebung meist nicht bekannt ist, wirkt sich neben der Form der Oberfläche auch das Muster der Umgebung auf die wahrgenommene Form aus (rechts).

2.6.1 Texturgradient

In Abschnitt 2.5.1 wurde der Texturgradient als Hinweisreiz für die Tiefenwahrnehmung 1. Ordnung vorgestellt. Ähnlich zu texturierten Oberflächen ändert sich auch auf spiegelnden Oberflächen der Texturgradient in Abhängigkeit der Form der Oberfläche. Der entscheidende Unterschied ist, dass diese Textur nicht von der Oberfläche, sondern aus der Umgebung kommt. Neben der Form entscheidet also auch die Beschaffenheit der Umgebung über die Wahrnehmung einer spiegelnden Oberfläche.

Es gibt verschiedene Erklärungsversuche, wie der Mensch die Form einer spiegelnden Oberfläche aus einem verzerrten Bild der Umgebung schätzt. Von Helmholtz [Hel67] wurde die Theorie beschrieben, dass eine inverse Abbildung des verzerrten auf das unverzerrte Bild der Umgebung geschätzt wird, woraus dann die Form der Oberfläche geschätzt werden kann. Da die Schätzung der inversen Abbildung äußerst kompliziert und zudem nicht eindeutig ist [Bal08],

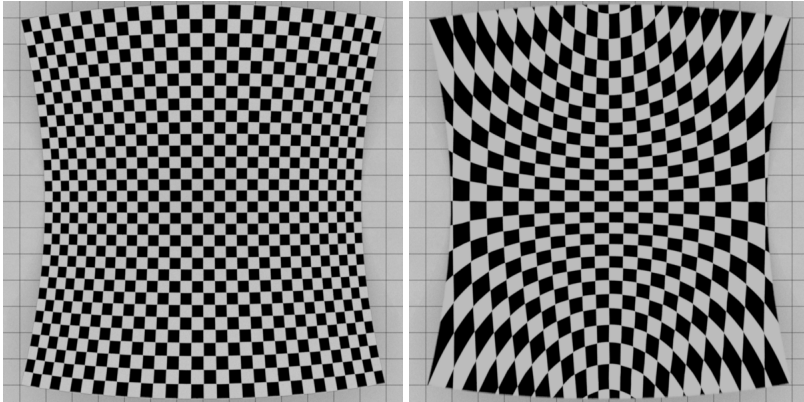


Abbildung 2.16: Diffus reflektierende sattelförmige Oberfläche mit einem Schachbrettmuster als Textur (links) und spiegelnde Reflexion eines Schachbrettmusters an einer sattelförmigen Fläche (rechts). Durch die spiegelnde Reflexion erscheint das Muster bei einer konvexen Krümmung der Oberfläche komprimiert, während es bei einer konkaven Krümmung der Oberfläche extrahiert erscheint.

wird heute davon ausgegangen, dass deutlich einfachere Hinweisreize verwendet werden, um die Form der Oberfläche zu schätzen [FTA04].

Der Texturgradient auf spiegelnden Oberflächen ist ein Hinweisreiz für die Tiefenwahrnehmung 2. Ordnung. Im Unterschied zu texturierten Oberflächen hängt der wahrgenommene Texturgradient also nicht von der Neigung der Oberfläche, sondern von den Neigungsänderungen relativ zum Beobachter ab. Betrachtet man beispielsweise eine texturierte ebene Fläche und neigt diese relativ zum Beobachter, ändert sich der wahrgenommene Texturgradient. Ist die Fläche jedoch spiegelnd, führt eine Neigung lediglich dazu, dass ein anderer Bereich der Umgebungstextur reflektiert wird. Wenn die Umgebungstextur also keinen Texturgradienten aufweist und einen gleichbleibenden Abstand zur Oberfläche besitzt, dann bleibt der wahrgenommene Texturgradient unverändert. In Abbildung 2.16 sind die Unterschiede bei der diffusen Reflexion und der spiegelnden Reflexion an einer sattelförmigen Fläche dargestellt.

Der wahrgenommene Texturgradient hängt stattdessen von der wahrgenommenen Krümmung der Oberfläche ab.

Definition 2.57: Wahrgenommene Krümmung

Projektion der zweiten Ableitung der Oberfläche auf die Bildebene.

Anmerkungen: Die wahrgenommene Krümmung entspricht der Definition der Tiefenstruktur 2. Ordnung.

In Abbildung 2.17 ist die wahrgenommene Krümmung am Beispiel einer Kugel dargestellt. Sie berechnet sich über die zweiten Ableitungen (Hesse-Matrix) der Oberfläche entlang der Bildebene [Wer11]. Im Zentrum der projizierten Kugel entspricht die wahrgenommene Krümmung der mittleren Krümmung: der Texturgradient ist in alle Richtungen gleich. Zum Rand der Kugel hin nimmt die wahrgenommene Krümmung in radialer Richtung zu, während sie in tangentialer Richtung gegen Null geht. Während die Hauptkrümmungen immer senkrecht aufeinander stehen, stehen die Hauptkrümmungen in der Bildebene nur bei frontparalleler Projektion senkrecht aufeinander [Wei+06]. Dafür stehen die Richtungen des minimalen und des maximalen Gradienten der 2. Ableitung der Oberfläche in der Bildebene senkrecht aufeinander.

Savarese et al.

Savarese et al. [SP01; SCP02; CBS00] haben die Rekonstruktion eines konvexen Spiegels aus einem monokularen, statischen Bild des Spiegels durch Invertierung des Musters einer bekannten Umgebung gezeigt. In einem späteren Experiment haben Savarese et al. [SLP04] festgestellt, dass der Texturgradient allein zur Wahrnehmung der Form spiegelnder Oberflächen nicht ausreicht. Sie untersuchten einfache sphärische, zylindrische und sattelförmige Objekte bei denen sie die Konturinformation entfernten, indem sie nur zufällige Ausschnitte der Fläche zeigten. Im Experiment befand sich das reflektierte regelmäßige Schachbrettmuster auf einem Schirm, der direkt neben dem Objekt stand, so dass ein großer Texturgradient alleine durch den variierenden Schirmabstand

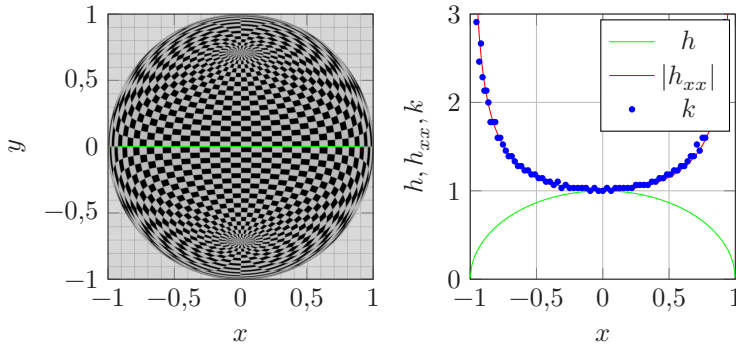


Abbildung 2.17: Orthographische Projektion der Spiegelung einer mit einem Schachbrettmuster texturierten sphärischen Umgebung mit einem Radius von 100 an einer sphärischen Oberfläche mit einem Radius von 1. Die Polstellen an Nord- und Südpol ergeben sich durch die Projektion des Schachbrettmusters auf die Sphäre (links). Die über den Texturgradienten wahrgenommene Krümmung k der Oberfläche $h(x)$ entlang der grünen Linie ergibt sich aus der zweiten Ableitung der Oberfläche h_{xx} (rechts). Die wahrgenommene Krümmung wurde über den Texturgradienten k (Musterfrequenz) entlang der grünen Linie bestimmt, der im Mittelpunkt auf 1 normiert wurde.

entstand. Unter diesen Voraussetzungen konnten die sphärischen und zylindrischen Flächen nur schlecht und die sattelförmigen Flächen überhaupt nicht von den anderen Flächen unterschieden werden.

Fleming et al.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Savarese et al. haben Fleming et al. [FTA04] festgestellt, dass die räumliche Wahrnehmung einer spiegelnden Oberfläche allein basierend auf bildlichen Hinweisreizen und ohne Kenntnis des Umgebungsmusters möglich und zudem robust gegenüber Änderungen der Umgebung und fehlender Kontur ist. Die Gründe für die widersprüchlichen Ergebnisse liegen an einem anderen Versuchsaufbau. Fleming et al. verwenden komplex geformte spiegelnde Objekte mit großen Krümmungen, sowie eine weit entfernte und natürlich strukturierte Umgebung.

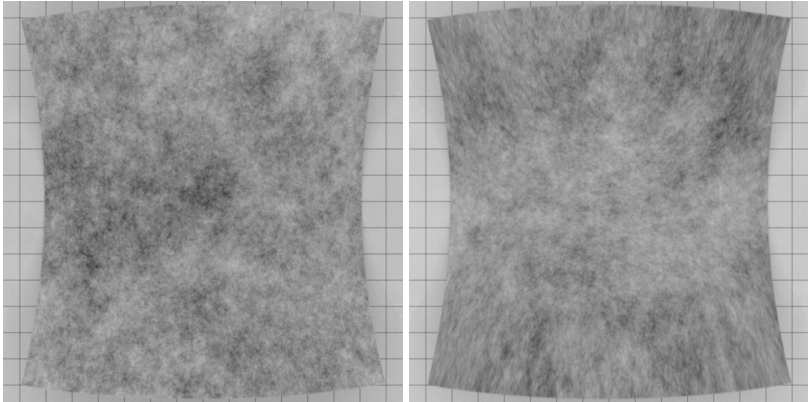


Abbildung 2.18: Diffus reflektierende sattelförmige Oberfläche mit einem zufälligen Muster als Textur (links) und spiegelnde Reflexion eines zufälligen Musters an einer sattelförmigen Fläche (rechts).

Als einfachen bildlichen Hinweisreiz schlugen Fleming et al. ein Richtungshistogramm vor [BPF12], das mithilfe einfacher linearer Filterfunktionen geschätzt werden kann. Daraus lassen sich die lokale Anisotropie und Vorzugsrichtung der Textur ableiten. Während die Anisotropie der Textur einen Rückschluss auf das Verhältnis der Hauptkrümmungen der spiegelnden Oberfläche erlaubt, gibt die Vorzugsrichtung einen Hinweis auf die Richtung der kleineren Hauptkrümmung. Bei den von Fleming et al. untersuchten Objekten hängen die Richtungsfelder stärker von den Krümmungen auf der Oberfläche als von der Umgebungstextur ab, sodass sie sich auch bei anderen Umgebungstexturen ausbilden. In Abbildung 2.18 sind die diffuse Reflexion und spiegelnde Reflexion einer zufälligen Textur³ an einer sattelförmigen Fläche dargestellt.

Bei der diffusen Reflexion erscheint die Oberfläche flach, da die kleinen Veränderungen des Texturgradienten kaum sichtbar sind. Im Gegensatz dazu sind auf der gleich geformten spiegelnden Oberfläche deutliche Veränderungen des

³ Für die Synthese der Textur wurde rosa Rauschen verwendet, also Rauschen mit einem Betragsspektrum reziprok zur Ortsfrequenz.

Texturgradienten sichtbar und somit ein Schluss auf die Form der Oberfläche möglich.

Weidenbacher et al.

Ein weiterer bildlicher Hinweisreiz sind Kanten, die an den Stellen auf der Oberfläche entstehen, an denen die beiden Hauptkrümmungen stark voneinander abweichen [Wei+06]. Diese Kanten verlaufen entlang der kleinsten Krümmungsrichtung der wahrgenommenen Krümmung und bleiben selbst bei Änderungen der Umgebung bestehen.

Doerschner et al.

Doerschner et al. [Doe+11] zeigen in einer Studie, dass die Wahrnehmung spiegelnder Oberflächen mit statischen Bildern mehrdeutig ist. So ist es beispielsweise aufgrund eines statischen Bildes der Oberfläche nicht möglich zwischen einer diffus reflektierenden Oberfläche mit aufgemaltem Muster und einer spiegelnd reflektierenden Oberfläche mit gespiegelm Muster zu unterscheiden. Erst der durch Bewegung entstehende optische Fluss oder das stereoskopische Sehen geben Hinweise auf die Reflektanzeigenschaften der Oberfläche. So bewegt sich das Muster bei diffus reflektierenden Oberflächen mit der Oberfläche, während es sich bei spiegelnd reflektierenden Oberflächen in Abhängigkeit der Oberflächenkrümmung bewegt.

Konieczny und Meyer

Konieczny und Meyer [Kon09; KM12] beschreiben die Sichtbarkeit kleiner konvexer Formabweichungen unter Berücksichtigung der Oberflächenneigung und -rauheit sowie des menschlichen Wahrnehmungsempfindens mit dem in Abbildung 2.19 dargestellten Modell.

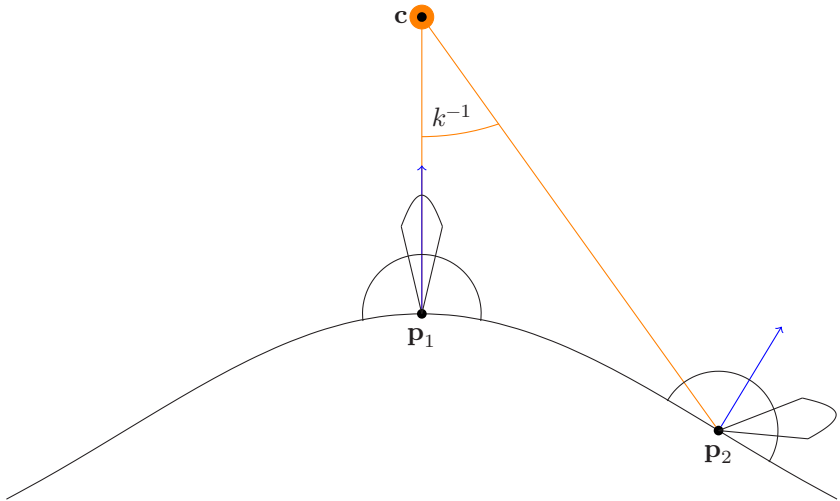


Abbildung 2.19: Sichtbarkeit kleiner Formabweichungen nach [Kon09]. Es wird der Intensitätsunterschied der ausgehenden Strahldichte an den Punkten \mathbf{p}_1 und \mathbf{p}_2 sowie deren Winkelabstand k^{-1} berücksichtigt. Sowohl Beobachter als auch eine Punktlichtquelle befinden sich im Punkt \mathbf{c} . Der Punkt \mathbf{p}_2 befindet sich an der Stelle auf der Oberfläche, an der die Strahldichte in Richtung \mathbf{c} minimal ist. Die ausgehende Strahldichte wird mithilfe des Beleuchtungsmodells nach Phong berechnet. Dazu werden eine diffuse Reflexion (breite Streukeule) und eine spiegelnde Reflexion (schmale Streukeule) in Abhängigkeit der Oberflächennormalen (blau) betrachtet.

Sowohl Beobachter als auch eine Punktlichtquelle befinden sich im Punkt $\mathbf{c} = (0, 0, 1)^T$. Die Oberfläche liegt in der xy -Ebene mit einer konvexen Formabweichung zentriert um den Ursprung. Auf der Oberfläche werden zwei Punkte ausgewählt. Der erste Punkt \mathbf{p}_1 befindet sich im Ursprung und besitzt die Oberflächennormale $\mathbf{n}_1 = (0, 0, 1)^T$ und reflektiert daher das meiste Licht zum Beobachter. Der zweite Punkt \mathbf{p}_2 befindet sich auf der Oberfläche an der Stelle, an der die Normale maximal von der Normalen \mathbf{n}_1 abweicht und das wenigste Licht zum Beobachter reflektiert. Die ausgehende Strahldichte an den beiden Punkten $g(p_1)$ und $g(p_2)$ wird mit der BRDF nach Phong, einem Reflektanzmodell für diffus reflektierende Oberflächen, berechnet. Anschließend gewichten Konieczny und Meyer den Kontrast der ausgehenden Strahldichten mit der CSF

und setzen diesen ins Verhältnis mit dem kleinsten wahrnehmbaren Intensitätsunterschied Δg_{jnd} ⁴.

$$g_{\text{steps}}(k) = \frac{f_{\text{CSF}}(k) \cdot g(p_1) - f_{\text{CSF}}(k) \cdot g(p_2)}{\Delta g_{\text{jnd}}} \quad (2.36)$$

Ist der Intensitätsunterschied g_{steps} größer als 1, so ist die Formabweichung sichtbar. Konieczny und Meyer definieren die zur Wellenlänge der Formabweichung gehörige Ortsfrequenz als k in Gleichung (2.36). Diese Definition berücksichtigt die laterale Größe der Formabweichung auf der Oberfläche und somit den Winkelabstand des hellsten Punktes \mathbf{p}_1 und des dunkelsten Punktes \mathbf{p}_2 . In einer anschließenden Evaluation verwenden Konieczny und Meyer stattdessen die wahrgenommene Musterfrequenz eines Schachbrettmusters, welches über die Oberflächen gespiegelt wird. Diese Abweichung vom eingeführten Modell ist sinnvoll, wurde jedoch nicht weiter erklärt.

Konieczny und Meyer evaluieren ihr Modell, indem sie einen Orangenschalen-effekt mit unterschiedlichen Wellenlängen am Computer simulieren und die Teilnehmer fragen, ab welcher Amplitude der jeweils dargestellte Orangenschaleneffekt sichtbar wird. Bei einer zweiten Evaluation, bei der die Oberfläche mit zwei unterschiedlichen Welligkeiten und Reflektanzfunktionen simuliert wurde, mussten die Teilnehmer entscheiden, welche Welligkeit stärker ausgeprägt ist. Dabei stellt sich heraus, dass bei einer stärkeren diffusen Streuung der Oberfläche die Welligkeiten weniger wahrgenommen werden. Dieses Ergebnis bestätigt zwar prinzipiell ihr Modell, lässt jedoch keine Aussage über die absolute Größe einer gerade noch sichtbaren Welligkeit zu.

Die gleichzeitige Verwendung der CSF und des kleinsten wahrnehmbaren Intensitätsunterschieds im Modell ist unnötig, da bereits der Vergleich des reflektierten Musters mit der CSF eine Entscheidung über die Sichtbarkeit nach Definition 2.44 trifft. Würde man statt der heuristisch motivierten Reflexionsverteilungs-

⁴ Konieczny und Meyer geben hier die Gleichung $\Delta g_{\text{jnd}} = 0,0594(1,219 + g_a^{0,4})^{2,5}$ mit der absoluten Intensität g_a für den kleinsten wahrnehmbaren Intensitätsunterschied (just noticeable difference) an.

funktion nach Phong ein realistischeres Modell für die Streueigenschaften der Oberfläche wählen und das Modell vollständig auf die CSF statt auf den kleinsten wahrnehmbaren Intensitätsunterschied zurückführen, wäre das Modell evtl. geeignet, um eine Aussage über die Sichtbarkeit von kleinen Formabweichungen auf teilspiegelnden Oberflächen zu treffen.

2.6.2 Stereopsis

Bei der Stereopsis auf spiegelnden Oberflächen hängt die Parallaxe nicht mehr nur vom Abstand zur Oberfläche ab, sondern genauso von der Form der Oberfläche und dem Abstand zur gespiegelten Umgebung. Helmholtz hat bemerkt, dass die für das linke und rechte Auge unterschiedlichen Spiegelpunkte einer spiegelnden Oberfläche zu einem Eindruck von Glanz führen [Hel67]. Allerdings ist die Suche nach einem korrespondierenden Spiegelpunkt im zweiten Auge nicht trivial, da dieser entweder nicht existiert oder gleich mehrere Punkte existieren können, die auf den gleichen Punkt in der Umgebung abbilden.

Im folgenden Abschnitt wird mit dem Modell von Muryy et al. [Mur+13] gezeigt, dass die Disparitäten für komplexe geformte spiegelnde Oberflächen im Allgemeinen nicht mehr aufgelöst werden können.

Muryy et al.

In [Mur+13] haben Muryy et al. die stereoskopische Wahrnehmung spiegelnder Oberflächen mit einem Modell beschrieben, das in Abbildung 2.20 dargestellt ist.

Die stereoskopische Wahrnehmung einer spiegelnden Oberfläche im Punkt P für einen Fixationspunkt F mit dem linken Auge E_L und dem rechten Auge E_R verläuft durch die Reflexionspunkte P_L und P_R auf der Oberfläche. Dazu ist eine Auflösung der Parallaxe auf dem Schirm notwendig, die dann erreicht ist, wenn zwei Punkte P_L und P_R auf der Oberfläche gefunden werden, sodass die reflektierten Sichtstrahlen durch zwei Schirmpunkte A_L und A_R gehen, die projiziert

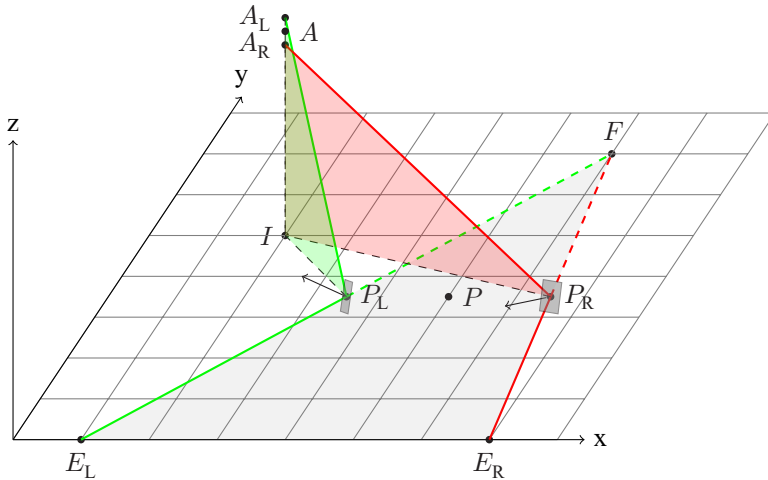


Abbildung 2.20: Die stereoskopische Wahrnehmung einer spiegelnden Oberfläche am Punkt P für einen Fixationspunkt F befindet sich am Punkt I , wenn nur horizontale Disparitäten zweier Schirmpunkte A_L und A_R ausgewertet werden (Abbildung nach [Mur+13]).

auf die Fixationsebene in einem Punkt I zusammenfallen. Die Fixationsebene verläuft durch die drei Punkte E_L , E_R und F . Sei A der gemeinsame Fokuspunkt, der mittig zwischen A_L und A_R liegt. Ist der Abstand von A_L und A_R zu groß, um diese als gemeinsamen Punkt wahrzunehmen, kann der Abstand zum Punkt A nicht stereoskopisch geschätzt werden. Das menschliche Wahrnehmungssystem kann die Informationen dann nicht mehr fusionieren und es werden Doppelbilder sichtbar. Nach einer Untersuchung von Burt und Julesz [BJ80] sind die maximalen Abstände $60'$ entlang der Fixationsebene und $12'$ orthogonal dazu. Während Disparitäten in der Fixationsebene zur Tiefenschätzung verwendet werden, vermuten Muryy et al. [MFW14], dass die Disparitäten senkrecht zur Fixationsebene ein Maß für die Unsicherheit der Tiefenschätzung darstellen und einen Hinweis auf eine fehlerhafte Wahrnehmung geben. Falls der Abstand der beiden Punkte A_L und A_R nicht zu groß ist, dann ist die Lage der virtuellen Oberfläche mittig im Punkt A . Hat die Umgebung einen sehr großen Abstand zur Oberfläche, stimmt die Lage der Oberfläche mit dem virtuellen Bild der

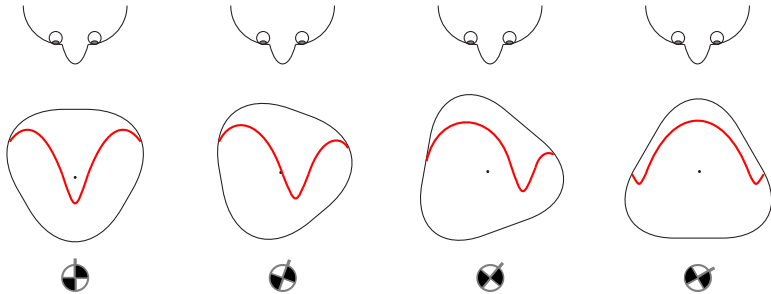


Abbildung 2.21: Virtuelle Oberfläche (wahrgenommene Lage der spiegelnden Oberfläche) beim stereoskopischen Sehen (rot) und Lage der realen Oberfläche (schwarz) nach [Mur+13]. Kleine Drehungen (um 20° , 40° und 60° dargestellt durch die darunterliegende Secchi-Scheibe) der realen Oberfläche führen zu einer starken Änderung der virtuellen Oberfläche. Je nach Krümmung kann eine konvex geformte Oberfläche als konkav wahrgenommen werden.

Oberfläche überein [Mur+13]. Das virtuelle Bild der Oberfläche entsteht für konvex geformte Spiegel hinter der realen Oberfläche und kann sich bereits für kleine Änderungen stark ändern; siehe Abbildung 2.21. Für konkav geformte Spiegel liegt das virtuelle Bild der Oberfläche vor der realen Oberfläche.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Stereopsis auf spiegelnden Oberflächen im Allgemeinen keine zusätzlichen Informationen über die Form der Oberfläche liefert.

2.6.3 Spekularer Fluss

Der spekulare Fluss (SF) ist der optische Fluss; siehe Abschnitt 2.5.1, der durch Spiegelung an einer spiegelnden Oberfläche entsteht. In diesem Abschnitt werden Veröffentlichungen und Modelle zum SF diskutiert. Viele der Modelle dienen der Rekonstruktion der Oberfläche aus einem beobachteten SF. Die Zielsetzung ist hier, oft im Unterschied zu den Wahrnehmungsmodellen, dass sich das Modell umkehren lässt. Dazu werden vereinfachende Annahmen getroffen, wie beispielsweise ein bekanntes Muster der Umgebung, eine bekannte

Trajektorie der Bewegung, ein kalibrierter Aufbau oder eine eingeschränkte Bewegung.

Longuet-Higgins

Longuet-Higgins [Lon60a; Lon60b; Lon60c] untersuchte bereits sehr früh die Bewegung von Glanzpunkten und das Funkeln auf Wasseroberflächen. Das Funkeln entsteht an Orten, an denen sich der Beobachter im Brennpunkt eines parabolischen Bereichs der Oberfläche (Kauistik) befindet. Die Wasseroberfläche wird dabei als zufällige Wellenlandschaft mit normalverteilten Gradienten modelliert [Lon57a]. Der Ansatz ist den späteren sehr ähnlich, allerdings ist die Zielstellung, die Statistik des Funkelns zu erfassen. In allen anderen Ansätzen ist gerade dieses Funkeln bzw. Kaustiken ein unerwünschter Fall.

Blake und Bülthoff

Blake und Bülthoff [BB91] beschreiben die Bewegung im Bild, die sich durch kleine Bewegungen des Beobachters relativ zu einer spiegelnden Oberfläche ergibt. Ihr Modell beschreibt die relative Bewegung $\dot{\mathbf{p}}$ eines gespiegelten Schirmpunktes entlang der Oberfläche, die durch eine Bewegung $\dot{\mathbf{c}}$ des Beobachters verursacht wird.

$$s^2(2\mathbf{W} - e\mathbf{\Pi})\mathcal{P}\dot{\mathbf{p}} = -\mathbf{\Pi}\dot{\mathbf{c}} \quad (2.37)$$

Die Bewegung $\dot{\mathbf{p}}$ wird relativ zu einem festen Punkt auf der Oberfläche betrachtet. Die beiden Bewegungen hängen über die Weingartenabbildung \mathbf{W} der Oberfläche; siehe [BB91], den Abstand des Beobachters s und des Schirmpunktes r zur Oberfläche voneinander ab, mit $e = \frac{1}{r} + \frac{1}{s}$. Außerdem wird eine Projektion \mathcal{P} des SF von der Bildebene auf die Tangentialebene der Oberfläche sowie eine Projektion $\mathbf{\Pi}$ der Bewegungsrichtung auf Bild- und Tangentialebene definiert. Sind die Krümmungen sehr klein, dominiert der Term $e\mathbf{\Pi}$ die Abbildung, der vom Abstand und der Richtung der Beobachtung relativ zur Tangentialebene

der Oberfläche abhängt. Sind Beobachtungs- und Schirmabstand groß, kann e vernachlässigt werden und die Gleichung vereinfacht sich folgendermaßen.

$$2s^2 \mathbf{W} \mathcal{P} \dot{\mathbf{p}} = -\mathbf{\Pi} \dot{\mathbf{c}} \quad (2.38)$$

Wird zudem die Oberfläche einer Kugel mit Radius R betrachtet, bilden die Projektionen $\mathbf{\Pi}$ und \mathcal{P} auf die Identität ab und die Weingartenabbildung ist $\mathbf{W} = 1/R$.

$$\dot{\mathbf{p}} = -\frac{R}{2s^2} \dot{\mathbf{c}} \quad (2.39)$$

Für konvexe Flächen und Ebenen ist die relative Bewegung des gespiegelten Punkts in Richtung der Bewegung des Beobachters, für konkave Flächen bewegt er sich in die entgegengesetzte Richtung. Nähert sich der Beobachter einer Kaustik, beschleunigt sich die Bewegung. Befindet sich der Beobachter direkt in der Kaustik der spiegelnden Oberfläche, kann kein reelles Bild wahrgenommen werden.

Waldon und Dyer

Waldon und Dyer [WD93] untersuchen die Kombination von optischem und spekularem Fluss auf teilspiegelnden Oberflächen. Für die Beschreibung des SF verwenden sie das Modell von Blake und Bülthoff auf Seite 76. Die teilspiegelnde Oberfläche wird über die BRDF nach Phong [Pho75] als Linearkombination einer ideal diffus reflektierenden Oberfläche nach dem lambertschen Gesetz und einer ideal spiegelnd reflektierenden Oberfläche beschrieben. In einer qualitativen Untersuchung wird gezeigt, dass die Fluss schätzung gestört wird, wenn weder der spekulare noch der diffus reflektierende Anteil die BRDF der Oberfläche dominiert. Der Grund dafür ist, dass bei teilspiegelnden Oberflächen die Annahme einer konstanten Helligkeit der Oberfläche bzw. der reflektierten Umgebung verletzt wird. Während dies ein Problem für die Rekonstruktion der

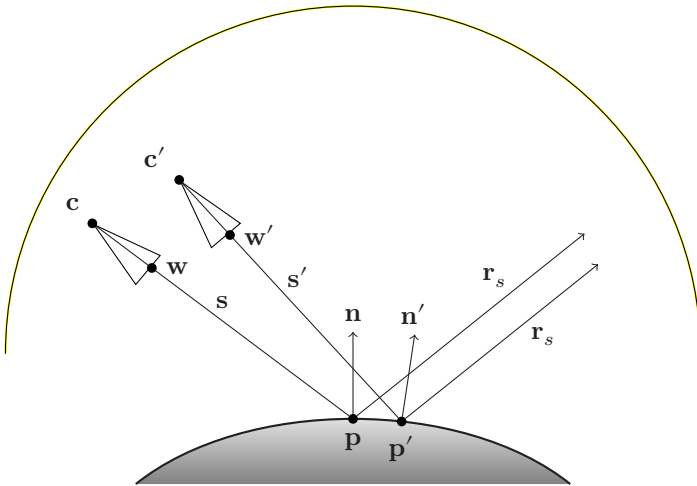


Abbildung 2.22: Modell zur Berechnung des SF nach [RB06].

Oberfläche aus dem SF darstellt, ist der Mensch davon nicht betroffen, da er durch meist zusätzlich auftretende Hinweisreize nicht auf die Annahme einer konstanten Helligkeit angewiesen ist.

Roth und Black

Roth und Black [RB06] haben ein parametrisches Modell zur Beschreibung des optischen Flusses auf diffusen und des SF auf spiegelnden Oberflächen aufgestellt, das in Abbildung 2.22 dargestellt ist.

Damit schätzen sie die Reflektanz und anschließend die Form der Oberfläche für jeden Punkt. Für das Modell wird ein bewegter Beobachter, eine entweder diffus oder spiegelnd reflektierende, ortsfeste Oberfläche und eine ortsfeste, strukturierte Umgebung mit großer Entfernung zur Oberfläche angenommen. Ein Sichtstrahl $s = c - p$ ausgehend vom bildseitigen Knotenpunkt des Beobachters

\mathbf{c} auf die Oberfläche am Punkt \mathbf{p} und sein reflektierter Strahl \mathbf{r}_s werden an der Oberflächennormalen $\mathbf{n}(\mathbf{p})$ in diesem Punkt reflektiert.

$$\mathbf{r}_s = 2\tilde{\mathbf{s}}^T \tilde{\mathbf{n}} \cdot \tilde{\mathbf{n}} - \tilde{\mathbf{s}} \quad (2.40)$$

Der Operator $\tilde{\mathbf{n}} = \frac{\mathbf{n}}{\|\mathbf{n}\|}$ bildet hier einen Vektor auf die Einheitskugel ab. Verschiebt sich nun der Beobachtungspunkt nach \mathbf{c}' , wird ein Punkt auf der Oberfläche \mathbf{p}' gesucht, sodass die Reflexion des Sichtstrahls $\mathbf{s}' = \mathbf{c}' - \mathbf{p}'$ auf den gleichen Punkt im Unendlichen abbildet, wenn dieser in die gleiche Richtung reflektiert wird.

$$\tilde{\mathbf{s}}' + \mathbf{r}_s = \epsilon \cdot \mathbf{n}' \quad (2.41)$$

Hier ist \mathbf{n}' die Winkelhalbierende von \mathbf{s}' und \mathbf{r}_s und ϵ ein Skalierungsfaktor. Die Autoren definieren eine schwache Bedingung der spiegelnden Reflexion, die diese Annahme konkretisiert.

Definition 2.58: Schwache Bedingung der spiegelnden Reflexion

Ein reflektiertes Merkmal, das von zwei verschiedenen Beobachtungspositionen aus gesehen wird, erfüllt die schwache Bedingung für die spiegelnde Reflexion, wenn die Oberfläche, auf der das Merkmal liegt, unendlichen Abstand zur spiegelnden Oberfläche hat. Das Merkmal erscheint dann unter der gleichen Beleuchtungsrichtung für jeden Punkt auf der Oberfläche.

Die Suche nach einem solchen zweiten Punkt auf der Oberfläche ist ähnlich zu Alhazens Problem, für das es im Allgemeinen keine analytische Lösung gibt. Daher wird eine implizite Funktion $f_\xi : \mathcal{R}^3 \rightarrow \mathcal{R}^3$ eingeführt, die für eine mit dem Parametervektor ξ beschriebene Oberfläche einen solchen Punkt berechnet.

$$f_\xi(\mathbf{c}) = \mathbf{p} \text{ und } f_\xi(\mathbf{c}') = \mathbf{p}' \quad (2.42)$$

Die Approximation dieser Funktion ist analytisch lösbar [CA00] und liefert für kleine Bewegungen eine gute Lösung, also wenn \mathbf{c} nahe \mathbf{c}' liegt.

$$\mathbf{p}' \approx \mathbf{p} + \frac{\partial f_{\xi}(\mathbf{c})}{\partial \mathbf{c}} \cdot (\mathbf{c}' - \mathbf{c}) \quad (2.43)$$

Der optische Fluss für eine kleine Bewegung des Beobachters ergibt sich dann für zwei Bildpunkte $\mathbf{w} = (y_1/y_3, y_2/y_3)^T$ und $\mathbf{w}' = (y'_1/y'_3, y'_2/y'_3)^T$.

$$\mathbf{f}(\mathbf{w}) = \mathbf{w}' - \mathbf{w} \quad (2.44)$$

Die Bildpunkte ergeben sich durch eine Projektion \mathbf{P} bzw. \mathbf{P}' der beiden Reflexionspunkte \mathbf{p} und \mathbf{p}' in die Bildebene des bewegten Beobachters.

$$(y_1, y_2, y_3)^T = \mathbf{P}\mathbf{p} \text{ und } (y'_1, y'_2, y'_3)^T = \mathbf{P}'\mathbf{p}' \quad (2.45)$$

Die grundlegende Idee dieses Ansatzes wird auch in dieser Arbeit verfolgt, mit dem Unterschied, dass nicht der Beobachter bewegt wird, sondern die Form der Oberfläche geändert wird.

Adato, Canas und Vasilyev

Adato, Canas, Vasilyev et al. [Ada+07; Vas+08; Can+09a; Can+09b; Ada+10; AB11; Vas+11] beschreiben den SF $\mathbf{f} = (\dot{x}, \dot{y})^T$ in 3D für eine Beobachtungsrichtung $\mathbf{v} = (0, 0, 1)^T$ mit orthographischer Projektion und der Drehung $\boldsymbol{\omega} = (\dot{\alpha}, \dot{\beta})^T$ einer weit entfernten Umgebung um eine spiegelnde Oberfläche $S = (x, y, h(x, y))$, beschrieben durch die Funktion $h(x, y)$ direkt auf der Bildebene, siehe Abbildung 2.23.

Die Winkel $\alpha(x, y) = 2\theta(x, y)$ und $\beta(x, y) = \phi(x, y)$ geben hier die Richtung der reflektierten Sichtstrahlen auf einen festen Punkt der Umgebung an. Über die Jacobi-Matrix $\mathbf{J} = \frac{\partial(\alpha, \beta)}{\partial(x, y)}$ der an der Oberfläche reflektierten Sichtstrahlen

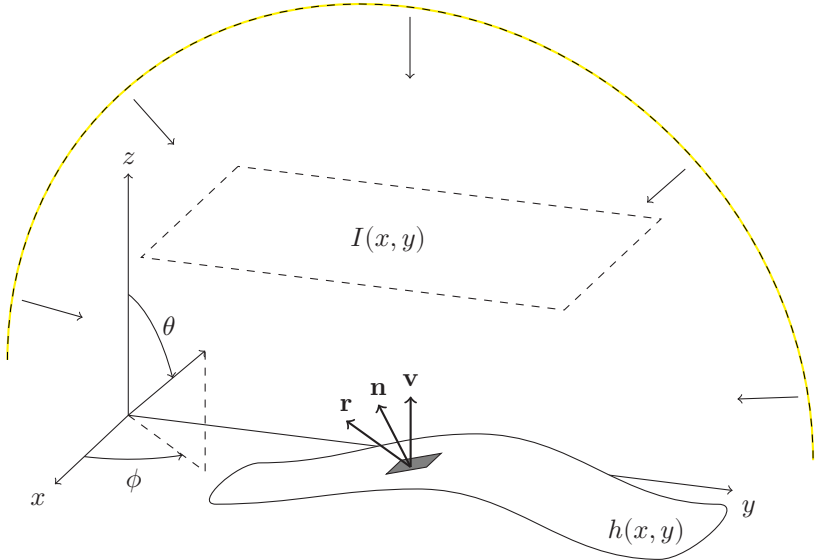


Abbildung 2.23: In der Oberfläche $h(x, y)$ spiegelt sich eine weit entfernte Umgebung, bei der jeder Punkt durch seine Richtung $\alpha(x, y) = 2\theta(x, y)$ und $\beta(x, y) = \phi(x, y)$ eindeutig bestimmt ist. Die Beobachtung erfolgt orthographisch in der Richtung $\mathbf{v}(x, y) = (0, 0, 1)^T$ und erzeugt ein Bild in der Ebene $I(x, y)$. Die Oberflächennormale $\mathbf{n}(x, y)$ stellt den Zusammenhang zwischen der Beobachtungsrichtung und dem reflektierten Umgebungspunkt $\mathbf{r}(x, y) = (\sin \alpha \cos \beta, \sin \alpha \sin \beta, \cos \alpha)^T$ her.

mit $\tan \alpha = \frac{2\|\nabla h\|}{1-\|\nabla h\|^2}$ und $\tan \beta = \frac{h_y}{h_x}$ wird ein Zusammenhang des SF \mathbf{f} mit der Bewegung der Umgebung ω hergestellt.

$$\mathbf{f} = \mathbf{J}^{-1}\omega \quad (2.46)$$

Außerdem geben Adato et al. ein einfaches generatives 2D-Modell für eine Funktion $h(x)$ mit Krümmung $\kappa(x) = \frac{h_{xx}(x)}{(1+h_x^2(x))^{3/2}}$ an.

$$\dot{x} = \frac{-\alpha(x)}{2\kappa(x)\sqrt{1+h_x(x)^2}} \quad (2.47)$$

Angenommen, auf einer ebenen Oberfläche befinde sich eine Delle mit großer Krümmung $\kappa(x)$. Der SF in (2.47) ist im konvexen Bereich der Delle klein, während er auf der ebenen Fläche groß ist, da die Oberflächenkrümmung $\kappa(x)$ klein ist.

Eine ebene Oberfläche wird von Adato et al. nicht explizit berücksichtigt. Die Autoren merken an, dass der SF an Punkten auf der Oberfläche, an denen eine der beiden Hauptkrümmungen einen Nulldurchgang hat, das Vorzeichen wechselt und sich Polstellen ausbilden. Adato et al. gehen von einer orthographischen Projektion aus und argumentieren, dass dieser Fall mit einer in der Praxis auftretenden perspektivischen Projektion kaum relevant ist: Um hier an allen Stellen eine verschwindende Hauptkrümmung zu besitzen, müsste es sich um eine schwach konkav gekrümmte Oberfläche handeln. Was die Delle für Menschen sichtbar macht, ist der SF über dem Bereich der Delle relativ zum SF über einem benachbarten, ungestörten Bereich auf der Oberfläche. Über diesen relativen Unterschied des SF lässt das Modell jedoch keine Aussage zu, da es den Autoren nur um die Rekonstruktion spiegelnder Oberflächen aus dem SF geht. Außerdem bildet das Modell mit der eingeschränkten Annahme über eine gemeinsame Bewegung von Oberfläche und Beobachter (mit orthographischer Projektion) die Realität schlecht ab.

2.6.4 Anwenderstudien

Hsakou [Hsa06] schlägt die Deflektometrie zur Inspektion und Bewertung von Karosserieteilen mit spiegelnden Oberflächen vor. Er bemerkt, dass aufgrund der hohen Winkelauflösung der Deflektometrie ein Abgleich der Messergebnisse (Hsakou schlägt die Krümmung als Merkmal der Sichtbarkeit einer Verformung vor) mit den Bewertungen von Gutachtern nötig sei, um keine Gutteile zurückzuweisen. Er schlägt weitere Merkmale wie Position, Fläche, Amplitude, ... des Defekts vor, gibt aber kein konkretes Maß an, da dieses anwendungsspezifisch sei.

Andersson (Volvo Cars Body Components) [And09] hat untersucht, ob sich die Entstehung von Oberflächenunvollkommenheiten auf Karosserieteilen am Computer simulieren lässt. Da sich die Entscheidung darüber, ob eine Verformung für einen Menschen einen Fehler darstellt, nicht direkt aus den Höhenwerten einer Oberfläche ableiten lasse, sei man bisher von der subjektiven und unzuverlässigen Beurteilung durch Experten abhängig. Zudem müsse man Teile erst extra fertigen, um sie anschließend durch die Experten beurteilen zu lassen. Eine direkte Bewertung der Simulationsergebnisse war laut Andersson nicht möglich. Daher schlägt Andersson ein Maß R basierend auf der Oberflächenkrümmung vor, mit dem sich subjektive Bewertungen ableiten lassen. Die Krümmung approximiert er durch das Verhältnis $S = \text{Tiefe}/\text{Fläche}$ einer Verformung und führt außerdem eine Gewichtung Z ein, die groß für Bereiche ist, auf denen Verformungen besonders gut sichtbar sind.

$$R = S \cdot Z \quad (2.48)$$

Dieses Maß benutzt Andersson zur Visualisierung der Messung, legt allerdings keine Grenzwerte für gerade noch tolerierbare Verformungen fest. Andersson stellt zudem fest, dass typische, deutlich sichtbare Fehler eine Tiefe von $50 \mu\text{m}$ hätten und Fehler mit einer Tiefe von unter $10 \mu\text{m}$ noch sichtbar seien. Außerdem gibt er an, dass das menschliche Auge besonders empfindlich für Verformungen mit einer lateralen Ausdehnung von $30\text{--}50 \text{ mm}$ sei.

Fernholz (Ford Motor Company) [Fer13] hat eine Studie mit jeweils schwarz lackierten und lediglich grundierten Blechen durchgeführt, wobei nur die Ergebnisse mit den schwarz lackierten Blechen ausgewertet werden konnten. Die flachen Bleche mit 228 mm und 254 mm Seitenlänge wurden mit einem Epoxidharz an mehreren Stellen mit einer Trägerstruktur verklebt und bei erhöhter Temperatur ausgehärtet. Durch das Hinterkleben eines Profils entstehen auf der Vorderseite kleine Verformungen. Die Fehler auf den Blechen wurden anschließend von mehreren Gutachtern nach dem Schweregrad sortiert. Anschließend wurden die Oberflächennormalen der Bleche mit einem deflektometrischen

Messsystem erfasst und daraus die Oberflächenkrümmungen berechnet. Vor der Berechnung der Krümmungen wurden die Messdaten zunächst mit einem Bandpassfilter gefiltert, um unerwünschte Welligkeiten und die Oberflächenform in den Daten zu unterdrücken. Fernholz hat vorab die Filtergrößen und dann die Schwellwerte für die sichtbaren Krümmungswerte festgelegt. Sie schreibt aber, dass die Grenzen für den Bandpass starke Auswirkungen auf die Ergebnisse hätten und sich die Wahl der Parameter für den Tiefpassfilter im Verlauf des Projekts als ungeeignet herausgestellt hat. Zusätzlich wurden die Krümmungswerte auf ein Intervall von $(0,0 \pm 0,7) \text{ m}^{-1}$ begrenzt und Bereiche mit unerwünschten Fehlern sowie die Randbereiche maskiert. Aufgrund des Vergleichs der Messergebnisse mit den subjektiven Einschätzungen der Gutachter wurden der Betrag der mittleren Krümmung (gemittelt über den gesamten Bereich einer Verformung) und die Fläche einer Verformung als Einflussgrößen identifiziert und folgendes Maß darauf basierend vorgeschlagen, welches am besten mit den ordinal skalierten Bewertungen der Gutachter übereinstimmt.

$$\text{Bewertung} = (\text{Mittlere Krümmung})^2 \times \text{Fläche} \quad (2.49)$$

Fernholz bemerkt, dass die subjektiven Bewertungen bei solchen Wahrnehmungsstudien immer stark schwankten, die Studien aber die einzige Quelle für Informationen über den Schweregrad bei unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften seien. Sollten beispielsweise fünf oder mehr Fehler nach dem Schweregrad sortiert werden, so gab es Unterschiede in den Sortierungen, außer die Ausprägung der Fehler war so unterschiedlich, dass die Studie ihre Aussagekraft verliert. Abschließend bemerkt Fernholz, dass das Übertragen dieser Methodik auf gekrümmte Bleche zunächst die Unterscheidung von erwünschter und unerwünschter Krümmung voraussetze, was nicht trivial sei.

Kessler und Traue [KT97] vergleichen in einer Studie die Bewertung von Lackunvollkommenheiten durch Gutachter mit den Bewertungen durch Kunden. Dabei hat sich herausgestellt, dass die Bewertungen durch die Kunden kaum mit

denen der Gutachter (EWK-Einteilung) korrelieren, was sie folgendermaßen kommentieren.

Bei beiden Fahrzeugen zeigt sich, dass die Kunden die Lackfehler unabhängig von der EWK-Einteilung überwiegend durch das Urteil „ich würde dies beim nächsten Kundendienst reklamieren“ beurteilen. Das heißt: Sieht ein Kunde einen Fehler, ist die werkseitige Einschätzung der Schwere der Fehler für den Kunden wenig relevant; er bleibt bei seinem Urteil. (Kessler und Traue [KT97])

Auf dieser Erkenntnis beruht auch die grundlegende Annahme dieser Arbeit, dass ein Fehler, der erkannt werden kann, auch schwerwiegend ist. Diese subjektive Bewertung ist weitgehend unabhängig von der Bewertung nach objektiven Maßstäben. Das Kriterium für eine objektive Fehlerbewertung sollte die Wahrscheinlichkeit für das Erkennen sein, nicht die subjektive Meinung eines Einzelnen. Außerdem bemerken Kessler und Traue, dass Fehler auf einer schwarz lackierten Karosserie als schwerwiegender gegenüber den Bewertungen der Gutachter bewertet werden, als auf einer in der „Farbe“ Silber lackierten Karosserie. In der Studie haben Personen, die eine höhere visuelle Intelligenz⁵ besitzen, mehr Fehler entdeckt.

2.6.5 Kratzer

In der Entwicklung neuer polymerer Oberflächen, insbesondere für die Anwendung im Interieur von Automobilen, werden die Oberflächen auf ihre Kratzempfindlichkeit getestet. Diese Kratzer stellen keine funktionalen Fehler dar, sondern sind rein ästhetische. In dem Bereich der Analyse und Bewertung von Beschädigungen polymerer Oberflächen durch Kratzer gibt es verhältnismäßig viele Veröffentlichungen. Im Folgenden werden einige Ansätze vorgestellt.

⁵ Die visuelle Intelligenz wird durch einen „embedded figure test“ bestimmt, bei dem die Zeit erfasst wird, die von einer Person benötigt wird, um ein einfaches Muster in einem komplexen Muster wiederzufinden.

Rangarajan et al. [Ran+03] beschreiben einen optischen Aufbau mit gerichteter Beleuchtung und zwei Kameras, der zur Erfassung des Hell- und Dunkelfelds von Kratzern auf Polymeroberflächen verwendet wird. Aufbauend auf Messungen mit diesem Aufbau haben sie ein empirisches Modell patentiert [Sin+04], das abhängig von der Größe SZ, Farbe C und Lichtstreuung SC eines Kratzers sowie dem Glanz G der unbeschädigten Oberfläche die Sichtbarkeit des Kratzers V mit empirisch ermittelten Konstanten c_0, \dots, c_9 beschreibt.

$$\begin{aligned}\sqrt{V} = & c_0 + c_1 C + c_2 SZ + c_3 G + c_4 SC + c_5 SZ^2 + c_6 C \cdot SZ \\ & + c_7 C \cdot G + c_8 C \cdot SC + c_9 SZ \cdot G\end{aligned}\quad (2.50)$$

Im gleichen Patent [Sin+04] geben die Autoren ein ähnliches Modell für die Sichtbarkeit von Kratzern basierend auf der Tiefe und Breite eines Kratzers an, die mit einem Profilometer gemessen wurden. In einem darauffolgenden, nicht veröffentlichten Schritt wird diese Sichtbarkeit an unterschiedliche Materialien angepasst. Zu keinem der beiden Modelle wurden aber Studienergebnisse veröffentlicht, daher ist eine Beurteilung der Modelle nicht möglich.

Ähnlich dazu schlagen Hutchings et al. [HWP03] eine optische Methode vor, um Sichtbarkeit von Kratzern auf der Oberfläche von schwarzen, spiegelnd reflektierenden Polymeren zu beurteilen. Sie verwenden einen Flachbettscanner zur Erfassung der Oberfläche. Dazu definieren sie ein Maß V_i , das die Kratzer anhand ihres Helligkeitsunterschieds ΔG gegenüber fehlerfreien Bereichen über die gesamte Fläche A bewertet.

$$V_i = \log \int_A \Delta G^{2.5}(x) dx \quad (2.51)$$

In einer Studie mit 20 Teilnehmern wurde der Zusammenhang der ordinal skalierten Bewertung durch die Studienteilnehmer mit dem vorgeschlagenen Maß

V_i untersucht und eine hohe Korrelation festgestellt. Es wurden allerdings keine Oberflächeneigenschaften wie Rauheit oder Farbe der Oberfläche und keine veränderlichen Umgebungsbedingungen betrachtet.

Jiang et al. [Jia+10] beschreiben eine Bewertungsfunktion, die zusätzlich zum Helligkeitsunterschied und der Fläche auch die Form eines Kratzers berücksichtigt. Die Oberfläche wird dabei mit einem Flachbettscanner erfasst. Details und die genaue Definition der Bewertungsfunktion werden nicht veröffentlicht. Im darauffolgenden Jahr ändern die Autoren ihre Bewertungsfunktion und verwenden statt des absoluten Helligkeitsunterschieds den Kontrast [Liu+11] und geben zudem eine Wahrnehmungsgrenze für einen durch den Kratzer hervorgerufenen Kontrast von 3 % an, ohne dies jedoch zu begründen.

Alle Ansätze haben gemein, dass sie ein empirisches Modell basierend auf dem Kontrast als wesentliche Größe für die Sichtbarkeit ableiten. Der Kontrast eines Kratzers wird gegenüber der ungestörten Oberfläche bei einer gerichteten Beleuchtung bestimmt. Dabei wird aufbauend auf einer Studie ein statistischer Zusammenhang der Bewertung durch Studienteilnehmer und den gemessenen Größen aufgestellt. Meist gehen die Autoren davon aus, dass der zur Inspektion verwendete Aufbau die Sichtbarkeit der Kratzer maximiert. Viele Ansätze berücksichtigen den Zusammenhang von Kontrast und Größe eines Kratzers, gehen aber nicht auf die Kontrastempfindlichkeit des menschlichen Auges ein. Keines der Modelle leitet plausible Grenzen für die Sichtbarkeit von Kratzern her. Da die Aufbauten zur Inspektion von Kratzern sehr speziell sind, lassen sich diese Ansätze nicht direkt auf die Wahrnehmung von Verformungen übertragen. Diese sind meist nur bei einer strukturierten Beleuchtung sichtbar.

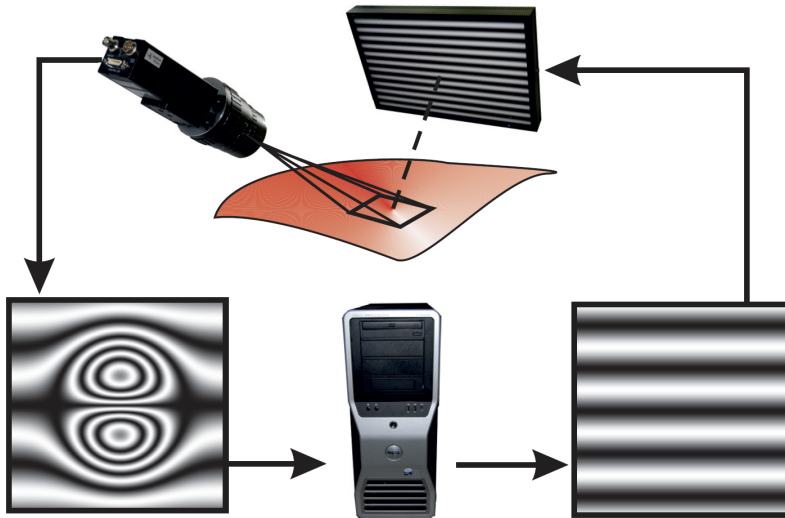


Abbildung 2.24: Das Prinzip der Deflektometrie beruht auf der Auswertung bekannter Muster, die über die spiegelnde Oberfläche reflektiert werden (Abbildung nach [Wer11]).

2.6.6 Messunsicherheit Deflektometrie

Das Prinzip der Deflektometrie [Wer11; Fab12] ähnelt der Art, wie auch Menschen spiegelnde Oberflächen über bildliche Hinweisreize wahrnehmen. Dabei wird die Reflexion eines bekannten Musters ausgewertet, siehe Abbildung 2.24.

Die Winkelauflösung des Menschen ist ungefähr vergleichbar mit der einer Kamera mit einer örtlichen Abtastung von $2,5 \mu\text{m}$ oder 200 Lp mm^{-1} auf dem Sensor und einem entsprechend hochauflösenden Objektiv mit 15 mm Brennweite, siehe Tabelle 2.1. Während der Mensch jedoch nur für Änderungen des reflektierten Musters empfindlich ist, werden in der Deflektometrie die Positionen, von denen das Muster ausgeht, absolut und mit geringer Unsicherheit erfasst. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Deflektometrie kleinere Neigungsunterschiede einer spiegelnden Oberfläche als der Mensch erfassen kann. Dies gilt jedoch nur für vergleichbare Umstände, wie dem Abstand

der Oberfläche zur Umgebung und zum Beobachtungszentrum. Im Folgenden werden einige Ergebnisse aus dem Bereich der Deflektometrie vorgestellt, die diese kleinsten erkennbaren Neigungsunterschiede untersuchen.

Beyerer und Pérard [BP97] zeigen eine deflektometrische Messung von einem sehr glatten, im Karosseriebau auftretenden Fehler (Strakfehler), der ein Verhältnis von Wellenabstand zu Wellentiefe von $1 \cdot 10^4 : 1$ bzw. Gradientenabweichung von $\delta\alpha \approx 3,4'$ auf $\delta x \approx 1$ cm besitzt. Sie bemerken, dass die Fehler trotz ihrer geringen Amplitude für den Menschen noch deutlich sichtbar sind.

Häusler et al. [HHK01] geben eine Unschärferelation für einen deflektometrischen Aufbau mit identischem Kamera- und Schirmabstand sowie einer Fokussierung auf die Oberfläche an. Das Produkt aus Winkelunsicherheit $\delta\alpha$ und lateraler Unsicherheit δx ist begrenzt durch die Beugung an der Aperturblende für Licht mit einer Wellenlänge λ und die Qualität der Phasenkodierung Q .

$$\tan \delta\alpha \cdot \delta x > 4\lambda/Q \quad (2.52)$$

Der Qualitätsparameter $Q < p/\delta l$ wird durch die Phasenunsicherheit der Kodierung δl bei einer Streifenbreite p des Musters begrenzt. Für einen typischen Qualitätsparameter $Q \approx 100$ und $\lambda = 500$ nm geben sie die theoretische Messunsicherheit $\delta\alpha > 4''$ und $\delta x > 1$ mm an. Diese entspricht einem gerade noch messbaren Höhenunterschied von 20 nm und liegt damit deutlich unterhalb der sichtbaren Höhenunterschiede auf diffus reflektierenden Oberflächen.

2.7 Zusammenfassung

Am Anfang dieses Kapitels wurden Normen vorgestellt, die zur Bewertung bearbeiteter und lackierter Oberflächen dienen. Sie werden in der Praxis verwendet, um funktionale und teilweise auch ästhetische Anforderungen an Oberflächen

zu definieren. Die Normen definieren die für diese Arbeit wesentlichen Begriffe und Größen. Jedoch liefert keine der Normen Größen zur Beschreibung der ästhetischen Anforderungen an spiegelnde Oberflächen.

Anschließend wurden die radiometrischen Größen und der Lichttransport in Abschnitt 2.3 eingeführt. Außerdem wurden der Kontrast und die Kontrastübertragung zur Beschreibung der Abbildung von Mustern über teilspiegelnde Oberflächen definiert.

In Abschnitt 2.4 wurde der Aufbau und die Funktionsweise des Auges beschrieben, mit dem einer Kamera verglichen und wesentliche Kenngrößen zur Beschreibung des Auges eingeführt. Schließlich wurde die visuelle Wahrnehmung von Tiefe für diffus reflektierende Oberflächen in Abschnitt 2.5 behandelt. Dazu verwendet der Mensch mehrere relativ einfache Hinweisreize, die gemeinsam zu einer Tiefenwahrnehmung führen.

Im Gegensatz zu den Hinweisreizen auf diffus reflektierenden Oberflächen sind die Hinweisreize auf spiegelnden Oberflächen oft mehrdeutig und schwer zu interpretieren. Allerdings sind diese auch wesentlich empfindlicher für kleine Änderungen der Oberfläche. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass das Wahrnehmungssystem des Menschen keine aufwendige Rekonstruktion der Oberfläche macht, da es die physikalischen Gesetze der Spiegelung nicht kennt. In Abschnitt 2.6 wurden Wahrnehmungsmodelle vorgestellt, die eine Tiefenwahrnehmung auf spiegelnden Oberflächen erklären. Dabei hat sich herausgestellt, dass nur noch die bildlichen Hinweisreize, allen voran der Texturgradient und der SF, also bewegte bildliche Hinweisreize, für die Tiefenwahrnehmung auf spiegelnden Oberflächen nützlich sind. Gerade die Stereopsis, die sonst sehr robuste und genaue Tiefenschätzungen erlaubt, ist auf spiegelnden Oberflächen oft unbrauchbar. Bei der Betrachtung spiegelnder Oberflächen in der Form eines Paraboloiden entstehen keine realen Bilder der Umgebung. In der Nähe dieser Kaustiken treten sehr große Texturgradienten bzw. ein großer spekularer Fluss auf. Keines der vorgestellten Modelle beschäftigt sich dabei mit der Fragestellung, welche Formabweichungen gerade noch sichtbar sind.

Die in Abschnitt 2.6.4 vorgestellten Anwenderstudien zur Wahrnehmung von Fehlern auf spiegelnden Oberflächen haben ergeben, dass eine Bewertung der „Schwere“ eines Fehlers kaum möglich ist und letztendlich jeder sichtbare Fehler schwerwiegend ist. Daher haben die vielen Versuche ein empirisches Maß für die Sichtbarkeit einer Verformung aus deren Krümmung abzuleiten bisher nicht zu überzeugenden Ergebnissen geführt. Auch für die Beschreibung der Sichtbarkeit von Kratzern gibt es eine Reihe von empirischen Modellen, die den Kontrast und die sichtbare Größe des Kratzers auf der Oberfläche verwenden.

Zur Erfassung von Verformungen auf spiegelnden Oberflächen ist die Deflektometrie gut geeignet, da ihre Empfindlichkeit mindestens der Empfindlichkeit eines Menschen entspricht. Eine direkte Bewertung der Sichtbarkeit einer Verformung aufgrund einer deflektometrischen Messungen ist jedoch bisher nicht möglich.

3 Modelle zur Wahrnehmung spiegelnder Oberflächen

Die Wahrnehmung des Menschen ist ein komplexer Prozess, der sich nur unzureichend beobachten und quantifizieren lässt. Daher basieren Theorien zur Wahrnehmung auf Modellen, die Bestandteile dieses Prozesses vereinfachen und diese dann anhand von Experimenten validieren. In diesem Kapitel werden neue Modelle zur Tiefenwahrnehmung erster und zweiter Ordnung, also zur Wahrnehmung von Neigung und Krümmung spiegelnder Oberflächen vorgestellt.

Neben der geometrischen Betrachtung der Formabweichungen beeinflussen auch das abgebildete Muster und statistische Eigenschaften der Oberfläche die Sichtbarkeit von Formabweichungen. So können beispielsweise Defekte auf spiegelnden Oberflächen erst dann erkannt werden, wenn die Umgebung kontrastreich und ausreichend strukturiert über die Oberfläche zum Beobachter reflektiert wird. Dagegen werden Verformungen der Oberfläche in einem einfarbig gestrichenen Raum ohne jegliche Texturierung und mit schattenfreier Beleuchtung nahezu unsichtbar. Im ersten Abschnitt 3.1 wird ein Modell zur Beschreibung der Kontrastübertragung von Umgebungsmustern zum Beobachter über die Oberfläche vorgestellt.

Während die Kontrastübertragung von der Rauheit der Oberfläche abhängt, verzerren Welligkeiten wie beispielsweise der Orangenschaleneffekt auf der Oberfläche die reflektierten Muster und kaschieren damit kleine Formabweichungen, die sich nicht deutlich von der Welligkeit unterscheiden. Die Auswirkungen von Rauheit und Welligkeit sind abhängig vom Abstand des Beobachters zur Ober-

fläche. In Abschnitt 3.2 werden zwei Modelle zur Beschreibung der Statistik der Welligkeit vorgestellt.

Anschließend werden zwei Modelle vorgestellt, die die Sichtbarkeit kleiner Verformungen auf spiegelnden Oberflächen beschreiben. Zunächst wird mit dem Elementarspiegelmodell ein Modell betrachtet, das die kleinsten sichtbaren Neigungsunterschiede approximiert, also die Tiefenwahrnehmung 1. Ordnung. Anschließend wird ein Modell vorgestellt, das den durch eine Verformung gegenüber einer Bezugsoberfläche hervorgerufenen SF approximiert. Dieses Modell beschreibt die Tiefenwahrnehmung 2. Ordnung, da es zusätzlich Oberflächenkrümmungen berücksichtigt.

3.1 Oberflächenrauheiten

Verformungen einer spiegelnden Oberfläche werden über sichtbare Abweichungen eines reflektierten Musters wahrgenommen; siehe Abschnitt 2.6.1. Mit zunehmender Oberflächenrauheit wird das Muster an der Oberfläche nicht spiegelnd, sondern zunehmend diffus gestreut. Ein Muster der Umgebung muss nach der Reflexion an der Oberfläche noch ausreichend Kontrast besitzen, damit kleine Änderungen des Musters sichtbar sind. In Kapitel 2 wurde zwischen der Sichtbarkeit (Definition 2.44) und der Unterscheidbarkeit (Definition 2.45) getrennt, die zu unterschiedlichen Winkelauflösungen für gerade noch erkennbare Abweichungen führen. Erst die CSF (Definition 2.46) vereinheitlicht beide Definitionen, indem sie sowohl die Winkelgröße als auch den Helligkeitsunterschied einer Änderung berücksichtigt. In diesem Abschnitt wird ein Modell vorgestellt, mit dem die Reflexionseigenschaften einer Oberfläche mithilfe der Kontrastübertragung beschrieben und daraus die Winkelauflösung eines reflektierten Musters berechnet wird.

In Abbildung 3.1 ist schematisch dargestellt, wie ein Schirmmuster über eine spiegelnde Oberfläche auf die Netzhaut des Auges abgebildet wird.

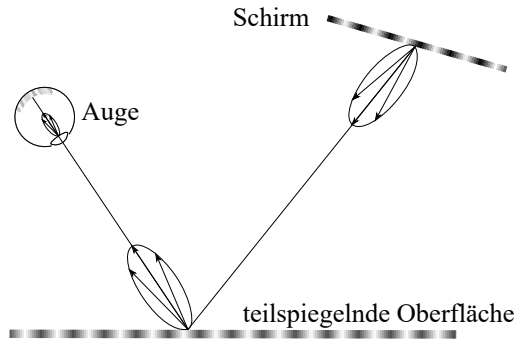


Abbildung 3.1: Kontrastübertragung des Schirmmusters über eine teilspiegelnde Oberfläche. Durch Streuung am Schirm, auf der Oberfläche und im Auge überlagern sich benachbarte Punkte und führen zu einem verringerten Kontrast des abgebildeten Schirmmusters.

Die gesamte Abbildung des Musters über die Oberfläche wird mithilfe der MTF, wie in Abschnitt 2.3.3 beschrieben, modelliert. Da die CSF bereits die Kontrastübertragung durch die abbildenden Teile des Auges berücksichtigt, kann diese hier vernachlässigt werden.

$$c_{\text{img}}(k_{\text{img}}) = c_{\text{scr}}(k_{\text{img}}) \cdot f_{\text{MTF.srf}}(k_{\text{img}}) \quad (3.1)$$

Die höchste auflösbare Ortsfrequenz ergibt sich durch den Schnittpunkt des wahrgenommenen Musterkontrastes $c_{\text{img}}(k_{\text{img}})$ mit der CSF $f_{\text{CSF}}(k_{\text{img}})$ aus Gleichung (2.31).

$$k_{\text{eye.max}} = \underset{k_{\text{img}}}{\text{argmax}} \{c_{\text{img}}(k_{\text{img}}) \geq f_{\text{CSF}}(k_{\text{img}})\} \quad (3.2)$$

Nach Gleichung (2.30) ist die Winkelauflösung θ_{eye} der Kehrwert der höchsten auflösbaren Ortsfrequenz des Musters im Auge $k_{\text{eye.max}}$.

$$\theta_{\text{eye}} \geq \frac{1}{k_{\text{eye.max}}} \quad (3.3)$$

Durch die Abbildung des Schirmmusters auf die Netzhaut ändert sich die Ortsfrequenz des Musters. Der Zusammenhang der beiden Ortsfrequenzen lässt sich über den Abbildungsmaßstab β_{mag} beschreiben.

$$k_{\text{img}} = \frac{k_{\text{scr}}}{\beta_{\text{mag}}} \quad (3.4)$$

Da zwischen dem Muster in der Umgebung und dem Auge noch die beliebig geformte spiegelnde Oberfläche die Abbildung beeinflusst, ist es im Allgemeinen schwierig diesen Abbildungsmaßstab für jeden Punkt anzugeben.

3.2 Oberflächenwelligkeiten

Im Gegensatz zur Rauheit lässt sich die Struktur der Welligkeit gerade noch auf der Oberfläche erkennen. Für einen normalsichtigen Beobachter mit einem Abstand von 1 m zur Oberfläche entspricht das beispielsweise einer Strukturgröße von mindestens 0,29 mm; siehe Abschnitt 2.4.5. Da es sich bei der Oberflächenstruktur um wiederholt auftretende Abweichungen der Oberflächentopographie handelt, werden diese jedoch nicht als lokale Oberflächenunvollkommenheiten wahrgenommen. Ein häufiges Erscheinungsbild auf beschichteten Oberflächen ist der Orangenschaleneffekt; siehe Abschnitt 2.2.5. In Abbildung 3.2 ist der Orangenschaleneffekt bei Betrachtung eines Streifenmusters dargestellt. Die Ausprägung des Orangenschaleneffekts ändert sich dabei graduell von links nach rechts. In Abbildung 3.3 sind die Gradienten zweier Oberflächen mit unterschiedlich ausgeprägtem Orangenschaleneffekt in Spaltenrichtung dargestellt.

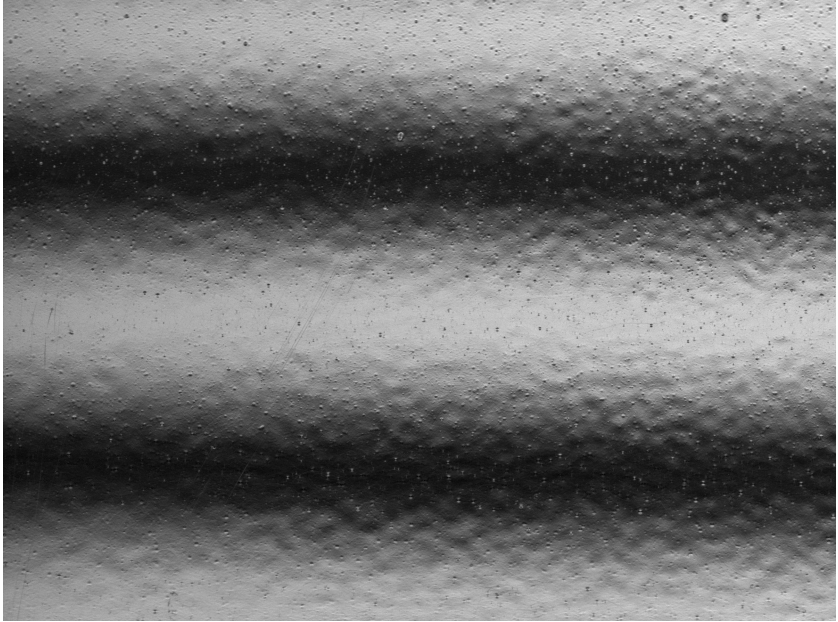


Abbildung 3.2: Visueller Eindruck einer Oberfläche mit gradueller Änderung der Ausprägung des Orangenschaleneffekts von links nach rechts bei Spiegelung eines Streifenmusters.

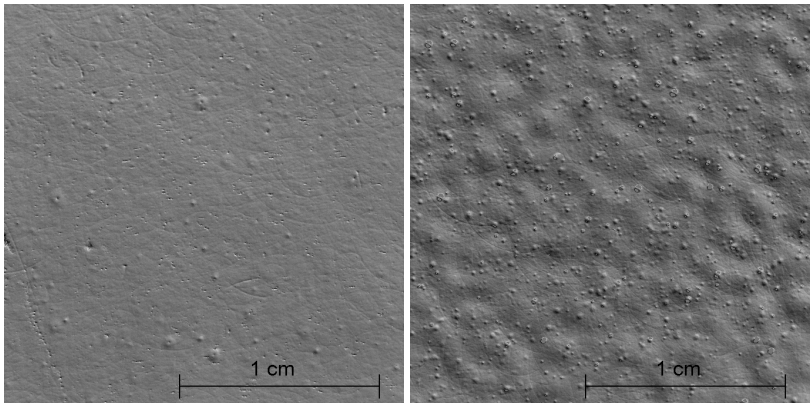


Abbildung 3.3: Qualitative Darstellung der Gradienten einer Oberfläche in Spaltenrichtung mit schwach (links) und stark (rechts) ausgeprägtem Orangenschaleneffekt.

Je nach Qualitätsanspruch des Herstellers stellt zwar auch ein zu stark ausgeprägter Orangenschaleneffekt einen Mangel dar, gleichzeitig dient er jedoch dazu, kleinere Oberflächenunvollkommenheiten zu kaschieren. In diesem Abschnitt werden Ansätze vorgestellt, mit denen beschrieben werden kann, bis zu welcher Ausprägung kleine Verformungen durch den Orangenschaleneffekt kaschiert werden.

Nach Definition 1.1 sind kleine Verformungen sichtbar, wenn sie gegenüber einer fehlerfreien Oberfläche zu einer sichtbaren Änderung des Spiegelbilds führen. Das Spiegelbild einer Oberfläche mit Orangenschaleneffekt weist jedoch bereits für eine fehlerfreie Oberfläche zufällige Verzerrungen des Umgebungsmusters auf. Daher muss eine Bezugsoberfläche definiert werden, die ähnliche stochastische Eigenschaften wie reale Oberflächen aufweist, also bei deren Betrachtung das Spiegelbild ähnliche stochastische Eigenschaften besitzt. Verformungen sind erst dann sichtbar, wenn sie gegenüber dieser (aufgrund ihrer stochastischen Eigenschaften beschriebenen) Bezugsoberfläche sichtbar werden.

Dazu werden drei Ansätze untersucht. In Abschnitt 3.2.1 wird die Bezugsoberfläche über die stochastischen Eigenschaften der Normalenabweichungen beschrieben. In Abschnitt 3.2.2 wird die Welligkeit der Oberfläche als additive Überlagerung von lokalen Verformungen betrachtet. Für die lokalen Verformungen wird dabei das gleiche parametrische Modell wie zur Beschreibung von sichtbaren Verformungen der Oberfläche in Abschnitt 3.3.4 verwendet. Somit kann anhand der Verteilung der Parameter direkt zwischen stochastischen Verformungen der Oberfläche durch die Welligkeit und sichtbaren Verformungen unterschieden werden. Für die Sichtbarkeit kleiner Verformungen bedeutet dies, dass diese als unsichtbar markiert werden, wenn sie den stochastisch auftretenden Verformungen im Parameterraum des Modells entsprechen. In Abschnitt 3.2.3 wird ein in der Industrie häufig eingesetztes Maß beschrieben, welches den Orangenschaleneffekt einer beschichteten Oberfläche über sechs Kennwerte beschreibt und in Abschnitt 4.3.3 zur einfachen Synthese von Welligkeiten verwendet wird.

3.2.1 Unsichtbare Normalenabweichungen

Eine Oberflächenunvollkommenheit dargestellt durch eine explizite Funktion $z = h'(x, y)$ ist unsichtbar, solange die maximale Normalenabweichung $\alpha_{h'}$ kleiner ist als eine Normalenabweichung α_o der Bezugsoberfläche mit Welligkeit¹ dargestellt durch die explizite Funktion $z = o(x, y)$.

$$\exists \alpha_o : \max \alpha_{h'} \leq \alpha_o \quad (3.5)$$

Die Normalenabweichungen $\alpha_{h'}$ einer Verformung werden gegenüber der Flächennormalen der Bezugsfläche, hier der Normalenvektor $\mathbf{n}_h = (0, 0, 1)^\top$, über das Skalarprodukt berechnet.

$$\alpha_{h'} = \arccos(\mathbf{n}_{h'}^\top \mathbf{n}_h) \quad (3.6)$$

Die Oberflächennormale $\mathbf{n}_{h'}$ steht senkrecht auf der Tangentialebene, die sich aus den beiden Richtungsableitungen $h'_x = \frac{\partial h'}{\partial x}$ und $h'_y = \frac{\partial h'}{\partial y}$ ergibt.

$$\mathbf{n}_{h'} = \frac{(-h'_x, -h'_y, 1)^\top}{\|(-h'_x, -h'_y, 1)\|} \quad (3.7)$$

Setzt man die Oberflächennormale in Gleichung (3.6) ein und diese anschließend in Gleichung (3.5), so erhält man die Bedingung für die Unsichtbarkeit der Oberflächenunvollkommenheit in Abhängigkeit der beiden Richtungsableitungen.

$$\exists \alpha_o : \alpha_o \geq \max \alpha_{h'} = \max \arccos \left(\frac{1}{\sqrt{1 + h_x'^2 + h_y'^2}} \right) \quad (3.8)$$

¹ In Abschnitt 3.4.2 wird eine Bezugsfläche ohne Welligkeit als $z_o = h(x, y)$ definiert. Zur Unterscheidung von der Bezugsfläche wird die Oberfläche mit Unvollkommenheit als h' bezeichnet.

Im Folgenden wird diese Ungleichung für das in Abschnitt 3.4.5 beschriebene Defektmodell, also einer gaußförmigen, rotationssymmetrischen Verformung, berechnet. Aufgrund der Rotationssymmetrie reicht es aus nur eine Gradientenrichtung zu betrachten.

$$\exists \alpha_o : \alpha_o \geq \max \arccos \left(\frac{1}{\sqrt{1 + h'_x{}^2}} \right) \quad (3.9)$$

$$\implies \exists \alpha_o : \max h'_x{}^2 \leq \tan(\alpha_o)^2 \quad (3.10)$$

Für eine gaußförmige Verformung $h'(x, y) = ae^{-\frac{x^2}{r^2}}$ befindet sich der maximale Gradient an der Stelle $x = \pm r$ und besitzt folgenden Wert.

$$\max h'_x{}^2 = \frac{a^2}{er^2} \quad (3.11)$$

Eingesetzt in Gleichung (3.10) liefert das die Bedingung für die maximale Ausprägung einer gaußförmigen Verformung, die gerade noch unsichtbar ist.

$$\exists \alpha_o : a^2 \leq er^2 \tan(\alpha_o)^2 \quad (3.12)$$

Schätzung der Normalenabweichung

In diesem Abschnitt wird untersucht, wie sich die maximale Normalenabweichung aus der Statistik der Normalenabweichungen bestimmen lässt. Eine Normalenabweichung der Bezugsoberfläche α_o , verursacht durch eine Welligkeit der Oberfläche, wird relativ zur Flächennormale der Bezugsoberfläche $\mathbf{n}_h = (0, 0, 1)^T$ über das Skalarprodukt berechnet.

$$\alpha_o = \arccos(\mathbf{n}_o^T \mathbf{n}_h) \quad (3.13)$$

Dafür muss die Form der Bezugsoberfläche innerhalb des Messbereichs annähernd plan sein. Falls die mittlere Flächennormale der Bezugsoberfläche von \mathbf{n}_h abweicht, kann eine Ausgleichsfläche geschätzt und von der Messung abgezogen werden. Im Anhang ist Algorithmus 4 angegeben, der zur robusten Schätzung einer Ausgleichsebene verwendet wurde. Die Oberflächennormale \mathbf{n}_o ergibt sich aus den beiden Richtungsableitungen $o_x = \frac{\partial o}{\partial x}$ und $o_y = \frac{\partial o}{\partial y}$.

$$\mathbf{n}_o = \frac{(-o_x, -o_y, 1)^T}{\|(-o_x, -o_y, 1)\|} \quad (3.14)$$

Eine wichtige Voraussetzung für die Berechnung der Kenngrößen der Welligkeit ist eine skalenbegrenzte Oberfläche $o(x, y)$, die nur die mit dem Orangenschaleneffekt korrespondierende Welligkeit enthält; siehe Abschnitt 2.2.3. Da dieser Effekt auch von externen Einflussgrößen wie dem Betrachtungsabstand abhängt, müsste die skalenbegrenzte Oberfläche je nach späterem Anwendungsszenario berechnet werden. Da die Welligkeit auf lackierten Oberflächen einen begrenzten Wellenlängenbereich besitzt, der vom Entstehungsprozess abhängt, wird im Folgenden der Wellenlängenbereich $\mathcal{L}_o = [0, 1 \text{ mm}, 10 \text{ mm}]$ für die skalenbegrenzte Oberfläche verwendet; siehe Abschnitt 2.2.5. Dazu wird ein lineares Gauß-Oberflächenfilter aus Gleichung (2.1) als S- und L-Filter verwendet, nachdem zunächst eine robuste Ebenenanpassung zur Entfernung von Formanteilen (F-Operator) angewendet wurde; siehe Algorithmus 4 im Anhang. Daher muss die Oberfläche in Abständen $\lambda_{\text{abta\ss}t} < 100 \text{ }\mu\text{m}$ abgetastet werden, um die relevanten Wellenlängen der Oberfläche aus der Messung zu rekonstruieren. Im nächsten Kapitel (Abschnitt 4.2) werden die zur Messung verwendeten Verfahren und ihre Messunsicherheiten genauer untersucht. An dieser Stelle soll es genügen, dass die Messungen eine durch die Sensorauflösung limitierte, laterale Ortsauflösung auf der Oberfläche von $\lambda_{\text{abta\ss}t} = 3,32 \text{ }\mu\text{m}$ besitzen. Die Istoberfläche ist also ausreichend fein abgetastet und vor der Bestimmung der Kenngrößen muss eine skalenbegrenzte Oberfläche berechnet werden. Da jedoch die Oberflächennormalen bestimmt werden sollen, ist weiterhin die vertikale Messunsicherheit relevant. Hier müssen zwei Fälle unterschieden werden. Da

die untersuchten Oberflächen unterschiedliche Rauheiten aufweisen, wurde zur Messung entweder ein konfokaler Sensor für raue Oberflächen mit einer vertikalen Unsicherheit $\sigma_z = 150 \text{ nm}$ oder ein interferometrischer Sensor mit einer vertikalen Unsicherheit von $\sigma_z = 1 \text{ nm}$ verwendet. Damit ergibt sich für den Wellenlängenbereich $\lambda_o \in \mathcal{L}_o$ je nach verwendetem Sensor eine variierende Unsicherheit bei Bestimmung des Oberflächenneigungswinkels $\alpha_o = \arctan\left(\frac{z_o}{\lambda_o}\right)$.

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_z/\lambda_o}{1 + (\sigma_z/\lambda_o)^2}$$

$$\sigma_\alpha = \begin{cases} 0,05\text{--}5,15' & (\text{konfokal}) \\ 0,02\text{--}2'' & (\text{interferometrisch}) \end{cases} \quad (3.15)$$

Die maximale Normalenabweichung verursacht durch die Welligkeit sei die Abweichung $\alpha_{o,\max}$, die mit 99,9% Wahrscheinlichkeit größer ist als alle auftretenden Normalenabweichungen.

$$\alpha_{o,\max} := \min \left\{ \alpha_o \mid F_{\alpha_o}(\alpha_o) \geq 99,9\% \right\}$$

$$= F_{\alpha_o}^{-1}(99,9\%) \quad (3.16)$$

Hierbei ist F_{α_o} die Verteilungsfunktion der Normalenabweichungen und $F_{\alpha_o}^{-1}$ die Quantilfunktion [Bro+01]. Eine Möglichkeit $\alpha_{o,\max}$ zu schätzen ist der direkte Weg über das empirische Quantil der Daten. Alternativ kann eine stetige Verteilungsfunktion F für die Gradienten geschätzt werden und, falls diese streng monoton wachsend ist, daraus direkt die Quantilfunktion F^{-1} berechnet werden. Diese Methode hat den Vorteil, dass deutlich weniger Daten von Normalenabweichungen benötigt werden, um das Quantil zu schätzen. Es genügt daher stichprobenartig kleine Bereiche der Oberfläche mit einem lateral hochauflösenden Verfahren zu vermessen, um eine Aussage der Statistik über große Bereiche

der Oberfläche zu erhalten. Auf Seite 105 werden verschiedene Verteilungsfunktionen für die Approximation der Verteilung der Normalenabweichungen der Welligkeit überprüft.

Schätzung der Normalenabweichungen über die Momente eines stochastischen Prozesses

In diesem Abschnitt wird eine weitere Möglichkeit vorgestellt, die Statistik der Normalenabweichungen zu schätzen. In [Lon57b] werden die Eigenschaften einer Oberfläche untersucht, die durch einen stochastischen Prozess beschrieben wird. Unter anderem wird daraus der Zusammenhang zwischen der Verteilungsfunktion der Normalenabweichungen und den ersten Momenten der Oberfläche abgeleitet.

Die Oberfläche $z_o = o(x, y)$ entstehe durch additive Überlagerung kosinusförmiger Wellen mit Amplitude a_i , den Ortsfrequenzen $k_{x,i}$ und $k_{y,i}$, sowie der Phasenverschiebung ϕ_i .

$$o(x, y) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i \cos(k_{x,i}x + k_{y,i}y + \phi_i) \quad (3.17)$$

Für die Phasenverschiebung ϕ_i wird eine Gleichverteilung über das Intervall $[0, 2\pi)$ angenommen. Die Ortsfrequenzen $k_{x,i}$ und $k_{y,i}$ seien dicht verteilt über die k_x - k_y -Ebene, das heißt in jedem Flächenelement $dk_x dk_y$ befinden sich unendlich viele Ortsfrequenzen $k_{x,i}$ und $k_{y,i}$. Das Leistungsdichtespektrum kann über den Grenzwert der Fourier-Transformation von $o_{X,Y}(x, y) = o(x, y)$ für $\|x\| < X$, $\|y\| < Y$ und $o_{X,Y}(x, y) = 0$ sonst, berechnet werden.

$$f_{\text{LDS}}(k_x, k_y) = \lim_{X, Y \rightarrow \infty} \frac{1}{4XY} \|\mathcal{F}\{o_{X,Y}\}(k_x, k_y)\|^2 \quad (3.18)$$

Die mittlere Leistung von $o(x, y)$, die Amplituden a_i und das Leistungsdichtespektrum f_{LDS} der Oberfläche stehen wie folgt im Zusammenhang.

$$\begin{aligned}
 \lim_{X,Y \rightarrow \infty} \frac{1}{4XY} \int_{-X}^X \int_{-Y}^Y o(x,y)^2 dx dy \\
 &= \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{2} a_i^2 \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_{\text{LDS}}(k_x, k_y) dk_x dk_y \quad (3.19)
 \end{aligned}$$

Die Momente $m_{p,q}$ des Zufallsprozesses seien ebenfalls über das Leistungsdichtespektrum definiert.

$$m_{p,q} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_{\text{LDS}}(k_x, k_y) k_x^p k_y^q dk_x dk_y \quad (3.20)$$

Die Momente $m_{0,0}, m_{1,1}, m_{2,0}, m_{0,2}$ können aus den Ableitungen der Oberfläche berechnet werden. Da der Prozess zudem ergodisch ist, ergeben sich die Momente über eine örtliche Mittelung.

$$m_{0,0} = \overline{o^2}, \quad m_{2,0} = \overline{o_x^2}, \quad m_{0,2} = \overline{o_y^2}, \quad m_{1,1} = \overline{o_x o_y} \quad (3.21)$$

Beispielsweise berechnet sich $\overline{o_x^2}$ wie folgt.

$$\overline{o_x^2} = \lim_{X,Y \rightarrow \infty} \frac{1}{4XY} \int_{-X}^X \int_{-Y}^Y \left(\frac{\partial o(x,y)}{\partial x} \right)^2 dx dy \quad (3.22)$$

Betrachtet man die Normalenabweichungen α_o über alle Richtungen, ergibt sich nach [Lon57b] die Wahrscheinlichkeitsdichte als Produkt der Wahrschein-

lichkeitsdichte einer Rayleigh-Verteilung und einer Besselfunktion 0. Ordnung

$$I_0(z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\{-z \sin \psi\} d\psi, \text{ wobei } \Delta_2 = m_{2,0}m_{0,2} - m_{1,1}^2.$$

$$p(\alpha_o) = \frac{\alpha_o}{\sqrt{\Delta_2}} \exp\left\{-\frac{\alpha_o^2(m_{2,0} + m_{0,2})}{4\Delta_2}\right\} I_0\left(\frac{\alpha_o^2(m_{2,0} - m_{0,2})}{4\Delta_2}\right) \quad (3.23)$$

Substituiert man mit $\eta = \alpha_o/\sqrt{m_{2,0} + m_{0,2}}$ und $\gamma = 1/\sqrt{m_{2,0}/m_{0,2}}$ so erhält man nach [Lon57b] eine Wahrscheinlichkeitsdichte über η .

$$p(\eta) = \eta(\gamma + \gamma^{-1}) \exp\left\{-\frac{\eta^2(\gamma + \gamma^{-1})^2}{4}\right\} I_0\left(\frac{\eta^2(\gamma^{-2} - \gamma^2)}{4}\right) \quad (3.24)$$

Longuet-Higgins bezeichnet η als relative Normalenabweichung und γ als Kammlänge, da es die Vorzugsrichtung der Wellen beschreibt. Für Oberflächen mit einer kurzen Kammlänge ($\gamma = 1$), das heißt einer Anisotropie der Normalenabweichungen, entfällt die Besselfunktion und man erhält die Wahrscheinlichkeitsdichte einer Rayleigh-Verteilung der relativen Normalenabweichung.

$$p(\eta) = 2\eta \exp\{-\eta^2\} \quad (3.25)$$

Überprüfung der Verteilung

In diesem Abschnitt wird überprüft, ob sich die Statistik der gemessenen Welligkeiten auf den Testblechen, die jeweils einen unterschiedlich stark ausgeprägten Orangenhauteffekt zeigen, tatsächlich durch die in Gleichung (3.24) angegebene Wahrscheinlichkeitsdichte beschreiben lässt. Dazu wurden die Verteilungsparameter mit der Maximum-Likelihood-Methode aufgrund der Statistik der Testdaten für die lackierten Stahlbleche 60 GU, 70 GU, 80 GU und 95 GU ge-

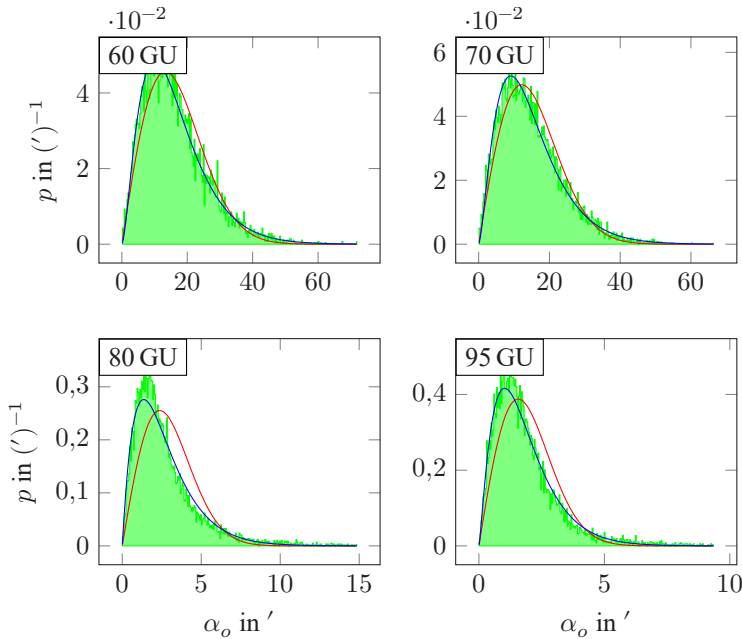


Abbildung 3.4: Histogramme der relativen Häufigkeiten (grün), geschätzte Wahrscheinlichkeitsdichten der Normalenabweichungen α_o unter Annahme einer χ^2 -Verteilung (blau) und einer Bessel-Rayleigh-Verteilung (rot) aus Gleichung (3.24).

schätzt; siehe Abschnitt 4.1.2. Zusätzlich zu der in Gleichung (3.23) definierten Verteilungsdichte wurde eine χ^2 -Verteilung für die Normalenabweichungen geschätzt, da sich diese in ersten Experimenten als geeignet erwiesen hat. In Abbildung 3.4 ist der Vergleich des Histogramms und der geschätzten Wahrscheinlichkeitsdichte dargestellt. In Abbildung 3.5 sind die empirischen gegen die geschätzten Quantile der Verteilungsfunktionen in einem Quantil-Quantil-Diagramm² dargestellt.

² Zu jeder Beobachtung x_i wird das empirische Quantil F_e berechnet und in die Inverse der geschätzten Verteilungsfunktion F^{-1} eingesetzt. Dargestellt wird das theoretische Quantil $y_i = F^{-1}(F_e(x_i))$ gegen das empirische Quantil x_i . Bei Übereinstimmung der Verteilungen liegen die Punkte auf einer Diagonalen mit Steigung 1.

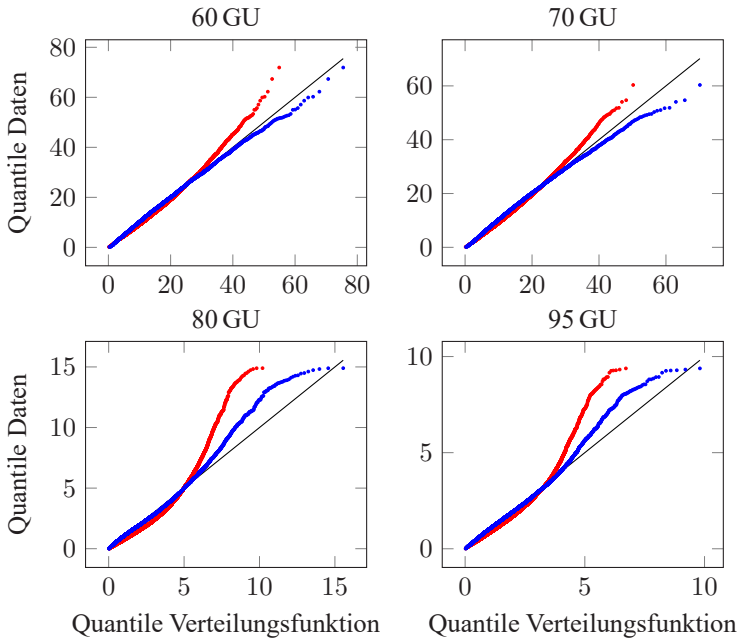


Abbildung 3.5: Quantil-Quantil-Diagramm, welches den Zusammenhang der Quantile der geschätzten Wahrscheinlichkeitsdichte für die χ^2 -Verteilung (blau) und die Bessel-Rayleigh-Verteilung (rot) mit den empirischen Quantilen der Normalenabweichungen α_o darstellt. Stimmt die geschätzte Wahrscheinlichkeitsdichte mit der Verteilung der Daten überein, liegen alle Punkte auf der schwarzen Linie.

Es ist zu sehen, dass beide Verteilungsfunktionen die relativen Häufigkeiten der Gradienten gut approximieren, wobei die χ^2 -Verteilung die Daten insbesondere auf den Blechen 80 GU und 95 GU besser approximiert. Die Frage bleibt bestehen, ob sich die Verteilungsfunktion auch direkt aus den Momenten der Oberflächenhöhenwerte, wie in Gleichung (3.23), ableiten lässt. Die Histogramme der Welligkeitsamplitude z_o für die Oberflächen 60 GU, 70 GU, 80 GU und 95 GU sind in Abbildung 3.6 dargestellt.

Um die Momente aus quantisierten Daten zu berechnen, muss das Quantisierungstheorem eingehalten werden und eine Sheppard-Korrektur von empirisch

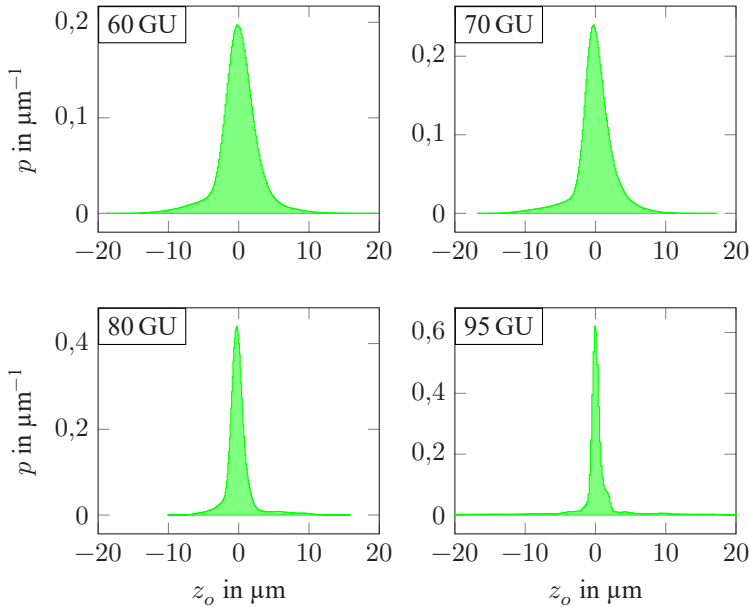


Abbildung 3.6: Histogramme der Welligkeitsamplitude.

berechneten Momenten höherer Ordnung vorgenommen werden; siehe [BPF12]. Das Quantisierungstheorem ist erfüllt, wenn die charakteristische Funktion $\Gamma_o = \mathcal{F}^{-1}\{p(z_o)\}$ bandbegrenzt mit $\frac{\overline{m}}{2} + \epsilon < \frac{1}{\sigma_z}$ für ein $\epsilon > 0$ ist.

$$\Gamma_o(k) = 0 \text{ für } |k| > \frac{\overline{m}}{2} \quad (3.26)$$

In Abbildung 3.7 ist die charakteristische Funktion dargestellt, aus der man $\frac{\overline{m}}{2} < 1 \mu\text{m}^{-1}$ ablesen kann. Für die vertikalen Unsicherheiten $\frac{1}{\sigma_z} = \frac{1}{150\text{nm}} \approx 6,6 \mu\text{m}^{-1}$ auf den rauen Oberflächen und $\frac{1}{\sigma_z} = \frac{1}{1\text{nm}} \approx 1 \cdot 10^3 \mu\text{m}^{-1}$ auf den glatteren Oberflächen ist das Quantisierungstheorem somit erfüllt. In Abbildung 3.8 ist der Vergleich des Histogramms mit der Wahrscheinlichkeitsdichte nach Gleichung (3.23) dargestellt.

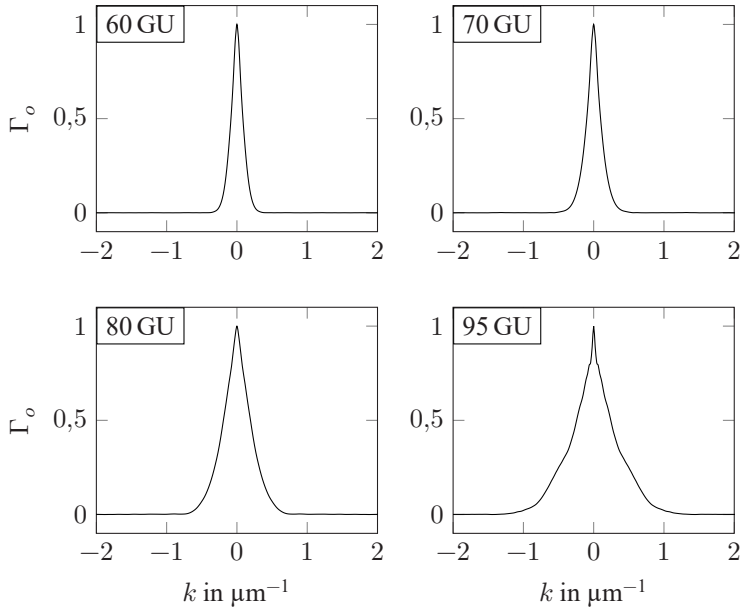


Abbildung 3.7: Die (normierte) charakteristische Funktion Γ_o der Oberflächenwelligkeit ist bandbegrenzt. Somit wird das Quantisierungstheorem eingehalten.

Die gute Übereinstimmung der Wahrscheinlichkeitsdichte aus Gleichung (3.23) mit den Histogrammen für 60 GU und 70 GU zeigt, dass die Statistik über die Normalenabweichungen auch direkt aus den ersten beiden Momenten der Oberflächenwelligkeit z_o geschätzt werden kann. Erst für die beiden Oberflächen mit sehr geringer Welligkeit 80 GU und 95 GU weichen die Schätzungen von den Histogrammen ab.

3.2.2 Welligkeit als additive Überlagerung von lokalen Verformungen

In diesem Abschnitt wird die Welligkeit der Oberfläche als additive Überlagerung von lokalen Verformungen betrachtet. Die lokalen Verformungen entspre-

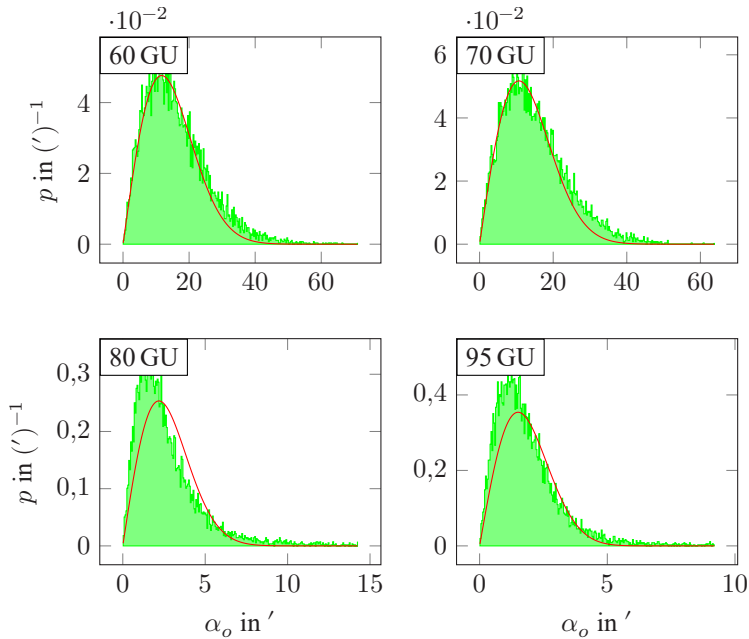


Abbildung 3.8: Empirische Wahrscheinlichkeitsdichte der Normalenabweichung α_o in grün und die aufgrund der Momente geschätzte Wahrscheinlichkeitsdichte der Normalenabweichungen in rot.

chen dabei dem später in Gleichung (3.68) verwendeten gaußförmigen Modell für sichtbare Formabweichungen. Die zugrunde liegende Idee ist es, lokale Formabweichungen, die von der Welligkeit nicht unterscheidbar sind, direkt im Parameterraum des SF-Modells als unsichtbar zu maskieren. Eine lokale Formabweichung wird durch die Funktion $h'(\mathbf{x})$ mit den Parametern Ort $\boldsymbol{\mu} \in \mathcal{R}^2$, Breite $r \in \mathcal{R}$ und Höhe $a \in \mathcal{R}$ beschrieben.

$$h'(\mathbf{x}|\boldsymbol{\mu}, a, r) = a \exp \left\{ -\frac{(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})}{r^2} \right\} \quad (3.27)$$

Die Welligkeit der Oberfläche entsteht als additive Überlagerung dieser Verformungen, deren Parameter einem unbekanntem stochastischen Prozess unterliegen.

Sind die Mengen der Parameter $\mathcal{A} = \{a_1, \dots, a_n\}$, $\mathcal{M} = \{\mu_1, \dots, \mu_n\}$ und $\mathcal{B} = \{r_1, \dots, r_n\}$ einer Musterfunktion bekannt, können diese zur Synthese einer ähnlichen Oberfläche mit Welligkeit verwendet werden.

$$o(\mathbf{x}|\mathcal{M}, \mathcal{A}, \mathcal{B}) = \sum_{i=1}^n h'(\mathbf{x}|\mathcal{M}_i, \mathcal{A}_i, \mathcal{B}_i) \quad (3.28)$$

Im nächsten Abschnitt wird ein Algorithmus zur Analyse der Welligkeit auf Basis dieser Oberflächenbeschreibung vorgestellt, indem die Mengen der Parameter \mathcal{A} , \mathcal{M} und \mathcal{B} für eine reale Oberfläche geschätzt werden. Auf Seite 115 wird dann die Verteilung über die berechneten Parameter untersucht.

Analyse der Welligkeit

Die Statistik über die Parameter, die die Welligkeit einer realen Oberfläche durch die Linearkombination in Gleichung (3.28) approximiert, wird anhand von Parametermengen geschätzt. Die Mengen der Parameter \mathcal{A} , \mathcal{M} und \mathcal{B} werden dazu über einen Messbereich $\mathbf{x} \in \mathcal{U}^2 \subset \mathcal{R}^2$ durch einen iterativen Algorithmus berechnet. Dazu wird zunächst von vier Oberflächen mit unterschiedlich stark ausgeprägtem Orangenschaleneffekt eine skalenbegrenzte Oberfläche $o(\mathbf{x})$ berechnet. Zunächst wird dafür eine robuste Ebenenschätzung als F-Operator angewendet; siehe Algorithmus 4. Anschließend wird wie im letzten Abschnitt ein Gauß-Filter als S-Filter mit der Grenzwellenlänge $\lambda_c = 0,1$ mm und ein Gauß-Filter als L-Filter mit der Grenzwellenlänge $\lambda_c = 10$ mm zur Begrenzung der Skalen angewendet; siehe Gleichung (2.1). In Abbildung 3.9 ist die Topographie der vier skalenbegrenzten Oberflächen dargestellt.

Für die skalenbegrenzten Oberflächen werden nun mithilfe von Algorithmus 1 iterativ die Parameter für die Komponenten h' geschätzt und als Mengen \mathcal{A} und \mathcal{B} zurückgegeben.

Da die Welligkeit einer Oberfläche mit einem Orangenschaleneffekt als ergodisch angenommen werden kann, wird zunächst die AKF durch eine örtliche

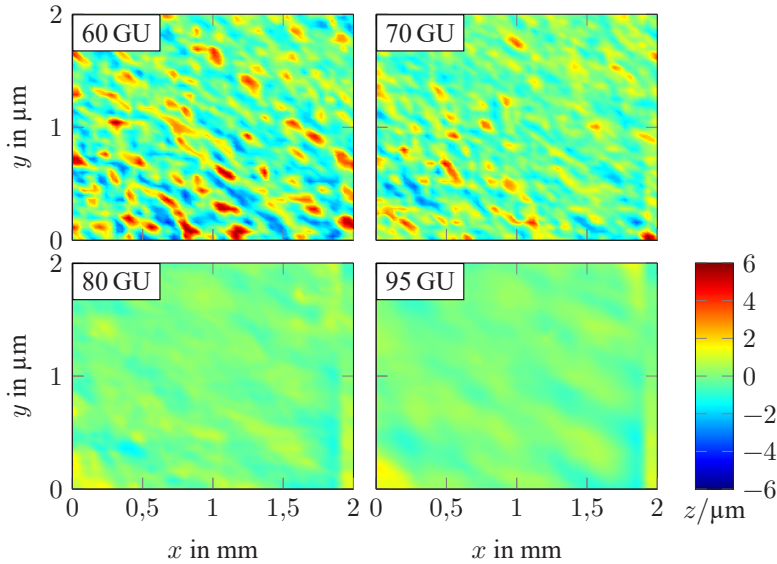


Abbildung 3.9: Topographie der analysierten Welligkeiten in einem Ausschnitt von vier realen Oberflächen mit unterschiedlich stark ausgeprägtem Orangenschaleneffekt.

Algorithmus 1 Analyse der Oberflächenwelligkeit

- 1: **function** ESTGAUSSIANS($o(\mathbf{x}) \in \mathcal{R}, \mathbf{x} \in \mathcal{U}^2 \subset \mathcal{R}^2$)
 - 2: $f_{\text{AKF}}(\boldsymbol{\tau}) \leftarrow \int_{\mathcal{U}} o(\mathbf{x})o(\mathbf{x} - \boldsymbol{\tau})d\mathbf{x}$
 - 3: $\boldsymbol{\sigma} \leftarrow \arg \min_{\boldsymbol{\sigma}' \in \mathcal{R}} \int_{\mathcal{U}^2} \|f_{\text{AKF}}(\boldsymbol{\tau}) - e^{-\boldsymbol{\tau}/\boldsymbol{\sigma}'}\|^2 d\boldsymbol{\tau}$
 - 4: $\mathbf{u} \leftarrow \max(\mathcal{U}) - \min(\mathcal{U})$
 - 5: $n \leftarrow \prod u_i/\sigma_i$
 - 6: $w_0(\mathbf{x}) \leftarrow o(\mathbf{x})$
 - 7: **for all** $i \in \{1, \dots, n\}$ **do**
 - 8: $\mathcal{M}_i, \mathcal{A}_i, \mathcal{B}_i \leftarrow \arg \min_{\boldsymbol{\mu} \in \mathcal{R}^2, a, r \in \mathcal{R}} \int_{\mathcal{U}^2} (w_i(\mathbf{x}) - h'(\mathbf{x}|\boldsymbol{\mu}, a, r))^2 d\mathbf{x}$
 - 9: $w_i(\mathbf{x}) \leftarrow w_{i-1}(\mathbf{x}) - h'(\mathbf{x}|\mathcal{M}_i, \mathcal{A}_i, \mathcal{B}_i)$
 - 10: **if** $\int_{\mathcal{U}^2} w_{i-1}^2(\mathbf{x})d\mathbf{x} \leq \int_{\mathcal{U}^2} w_i^2(\mathbf{x})d\mathbf{x}$ **then break**
 - 11: **return** \mathcal{A}, \mathcal{B}
-

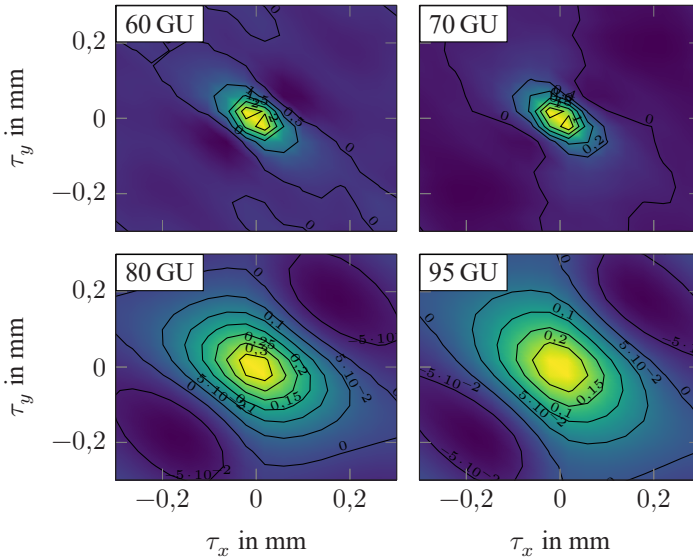


Abbildung 3.10: Autokorrelationsfunktion der Welligkeit. Alle Eintragungen in mm^2 .

Mittlung über die Oberfläche bestimmt. In Abbildung 3.10 sind die AKFs für die vier Oberflächen dargestellt.

Sowohl in der Topographie der analysierten Welligkeit (Abbildung 3.9) als auch in der AKF der Welligkeit (Abbildung 3.10) ist eine leichte Richtungsabhängigkeit zu erkennen. Es zeigt sich, dass die Verteilung der AKF näherungsweise gaußförmig ist und mit einer Korrelationslänge σ durch $e^{-\tau/\sigma}$ approximiert werden kann³. Mithilfe der Korrelationslänge $\sigma = (\sigma_1, \sigma_2)^T$ lässt sich nun die Anzahl der benötigten Komponenten n innerhalb des Messbereichs mit der Größe $\mathbf{u} = (u_1, u_2)^T$ abschätzen. Der Vorteil bei der Bestimmung der Korrelationslänge über die AKF gegenüber der Fourier-Transformation ist, dass für stationäre Zufallsprozesse das Fourier-Integral im Allgemeinen nicht konvergiert [BPF12, S. 515].

³ Die Vektordivision sei hier durch eine komponentenweise Division wie folgt definiert: $(c_1, c_2)^T = (a_1, a_2)^T / (b_1, b_2)^T = (a_1/b_1, a_2/b_2)^T$

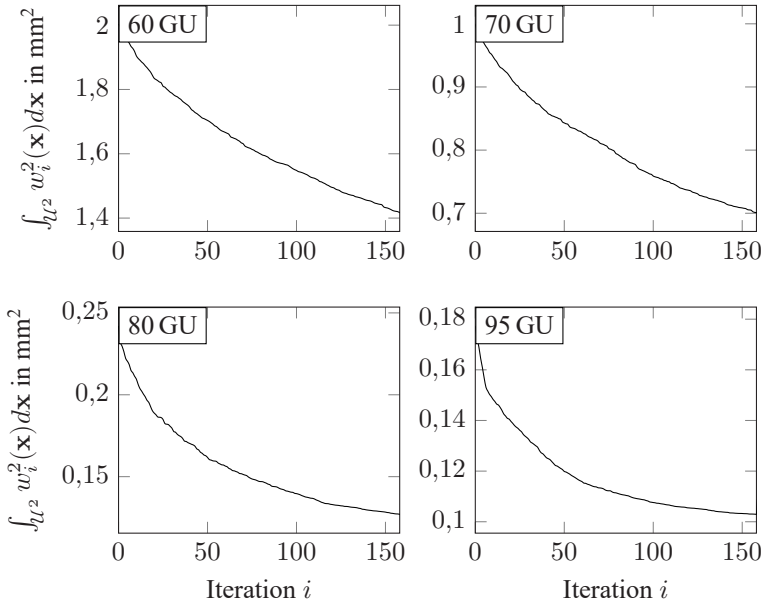


Abbildung 3.11: Konvergenz des Algorithmus zur Schätzung der Oberflächenstatistik.

Als zusätzliche Vereinfachung von Algorithmus 1 werden vorab alle lokalen Extrema, die einen Mindestabstand entsprechend der Korrelationslänge haben, auf der Oberfläche gesucht. Für jeden Iterationsschritt werden die Parameter für eine Komponente nach Gleichung (3.27) mit der Methode der kleinsten Quadrate innerhalb einer Umgebung des absolut größten noch verbleibenden Extremums geschätzt. Die gefundene Komponente wird von der Oberfläche entfernt, sodass die mittlere Leistung der Oberfläche reduziert wird. Falls in einem Schritt die mittlere Leistung nicht reduziert wird, wird der Algorithmus abgebrochen. In Abbildung 3.11 ist die mittlere Leistung über alle Iterationen bis zum Abbruch dargestellt.

Es ist zu sehen, dass der Algorithmus abbricht, obwohl die mittlere Leistung noch weiter reduziert werden könnte. Da die verbleibende Leistung nicht verschwindet, muss davon ausgegangen werden, dass keine „passenden“ Komponenten

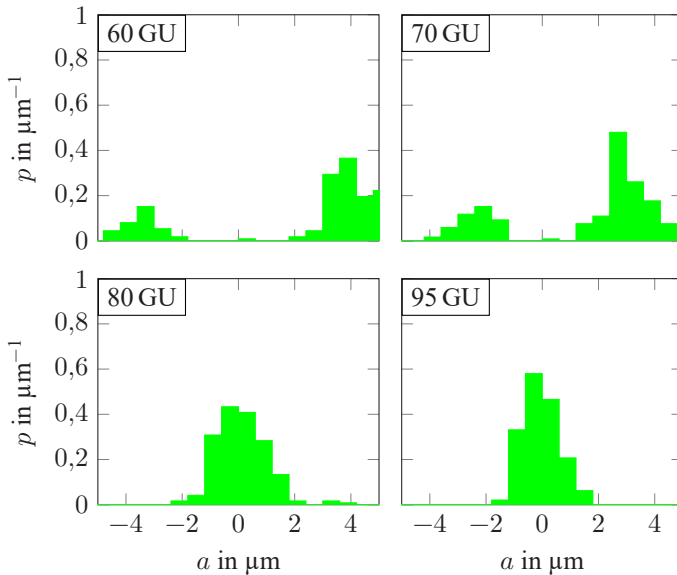


Abbildung 3.12: Histogramme über die Höhe a der gefundenen Komponenten.

mehr gefunden werden. Ein Grund hierfür liegt darin, dass sich die verbleibenden „Wellenberge“ und „Wellentäler“ der untersuchten Oberflächen nur unzureichend durch einen gaußförmigen Verlauf beschreiben lassen.

Statistik der Parameter

In Abbildung 3.12 ist das Histogramm über die Höhe a der gefundenen Komponenten für alle vier Oberflächen dargestellt. Die größte relative Häufigkeit liegt für die Oberfläche 60 GU bei $\pm 3 \mu\text{m}$, für 70 GU bei $\pm 2 \mu\text{m}$ und für 80 GU und 95 GU bei $\pm 1 \mu\text{m}$. Es ist zu sehen, dass die Histogramme für die Oberflächen 60 GU und 70 GU nicht symmetrisch sind und negative Höhenwerte weniger häufig sind als positive, obwohl die Oberflächen im Mittel auf die Höhe 0 normiert wurden. Außerdem ist ein deutlicher Unterschied der Welligkeit zwischen den Oberflächen 70 GU und 80 GU zu erkennen, was sich bereits in

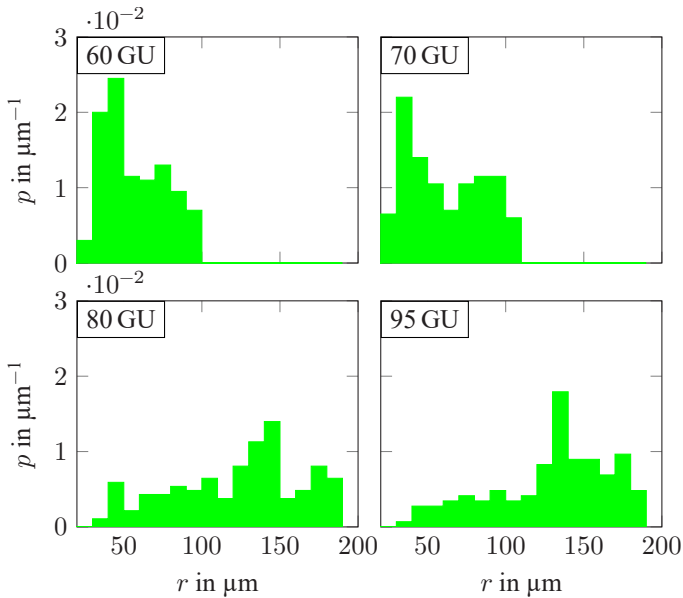


Abbildung 3.13: Histogramm über die Breite r .

den vorhergehenden Untersuchungen der Oberflächen gezeigt hat und mit dem Erscheinungsbild der Oberflächen übereinstimmt. In Abbildung 3.13 ist das Histogramm über die Breite r der gefundenen Komponenten dargestellt.

Die häufigste Breite einer Komponente liegt für die Oberflächen 60 GU und 70 GU bei 30–50 μm und bei den Oberflächen 80 GU und 95 GU bei 130–150 μm . Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs lässt sich die Verteilung für die Breite der Komponenten nicht mit ausreichender Sicherheit feststellen. Longuet-Higgins hat jedoch in [Lon57b] gezeigt, dass die Breite der Komponenten durch eine Gauß-Verteilung beschrieben werden kann. Ein Grund für den geringen Stichprobenumfang ist die frühe Konvergenz des Algorithmus und die damit einhergehende geringe Anzahl gefundener Komponenten. Damit ist außerdem fraglich, inwiefern die gefundenen Parametervektoren die gesamte Statistik der

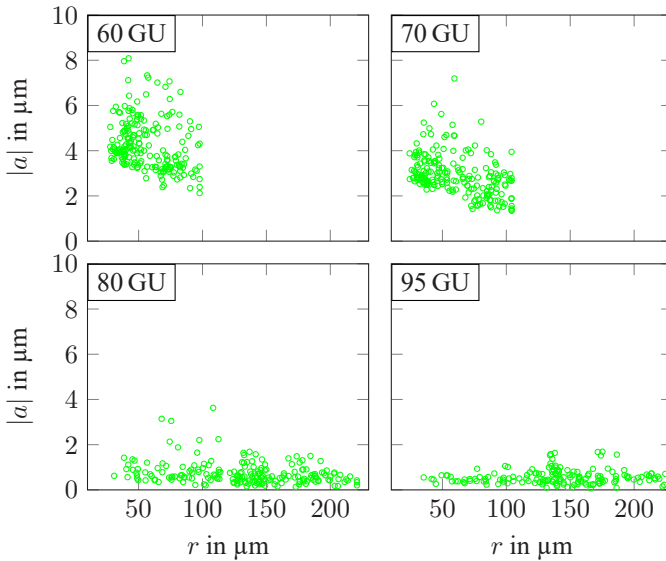


Abbildung 3.14: Streudiagramm der Parameter a und r .

Welligkeit beschreiben. In Abbildung 3.14 ist das Streudiagramm der Parametervektoren dargestellt.

Hier ist noch einmal deutlich zu sehen, wie die Höhe und Breite der gefundenen Komponenten auf den unterschiedlichen Oberflächen zusammenhängen. Bei den Oberflächen mit stark ausgeprägtem Orangenschaleneffekt (60 GU und 70 GU) werden viele Komponenten mit großer Höhe und geringer Breite, also einer großen Steigung gefunden. Im Gegensatz dazu weisen die gefundenen Komponenten auf den Oberflächen mit schwach ausgeprägtem Orangenschaleneffekt 80 GU und 95 GU nur geringe Steigung auf.

Lokale Formabweichungen mit den gleichen Parametern a und r im Parameterraum des SF-Modells können von der Welligkeit nicht unterschieden werden und sind somit unsichtbar. Wenn die Verteilung der Parameter ausreichend sicher bekannt ist, kann der Bereich im Parameterraum direkt maskiert werden.

3.2.3 Analyse im Ortsfrequenzbereich

Die beiden beschriebenen Methoden zur Analyse des Orangenschaleneffekts können verwendet werden, um deren Einfluss in den Wahrnehmungsmodellen zu berücksichtigen. In der Praxis hat sich jedoch eine einfachere Methode zur Beschreibung des durch Welligkeit beeinflussten Erscheinungsbildes einer spiegelnden Oberfläche etabliert. Diese Methode wird insbesondere von der Firma Byk-Gardner im optischen Profilometer „Wave-Scan“ für die Beurteilung des Orangenschaleneffekts beschichteter Oberflächen verwendet. Da die Statistik der Welligkeit des Orangenschaleneffekts meist richtungsunabhängig ist, genügt die Abtastung der Oberfläche in eine beliebige Richtung. Allerdings ist die Berechnungsvorschrift hierfür nicht veröffentlicht, deshalb wird stattdessen ein Bewertungsmaß verwendet, das auf dem nach [ISO25178] definierten Winkelleistungsdichtespektrum f_{APS} definiert ist; siehe Abschnitt 2.2.3. Mithilfe dieses Bewertungsmaßes lassen sich die Kennzahlen des „Wave-Scan“ größtenteils ableiten [Zie+13]. Außerdem lassen sich aus den Kennzahlen statistisch ähnliche Oberflächen synthetisieren [Ola14].

Aus einem mindestens 50 mm langen Profil werden für sechs Wellenlängenbereiche im Bereich von 0,1–30 mm Kennzahlen berechnet, die beschreiben, wie ausgeprägt die Welligkeit in dem jeweiligen Wellenlängenbereich ist. Die Wellenlängenbereiche λ_i , $i \in \{\text{du}, \text{a}, \text{b}, \text{c}, \text{d}, \text{e}\}$ sind übereinstimmend mit denen des „Wave-Scan“, die sich über zwei Größenordnungen erstrecken: $\lambda_{\text{du}} < 0,1$ mm, $\lambda_{\text{a}} = 0,1\text{--}0,3$ mm, $\lambda_{\text{b}} = 0,3\text{--}1$ mm, $\lambda_{\text{c}} = 1\text{--}3$ mm, $\lambda_{\text{d}} = 3\text{--}10$ mm, $\lambda_{\text{e}} = 10\text{--}30$ mm. Die Kennzahlen werden über das Winkelleistungsdichtespektrum APS_i in eine Richtung ϑ entlang der Oberflächentangente berechnet.

$$\text{APS}_i(\vartheta) := \int_{\lambda_i} \lambda^{-1} |\mathcal{F}\{g\}(\lambda^{-1} \sin(\vartheta), \lambda^{-1} \cos(\vartheta))|^2 d\lambda \quad (3.29)$$

Alternativ kann das Winkelleistungsdichtespektrum aus den Oberflächengradienten mit $G_x(k_x, k_y) = \mathcal{F}\left\{\frac{\partial g(x,y)}{\partial x}\right\}$ und $G_y(k_x, k_y) = \mathcal{F}\left\{\frac{\partial g(x,y)}{\partial y}\right\}$ berechnet werden [Zie+13].

$$\begin{aligned} \text{APS}_i(\vartheta) = \int_{\lambda_i} \frac{\lambda}{4\pi^2} & \left(|G_x(\lambda^{-1} \sin(\vartheta), \lambda^{-1} \cos(\vartheta))|^2 \right. \\ & \left. + |G_y(\lambda^{-1} \sin(\vartheta), \lambda^{-1} \cos(\vartheta))|^2 \right) d\lambda \end{aligned} \quad (3.30)$$

Die Integration über alle Richtungen ϑ des Leistungsdichtespektrums liefert die BPS_i-Kennzahl als mittlere Leistungsdichte in den jeweiligen Bandpassbereichen λ_i .

$$\text{BPS}_i := \int_0^{2\pi} \text{APS}_i(\vartheta) d\vartheta \quad (3.31)$$

Die Kennzahlen werden im nächsten Kapitel zur Synthese von welligen Oberflächen verwendet, finden aber keine Verwendung in den Wahrnehmungsmodellen.

3.3 Formabweichung nach Elementarspiegelmodell

In diesem Abschnitt wird ein Wahrnehmungsmodell erster Ordnung für spiegelnde Oberflächen vorgestellt. Mithilfe dieses Modells werden Grenzen für die Sichtbarkeit von Oberflächenneigungen und Höhenunterschieden auf spiegelnden Oberflächen hergeleitet. Dazu wird angenommen, dass sich die Oberfläche aus vielen Spiegelementen zusammensetzt, die in ihrer lateralen Größe gerade der Auflösung des Auges entsprechen. Jeder dieser Elementarspiegel reflektiert einen Sichtstrahl, welcher anschließend auf einen Punkt der Umgebung

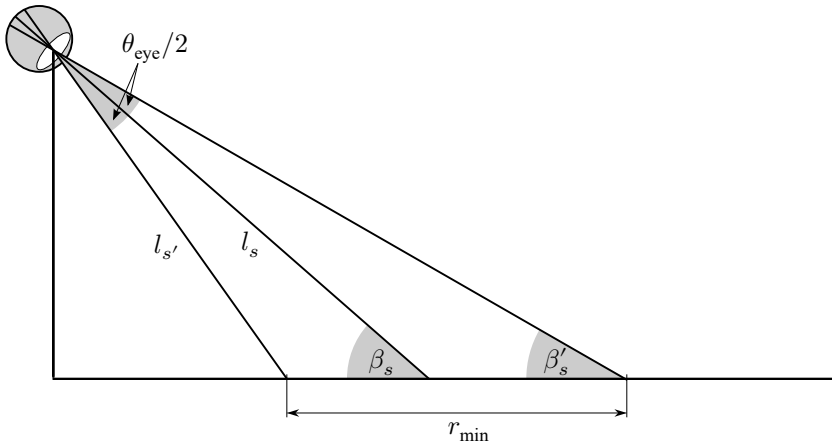


Abbildung 3.15: Laterale Auflösung auf der Oberfläche.

trifft. Die Umgebung ist in diesem Modell ein ebener, strukturierter Schirm mit endlichem Abstand. Um die Auflösung auf der Oberfläche und dem Schirm zu bestimmen, wird die Winkelauflösung des Auges verwendet.

3.3.1 Auflösung auf der Oberfläche

Die Winkelauflösung des Auges θ_{eye} , der Abstand des Beobachters zur Oberfläche l_s und der Winkel zur Oberfläche β_s bestimmen die Größe der kleinsten wahrnehmbaren Strukturen auf der Oberfläche r_{min} wie in Abbildung 3.15 dargestellt.

$$\frac{r_{min}}{\sin(\theta_{eye})} = \frac{l_{s'}}{\sin(\beta'_s)} \quad (3.32)$$

Für die Herleitung wird zudem der Winkel

$$\beta'_s = \beta_s - \frac{\theta_{eye}}{2}, \quad (3.33)$$

sowie die Strecke $l_{s'}$ benötigt.

$$\begin{aligned}\frac{l_{s'}}{\sin(\beta_s)} &= \frac{l_s}{\sin(\pi - \beta_s - \frac{\theta_{\text{eye}}}{2})} \\ l_{s'} &= \frac{l_s \sin(\beta_s)}{\sin(\beta_s + \frac{\theta_{\text{eye}}}{2})}\end{aligned}\quad (3.34)$$

Das Einsetzen der Ergebnisse aus den Gleichungen (3.33) und (3.34) in Gleichung (3.32) liefert die gesuchte Auflösung auf der Oberfläche.

$$r_{\min} = \frac{l_s \sin(\theta_{\text{eye}}) \sin(\beta_s)}{\sin(\beta_s - \frac{\theta_{\text{eye}}}{2}) \sin(\beta_s + \frac{\theta_{\text{eye}}}{2})}\quad (3.35)$$

Unter Verwendung von $\sin(x) \sin(y) = \frac{1}{2} (\cos(x - y) - \cos(x + y))$ und der Geradheit der Kosinusfunktion $\cos(x) = \cos(-x)$ lässt sich Gleichung (3.35) vereinfachen.

$$r_{\min} = 2l_s \frac{\sin(\theta_{\text{eye}}) \sin(\beta_s)}{\cos(\theta_{\text{eye}}) - \cos(2\beta_s)}\quad (3.36)$$

Im Spezialfall $\beta_s = 90^\circ$, also bei senkrechter Beobachtung der Oberfläche, vereinfacht sich Gleichung (3.36).

$$\begin{aligned}r_{\min} &= 2l_s \frac{\sin(\theta_{\text{eye}})}{\cos(\theta_{\text{eye}}) + 1} \\ &= 2l_s \tan\left(\frac{\theta_{\text{eye}}}{2}\right)\end{aligned}\quad (3.37)$$

Bei einer senkrechten Beobachtung spiegelt sich statt eines Musters der Umgebung der Beobachter selbst in der Oberfläche, weshalb dieser Fall in der Praxis

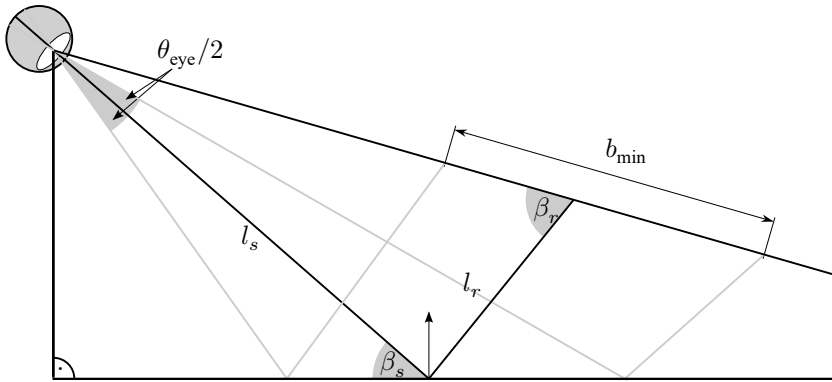


Abbildung 3.16: Laterale Auflösung auf dem Schirm.

selten auftritt. Kleine Abweichungen von der senkrechten Beobachtungsrichtung lassen sich jedoch durch diesen vereinfachten Fall approximieren.

3.3.2 Auflösung auf dem Schirm

Analog zur Auflösung auf der Oberfläche in Gleichung (3.36) kann die Auflösung auf dem Schirm b_{\min} , wie in Abbildung 3.16 dargestellt, berechnet werden; siehe [Ziel5].

Zusätzlich wird der Winkel des an der Oberfläche reflektierten Strahls zur Tangentialebene des Schirms β_r benötigt, sowie die Länge des reflektierten Strahls l_r .

$$b_{\min} = 2(l_s + l_r) \frac{\sin(\theta_{\text{eye}}) \sin(\beta_r)}{\cos(\theta_{\text{eye}}) - \cos(2\beta_r)} \quad (3.38)$$

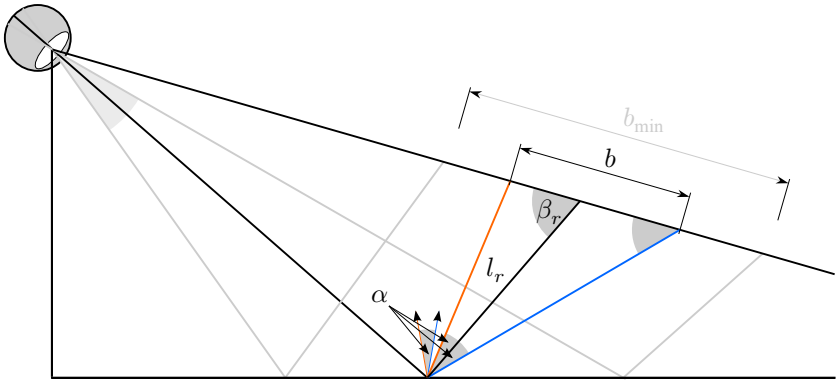


Abbildung 3.17: Ablenkung des reflektierten Sichtstrahls durch eine Änderung der Oberflächenneigung gemessen als Abstand auf dem Schirm.

Im Spezialfall $\beta_r = 90^\circ$, also wenn die Richtung des reflektierten Sichtstrahls senkrecht auf den Schirm trifft, vereinfacht sich Gleichung (3.38).

$$b_{\min} = 2(l_s + l_r) \tan\left(\frac{\theta_{\text{eye}}}{2}\right) \quad (3.39)$$

Wie bei der Beobachtungsrichtung auf die Oberfläche lassen sich auch kleine Abweichungen von der senkrechten Beobachtung des Schirms durch diesen vereinfachten Fall approximieren.

3.3.3 Ablenkung auf dem Schirm

Wie in Abbildung 3.17 dargestellt bewirkt eine Änderung der Oberflächennormalen zur Bezugsebene um den Winkel α eine Ablenkung des reflektierten Sichtstrahls um 2α und somit eine Bewegung des Punktes, an dem dieser den Schirm trifft, entlang der Strecke b .

Die Ablenkung auf dem Schirm wird analog zu Gleichung (3.38) wie folgt berechnet; siehe [Zie15].

$$b = 2l_r \frac{\sin(2\alpha) \sin(\beta_r)}{\cos(2\alpha) - \cos(2\beta_r)} \quad (3.40)$$

Im Spezialfall $\beta_r = 90^\circ$ vereinfacht sich Gleichung (3.40).

$$b = 2l_r \tan(\alpha) \quad (3.41)$$

Kleine Abweichungen von der senkrechten Beobachtung des Schirms lassen sich wieder durch diesen vereinfachten Fall approximieren.

3.3.4 Defektmodell

Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, wird angenommen, dass sich die Oberfläche aus Spiegelementen zusammensetzt, die im Zweidimensionalen jeweils durch ein Dreieck beschrieben werden können; siehe Abbildung 3.18.

Der Winkel α_t entspreche der Änderung des Oberflächenneigungswinkels α . Der Zusammenhang der lateralen Ausdehnung des Dreiecks r_t seiner Höhe a_t ist dann folgendermaßen.

$$r_t = \frac{a_t}{\tan(\alpha_t)} \quad (3.42)$$

3.3.5 Sichtbarkeit

Ein geeigneter Elementarspiegel wird sichtbar, wenn zwei Bedingungen erfüllt sind: Erstens muss die Größe des Elementarspiegels r_t aus Gleichung (3.42) min-

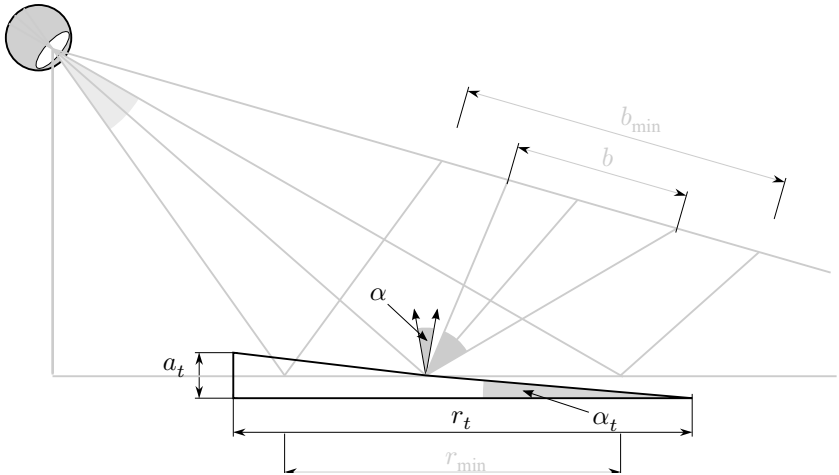


Abbildung 3.18: Der Höhenunterschied, der durch ein um α_t gekipptes Spiegelement verursacht wird, lässt sich über die Beziehungen am Dreieck beschreiben.

destens der Auflösung auf der Oberfläche r_{\min} aus Gleichung (3.36) entsprechen.

$$2l_s \frac{\sin(\theta_{\text{eye}}) \sin(\beta_s)}{\cos(\theta_{\text{eye}}) - \cos(2\beta_s)} = \frac{a_{\min}}{\tan(\alpha_{\min})} \quad (3.43)$$

Im Spezialfall $\beta_s = 90^\circ$ vereinfacht sich Gleichung (3.43).

$$2l_s \tan\left(\frac{\theta_{\text{eye}}}{2}\right) = \frac{a_{\min}}{\tan(\alpha_{\min})} \quad (3.44)$$

Zweitens muss die Ablenkung auf dem Schirm b aus Gleichung (3.40) mindestens der Auflösung auf dem Schirm b_{\min} aus Gleichung (3.38) entsprechen, womit sich die kleinste sichtbare Normalenabweichung ergibt.

$$2(l_s + l_r) \frac{\sin(\theta_{\text{eye}}) \sin(\beta_r)}{\cos(\theta_{\text{eye}}) - \cos(2\beta_r)} = 2l_r \frac{\sin(2\alpha_{\min}) \sin(\beta_r)}{\cos(2\alpha_{\min}) - \cos(2\beta_r)} \quad (3.45)$$

An dieser Stelle ist zu bemerken, dass gerade die Winkelauflösung auf dem Schirm für bestimmte Muster unterhalb der Auflösungsgrenze liegen kann, siehe Abschnitt 2.4.5. Im Spezialfall $\beta_s = \beta_r = 90^\circ$ vereinfacht sich Gleichung (3.45).

$$\begin{aligned} 2(l_s + l_r) \tan\left(\frac{\theta_{\text{eye}}}{2}\right) &= 2l_r \tan(2\alpha_{\min}) \\ \alpha_{\min} &= \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{l_s + l_r}{l_r} \tan\left(\frac{\theta_{\text{eye}}}{2}\right)\right) \end{aligned} \quad (3.46)$$

Das Einsetzen der Ablenkung auf dem Schirm aus Gleichung (3.46) in Gleichung (3.44) liefert die kleinste sichtbare Höhengauslenkung a_{\min} eines Elementarspiegels, der gerade noch lateral aufgelöst werden kann, unter der Voraussetzung, dass Schirm- und Oberflächentangente parallel zur Bildebene liegen.

$$\begin{aligned} 2(l_s + l_r) \tan\left(\frac{\theta_{\text{eye}}}{2}\right) &= \frac{a_{\min}}{\frac{l_s + l_r}{l_r} \tan\left(\frac{\theta_{\text{eye}}}{2}\right)} \\ a_{\min} &= 2(l_s + l_r) \frac{l_s}{l_r} \tan\left(\frac{\theta_{\text{eye}}}{2}\right)^2 \end{aligned} \quad (3.47)$$

Alternativ dazu kann für beliebige Winkel β_s und β_r Gleichung (3.45) verwendet und für kleine Winkel $\tan(\alpha_{\min}) \approx \alpha_{\min}$ approximiert werden.

$$\alpha_{\min} \approx \frac{\sin(\beta_r)^2 (l_s + l_r) \sin(\theta_{\text{eye}})}{(l_s + l_r) \sin(\theta_{\text{eye}}) - l_r \cos(2\beta_r) + l_r \cos(\theta_{\text{eye}})} \quad (3.48)$$

Das Einsetzen dieser Gleichung in das Defektmodell aus Gleichung (3.42) und die Auflösung auf der Oberfläche aus Gleichung (3.36) liefern dann den gerade sichtbaren Höhenunterschied eines ausgelenkten Spiegelements.

$$a_{\min} \approx - \frac{l_s \sin(\beta_s) \sin(\theta_{\text{eye}}) \tan \left(\frac{\sin(\beta_r)^2 (l_s + l_r) \sin(\theta_{\text{eye}})}{(l_s + l_r) \sin(\theta_{\text{eye}}) - l_r \cos(2\beta_r) + l_r \cos(\theta_{\text{eye}})} \right)}{\cos(2\beta_s) - \cos(\theta_{\text{eye}})} \quad (3.49)$$

Mit einer Winkelauflösung von $\theta_{\text{eye}} = 1'$ gilt $\sin(\theta_{\text{eye}}) \approx \theta_{\text{eye}}$ und $\cos(\theta_{\text{eye}}) \approx 1$ und das Ergebnis kann weiter vereinfacht werden.

$$a_{\min} \approx \frac{l_s \theta_{\text{eye}}}{\sin \beta_s} \tan \left(\frac{\sin(\beta_r)^2 (l_s + l_r) \theta_{\text{eye}}}{(l_s + l_r) \theta_{\text{eye}} - l_r \cos(2\beta_r) + l_r} \right) \quad (3.50)$$

Die Annahmen des Modells setzen unter anderem eine ideal spiegelnd reflektierende Oberfläche voraus, sowie einen Schirm, auf dem zwei beliebige Punkte mit der kleinstmöglichen Winkelauflösung unterschieden werden können. Diese Annahmen treten in der Praxis selten auf, liefern aber eine untere Schranke für die Sichtbarkeit von lokalen Neigungsabweichungen α_{\min} und Höhenunterschieden a_{\min} auf einer spiegelnden Oberfläche unter optimalen Umständen; siehe Abbildung 3.19.

Es ist zu sehen, dass sowohl die Sichtbarkeit kleiner Neigungsabweichungen als auch Höhenabweichungen für kleine Beobachtungsabstände l_s und große Schirmabstände l_r steigt. Beispielsweise sind für eine Betrachtung der Oberflä-

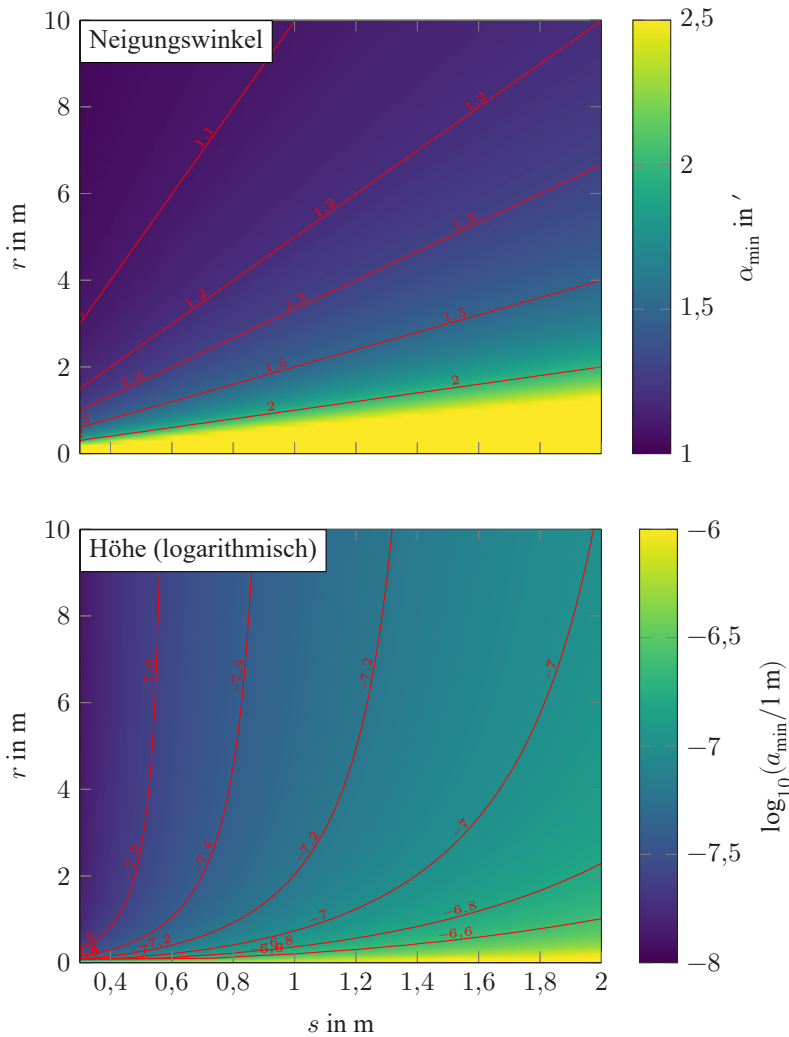


Abbildung 3.19: Wahrnehmungsgrenzen für den Neigungswinkel α_{\min} und die Höhenauslenkung a_{\min} nach dem Elementarspiegelmodell für $\beta_s = \beta_r = 90^\circ$.

che aus 30 cm und einem Schirmabstand von 10 m Höhenunterschiede ab 22 nm und Neigungsunterschiede der Oberfläche ab 1' sichtbar.

Für reale Oberflächen, auf denen Rauheiten und Welligkeiten auftreten, wird die Winkelauflösung im Modell an die Rauheit der Oberfläche wie in Abschnitt 3.1 angepasst und die sichtbaren Normalenabweichungen durch die Welligkeit der Oberfläche wie in Abschnitt 3.2.1 eingeschränkt. Für die experimentelle Evaluation wird nicht die minimale Breite eines Spiegelements r_{\min} in Abhängigkeit der lateralen Auflösung auf der Oberfläche, sondern stattdessen die reale Breite r_l der lokalen Verformungen verwendet.

3.4 Spekularer Fluss kleiner Formabweichung

Bei der manuellen Inspektion spiegelnder Oberflächen wird typischerweise eine kontrastreiche und stark strukturierte Beleuchtung verwendet. Ein Prüfer bewegt sich bei der Inspektion um das Objekt herum, um möglichst alle Bereiche so zu betrachten, dass die strukturierte Umgebung über jeden Bereich der Oberfläche mindestens einmal abgebildet wird. Häufig ist zu beobachten, dass die Position des Kopfs dabei in einer leichten, wippenden Bewegung verändert wird, um eine Bewegung des reflektierten Musters auf der Oberfläche, den SF, zu erzeugen. Ändert sich die Bewegung eines Punktes oder eines Musters dabei nicht wie erwartet, so deutet dies auf einen Fehler auf der Oberfläche hin. Ein Prüfer vergleicht also instinktiv den SF über einen verformten Bereich der Oberfläche mit einem benachbarten Bereich, der als Bezugsfläche dient.

3.4.1 Beschreibung des Modells

Der Beobachter wird modelliert als ortsfeste Lochkamera mit einer planen Bildebene, die parallel zur Objektebene liegt. Jede Beobachtungsrichtung zur Oberfläche lässt sich in diese Form überführen. Sie wird im Folgenden Einheitskamera genannt. Die Oberfläche reflektiert spiegelnd eine vollständig und eindeutig strukturierte Umgebung, welche einen unendlichen Abstand zur Ober-

fläche besitzt. Die schwache Bedingung der spiegelnden Reflexion (Definition 2.58) wird eingehalten und somit kann der Richtung eines reflektierten Sichtstrahls ein eindeutiger Punkt der Umgebung zugeordnet werden. Eine Oberflächenunvollkommenheit ist eine lokale, örtlich begrenzte, Abweichung der wirklichen Oberfläche von einer Bezugsoberfläche. Ein Vergleich der Bilder der wirklichen Oberfläche mit der Bezugsoberfläche liefert den SF. Für jeden Punkt auf der Bildebene, von dem ein Sichtstrahl ausgeht, gibt der zugehörige SF die Bewegung eines Umgebungspunktes an, der durch die Verformung der Bezugsoberfläche verursacht wird. Der so auftretende SF ist ähnlich dem SF, der wie eingangs beschrieben bei Kopfbewegungen auftritt. In der Evaluation wird dieser durch eine Bewegung des Beobachters verursachte SF zur Verifikation des Modells verwendet. Obwohl Bewegungen des Beobachters nicht explizit im Modell berücksichtigt werden, lässt sich der im Folgenden hergeleitete SF auch für die Sichtbarkeit von Verformungen für einen bewegten Beobachter anwenden, da es ähnlich zu dem Modell von Roth und Black auf Seite 78 ist, das genau diese Bewegungen beschreibt.

3.4.2 Definition spekularer Fluss

Die Bezugsoberfläche sei durch eine hinreichend glatte Funktion $z = h(x, y)$ beschrieben. Das Projektionszentrum der Lochkamera (Beobachter) liege im Punkt $\mathbf{c} = (0, 0, c_z)^T$ und die Bildebene der Einheitskamera liege parallel zur x - y -Ebene mit Abstand $z = c_z - 1$; siehe Abbildung 3.20.

Ein Punkt $\mathbf{w} = (u, v)^T$ in der Bildebene entspricht einem Sichtstrahl, der von \mathbf{c} aus in Richtung \mathbf{s} verläuft.

$$\mathbf{s}(\mathbf{w}) = (u, v, -1)^T \quad (3.51)$$

Ein Punkt auf der Bezugsoberfläche \mathbf{p}_h an der Stelle x, y hat die Höhe $h(x, y)$.

$$\mathbf{p}_h(x, y) = (x, y, h(x, y))^T \quad (3.52)$$

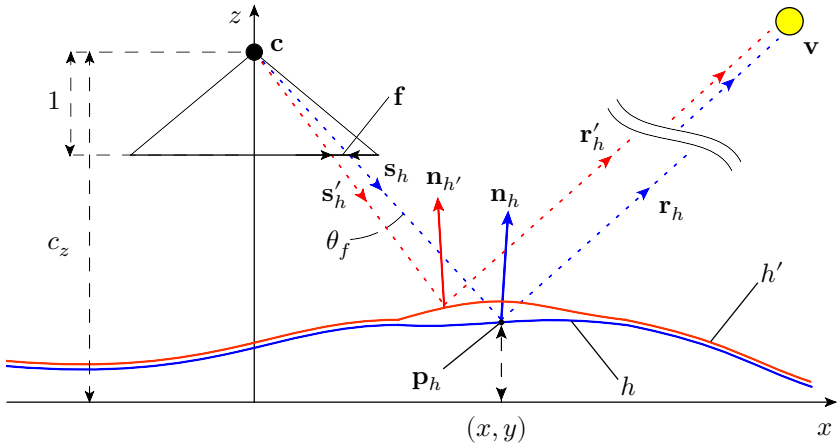


Abbildung 3.20: SF f verursacht durch eine gegenüber der Bezugsfläche h (blau) verformten Oberfläche h' (rot). Ein Sichtstrahl (blau) ausgehend vom Projektionszentrum der Abbildung \mathbf{c} in Richtung \mathbf{s}_h trifft die Bezugsfläche am Punkt $(x, y, h(x, y))^T$, wird dort in Richtung \mathbf{r}_h reflektiert und trifft einen Umgebungspunkt \mathbf{v} im Unendlichen. Auf der wirklichen Oberfläche ist derselbe Umgebungspunkt \mathbf{v} für den Beobachter mit einem zweiten Sichtstrahl (rot) sichtbar. Der Schwinkel θ_f zwischen beiden Sichtstrahlen wird durch den SF f in der Bildebene beschrieben.

Zu einem Sichtstrahl auf die Oberfläche, der durch die Punkte \mathbf{c} und \mathbf{p}_h verläuft, lässt sich der Schnittpunkt $\mathbf{w}_h(x, y)$ mit der Bildebene direkt angeben.

$$\mathbf{w}_h(x, y) = \frac{(x, y)^T}{c_z - h(x, y)} \quad (3.53)$$

Der Normalenvektor \mathbf{n}_h für einen Punkt auf der Oberfläche kann durch das Kreuzprodukt der beiden Ableitungen $\frac{\partial \mathbf{p}_h(x, y)}{\partial x}$ und $\frac{\partial \mathbf{p}_h(x, y)}{\partial y}$ berechnet werden.

$$\mathbf{n}_h(x, y) = \frac{\partial \mathbf{p}_h(x, y)}{\partial x} \times \frac{\partial \mathbf{p}_h(x, y)}{\partial y} \quad (3.54)$$

Ein Sichtstrahl in Richtung $\mathbf{s} = \mathbf{s}(\mathbf{w}_h(x, y))$ wird an der Oberfläche im Punkt \mathbf{p}_h in Richtung \mathbf{r}_h gespiegelt und trifft dann einen Punkt der Umgebung \mathbf{v} . Die Richtung \mathbf{r}_h des reflektierten Strahls ergibt sich über die Householdertransfor-

mation des Sichtstrahls mit der Oberflächennormalen der Bezugsoberfläche $\mathbf{n} = \mathbf{n}_h(x, y)$.

$$\mathbf{r}_h(x, y) = \mathbf{s}(\mathbf{n}^T \cdot \mathbf{n}) - 2\mathbf{n}(\mathbf{n}^T \cdot \mathbf{s}) \quad (3.55)$$

Nach Definition 2.58 erscheint ein Punkt \mathbf{v} der Umgebung unter der gleichen Reflexionsrichtung für jeden Punkt auf der Oberfläche. Ein zweiter Sichtstrahl, der an einer verformten Oberfläche $h'(x', y')$ gespiegelt wird, trifft also denselben Punkt der Umgebung \mathbf{v} , wenn der reflektierte Strahl $\mathbf{r}_{h'}$ parallel zu \mathbf{r}_h ist.

$$\mathbf{r}_h(x, y) = \varepsilon \cdot \mathbf{r}_{h'}(x', y'), \quad \varepsilon \in \mathcal{R} \quad (3.56)$$

Den Punkt x', y' auf der verformten Oberfläche h' , über den der Sichtstrahl in die gleiche Richtung reflektiert wird, erhält man durch Auflösen von Gleichung (3.56) nach x' und y' . Um den SF \mathbf{f} zu erhalten, muss man die Verschiebung der beiden Sichtstrahlen in der Bildebene berechnen.

$$\mathbf{f}(\mathbf{w}_h(x, y)) = \mathbf{w}_{h'}(x', y') - \mathbf{w}_h(x, y) \quad (3.57)$$

Der Schwinkel θ_f des SF zwischen der wahrgenommenen Position des Punktes \mathbf{v} über die Bezugsoberfläche und der verformten Oberfläche, sei der Winkel zwischen beiden Sichtstrahlen.

$$\theta_f(x, y) = \gamma(\mathbf{w}_h(x, y), \mathbf{w}_h(x, y) + \mathbf{f}(\mathbf{w}_h(x, y))) \quad (3.58)$$

Die Funktion $\gamma(\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2)$ berechnet das Winkelargument des Skalarprodukts.

$$\gamma(\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2) = \arccos\left(\frac{\mathbf{s}^T(\mathbf{w}_1) \cdot \mathbf{s}(\mathbf{w}_2)}{|\mathbf{s}(\mathbf{w}_1)| |\mathbf{s}(\mathbf{w}_2)|}\right) \quad (3.59)$$

Da der SF f eine zweidimensionale Größe ist und für Sichtbarkeit nur der (eindimensionale) Sehwinkel des SF von Interesse ist, wird im Folgenden meist nur der Sehwinkel des SF angegeben.

3.4.3 Analytische Lösung für kleine Formabweichungen

Im Allgemeinen setzt sich Gleichung (3.56) aus komplizierten, nichtlinearen Termen zusammen und kann daher nur numerisch gelöst werden. Zudem kann nicht davon ausgegangen werden, dass der SF für kleine Verformungen klein ist. So führen beispielsweise beliebig kleine Formabweichungen der Oberfläche zu großen Verschiebungen des Reflexionspunktes entlang der Oberfläche $\mathbf{p}_h(x, y)$, wenn sich die Kamera in der Nähe des Brennpunkts eines parabolischen Bereichs auf der Oberfläche befindet. Eine solche Situation ist jedoch auch für die Inspektion unüblich, da hier kein deutliches Bild der Umgebung auf der Oberfläche entsteht und somit auch keine Änderung der Umgebung wahrgenommen werden kann. Daher wird zusätzlich zu den oben genannten Annahmen davon ausgegangen, dass sich der Beobachter außerhalb der Nähe eines Brennpunkts der Oberfläche befindet und somit kleine Formabweichungen der Oberfläche auch einen kleinen SF bewirken. In der Praxis kann beispielsweise eine Schranke für den Betrag des erwarteten SF gesetzt werden, ab dem die approximierten Ergebnisse zu stark abweichen.

Für die analytische Lösung von Gleichung (3.56) werden die Oberflächen durch eine Reihenentwicklung approximiert. Mit den partiellen Ableitungen der Oberfläche bis zur 1. Ordnung $h = h(x, y)$, $h_x = \partial h(x, y)/\partial x$ usw. wird die Bezugsfläche als Taylorreihenentwicklung um (x, y) dargestellt⁴.

$$h(x + \delta x, y + \delta y) \approx h + h_x \delta x + h_y \delta y \quad (3.60)$$

⁴ Da in dieser Arbeit von einer ebenen Referenzfläche ausgegangen wird, ist eine Approximation 1. Ordnung hinreichend. Für eine Erweiterung des Modells auf gekrümmte Referenzflächen können hier auch Approximationen höherer Ordnung verwendet werden.

Auch die verformte Oberfläche $h'(x, y)$ wird als Taylorreihenentwicklung um (x, y) mit den partiellen Ableitungen bis zur 2. Ordnung dargestellt.

$$\begin{aligned} h'(x + \delta x, y + \delta y) &\approx h' + h'_x \delta x + h'_y \delta y \\ &+ \frac{h'_{xx}}{2} (\delta x)^2 + h'_{xy} \delta x \delta y + \frac{h'_{yy}}{2} (\delta y)^2 \end{aligned} \quad (3.61)$$

Setzt man die approximierten Oberflächen in die Gleichungen (3.54) und (3.55) ein, erhält man für Gleichung (3.56) mit $x' = x + \delta x$ und $y' = y + \delta y$ eine lineare Gleichung.

$$\varepsilon \mathbf{b} = \mathbf{a} + \mathbf{a}_x \delta x + \mathbf{a}_y \delta y + \mathcal{O}((\delta x)^2, (\delta y)^2, \delta x \delta y) \quad (3.62)$$

Die Koeffizienten \mathbf{a} , \mathbf{a}_x und \mathbf{a}_y sind abhängig von x , y und den partiellen Ableitungen bis zum zweiten Grad von $h'(x, y)$. Der Vektor \mathbf{b} ist abhängig von x , y und den ersten Ableitungen von $h(x, y)$. Das lineare Gleichungssystem in Gleichung (3.62) kann statt Gleichung (3.56) für δx , δy und ε gelöst werden. Dazu wurde das Computeralgebrasystem Mathematica verwendet. Das Einsetzen der so erhaltenen Ergebnisse für δx und δy in Gleichung (3.57) führt dann zu einer Gleichung die den gesuchten SF $\mathbf{f}(\mathbf{w}_h(x, y))$ approximiert.

$$\mathbf{f}(\mathbf{w}_h(x, y)) \approx \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix} \quad (3.63)$$

$$\begin{aligned}
f_1 &= -2h_0x(h_{xx}x^2 + h_{xx} + h_{yy}y^2) - 2h_0h_{xy}(2x^2 + 1)y \\
&+ 4h_x^2(x^3 + x) + 2h_x(2h_{xx}(x^2 + 1)^2 + x(4y(h_{xy}x^2 + h_{xy} + h_yx) \\
&+ 2h_{yy}xy^2 + x) + h_yy + 1) + 4h_yxy(h_{xx}x^2 + h_{xx} + h_yy + h_{yy}y^2 + h_{yy}) \\
&+ 4h_{xy}h_y(x^2(2y^2 + 1) + y^2 + 1) + 2h_yx(h_y + y) \\
f_2 &= 2\left(-h_0y(h_{xx}x^2 + 2h_{xy}xy + h_{yy}y^2 + h_{yy}) - h_0h_{xy}x + h_x^2(2x^2y + y) \right. \\
&+ h_x(xy(2h_{xx}(x^2 + 1) + 4h_yy + 2h_{yy}(y^2 + 1) + 1) + 2h_{xy}(x^2(2y^2 + 1) \\
&+ y^2 + 1) + h_yx) + h_yy(2h_{xx}x^2y + 4h_{xy}x(y^2 + 1) + y) + 2h_y^2(y^3 + y) \\
&\left. + 2h_yh_{yy}(y^2 + 1)^2 + h_y\right)
\end{aligned}$$

Das Modell kann direkt auf höhere Ordnungen erweitert werden, indem partielle Ableitungen höheren Grades zur Approximation verwendet werden. Die Approximation wird später in Abschnitt 4.4 überprüft.

3.4.4 Skalierungsinvarianz

Das Modell enthält bisher die partiellen Ableitungen der Bezugsoberfläche und verformten Oberfläche $h, h_x, h_y, h', \dots, h'_{xy}$ und den Abstand des Beobachters zur Oberfläche c_z . Eine Änderung des Beobachtungsabstandes bewirkt auch eine Änderung des SF, da dieser die Verschiebung des Reflexionspunktes \mathbf{p} auf der Oberfläche in die Bildebene projiziert. Wird jedoch mit der Änderung des Beobachtungsabstandes auch die Oberfläche mit einem Faktor $\varepsilon_z \in \mathcal{R}$ skaliert, verändert sich in Abbildung 3.20 lediglich die Größe des Setups, während alle Winkel wie θ_f und der SF selbst unverändert bleiben.

$$c_z \rightarrow \varepsilon_z c_z \quad (3.64)$$

$$h(x, y) \rightarrow \varepsilon_z h(x/\varepsilon_z, y/\varepsilon_z) \quad (3.65)$$

$$h'(x, y) \rightarrow \varepsilon_z h'(x/\varepsilon_z, y/\varepsilon_z) \quad (3.66)$$

Daher kann für die Beobachtungsdistanz o.B.d.A. $c_z = 1$ angenommen werden. Die Ergebnisse können dann später an den Beobachtungsabstand angepasst werden.

3.4.5 Gaußförmige Formabweichung auf einem Planspiegel

Analog zum Modell der lokalen Oberflächenunvollkommenheiten für das Elementarspiegelmodell in Abschnitt 3.3.4, für das eine Formabweichung durch eine gekippte Spiegelebene auf einer ebenen Bezugsoberfläche angenommen wurde, wird in diesem Abschnitt eine gaußförmige Formabweichung auf einer ebenen Bezugsoberfläche angenommen.

$$h(x, y) = 0 \quad (3.67)$$

$$h'(x, y) = a \exp \left\{ -\frac{(x-d)^2 + y^2}{r^2} \right\} \quad (3.68)$$

Der Parameter a bestimmt die Höhe bzw. Tiefe und der Parameter r die laterale Ausdehnung der Formabweichung auf der wirklichen Oberfläche. Aufgrund der rotationssymmetrischen Form ist es ausreichend, die Position auf der Oberfläche mit einem Skalar d zu beschreiben. In Abbildung 3.21 ist ein Beispiel für eine gaußförmige Formabweichung zu einer ebenen Bezugsoberfläche und das Projektionszentrum der Einheitskamera dargestellt.

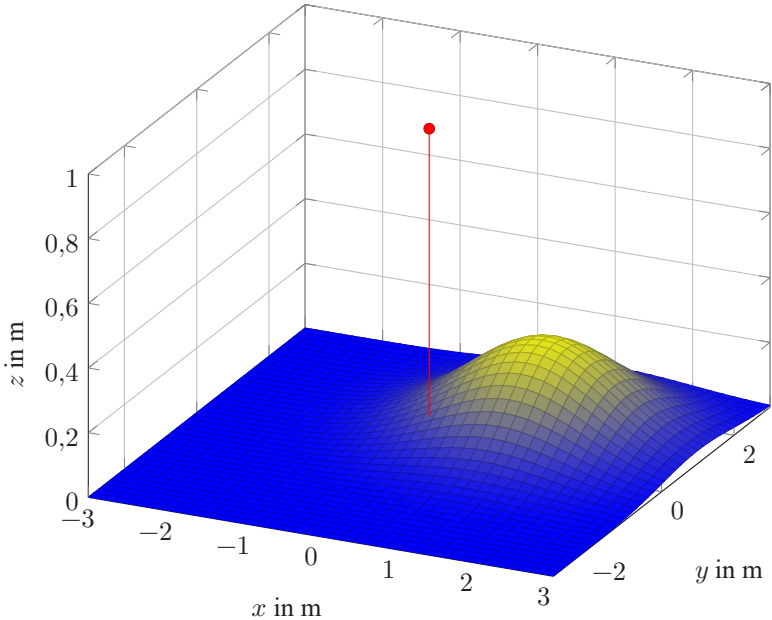


Abbildung 3.21: Eine plane Oberfläche, verformt durch eine Gauß-Glocke mit den Parametern $d = \sqrt{2}\text{m}$, $a = 0,3\text{ m}$ und $r = 1\text{ m}$ eingesetzt in Gleichung (3.68). Der rote Punkt stellt das optische Zentrum des Beobachters dar und liegt im Punkt $(0\text{ m}, 0\text{ m}, 1\text{ m})^T$.

In Abhängigkeit von den Parametern a , r und d kann der SF nach Gleichung (3.58) und der Approximation in Abschnitt 3.4.3 für jeden Punkt in der Bildebene berechnet werden. Eine Verformung wird sichtbar, wenn der maximale Schwinkel θ_{\max} des SF über der Verformung sichtbar wird. Daher genügt es diesen zu betrachten.

$$\theta_{\max} = \max_{x,y} \theta_f(x, y) \quad (3.69)$$

Für die rotationssymmetrische Gauß-Glocke liegt die Stelle in der Objektebene, an der $\theta_f(x, y)$ maximal wird, immer auf einer Geraden, die durch den Mittelpunkt der Gauß-Glocke und den Punkt $(0, 0, 0)^T$ verläuft; siehe Abbildung 3.22.

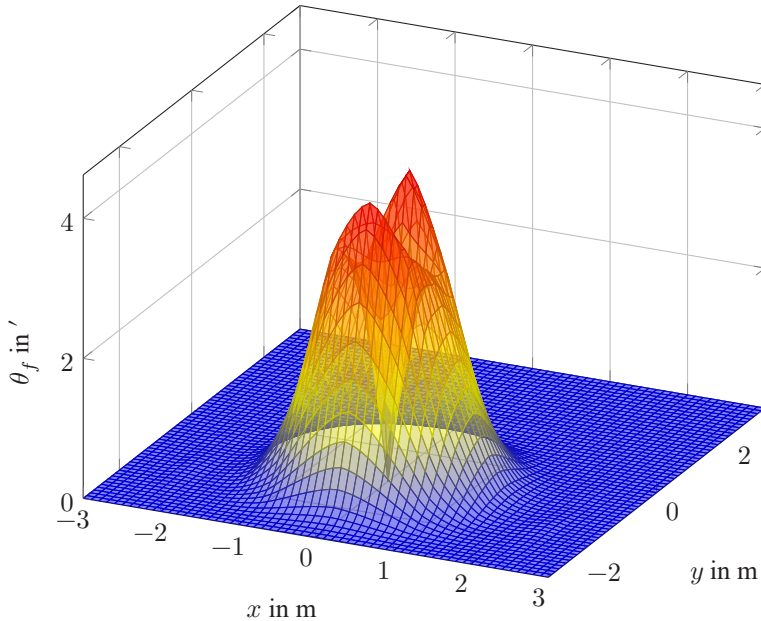


Abbildung 3.22: Schwinkel des SF für eine Oberfläche mit gaußförmiger Formabweichung mit den Parametern $d = 1$ m, $a = 50 \mu\text{m}$, $r = 0,5$ m und Beobachtungsposition $(0 \text{ m}, 0 \text{ m}, 1 \text{ m})^T$.

$$\theta_{\max} = \max_x \theta_f(x, 0) \tag{3.70}$$

Für die relevanten, also sehr kleinen, Ausprägungen der Verformungen $a \approx 0$ ist die Funktion $\theta_{\max}(a, r, d)$ in näherungsweise linearer Weise abhängig von a für einen weiten Bereich von a, r bzw. c_z . Um dies zu überprüfen ist in Abbildung 3.23 der Quotient $a^{-1} \cdot \theta_{\max}(a, r, d)$ dargestellt.

Für Bereiche, in denen die Linearisierung gültig ist, sollte dieser Quotient konstant sein. Für einen Radius $r = 10$ mm und einen lateralen Abstand $d = 0,1$ m ist die Linearisierung für Beobachtungsabstände $c_z < 100$ m gültig. In Abhängigkeit des lateralen Abstandes d ist die Linearisierung bei festem Beobachtungsabstand $c_z = 1$ m und $r = 10$ mm gültig für $d < 1$ m. In Abhängigkeit vom

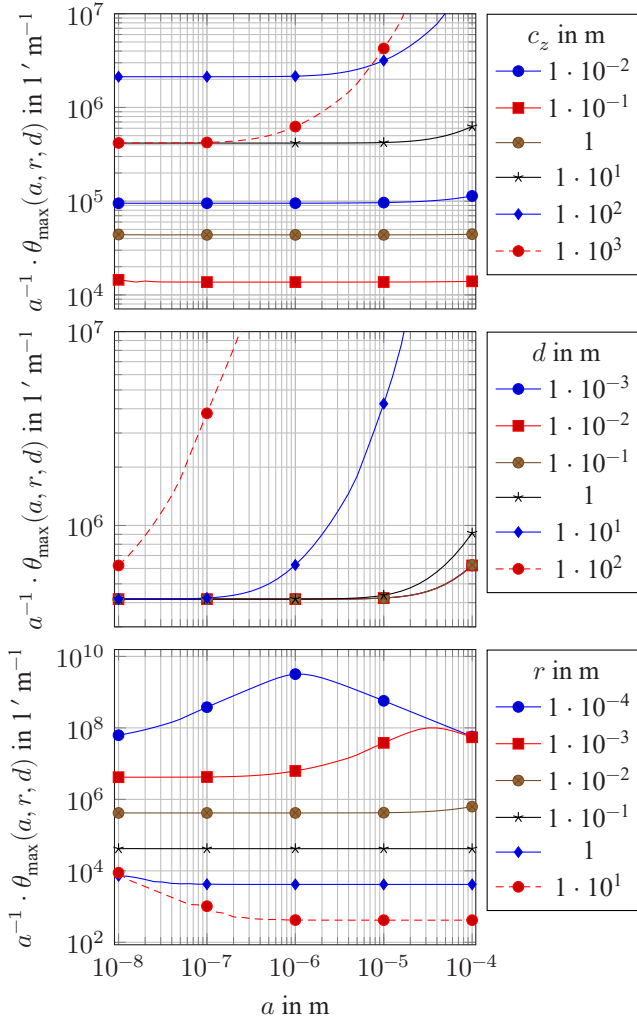


Abbildung 3.23: Linearität von $\theta_{\max}(a, r, d)$ in Abhängigkeit von a für verschiedene r , d und c_z . Die jeweils festen Parameter haben den Wert $d = 0,1$ m, $r = 10$ mm und $c_z = 1$ m. Bei der Skalierung von c_z wurde d so skaliert, dass der Betrachtungswinkel gleich bleibt. Ist $\theta_{\max}(a, r, d)$ linear in Abhängigkeit von a , so hat $a^{-1} \cdot \theta_{\max}(a, r, d)$ einen konstanten Wert.

Radius r ist die Linearisierung gültig für $1 \mu\text{m} < r < 1 \text{ m}$. Ist die Linearisierung gültig, muss lediglich die partielle Ableitung $\left. \frac{\partial \theta_{\max}}{\partial a} \right|_{a \approx 0}$ numerisch berechnet werden.

$$\theta_{\max}(a, r, d) \approx \left. \frac{\partial \theta_{\max}(a, r, d)}{\partial a} \right|_{a \approx 0} a_{\max}(r, d) \quad (3.71)$$

Die in Abschnitt 2.4.5 angegebene Winkelauflösung θ_{eye} des Menschen beschränkt den Schwinkel des SF θ_{\max} einer gerade noch unsichtbaren Verformung folgendermaßen.

$$\theta_{\max}(a, r, d) \leq \theta_{\text{eye}} \quad (3.72)$$

Setzt man die Approximation für $\theta_{\max}(a, r, d)$ aus Gleichung (3.71) in obige Gleichung ein, erhält man einen Zusammenhang der maximalen Amplitude $a_{\max}(r, d)$ einer Verformung mit der Winkelauflösung des Menschen.

$$a_{\max}(r, d) \leq \theta_{\text{eye}} \cdot \left(\left. \frac{\partial \theta_{\max}(a, r, d)}{\partial a} \right|_{a \approx 0} \right)^{-1} \quad (3.73)$$

In Abbildung 3.24 ist für $\theta_{\text{eye}} = 1'$ die maximale Amplitude $a_{\max}(r, d)$ bei gegebenem Radius r und lateraler Verschiebung d für einen vertikalen Beobachtungsabstand $c_z = 1 \text{ m}$ dargestellt.

Für andere Beobachtungsabstände müssen die Ergebnisse wie in Abschnitt 3.4.4 beschrieben skaliert werden. Später in Abschnitt 5.1 wird die Anwendung des Modells demonstriert und es werden einfache Faustregeln abgeleitet.

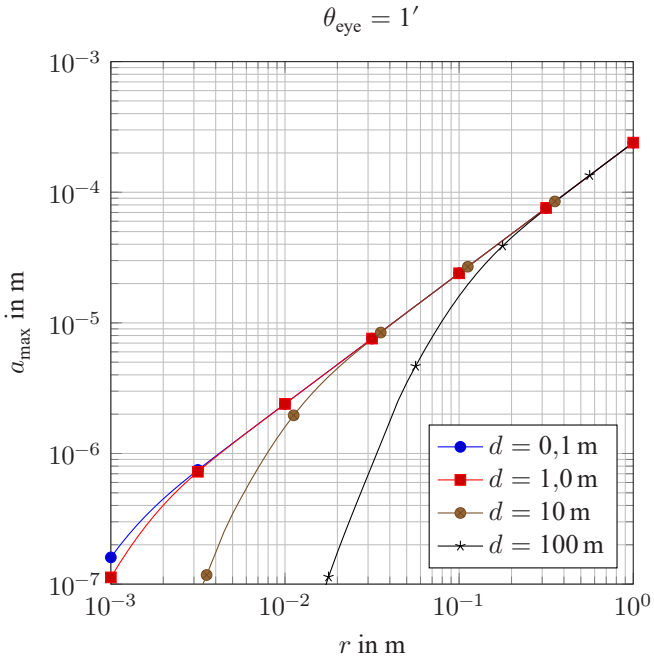


Abbildung 3.24: Maximale Amplitude $a_{\text{max}}(r, d)$ einer unsichtbaren gaußförmigen Formabweichung in Abhängigkeit ihrer lateralen Ausdehnung r und der Lage d .

4 Evaluation der Modelle

In diesem Kapitel wird die experimentelle Evaluation der Wahrnehmungsmodelle beschrieben. Die für die Evaluation benötigten Testdaten werden durch simulierte und reale Oberflächen gewonnen. In Abschnitt 4.1 wird beschrieben, wie die Oberflächen erzeugt werden. Anschließend werden in Abschnitt 4.2 die Messverfahren beschrieben, mit denen die Form und benötigte Eigenschaften der realen Oberflächen erfasst werden. Außerdem werden die Unsicherheiten der Messungen untersucht. In Abschnitt 4.3 wird untersucht, wie gut die erzeugten Verformungen auf den realen Oberflächen durch das im vorangegangenen Kapitel vorgestellte Gauß-Defektmodell beschrieben werden. Außerdem werden die Eigenschaften der Oberflächen untersucht, indem die Rauheits- und Welligkeitseigenschaften der Oberflächen geschätzt werden. Bevor die Modelle mit den Studien evaluiert werden, wird in Abschnitt 4.4 für das SF-Modell zunächst geprüft, ob und unter welchen Umständen die Approximation des SF gültig ist. Dann werden in Abschnitt 4.5 die beiden Studien beschrieben, die zur experimentellen Evaluation der Wahrnehmungsgrenzen verwendet werden. Darauf folgt die eigentliche Evaluation der Modelle, also der Vergleich der Studienergebnisse mit den Ergebnissen der Wahrnehmungsmodelle für das Elementarspiegelmodell in Abschnitt 4.6.1, für das SF-Modell in Abschnitt 4.6.2 und ein direkter Vergleich beider Modelle in Abschnitt 4.6.3. Abschließend folgt eine Zusammenfassung der Evaluation in Abschnitt 4.7.

4.1 Testoberflächen

Zur Evaluation werden Oberflächen benötigt, auf denen Verformungen auftreten, die entweder gerade noch sichtbar oder bereits unsichtbar sind. Die einzelnen Verformungen müssen ausreichend Abstand zueinander besitzen, um eine wechselseitige Beeinflussung ihrer Sichtbarkeit auszuschließen. Außerdem sollte die Bezugsoberfläche, also die Ausgangsfläche für die Verformungen, möglichst einfach und bis auf die untersuchten Verformungen fehlerfrei sein. Die Untersuchungen der Wahrnehmungsmodelle im vorangegangenen Kapitel haben gezeigt, dass für Verformungen mit wenigen Millimetern Durchmesser die Wahrnehmungsgrenze je nach Umgebungsbedingungen und Oberflächeneigenschaften im Bereich weniger Mikrometer Höhengausdehnung liegt. In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Methoden zur Erzeugung simulierter und realer Testoberflächen mit solchen lokalen Formabweichungen beschrieben.

Eine Methode ist die Simulation von Verformungen in Abschnitt 4.1.1, also die Bildsynthese einer triangulierten Oberfläche innerhalb einer Inspektionsszene. Zur Erzeugung sehr kleiner Formabweichungen auf realen Oberflächen werden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt. Beim ersten Ansatz in Abschnitt 4.1.2 werden ebene lackierte Stahlbleche verwendet und dann lokal deformiert. Beim zweiten Ansatz in Abschnitt 4.1.3 wird eine vorgegebene Topographie mit lokalen Verformungen aus einer Aluminiumrunde gefräst.

4.1.1 Simulierte Oberflächen

Für die Bildsynthese von Oberflächen wird der physikalisch korrekte Renderer Mitsuba [Jak17] verwendet. Dazu wurde eine einfache Inspektionsszene erstellt, die in Abbildung 4.1 schematisch dargestellt ist.

Die Szene enthält als Bezugsfläche einen ebenen Spiegel im Ursprung. Auf der Bezugsfläche werden die Formabweichungen und Oberflächenwelligkeiten durch „Displacement Mapping“ aufgetragen, bei dem eine Oberfläche durch vorgegebene Werte in der Höhe verformt wird. Die Verformungen werden

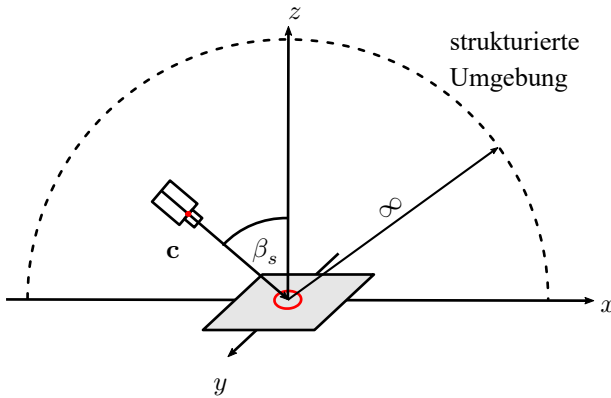


Abbildung 4.1: Simulationsumgebung für die Bildsynthese spiegeler Oberflächen mit unendlichem Schirmabstand und gleichbleibender Entfernung zum Mittelpunkt der Verformung bei einer Variation des Beobachtungswinkels β_s .

dafür als Höhenkarte mit einer relativ kleinen Auflösung von 128×128 Punkten generiert und über das Mitsuba Plugin „Heightfield“ in die Szene geladen. Diese Auflösung der Höhenkarte wurde empirisch ermittelt. Sie muss einerseits fein genug sein, um die Verformung gut abzubilden und darf andererseits nicht so fein aufgelöst sein, dass Artefakte bei der Bildsynthese auftreten. Die Höhenkarte wird während der Bildsynthese linear zwischen den vorgegebenen Punkten interpoliert. Als Umgebungstextur wird ein Muster mit kosinusförmigem Intensitätsverlauf vorberechnet und durch „Environment Mapping“ in der Szene dargestellt; siehe [Jak17]. Das Umgebungsmuster hat bei dieser Vorgehensweise eine unendliche Entfernung zur Oberfläche und erfüllt somit die Bedingung des SF-Modells. Licht wird direkt von der texturierten Umgebung emittiert, dann von der Oberfläche ohne Streuung oder Dämpfung entsprechend dem Reflexionsgesetz reflektiert und anschließend von einer Lochkamera aufgenommen. Das optische Zentrum befindet sich in Abhängigkeit vom Beobachtungswinkel β_s am Punkt $\mathbf{c} = (-\sin \beta_s, 0, \cos \beta_s)^T$. Die Ausrichtung und Brennweite der Kamera werden für jeden Beobachtungswinkel so gewählt, dass die gesamte Verformung formatfüllend auf den Sensor abgebildet wird. Als Sensor wurde

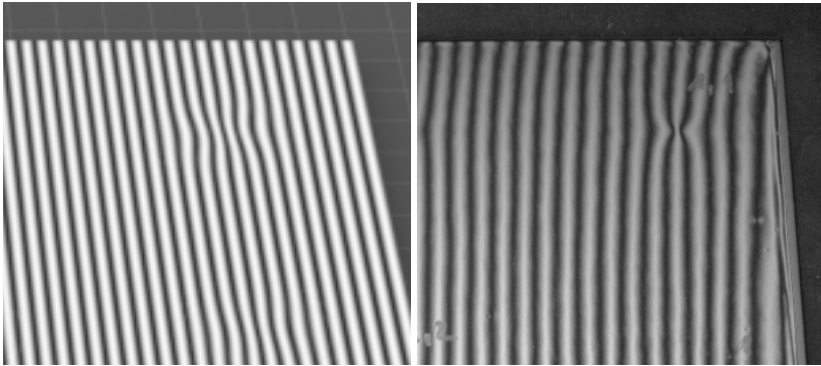


Abbildung 4.2: Simuliertes (links) und reales (rechts) Kamerabild einer spiegelnd lackierten Metalloberfläche, die ein Streifenmuster reflektiert, wobei sich die Beobachtungspositionen und die Verformungen leicht unterscheiden. Ein weiterer Unterschied ist der Abstand des reflektierten Streifenmusters, der in der realen Szene endlich ist. Im realen Kamerabild der lackierten Oberfläche lässt sich im Gegensatz zur simulierten Szene eine leichte Krümmung der gesamten Oberfläche (Form), sowie starke Krümmungen am Rand der Oberfläche erkennen.

ein Rastersensor mit einer Auflösung von 1024×1024 Bildpunkten verwendet, der die Intensitätswerte als 16 Bit Fließkommazahlen aufzeichnet. In Abbildung 4.2 ist der Vergleich einer simulierten und einer realen Oberfläche mit einer Verformung im oberen rechten Bereich dargestellt.

4.1.2 Lackierte Stahlbleche

Als typische spiegelnde Oberfläche wurden insgesamt acht schwarz lackierte Stahlbleche mit einer Größe von $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ hergestellt und davon die fünf besten als Testoberflächen ausgewählt. Auf den restlichen drei Testoberflächen traten störende Oberflächenunvollkommenheiten wie Poren und Blasen auf, die in der später durchgeführten Studie von den eigentlich untersuchten Beulen und Dellen abgelenkt hätten. Die Rauheit und Welligkeit der ersten vier schwarz lackierten Stahlbleche unterscheiden sich. Die Bleche wurden nach einer Messung des Glanzwerts durch den Hersteller mit 60 GU, 70 GU, 80 GU

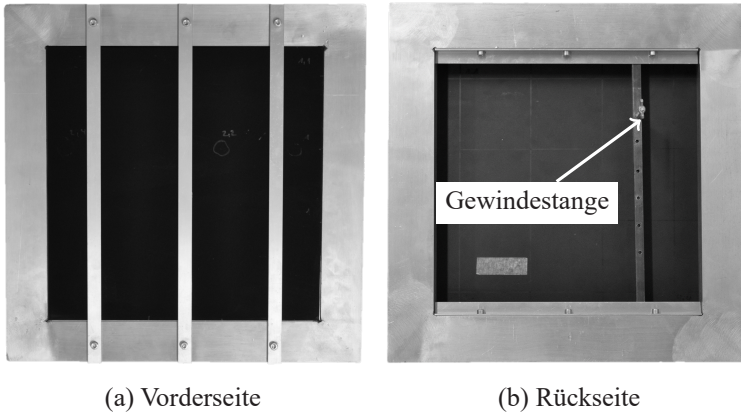


Abbildung 4.3: Vorrichtung zur Erzeugung definierter Formabweichungen. Ein Stahlblech kann im Rahmen fixiert werden und dann können von der Rückseite aus mit einer Schraube lokale Formabweichungen erzeugt werden.

und 95 GU bezeichnet. Ein weiteres Blech mit 95 GU wurde ausschließlich zur Plausibilitätsprüfung des SF-Modells verwendet. In Abschnitt 4.3 werden die Eigenschaften der Oberfläche mit den Methoden, die im vorangegangenen Kapitel vorgestellt wurden, genauer untersucht.

Um kontrolliert Defekte zu erzeugen, wird ein Rahmen verwendet, mit dem Formabweichungen definierter Tiefe auf dünnen Stahlblechen erzeugt werden können. Die Vorder- und Rückseite des Rahmens sind in Abbildung 4.3 dargestellt.

Auf der Vorderseite ist ein 5 mm breiter und 1 mm tiefer Sims eingefräst, in den das Stahlblech eingesetzt wird. Das Stahlblech wird von der Vorderseite mit drei Flachprofilen im Rahmen fixiert. Auf der Rückseite des Stahlbleches sind oben und unten an den Innenseiten des Rahmens Winkel angebracht, auf die ein Vierkant mit sechs Bohrungen aufgelegt wird. Eine lokale Formabweichung wird nun mit einer M5-Gewindestange, die eine Steigung von 0,8 mm pro Umdrehung besitzt, in das Stahlblech gedrückt. Um die Entstehung von Kratzern auf dem

Lack bei der Erzeugung von Dellen zu verhindern, wird zwischen Stahlblech und Gewindestange jeweils ein Stück Polyethylen Schaum-Klebeband geklebt und ein Holzdübel mit 6 mm Durchmesser auf die Gewindestange aufgesetzt.

Der Vorteil dieser Variante ist, dass Beulen und Dellen auf dem Stahlblech erzeugt werden. Der Nachteil ist, dass kleine Einschraubtiefen die Oberfläche nur elastisch verformen. Die Gradienten der Formabweichungen, die mit dieser Technik erzeugt werden können, sind also begrenzt. Außerdem vergrößern sich mit der Einschraubtiefe der Gewindestange sowohl die Tiefe als auch die Breite der Verformung. Eine Erzeugung einer Reihe von Verformungen mit konstantem Radius und unterschiedlicher Tiefe ist nicht möglich. Es wurden jeweils acht Verformungen auf den vier Stahlblechen 60 GU, 70 GU, 80 GU und 95 GU mit diesem Verfahren erzeugt. Die Größen der Verformungen werden später untersucht und sind in Abbildung 4.18 dargestellt. Die örtliche Anordnung der Verformungen wird im Rahmen der Studiendurchführung diskutiert und ist in Abbildung 4.28 dargestellt.

Für die Plausibilitätsprüfung des SF-Modells wird eine weitere Variante für das definierte Einbringen von Verformungen in das lackierte Stahlblech verwendet. Hier wird ein Blech mit 95 GU auf eine Unterlage aus Luftpolsterfolie gelegt und mit der Spitze eines verstellbaren Federkörners auf die Rückseite des Blechs gedrückt; siehe Abbildung 4.4.

Durch Einstellung der Federkraft lassen sich Verformungen unterschiedlicher Tiefe erzeugen. Der Vorteil dieser Variante ist, dass die Verformungen dabei einen annähernd gleichbleibenden Radius besitzen. Der Nachteil ist, dass sich nur Beulen erzeugen lassen, da eine Anwendung auf der spiegelnden Seite des Blechs zu deutlich sichtbaren Schäden an der Oberfläche führt¹. Auch hier begrenzt die elastische Verformung des Stahlblechs die kleinste erzeugbare Verformung. Die Messungen der Verformungen A bis H, die mit dem Federkörner erzeugt

¹ Durch die Verwendung von weichen Aufsätzen für die Federkörnerspitze können auch Dellen ohne sichtbare Schäden der Oberfläche erzeugt werden. Die somit erzeugten Verformungen besitzen jedoch einen wesentlich größeren Radius und hätten sich auf den Testoberflächen gegenseitig überlagert.



Abbildung 4.4: Rückseite eines Testblechs auf einer Luftpolsterfolie mit aufgezzeichnetem Raster und verstellbarer Federkörner, der zum Einbringen definierter Formabweichungen verwendet wurde.

wurden, sind in Abbildung 4.5 dargestellt. Auf die Messung der Oberflächen wird im folgenden Abschnitt 4.2 genauer eingegangen.

4.1.3 Diamantgedrehte Oberflächenspiegel

Die beiden im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Methoden, mit denen lokale Formabweichung in Stahlbleche eingebracht werden, haben den Nachteil, dass die damit erzeugten Verformungen auf hochspiegelnden Oberflächen nicht klein genug sind. Auf diesen Oberflächen sind nach dem Elementarspiegelmodell und dem SF-Modell Verformungen mit weniger als $1\ \mu\text{m}$ Höhenauslenkung sichtbar; siehe Abbildungen 3.19 und 3.24. Daher wurde für die Evaluation der Wahrnehmungsmodelle auf hochspiegelnden Oberflächen eine andere Variante zur Erzeugung lokaler Formabweichungen verwendet. Statt die Formabweichungen durch Verformung der Oberfläche einzubringen, wurden Oberflächenspiegel direkt aus einer Aluminium-Legierung durch eine variable Zustellung des Drehmeißels gedreht. Die zwei von der Innolite GmbH aus Aachen gedrehten großen

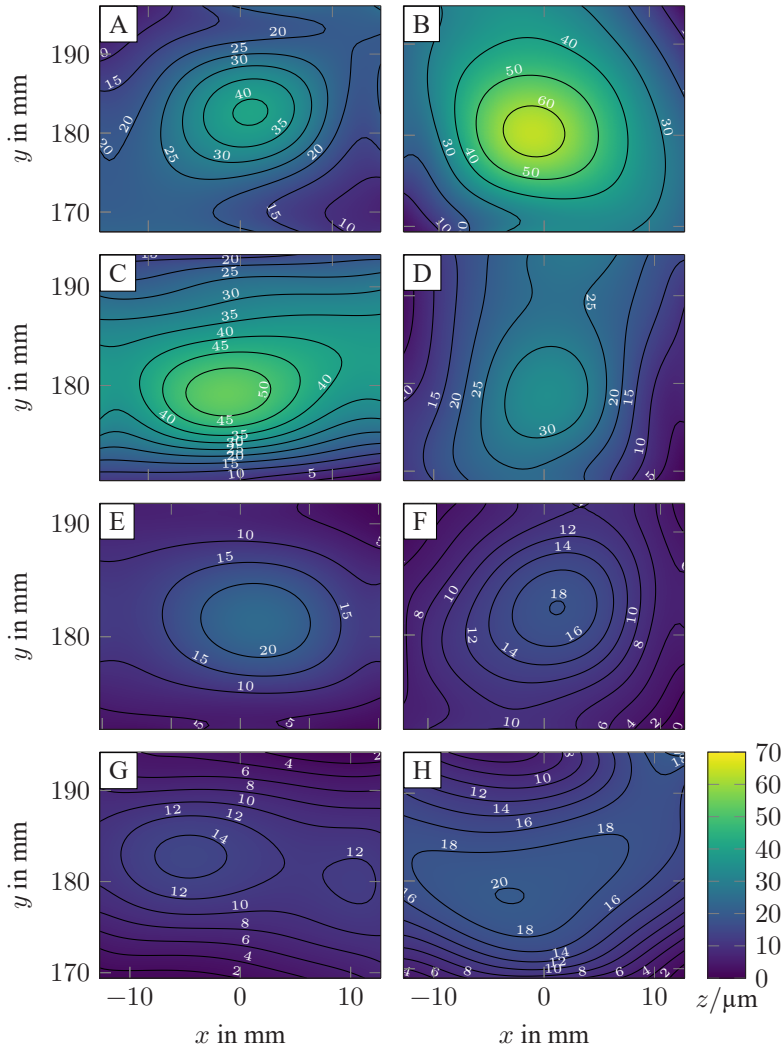


Abbildung 4.5: Topographische Messungen von zehn Formabweichungen auf einem lackierten Stahlblech, die mit dem Federkörper erzeugt wurden. Alle Höhenwerte in μm .



Abbildung 4.6: Diamantgedrehter Oberflächenspiegel (R2) mit 144 mm Durchmesser. Die Oberfläche ist eben und weist sechs unterschiedlich ausgeprägte konvexe Formabweichungen, sowie jeweils eine konvexe und eine konkave Verformung für die Markierung des Nord- und Südpols auf.

Ronden haben einen Durchmesser von 144 mm und eine Dicke von 18 mm. Außerdem wurde eine kleine Ronde mit einem Durchmesser von 80 mm und einer Dicke von 11 mm gedreht. In Abbildung 4.6 ist eine der großen Ronden (R2) mit sechs kreisförmig angeordneten, konvexen Verformungen dargestellt.

Die Oberfläche der Ronden wurde mit einer Spurbreite von $5\ \mu\text{m}$ gedreht. Auf der Oberfläche jeder Ronde sind jeweils sechs gaußförmige Formabweichungen unterschiedlicher Höhe bzw. Tiefe gegenüber einer ebenen Referenzfläche aufgebracht. Die Formabweichungen entsprechen Defekten nach Gleichung (3.68) mit den Parametern $a = 1, 2, \dots, 6\ \mu\text{m}$, $r = 7,5\ \text{mm}$ für R1, $a = 2, 4, \dots, 12\ \mu\text{m}$, $r = 12\ \text{mm}$ für R2 und $a = -2, -4, \dots, -12\ \mu\text{m}$, $r = 12\ \text{mm}$ für R3. Die Topographie der geometrischen Oberfläche ist im Vergleich zur Istoberfläche in Abbildung 4.7 dargestellt.

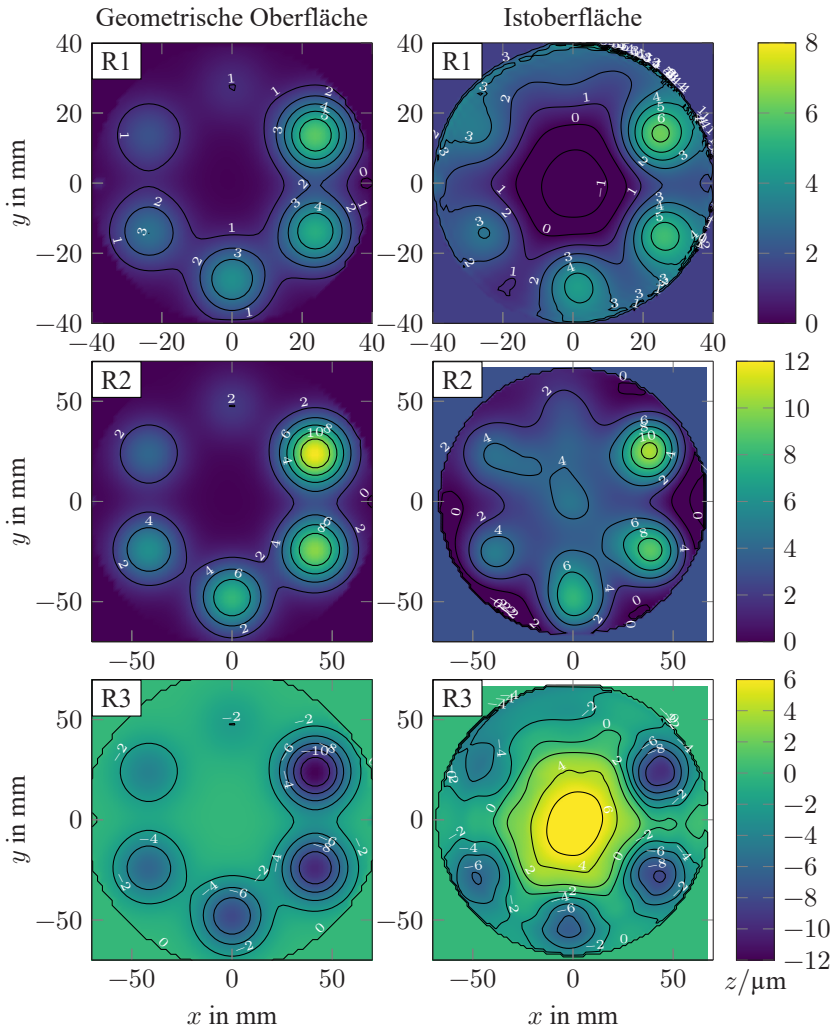


Abbildung 4.7: Topographien der Geometrischen Oberflächen für die Ronden R1, R2 und R3 mit jeweils sechs gaußförmigen Formabweichungen (linke Spalte). Topographie der Istoberfläche der drei Ronden (rechte Spalte).

Jede Ronde besitzt zusätzlich zu den sechs Verformungen eine konvexe und eine konkave Markierung an Nord- und Südpol mit $a = \pm 1 \mu\text{m}$, $r = 1 \text{ mm}$ für R1 und $a = \pm 2 \mu\text{m}$, $r = 1 \text{ mm}$ für R2 und R3. Die Topographie der Istoberfläche der Ronden wurde aus jeweils über 800 Einzelmessungen mit einem interferometrischen Sensor zusammengesetzt. In Abschnitt 4.2 wird die Messung der Istoberfläche genauer beschrieben.

4.2 Messverfahren

Für die Evaluation der Wahrnehmungsmodelle müssen verschiedene Eigenschaften der spiegelnden Oberflächen bestimmt werden. Hier werden die Sensoren und Verfahren vorgestellt, die zur Messung dieser Eigenschaften verwendet werden. Zunächst werden die Messungen der Topographie mit einem interferometrischen bzw. konfokalen Sensor in Abschnitt 4.2.1 beschrieben. Anschließend wird in Abschnitt 4.2.2 beschrieben, wie die Einzelmessungen zu größeren Messungen zusammengesetzt werden, um einen größeren Bereich der Oberfläche zu erfassen und in Abschnitt 4.2.3 wird untersucht, wie sich dies auf die Messunsicherheiten auswirkt. Anschließend wird die deflektometrische Registrierung in Abschnitt 4.2.4 kurz eingeführt und beschrieben, wie diese zur Messung des SF verwendet wird. Bevor diese später mit dem für eine Einheitskamera approximierten SF verglichen werden kann, muss sie noch, wie in Abschnitt 4.2.5 beschrieben, in dasselbe Koordinatensystem transformiert werden. Abschließend wird in Abschnitt 4.2.6 beschrieben, wie ein deflektometrischer Messaufbau zur Messung der MTF einer spiegelnden Oberfläche verwendet wird.

4.2.1 Topographiemessung

Bei der Messung von Gestaltabweichungen muss, wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, zunächst überprüft werden, ob die Messverfahren für die jeweilige Anwendung geeignet sind. Für die Evaluation der Wahrnehmungsmodelle müssen diese auf spiegelnden Oberflächen mindestens so empfindlich für Ver-



Abbildung 4.8: Für die Topographiemessungen der Oberflächen wird das Messgerät DCM3D der Firma Leica verwendet, das sowohl einen interferometrischen als auch einen konfokalen Sensorkopf besitzt.

formungen sein wie der Mensch. Zur Erfassung der Topographie wird das 3D-Oberflächenmesssystem DCM3D der Firma Leica verwendet, siehe Abbildung 4.8.

Es besitzt sowohl einen interferometrischen, als auch einen konfokalen Sensorkopf. In Tabelle 4.1 sind die vom Hersteller angegebenen Messunsicherheiten des DCM3D in lateraler und vertikaler Richtung dargestellt.

Im Gegensatz zum Menschen, der die Krümmung einer spiegelnden Oberfläche direkt wahrnimmt, muss diese aus der topographischen Messung erst abgeleitet werden. Zum Vergleich: Betrachtet ein Mensch die Oberfläche aus einer sehr geringen Entfernung von 30 cm, können Oberflächenelemente ab $87\ \mu\text{m}$ lateraler Größe und Neigungsänderungen ab $1'$ für einen großen Schirmabstand erkannt werden; siehe Abbildung 3.19 für die kleinsten sichtbaren Neigungsunterschiede in Abhängigkeit des Beobachtungs- und Schirmabstands beim Elementarspiegelmodell. Bei beiden Messverfahren liegt die laterale Auflösung

Tabelle 4.1: Messunsicherheit des 3D-Oberflächenmesssystems und des Verfahrtesches.

Messobjektiv	Verfahren	Auflösung	Unsicherheit
		lateral	vertikal
5x Michelson	PSI	3,32 μm	0,1 nm
5x Michelson	ePSI	3,32 μm	1,0 nm
5x Michelson	VSI	3,32 μm	4,0 nm
5x Konfokal		3,32 μm	150 nm
Verfahrtisch		1,00 μm	

mit den verwendeten 5x Objektiven mit 3,32 μm deutlich darunter. Auch die Winkelauflösung einer interferometrischen Messung mit vertikaler Auflösung von 0,1–4 nm liegt mit 0,004–0,2' deutlich darunter. Bei einer konfokalen Messung der Oberfläche reicht die Winkelauflösung mit 6' allerdings nicht aus. Daher wird für hochspiegelnde Oberflächen der interferometrische Sensorkopf verwendet (je nach Höhe der Verformungen im PSI, ePSI oder VSI-Verfahren²). Nur für Messungen, bei denen die Oberfläche zu rau für eine interferometrische Messung ist, wird der konfokale Sensorkopf verwendet. Da auch die Empfindlichkeit des Menschen mit zunehmender Rauheit der Oberfläche gegenüber Neigungsänderungen nachlässt, ist die kleinere Auflösung für raue Oberflächen kein Problem. Die topographischen Messungen beider Sensoren sind also geeignet, um die Wahrnehmungsmodelle zu evaluieren, da die Messunsicherheit des konfokalen und speziell des interferometrischen Sensors deutlich unter der vorhergesagten Wahrnehmungsgrenze des Menschen liegt.

² Phase Shift Interferometer (PSI), extending Phase Shift Interferometer (ePSI) und Vertical Scanning Interferometer (VSI) sind verschiedene Methoden mit denen der Abstand zwischen dem Sensorkopf und der Oberfläche interferometrisch gemessen wird. Diese Verfahren sind im Leica DCM3D implementiert.

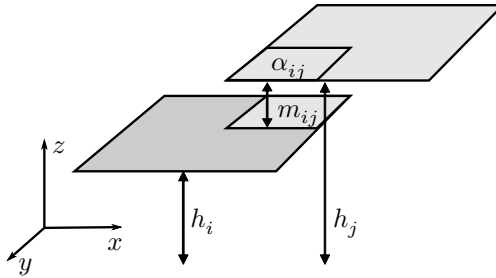


Abbildung 4.9: Benachbarte Messungen i und j einer Oberfläche überlappen sich an α_{ij} Punkten und besitzen eine durchschnittliche Differenz von m_{ij} . Das Ziel ist es h_i und h_j so zu wählen, dass alle Einzelmessungen in einer Ebene liegen.

4.2.2 Zusammengesetzte Messungen

Der Messbereich des DCM3D mit den 5x Objektiven ist mit $2,55 \text{ mm} \times 1,91 \text{ mm}$ zu klein, um eine gesamte Testoberfläche zu erfassen. Um dieser Schwierigkeit zu begegnen, wurde eine Ansteuerung für den XY-Kreuztisch und das DCM3D entwickelt, die große Bereiche der Testoberflächen durch laterale Verschiebung von Einzelmessungen automatisiert aufnimmt. Da die absoluten Höhen der Einzelmessungen vom Mikroskop mit über $1 \mu\text{m}$ zufälliger Abweichung nicht ausreichend genau sind, wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem die absoluten Höhen durch Minimierung des durchschnittlichen Höhenunterschiedes benachbarter überlappender Messbereiche geschätzt werden. Das Ziel ist die Schätzung der absoluten Höhe h_i für jede der n Einzelmessungen, sodass diese zu einer gemeinsamen Messung zusammengesetzt werden können; siehe Abbildung 4.9.

Die Position des XY-Kreuztisches kann mit einer Messunsicherheit unterhalb der lateralen Auflösung für jede Einzelmessung ausgelesen werden; siehe Tabelle 4.1. Sei $\mathbf{M} = ((m_{ij}))$ die Matrix des Medians der Höhenunterschiede der überlappenden Regionen aller Messungen i und j und $\mathbf{A} = \mathbf{A}^T = ((\alpha_{ij}))$ die Matrix der Anzahl sich überlappender Messpunkte der Messungen (Adjazenz-

matrix). Da die Höhenunterschiede auf unsicheren Messungen beruhen, ist auch eine Schätzung für $\mathbf{h} = (h_1, \dots, h_n)^T$ unsicher mit einem Gesamtfehler e .

$$e = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} (m_{ij} - h_i + h_j)^2 \quad (4.1)$$

Zudem wird noch die Nebenbedingung $\sum_{i=1}^n h_i^2$ als Regularisierungsterm mit einem Lagrange-Multiplikator λ_M hinzugefügt, um eine eindeutige Lösung für die spätere Optimierung zu erzwingen.

$$e = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} (m_{ij} - h_i + h_j)^2 + \lambda_M \sum_{i=1}^n h_i^2 \quad (4.2)$$

Das Ziel ist es also, \mathbf{h} so zu wählen, dass der Gesamtfehler e minimiert wird und die absolute Höhe im Mittel klein ist. Damit ergibt sich die notwendige Bedingung für ein Minimum.

$$\forall k : \frac{\partial e}{\partial h_k} = 0 \quad (4.3)$$

Damit ergeben sich die folgenden partiellen Ableitungen, die anschließend zusammengefasst werden können.

$$\begin{aligned}
 0 &= 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} (m_{ij} - h_i + h_j) (-\delta_{ik} + \delta_{jk}) + 2\lambda_M h_k \\
 \Leftrightarrow \lambda_M h_k &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} (m_{ij} - h_i + h_j) (\delta_{ik} - \delta_{jk}) \\
 \Leftrightarrow \lambda_M h_k &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} (m_{ij} - h_i + h_j) \delta_{ik} - \alpha_{ij} (m_{ij} - h_i + h_j) \delta_{jk} \\
 \Rightarrow \lambda_M h_k &= \sum_{i=1}^n \alpha_{ki} (m_{ki} - h_k + h_i) - \sum_{i=1}^n \alpha_{ik} (m_{ik} - h_i + h_k) \\
 \Rightarrow \lambda_M h_k &= \sum_{i=1}^n \alpha_{ki} (-m_{ik} - h_i + h_k) - \alpha_{ki} (m_{ik} - h_k + h_i) \\
 \Leftrightarrow \lambda_M h_k &= 2 \sum_{i=1}^n \alpha_{ki} (-m_{ik} - h_i + h_k) \\
 \Leftrightarrow \frac{\lambda_M h_k}{2} &= - \sum_{i=1}^n \alpha_{ki} m_{ik} - \sum_{i=1}^n \alpha_{ki} h_i + \sum_{i=1}^n \alpha_{ki} h_k
 \end{aligned}$$

Nun können obige Definitionen für \mathbf{A} , \mathbf{h} und \mathbf{M} eingesetzt werden. Dabei bezeichnet \mathbf{X}_k die Spalte k einer beliebigen Matrix \mathbf{X} .

$$\begin{aligned}
 \frac{\lambda_M h_k}{2} &= -\mathbf{A}_k^T \mathbf{M}_k - \mathbf{A}_k^T \mathbf{h} + \mathbf{1}^T \mathbf{A}_k h_k \\
 \Leftrightarrow \mathbf{A}_k^T \mathbf{M}_k &= \left(\mathbf{1}^T \mathbf{A}_k - \frac{\lambda_M}{2} \right) h_k - \mathbf{A}_k^T \mathbf{h}
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Die Grad-Matrix \mathbf{D} enthalte den Zusammenhang der Einzelmessungen.

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \mathbf{1}^T \mathbf{A}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{1}^T \mathbf{A}_n \end{pmatrix} \tag{4.5}$$

Der Vektor \mathbf{k} enthalte die gewichteten Höhenunterschiede.

$$\mathbf{k} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_1 \mathbf{M}_1 \\ \dots \\ \mathbf{A}_n \mathbf{M}_n \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Mit \mathbf{D} und \mathbf{k} kann Gleichung (4.4) verkürzt geschrieben werden.

$$\mathbf{k} = \left(\mathbf{D} - \mathbf{I} \frac{\lambda_M}{2} \right) \mathbf{h} - \mathbf{A} \mathbf{h} \quad (4.7)$$

Umstellen nach \mathbf{h} liefert den minimalen Fehler.

$$\mathbf{h} = \left(\mathbf{D} - \mathbf{I} \frac{\lambda_M}{2} - \mathbf{A} \right)^{-1} \mathbf{k} \quad (4.8)$$

Zur Berechnung von \mathbf{h} müssen also die Matrizen für die Anzahl der überlappenden Messpunkte \mathbf{A} und die Höhenunterschiede der überlappenden Einzelmessungen \mathbf{M} berechnet werden, woraus sich dann \mathbf{D} und \mathbf{k} ergeben.

4.2.3 Messunsicherheit für zusammengesetzte Messungen

Durch das Zusammensetzen verändern sich die Messunsicherheiten gegenüber den Einzelmessungen, die in Abschnitt 4.2 diskutiert wurden. So beträgt die absolute Positionierunsicherheit (Soll-Position) des XY-Kreuztisches SCANplus 200 x 200 der Firma Märzhäuser Wetzlar etwa $1 \mu\text{m}$. Für jede Einzelmessung wurde jedoch die angefahrene Ist-Position gespeichert, die aufgrund des integrierten Messsystems mit Schrittweiten von $0,05 \mu\text{m}$ angegeben wird. In beiden Fällen liegt die Positionierunsicherheit unterhalb der lateralen Auflösung $3,32 \mu\text{m}$ des Sensors auf der Oberfläche.

Ein weiterer Unsicherheitsfaktor ist die Temperaturänderung während einer Messung. Da die Messungen in einem geschlossenen Kellerraum stattfanden, hat sich die Umgebung während der Messzeit aufgeheizt. Die Temperaturänderung während der Dauer einer Einzelmessung von 6 s kann dabei vernachlässigt werden. Über die Gesamtzeit einer Messung von 8 h hat sich die Temperatur im Raum um etwa $\Delta T = 3 \text{ K}$ erhöht. Die Ronden bestehen aus der Aluminium-Legierung EN AW 5083, die einen Wärmeausdehnungskoeffizienten von $\alpha_L = 24,2 \cdot 10^{-6} \text{ m K}^{-1}$ besitzt. In linearer Näherung beträgt die Längenänderung $\Delta L = L\alpha_L\Delta T$ bei einer Temperaturänderung ΔT für eine Länge L . Das führt zu einer Änderung der Rondendicke von maximal $1,3 \text{ }\mu\text{m}$ für die großen Ronden bzw. $0,8 \text{ }\mu\text{m}$ für die kleine Ronde. Da die Höhen der Einzelmessungen wie bereits beschrieben nur relativ gespeichert werden, wirkt sich die absolute Höhenänderung der Oberfläche während der Messung nicht auf die zusammengesetzte Messung aus. Die laterale Ausdehnung der Ronde während der Messzeit führt jedoch zu einer Änderung des Durchmessers von $10,4 \text{ }\mu\text{m}$ für die großen Ronden bzw. $5,8 \text{ }\mu\text{m}$ für die kleine Ronde. Dies entspricht 2–4 Pixeln auf dem Sensor des Mikroskops und kann zu Fehlern beim Zusammensetzen der Einzelmessungen führen, die nicht korrigiert werden. Durch Erweiterung des in Abschnitt 4.2.2 vorgestellten Minimierungsverfahrens könnten jedoch auch diese lateralen Verschiebungen korrigiert werden.

Die Messungen der Stahlbleche wurden aufgrund der größeren Rauheit entweder mit dem Michelson-Interferometer mit 5x Objektiv und dem VSI-Verfahren oder mit dem konfokalen Mikroskop mit 5x Objektiv durchgeführt. Sowohl die Dicke der Stahlbleche (1 mm) als auch die lateralen Messbereiche (20–30 mm) sind deutlich geringer als bei obigen Ronden. Da außerdem der Wärmeausdehnungskoeffizient von Stahl ($\alpha_L = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ m K}^{-1}$) nur etwa halb so groß ist, ist der Fehler beim Zusammensetzen der Einzelmessungen hier vernachlässigbar klein.

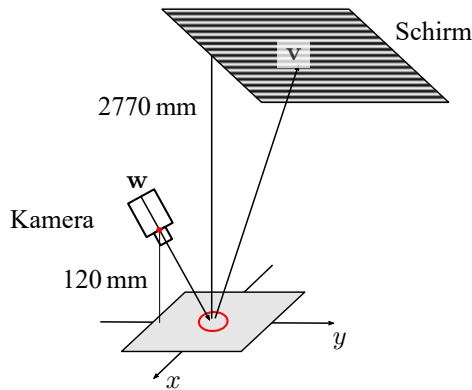


Abbildung 4.10: Deflektometrischer Messaufbau zur Evaluation des spekularen Flusses.

4.2.4 Deflektometrische Registrierung

Die deflektometrische Registrierung ist die Ortskodierung der Umgebung, welche an der Oberfläche gespiegelt wird. Wie bereits in Abschnitt 2.6.6 diskutiert, ist das deflektometrische Messprinzip ähnlich der menschlichen Wahrnehmung spiegelnder Oberflächen. Daher kann für einen vergleichbaren Schirmabstand und eine vergleichbare Auflösung auf der Oberfläche davon ausgegangen werden, dass ein deflektometrischer Sensor mindestens so empfindlich wie der Mensch für Neigungsunterschiede der Oberfläche ist. In diesem Abschnitt wird kurz darauf eingegangen, wie die deflektometrische Registrierung berechnet wird. In Abbildung 4.10 ist der verwendete Messaufbau dargestellt.

Zum Erzeugen einer zeitlich veränderlichen, strukturierten Beleuchtung der Umgebung, im Folgenden Mustersequenz genannt, wird eine Projektion auf eine Schirmebene verwendet. Jeder Sichtstrahl, der von einem Punkt auf der Bildebene der Kamera durch das optische Zentrum der Kamera verläuft, wird an der Oberfläche reflektiert und trifft dann den Schirm in einem Punkt v . Als Kodierungsverfahren wird ein zeitliches Phasenschiebeverfahren mit vier äquidistanten Schritten verwendet. Die Grundidee des zeitlichen Phasenschiebens ist die Kodierung der Spalten- und Zeilenposition $\mathbf{v} = (v_x, v_y)^T$ auf dem Monitor

durch die Phasen $\phi = (\phi_x, \phi_y)^T$ eines Kosinussignals, welches als intensitätsmodulierte Mustersequenz auf dem Schirm angezeigt und von der Kamera am Punkt \mathbf{w} beobachtet wird (hier nur für die Kodierung der Spaltenposition, die Kodierung der Zeilenposition erfolgt analog).

$$g_{x,i}(\mathbf{w}) = o(\mathbf{w}) + m(\mathbf{w}) \cos(\phi_x(\mathbf{w}) + \psi_i) \quad (4.9)$$

Mit vier Phasenschüben $\psi_i = 2\pi i/4$, $i = 1, \dots, 4$ und den drei unbekannt GröÙen mittlere Intensität o , Modulation m und Phase ϕ_x erhält man ein überbestimmtes Gleichungssystem für jeden Punkt auf dem Schirm [Bur12].

$$\phi_x(\mathbf{w}) \bmod 2\pi = \arctan\left(\frac{g_{x,3} - g_{x,1}}{g_{x,0} - g_{x,2}}\right) \quad (4.10)$$

Um die Spaltenposition v_x aus der Phase zu bestimmen, muss die Wellenlänge λ_s des Kosinussignals größer als die Schirmbreite sein. Andernfalls erhält man die gefaltete Phase, aus der man die Spaltenposition mit $v_x = \lambda_s \left(q_x + \frac{\phi_x}{2\pi}\right)$ rekonstruieren kann, wenn die Unbekannte q_x durch zusätzliche Informationen berechnet wird. Dafür gibt es verschiedene Verfahren der Phasenfaltung. Hier wird das mehrstufige Phasenschiebverfahren aus [WB11] mit zwei teilerfremden Wellenlängen verwendet. Damit sind für die Kodierung von Spalten- und Zeilenposition bei Verwendung von vier Phasenschüben und zwei Wellenlängen insgesamt 16 Bildaufnahmen nötig. Die Registrierung eines Schirmpunkts $\mathbf{v} \in \mathcal{V}$ für jeden Bildpunkt $\mathbf{w} \in \mathcal{W}$ sei durch die Abbildung $\varrho : \mathcal{W} \rightarrow \mathcal{V}$, $\varrho(\mathbf{w}) = \mathbf{v}$ beschrieben. Ein Problem, das sich bei der Aufnahme des Schirmmusters ergibt, ist die begrenzte Schärfentiefe der Abbildung des Schirmmusters über den verformten Bereich der Oberfläche, siehe Abbildung 4.11.

Da die unscharfe Abbildung einen Tiefpasscharakter besitzt [BPF12], bleibt der abgebildete Kosinus aus Gleichung (4.9) zwar erhalten, wird aber für höhere Ortsfrequenzen so stark abgeschwächt, dass die Registrierung stark verrauscht ist. Daher muss die Blende bei der Bildaufnahme sehr klein gewählt werden, was lange Belichtungszeiten und somit lange Messzeiten zur Folge hat. Der Mensch

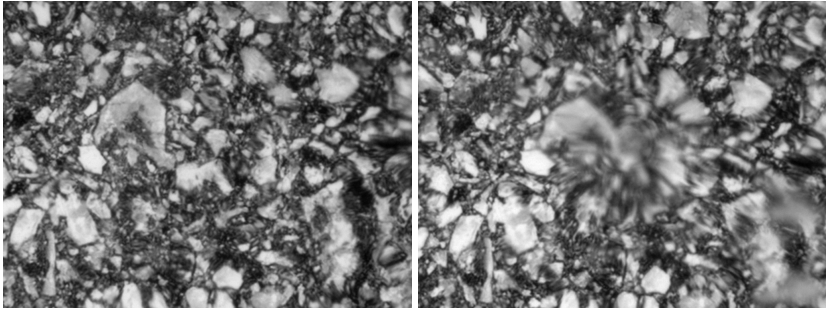


Abbildung 4.11: Aufnahme der Spiegelung eines Umgebungsmusters in einer ebenen, spiegelnd reflektierenden Oberfläche ohne Oberflächenunvollkommenheit (links) und mit Oberflächenunvollkommenheit (rechts). Der Fokus der Kamera ist auf das Umgebungsmuster eingestellt, trotzdem wird die Umgebung über die Oberflächenunvollkommenheit unscharf abgebildet, da die Oberflächenunvollkommenheit selbst als optisches Element wirkt und den musterseitigen Schärfebereich verschiebt.

wird durch diesen Effekt jedoch nicht beeinträchtigt, da er die Akkommodation des Auges ständig an das betrachtete Muster anpasst.

Berechnung des spekularen Flusses

Man kann die deflektometrische Registrierung als eindeutige Zuordnung jedes Sichtstrahls zu einem Schirmpixel interpretieren. Um den SF zwischen Bezugsfläche und verformter Oberfläche zu berechnen, wird zunächst eine deflektometrische Registrierung eines ungestörten Bereichs auf der Oberfläche als Bezugsfläche aufgenommen. Anschließend wird die Oberfläche verschoben, sodass die deflektometrische Registrierung des verformten Bereichs der Oberfläche gemessen wird; siehe Abbildung 4.12.

Der Differenzvektor zweier deflektometrischer Registrierungen befindet sich in der Schirmebene, der SF $\mathbf{f} = (f_1, f_2)^T$ befindet sich jedoch in der Bildebene, siehe Abbildung 4.13.

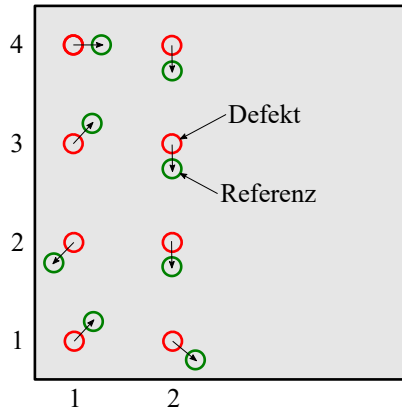


Abbildung 4.12: Auf dem Testblech zur Evaluation befinden sich acht Oberflächenunvollkommenheiten A (1, 1) bis H (2, 4). Die Bezugsoberfläche zu jeder Oberflächenunvollkommenheit befindet sich in der direkten Nachbarschaft.

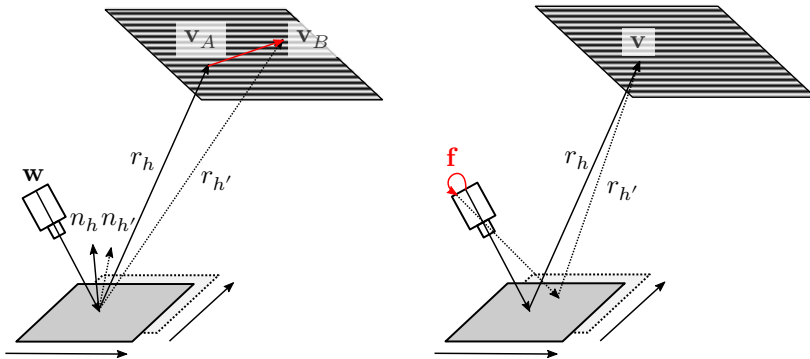


Abbildung 4.13: Die laterale Verschiebung der verformten Oberfläche führt zu einer Änderung der Richtung des reflektierten Sichtstrahls und somit einer Verschiebung des Schnittpunkts \mathbf{v} mit dem Schirm (links). Der SF befindet sich in der Bildebene und wird mit Algorithmus 2 aus der deflektometrischen Registrierung für die Punkte auf der Bildebene \mathbf{w} berechnet (rechts).

Um \mathbf{f} zu finden, muss der für jeden Bildpunkt $\mathbf{w} = (w_x, w_y)^T$ registrierte Schirmpunkt $\mathbf{v} = (v_x, v_y)^T$ mit $\mathbf{v}_A = \varrho_A(\mathbf{w})$ in der zweiten Registrierung $\mathbf{v}_B = \varrho_B(\mathbf{w})$ gesucht werden, was durch Algorithmus 2 berechnet wird.

Algorithmus 2 Berechnung des spekularen Flusses

```

1: function SFLOW( $\varrho_A, \varrho_B$ )
2:   for all  $\mathbf{w}_A \in W$  do
3:      $\mathbf{v}_A \leftarrow \varrho_A(\mathbf{w}_A)$ 
4:      $\mathbf{w}_B \leftarrow \text{MINDIST}(\varrho_B, \mathbf{v}_A)$ 
5:      $\mathbf{f}(\mathbf{w}_A) \leftarrow \mathbf{w}_A - \mathbf{w}_B$ 
6:   return  $\mathbf{f}$ 

7: function MINDIST( $\varrho_B, \mathbf{v}_A$ )
8:    $d_{\min} \leftarrow \infty$ 
9:   for all  $\mathbf{w}'_B \in W$  do
10:     $\mathbf{v}'_B \leftarrow \varrho_B(\mathbf{w}'_B)$ 
11:     $d \leftarrow \|\mathbf{v}_A - \mathbf{v}'_B\|$ 
12:    if  $d < d_{\min}$  then
13:       $d_{\min} \leftarrow d$ 
14:       $\mathbf{w}_B \leftarrow \mathbf{w}'_B$ 
15:   return  $\mathbf{w}_B$ 

```

In Abbildung 4.14 sind Beispiele für die deflektometrische Registrierung eines verformten Bereichs der Oberfläche (Oberflächenunvollkommenheit A) und der zugehörigen Bezugsoberfläche sowie der daraus berechnete SF dargestellt.

Befindet sich die Kamera im Brennpunkt eines konkaven Bereichs der Oberfläche, ist der SF \mathbf{f} nicht eindeutig; siehe Seite 80. Nach Algorithmus 2 wird jedoch auch in diesem Fall der SF zu einem Punkt innerhalb eines solchen Bereichs berechnet.

4.2.5 Transformation in die Einheitskamera

Bevor die Ergebnisse des deflektometrisch gemessenen SF mit dem approximierten SF verglichen werden können, muss dieser in die Bildebene der Ein-

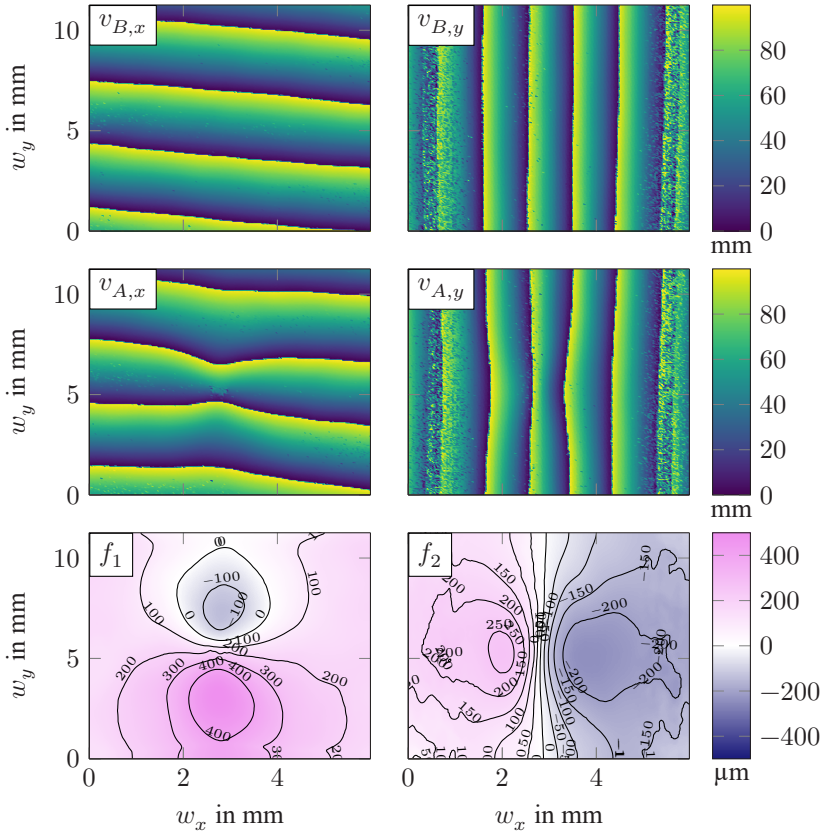


Abbildung 4.14: Registrierung der Punkte auf dem Schirm über die Bezugs­oberfläche $\mathbf{v}_B = \varrho_B(\mathbf{w})$, über die Oberflächenunvollkommenheit $\mathbf{v}_A = \varrho_A(\mathbf{w})$ in Zeilen- und Spaltenrichtung, sowie der berechnete SF f in der Bildebene zwischen den beiden Registrierungen. Zur besseren Sichtbarkeit sind die Registrierungen gefaltet für eine Wellenlänge von 100 mm auf dem Schirm dargestellt.

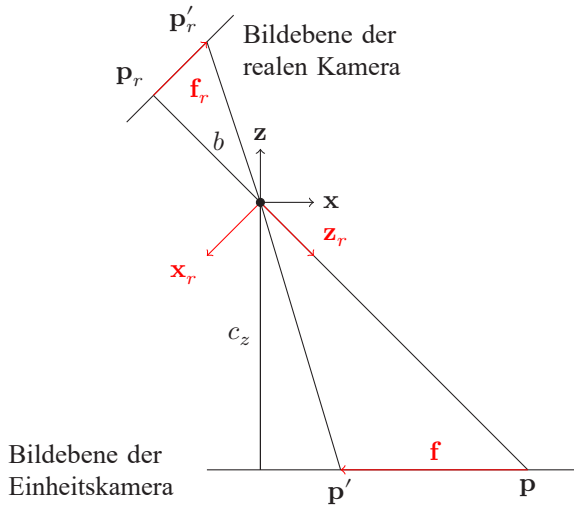


Abbildung 4.15: Koordinatentransformation einer realen Kamera zur Einheitskamera.

heitskamera transformiert werden; siehe Gleichung (3.51). Die Einheitskamera und das Weltkoordinatensystem haben ihren Ursprung im Projektionszentrum der realen Kamera; siehe Abbildung 4.15.

Die Achsen des Koordinatensystems der realen Kamera sind in Weltkoordinaten angegeben.

$$\{\mathbf{x}_r, \mathbf{y}_r, \mathbf{z}_r\} = \left\{ \begin{pmatrix} x_{1,r} \\ x_{2,r} \\ x_{3,r} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} y_{1,r} \\ y_{2,r} \\ y_{3,r} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} z_{1,r} \\ z_{2,r} \\ z_{3,r} \end{pmatrix} \right\} \quad (4.11)$$

Die Bildebene der realen Kamera hat den Abstand b entlang von \mathbf{z}_r und liege in der Ebene der Vektoren \mathbf{x}_r und \mathbf{y}_r . Die \mathbf{x} und \mathbf{y} Vektoren des Weltkoordinatensystems liegen, mit dem Abstand c_z entlang von \mathbf{z} verschoben, in der Objektebene. Die Objektebene ist gleichzeitig die Bildebene der Einheitskame-

ra. Um den Punkt auf die Bildebene der Einheitskamera abzubilden, wird die Projektion $\mathbf{p} = \pi(\mathbf{p}_r)$ nach [Mal+91] verwendet.

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} = \frac{-c_z}{x_{3,r}p_{1,r} + y_{3,r}p_{2,r} - z_{3,r}b} \begin{pmatrix} x_{1,r}p_{1,r} + y_{1,r}p_{2,r} - z_{1,r}b \\ x_{2,r}p_{1,r} + y_{2,r}p_{2,r} - z_{2,r}b \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

Der SF \mathbf{f} auf der Bildebene der Einheitskamera lässt sich nun direkt für zwei Punkte auf der Bildebene der realen Kamera \mathbf{p}_r und \mathbf{p}'_r berechnen.

$$\mathbf{f}(\mathbf{p}_r, \mathbf{p}'_r) = \pi(\mathbf{p}_r) - \pi(\mathbf{p}'_r) \quad (4.13)$$

4.2.6 MTF Messung

Die Messung der Kontrastübertragungsfunktion der lackierten Stahlbleche wurde ähnlich zu Gleichung (2.22) über das Verhältnis des Kontrasts auf der Bildebene zum Kontrast auf der Objektebene bestimmt. Da die Objektebene hier nicht die spiegelnde Oberfläche, sondern das darin gespiegelte Bild der Umgebung ist, wurde ein deflektometrischer Messaufbau verwendet. Auf dem Schirm mit einer Rastergröße von 0,5 mm wurden dazu Streifenmuster von 1 bis 500 Streifen über die gesamte Schirmbreite 960 mm bzw. -höhe 540 mm angezeigt und mit der Kamera AVT Dolphin F-145B mit Rastergröße 6,45 μm (8,256 mm x 6,192 mm Sensorgröße) und Linos MeVis-C 1.6/16 Objektiv mit einer Auflösung von mindestens 100 Lp mm^{-1} (entspricht einer Rastergröße von 5 μm auf dem Sensor) aufgezeichnet. Der Abstand der Kamera zur Oberfläche beträgt 710 mm, der Abstand vom Schirm zur Oberfläche beträgt 560 mm. In Abbildung 4.16 sind beispielhaft die Spiegelbilder eines Streifenmusters mit einer Ortsfrequenz von $k_{\text{img}} = 0,29$ cpd für einen Oberflächenspiegel und die Testoberflächen 95 GU, 80 GU, 70 GU, 60 GU dargestellt.

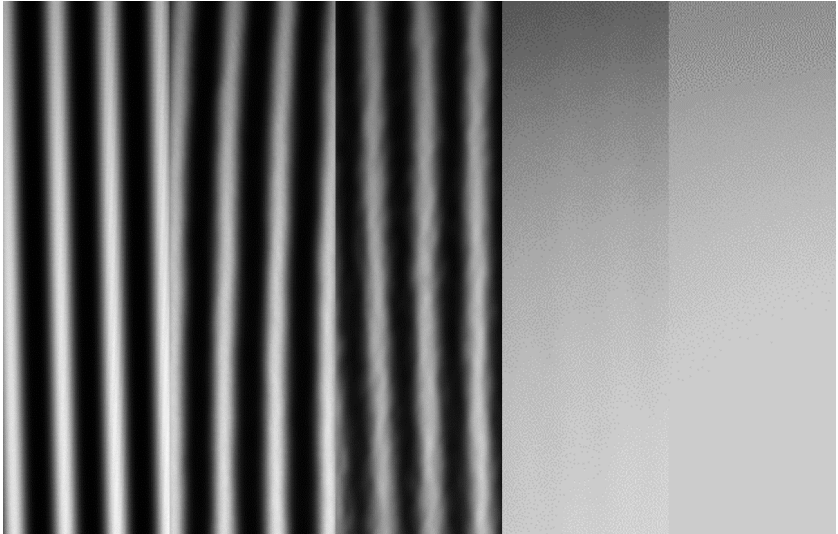


Abbildung 4.16: Bild eines reflektierten Streifenmusters mit $k = 0,29$ cpd für einen Oberflächenspiegel und die Oberflächen 95 GU bis 60 GU (von links nach rechts). Es ist eine deutliche Änderung des abgebildeten Musterkontrasts zwischen den Oberflächen 80 GU und 70 GU erkennbar, was auf die unzureichende Beschreibung der Oberflächen durch die GU-Werte im Hinblick auf die Kontrastübertragung zurückzuführen ist.

Die Kontrastübertragung eines Schirmmusters mit Kontrast c_{scr} auf die Bildebene mit Kontrast c_{img} kann aufbauend auf Gleichung (2.15) als Verkettung der abbildenden Teile im Strahlengang durch Multiplikation ihrer MTFs beschrieben werden. Somit lässt sich die Abbildung des Schirmmusters über die spiegelnde Oberfläche $f_{\text{MTF.srf}}$ und die Optik $f_{\text{MTF.cam}}$ auf die Bildebene der Kamera beschreiben.

$$c_{\text{img}}(k_{\text{img}}) = f_{\text{MTF.srf}}(k_{\text{img}}) \cdot f_{\text{MTF.cam}}(k_{\text{img}}) \cdot c_{\text{scr}}(k_{\text{img}}) \quad (4.14)$$

Nach Gleichung (2.22) wird die MTF der gesamten Abbildung bestimmt. Da nur die Kontrastübertragung durch die Oberfläche $f_{\text{MTF.srf}}$ von Interesse ist, wurde

mit einem Oberflächenspiegel $f_{\text{MTF.ref}} \approx 1$ die Kontrastübertragung des Systems $f_{\text{MTF.cam}}$ bestimmt und durch diese dividiert.

$$f_{\text{MTF.srf}}(k_{\text{img}}) = \frac{f_{\text{MTF.srf}}(k_{\text{img}}) \cdot f_{\text{MTF.cam}}(k_{\text{img}})}{f_{\text{MTF.ref}}(k_{\text{img}}) \cdot f_{\text{MTF.cam}}(k_{\text{img}})} \quad (4.15)$$

In Abschnitt 4.3.2 werden die Messungen der Kontrastübertragung für die Testoberflächen 95 GU, 80 GU, 70 GU, 60 GU dargestellt.

4.3 Eigenschaften der Testoberflächen

Vor der Evaluation der Wahrnehmungsmodelle werden zunächst die Eigenschaften der Testoberflächen bestimmt. Dazu gehört die Bestimmung der Parameter des Defektmodells in Abschnitt 4.3.1, das die Verformungen der Oberfläche approximiert, um diese mit wenigen Parametern zu beschreiben. Außerdem werden die Rauheit und Welligkeit der Testoberflächen in den Abschnitten 4.3.2 und 4.3.3 analysiert.

4.3.1 Analyse des Defektmodells

In Abschnitt 3.4.5 wurde ein rotationssymmetrisches, gaußförmiges Defektmodell zur approximativen Beschreibung von lokalen Verformungen der Oberfläche eingeführt. In diesem Abschnitt werden die topographischen Messungen der mit einem Federkörner auf lackierten Stahlblechen erzeugten Verformungen mit dem gaußschen Defektmodell verglichen. Die Plausibilitätsprüfung des berechneten SF (nach Gleichung (3.58)) erfolgt direkt aufgrund der Topographie der Oberfläche, also ohne Annahme eines Defektmodells. Daher ist für die Plausibilitätsprüfung eine gute Übereinstimmung der realen Verformungen mit dem Defektmodell nicht nötig. Für eine Reduktion der Sichtbarkeitsbedingungen auf wenige Parameter (Breite, Höhe und Abstand einer Verformung) wie in Abbildung 3.24 dargestellt, wird jedoch eine gute Approximation der

typischen Oberflächenunvollkommenheiten durch ein Defektmodell benötigt. In Abbildung 4.17 sind die Verformungen auf der Oberfläche und die Differenz zu einem angepassten gaußförmigen Defekt dargestellt.

Die erste Beobachtung ist, dass sich viele der gemessenen Verformungen gut durch einen gaußförmigen Verlauf approximieren lassen, auch wenn sie nicht rotationssymmetrisch sind. Wenn es das Ziel ist, die Verformungen besser zu approximieren, kann das Defektmodell erweitert werden, beispielsweise indem die Breite einer Verformung entlang zweier Hauptrichtungen und eine Rotation der beiden Hauptrichtungen zugelassen werden. Alternativ können komplexere Formen durch eine Gaußmischdichte beschrieben werden. Für die Evaluation des SF wird die Messung der Verformungen direkt verwendet, also ohne Approximation der Verformung durch das Defektmodell. Erst bei den Studienauswertungen werden die realen Verformungen durch das Defektmodell beschrieben. Hier wird zunächst ein erweitertes Modell geschätzt und die jeweils kleinste laterale Ausdehnung, also die größte Krümmung ausgewählt. Dies entspricht dem Worst-Case Szenario, da die Sichtbarkeit der Verformungen überschätzt wird. Die Ergebnisse der Schätzung für die Parameter a und r sind in Abbildung 4.18 zusammen mit ihren Schätzunsicherheiten (95 %-Konfidenzintervalle) zusammengefasst.

Bis auf wenige Ausnahmen (60 GU D5, 70 GU B4, 70 GU B7, 70 GU D7, 80 GU H6, 95 GU C4) sind die Konfidenzintervalle klein, die geschätzten Parameter sind also gegenüber dem Rauschen der Messung unempfindlich. Daraus kann gefolgert werden, dass das Messrauschen für die meisten Verformungen wenig Einfluss auf die Schätzung der Parameter hat. In der Auswertung der Wahrnehmungsmodelle werden die einzelnen Verformungen im Detail diskutiert.

4.3.2 Analyse der Rauheit

Aufbauend auf der in Abschnitt 4.2.6 beschriebenen Charakterisierung der Oberflächenrauheit durch eine MTF Messung, wird hier die Winkelauflösung auf dem Schirm geschätzt. Die höchste Ortsfrequenz des Musters $k_{\text{eye,max}}$, die bei

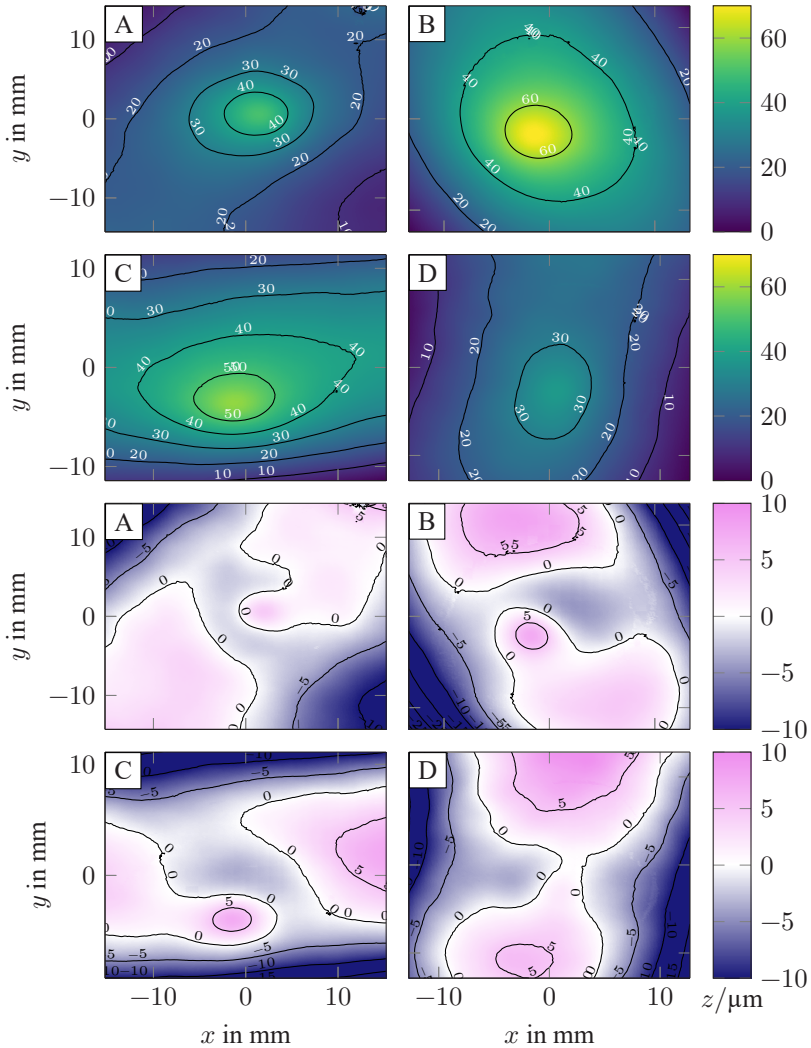


Abbildung 4.17: Messungen der mit einem Federkörper erzeugten Defekte (Reihen 1–2) auf einem lackierten Stahlblech und Abweichungen zum Gauß-Defektmodell (Reihen 3–4).

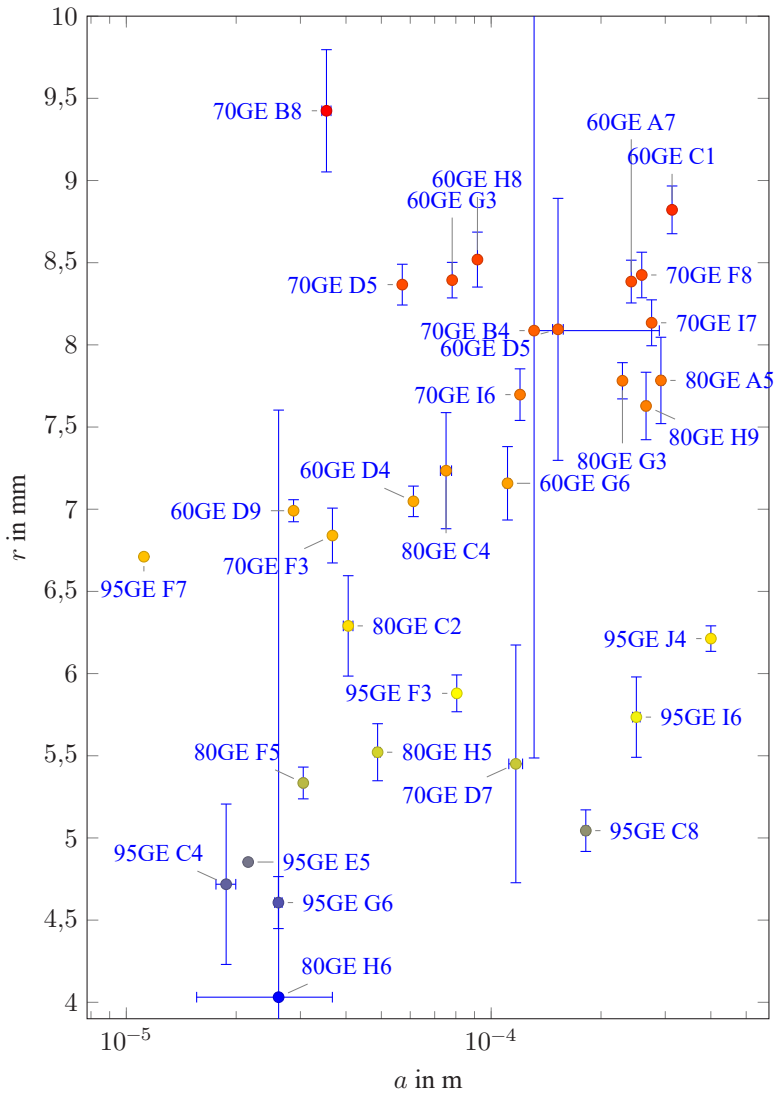


Abbildung 4.18: Parameterschätzungen des Defektmodells für a und r mit 95% Konfidenzintervallen für die Verformungen auf den lackierten Stahlblechen 60 GU, 70 GU, 80 GU und 95 GU.

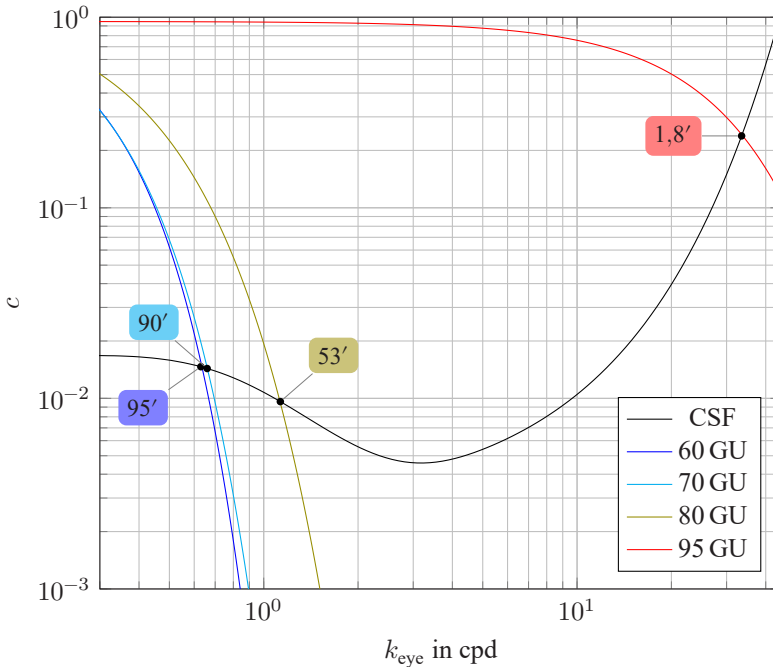


Abbildung 4.19: CSF des menschlichen Auges und MTF der Testoberflächen 60 GU, 70 GU, 80 GU und 95 GU. Für die Schnittpunkte der CSF und MTF sind die Schwinkel $\theta_{\text{eye}} = 1/k_{\text{eye,max}}$ angegeben.

dem gegebenen Aufbau gerade noch auf dem Schirm erkannt werden kann, muss noch ausreichend Kontrast $c_{\text{eye}}(k_{\text{eye}})$ besitzen, um vom Auge erkannt zu werden; siehe Gleichung 3.2. In Abbildung 4.19 sind die Ergebnisse der Kontrastmessung dargestellt und der jeweils errechnete Schnittpunkt mit der CSF $\theta_{\text{eye}} = 1/k_{\text{eye,max}}$ für alle Oberflächen eingezeichnet.

Es ist zu sehen, dass die Abbildungseigenschaften der Oberflächen durch die GU-Skala unzureichend beschrieben werden. So besitzen Oberflächen mit 60 GU und 70 GU ähnliche Abbildungseigenschaften, während die Oberfläche mit 80 GU und insbesondere die Oberfläche mit 95 GU deutlich höhere Musterfrequenzen

abbilden. Außerdem ist zu sehen, dass geringe Musterfrequenzen auch über sehr raue Oberflächen abgebildet werden. Diese Eigenschaft wird beispielsweise beim photometrischen Stereo genutzt. Auf sehr glatten Oberflächen dagegen wird θ_{eye} nicht mehr durch die Oberfläche, sondern ausschließlich durch die Eigenschaften des Auges beschränkt.

Die berechneten Winkelauflösungen, die über die jeweiligen Testoberflächen möglich sind, gelten nur für den verwendeten Aufbau. Ändern sich die Bedingungen, beispielsweise wenn Streulicht aus der Umgebung auf die Oberfläche fällt oder die Oberfläche aus einem anderen Abstand oder Winkel betrachtet wird, so kann sich auch die Winkelauflösung über die Oberfläche ändern. Im Folgenden wird jedoch davon ausgegangen, dass die Winkelauflösung für die betrachteten Szenarien nicht stark von den hier angegebenen Werten abweicht.

Synthese der Rauheit

Die Rauheit der Oberfläche kann in Mitsuba durch die Wahl einer geeigneten BRDF simuliert werden. In Mitsuba sind verschiedene BRDF-Modelle für teilspeiegelnde Oberflächen implementiert, die auf dem Mikrofacetten-Modell von Torrance et al. [TS67; CT82] basieren. Diese beruhen auf der Annahme, dass die Oberfläche als Kombination der (deterministischen) Form und der (stochastischen) Rauheit beschrieben werden kann. Die Rauheit wird dabei über eine Verteilungsfunktion der Neigung einzelner Flächenelemente der Oberfläche (Mikrofacetten) beschrieben. Je rauer die Oberfläche ist, umso breiter wird die Verteilung der Neigungen. Das Problem bei diesem Ansatz ist, dass diese Verteilung stark von der Größe und Abtastung der Flächenelemente abhängig ist. Es gibt bisher keine systematische Herangehensweise, wie die Größe der Flächenelemente (Synthese) bzw. die Grenzwellenlängen für eine skalenbegrenzte Oberfläche (Analyse) zu bestimmen sind, um ein realistisches Erscheinungsbild einer realen Oberfläche zu synthetisieren [Don+15]. In dieser Arbeit wird daher stattdessen die MTF zur Analyse der Oberflächenrauheit verwendet; siehe Abschnitte 2.3.3 und 3.1. Da eine Bildsynthese in Mitsuba damit nicht möglich ist, wird die Rauheit auf simulierten Daten nicht evaluiert.

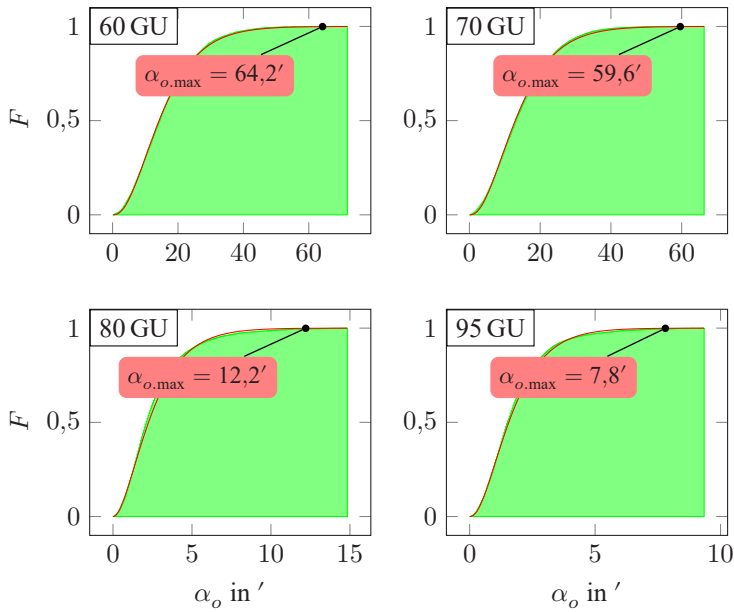


Abbildung 4.20: Empirische Verteilung (grün) und geschätzte Beta-Verteilung (rot) der Gradientenabweichungen der Oberflächenwelligkeit auf den Testblechen. Für jede Verteilung ist die maximale Gradientenabweichung $\alpha_{o,\text{max}}$ aus Gleichung (3.16) angegeben.

4.3.3 Analyse der Welligkeit

In Abschnitt 3.2 wurde vorgestellt, wie aus der Statistik der Normalenabweichungen auf der Bezugsoberfläche die maximale Normalenabweichung bestimmt wird. In diesem Abschnitt werden die maximalen Normalenabweichungen für die verwendeten Testbleche über die Quantile der χ^2 -Verteilungsfunktion geschätzt. In Abbildung 4.20 sind die geschätzten und die empirischen Verteilungsfunktionen dargestellt.

Diese Werte werden bei der Auswertung der Studie auf den lackierten Oberflächen verwendet, um den Bereich festzulegen, in dem kleine Verformungen durch die Welligkeit der Oberfläche maskiert werden.

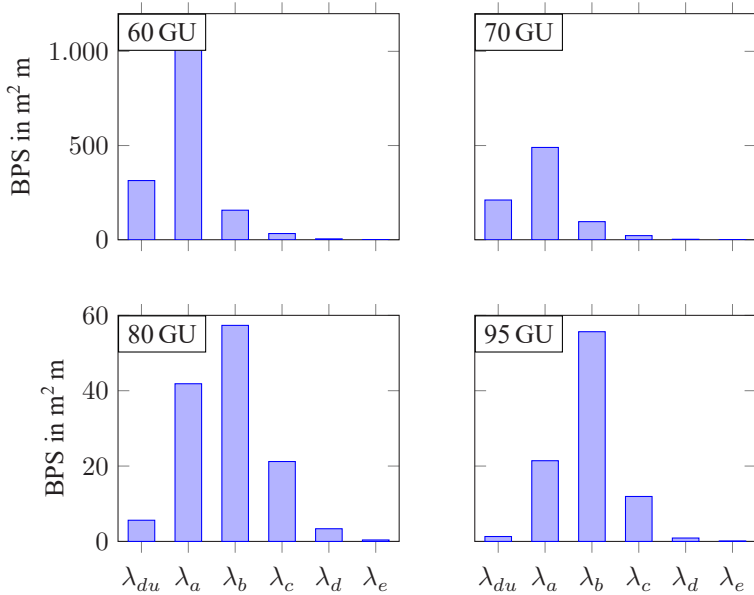


Abbildung 4.21: Ergebnisse der Welligkeitsanalyse.

Analyse des Orangenschaleneffekts

In diesem Abschnitt werden die Testoberflächen, die einen Orangenschaleneffekt zeigen, mit dem Bewertungsmaß aus Abschnitt 3.2.3 analysiert und die Kennzahlen zur Synthese statistisch ähnlicher Oberflächen verwendet. In Abbildung 4.21 sind die BPS_i -Werte für die Oberflächen der lackierten Stahlbleche 60 GU, 70 GU, 80 GU und 95 GU dargestellt.

Für die Oberflächen 60 GU und 70 GU, die einen starken Orangenschaleneffekt aufweisen, nehmen die BPS_i -Kennzahlen insgesamt große Werte an und das Maximum befindet sich im Wellenlängenbereich λ_a . Auf den Oberflächen 80 GU und 95 GU ist der Orangenschaleneffekt nur schwach sichtbar. Die Kennzahlen für diese Oberflächen haben im Vergleich deutlich kleinere Werte und erreichen ihr Maximum für den Wellenlängenbereich λ_b . Für die Testoberflächen ent-

steht ein starker Orangenschaleneffekt vor allem durch ausgeprägte Welligkeit im Bereich um 0,2 mm Wellenlänge, während die Oberflächen mit geringem Orangenschaleneffekt nur schwach ausgeprägte Welligkeit vor allem im Bereich um 0,6 mm Wellenlänge besitzen. Anhand dieser Werte werden im folgenden Abschnitt statistisch ähnliche Oberflächen synthetisiert.

Synthese des Orangenschaleneffekts

Die Oberflächenwelligkeiten werden im Ortsfrequenzraum der Fourier-Transformation synthetisiert [Ola14]. Dabei wird eine zufällige Phase $\phi(k_x, k_y)$ und als Betragsspektrum $O(k_x, k_y)$ die mittlere Leistungsdichte BPS_i einer zuvor analysierten Oberfläche verwendet.

$$O(k_x, k_y) = \begin{cases} \text{BPS}_i & \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \in 1/\lambda_i \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.16)$$

Eine Oberfläche $o(x, y)$ mit einer ähnlichen Statistik ergibt sich über eine inverse Fouriertransformation des definierten Betragsspektrums und einer zufälligen (in beide Richtungen unabhängig gleichverteilten) Phase.

$$o(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \{ O(k_x, k_y) \cdot e^{j\phi(k_x, k_y)} \} \quad (4.17)$$

In Abbildung 4.22 ist die reale Welligkeit und die zugehörigen Ergebnisse der Synthese den in Abschnitt 4.3.3 vorgestellten BPS-Werten gegenübergestellt.

Die Wellenlängen der synthetisierten Welligkeit stimmen mit der Welligkeit der analysierten Oberfläche überein. Die Amplituden sind für die Oberflächen 60 GU und 70 GU etwas zu groß, während sie für die Oberfläche 95 GU etwas zu klein sind. Ein Problem ist, dass die Welligkeiten auf den Testoberflächen entgegen der Annahme eine leichte Richtungsabhängigkeit aufweisen.

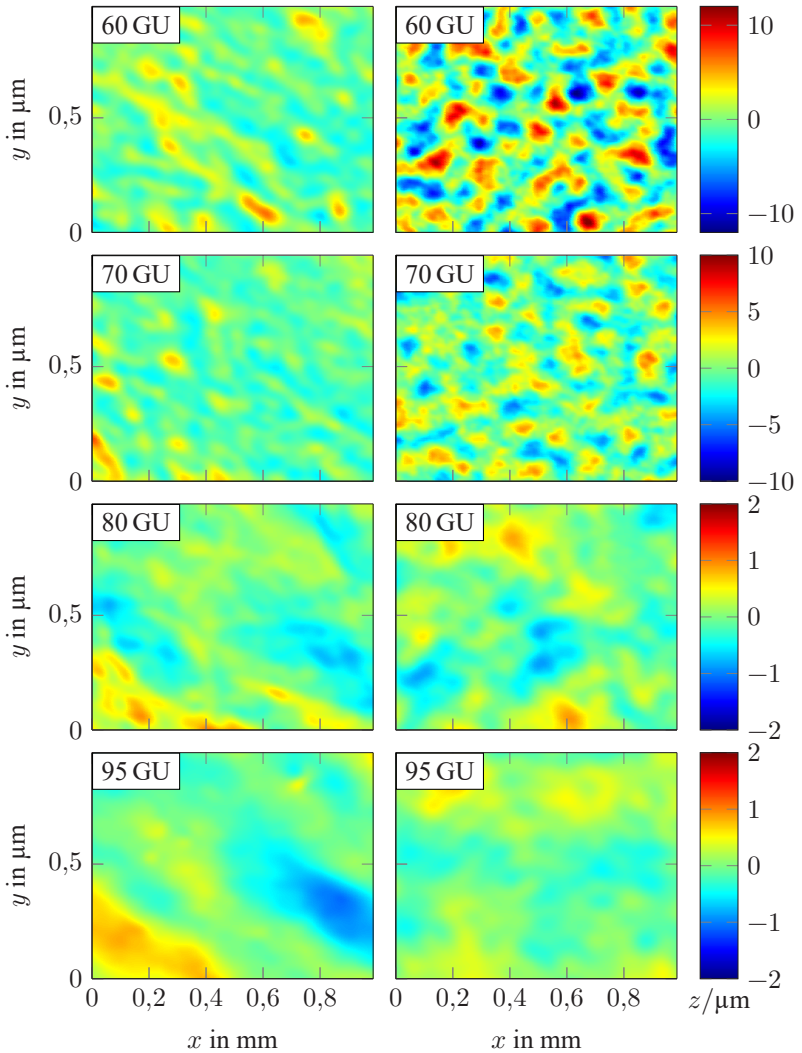


Abbildung 4.22: Vergleich der Topographie der analysierten Oberfläche (linke Spalte) und der synthetisierten Oberfläche mit den ermittelten BPS-Werten der jeweiligen Oberfläche (rechte Spalte).

In Abschnitt 3.2.2 wurde eine weitere Möglichkeit zur Beschreibung der Welligkeiten vorgestellt, bei der die Statistik über die Parameter einer Linearkombination gaußförmiger Verformungen betrachtet wird, mit der die Oberfläche dargestellt werden kann. Diese Methode liefert für die nach Gleichung (4.17) synthetisierten Oberflächen sehr gute Ergebnisse. Da die Welligkeit auf den realen Testoberflächen jedoch nur schlecht durch die gaußförmigen Verformungen beschrieben wird, ist die Statistik über die Parameter der Welligkeit nicht ausreichend, um diese für die Wahrnehmungsmodelle zu verwenden; siehe Abschnitt 3.2.2. Daher wurde dieser Ansatz nicht evaluiert.

4.4 Plausibilitätsprüfung des SF-Modells

In diesem Abschnitt werden die Annahmen und die Approximation des SF-Modells aus Abschnitt 3.4 anhand simulierter und realer Daten überprüft. Durch eine deflektometrische Registrierung werden zunächst die an der Oberfläche gespiegelten Schirmpunkte eindeutig identifiziert; siehe Abschnitt 4.2.4. Aufgrund dieser eindeutigen Kodierung wird dann der SF in der Bildebene berechnet und in die Bildebene der Einheitskamera transformiert; siehe Abschnitte 4.2.4 und 4.2.5. Nun können die Messungen des SF der simulierten und der realen Oberflächen mit dem approximierten SF des Modells verglichen werden; siehe Abschnitte 4.4.1 und 4.4.2. Abschließend wird in Abschnitt 4.4.3 die Approximation für kleine gaußförmige Formabweichungen überprüft.

4.4.1 Vergleich mit Simulationsdaten

Für den Vergleich wurde eine ebene Bezugsoberfläche mit einer gaußförmigen Verformung entsprechend dem gaußschen Defektmodell nach Gleichung (3.68) generiert. Mit der Bezugsoberfläche und der verformten Oberfläche wurden dann für unterschiedliche Betrachtungswinkel auf die Oberfläche und einen Abstand von 1 m Bilder synthetisiert, mit denen eine deflektometrische Registrierung berechnet wurde, die für die Flussberechnung verwendet wurde. Anschließend

wurde die Winkelabweichung nach Gleichung (3.59) berechnet. Diese Winkelabweichung des gemessenen SF dient als Referenz für die Approximation des SF nach Gleichung (3.62). Die Approximation des SF wurde mit einer, zu der Simulationsszene passenden Verschiebung d und einer Re-Skalierung von c_z entsprechend Gleichung (3.66) berechnet.

Die Ergebnisse zeigen für alle Beobachtungswinkel, siehe Abbildung 4.1, eine sehr gute Übereinstimmung der Approximation mit den Messungen anhand des simulierten SF. In Abbildung 4.23 sind für vier verschiedene Beobachtungswinkel und eine kleine Verformung mit $a = 1$ mm und $r = 0,3$ m die Ergebnisse gegenübergestellt. Da die Kamera, mit der die simulierten Daten aufgezeichnet wurden, in y -Richtung ein etwas zu kleines Sichtfeld besitzt, ist jeweils ein kleiner Bereich am oberen Rand abgeschnitten.

4.4.2 Vergleich mit realen Daten

Das Ergebnis des gemessenen SF für vier reale Oberflächenunvollkommenheiten, die für den Vergleich verwendet werden, ist in Abbildung 4.24 dargestellt.

Der gemessene SF und die Approximation des SF aufgrund der Höhendaten zeigt eine grobe Übereinstimmung der Größenordnung und der Form des SF. Die im Vergleich zu den simulierten Daten schlechtere Übereinstimmung der Approximation mit den deflektometrisch gemessenen Daten liegt an den zugrunde liegenden Höhendaten. Während die Höhenkarten für die simulierten Messungen sehr glatt sind, enthalten die Messungen der realen Verformungen neben dem eigentlichen gaußförmigen Defekt weitere, kurzweilige Formabweichungen. Diese sind in der Topographie in Abbildung 4.5 kaum zu erkennen, werden jedoch durch die Ableitungen, die zur Flussberechnung benötigt werden, verstärkt. Für die Bestimmung der Ableitungen wurde daher eine skalenbegrenzte Oberfläche mit Spline-Filtern nach [ISO16610-22] berechnet.

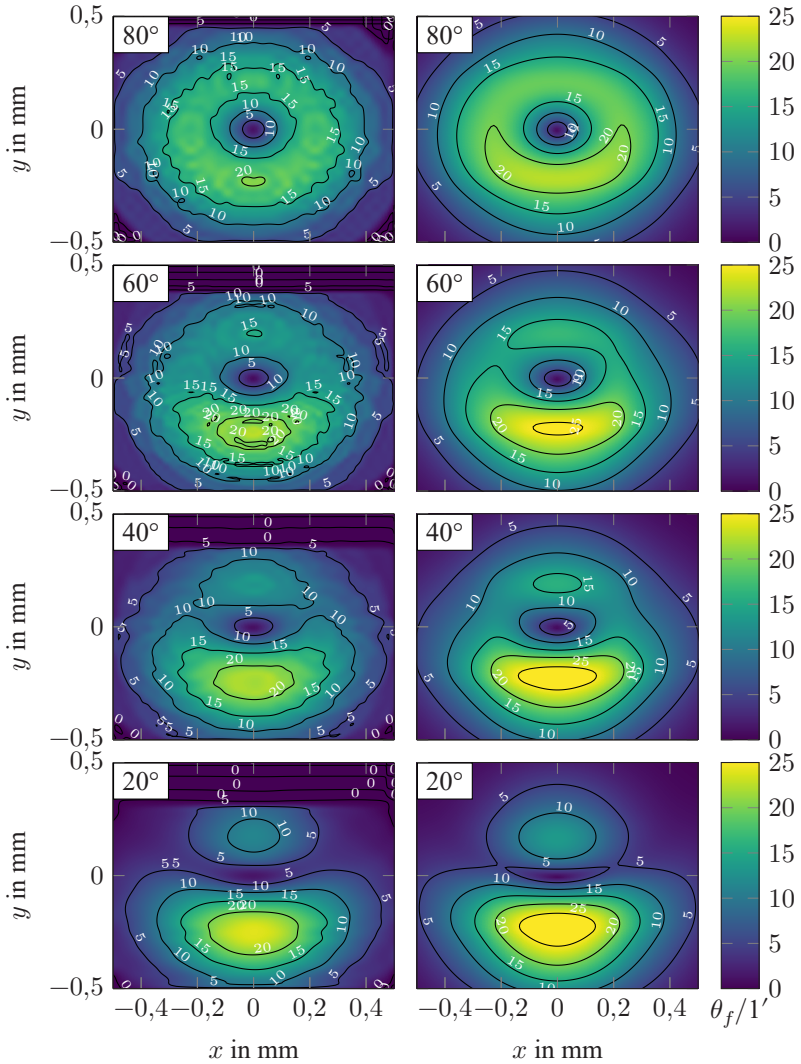


Abbildung 4.23: Flusschätzung aus simulierter Messung (linke Spalte) und approximierter Fluss (rechte Spalte) für verschiedene Winkel und mit den Parametern $a = 1$ mm, $r = 0,3$ m.

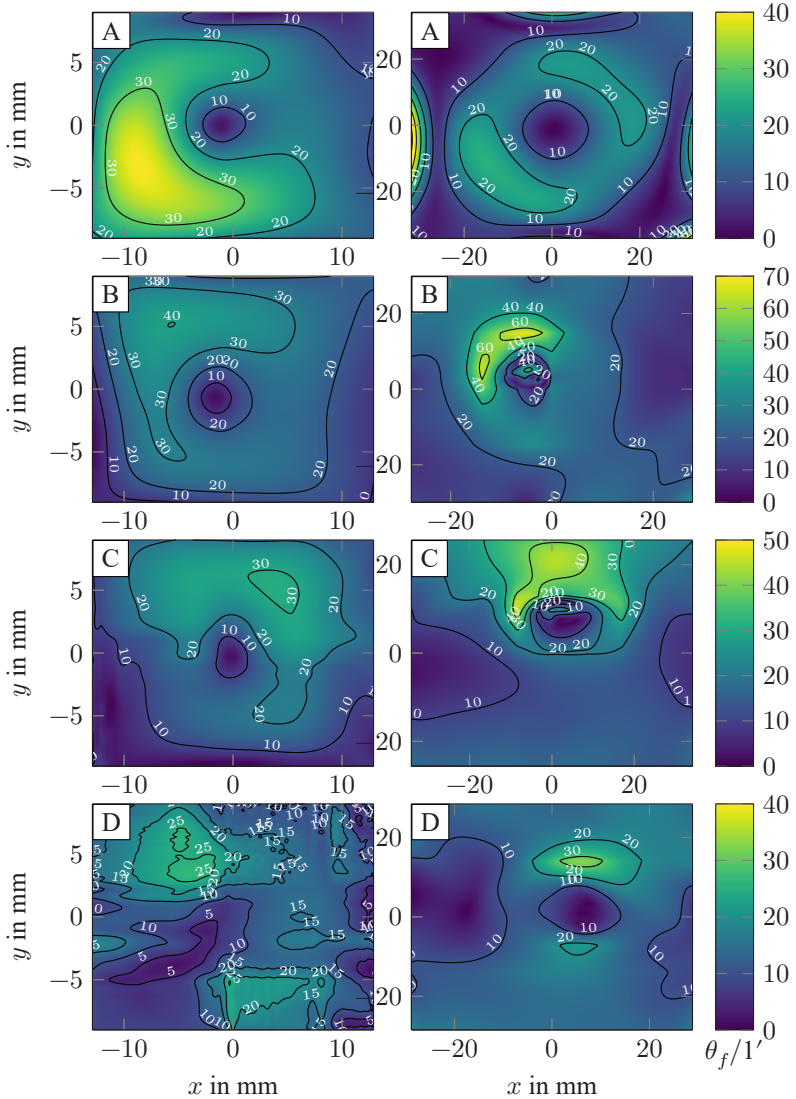


Abbildung 4.24: Flusserschätzungen aus deflektometrischen Messungen (linke Spalte) und approximierter Fluss (rechte Spalte) basierend auf topographischen Messungen der Oberflächenunvollkommenheiten A bis D; siehe Abbildung 4.5.

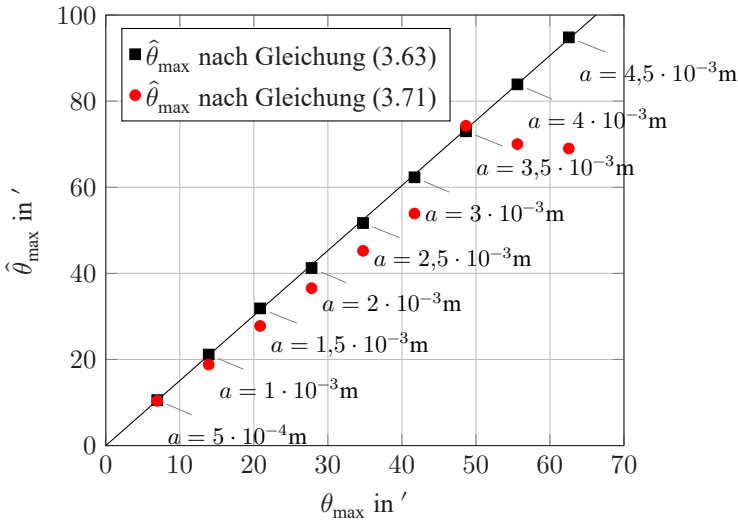


Abbildung 4.25: Vergleich der Approximation $\hat{\theta}_{\max}$ für den maximalen Schwinkel des SF nach Gleichung (3.63) und für kleine gaußförmige Verformungen nach Gleichung (3.71) mit dem an simulierten Oberflächen gemessenen θ_{\max} . Die Verformungen haben die Parameter $r = 0,3 \text{ m}$, $d = 0 \text{ m}$ und $c_z = 1 \text{ m}$. Die Ergebnisse liegen annähernd auf einer Geraden mit Steigung 1,51 (schwarze Linie). Der systematische Fehler ergibt sich aus der Linearisierung nach Gleichung (3.71).

4.4.3 Kleine gaußförmige Verformungen

In diesem Abschnitt wird die Approximation des maximalen Schwinkels des SF $\hat{\theta}_{\max}$ für kleine gaußförmige Verformungen mit dem gemessenen SF aufgrund simulierter und realer Messdaten θ_{\max} verglichen. In Abbildung 4.25 werden das Maximum der Approximation des Schwinkels des SF nach (3.63) und die Approximation für kleine gaußförmige Verformungen nach Gleichung (3.71) mit dem gemessenen θ_{\max} auf Basis der simulierten Daten gaußförmiger Verformungen verglichen.

Der direkte Vergleich zeigt eine sehr gute Korrelation der approximierten und der gemessenen Daten. Die Approximation des SF-Modells $\hat{\theta}_{\max}$ überschätzt das gemessene θ_{\max} , da die Steigung nicht 1 beträgt. Mithilfe eines Skalie-

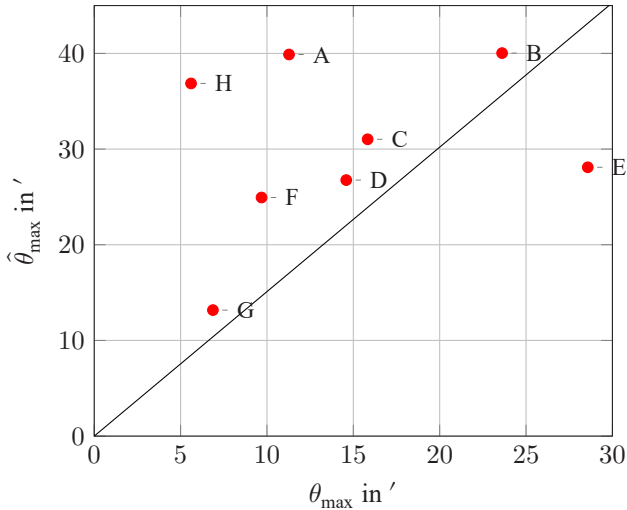


Abbildung 4.26: Vergleich der Approximation des SF-Modells $\hat{\theta}_{\max}$ für kleine gaußförmige Verformungen mit realen Messdaten des maximalen Schwinkels des SF θ_{\max} der Verformungen A bis H auf lackierten Stahlblechen. Zum Vergleich mit Abbildung 4.25 ist eine Gerade mit Steigung 1,51 eingezeichnet (schwarze Linie).

rungsfaktors (hier 1,51) kann die Approximation an die Messung des realen SF angepasst werden. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Approximation, wie in Abschnitt 3.4.5 bereits untersucht, nur für kleine Verformungen gültig ist. Werden diese zu groß, ist die direkte Approximation des maximalen Schwinkels des SF nach Gleichung (3.63) weiterhin gültig, während die Approximation für kleine Verformungen stark von der Messung abweicht.

In Abbildung 4.26 wird die Approximation des maximalen Schwinkels des SF für kleine gaußförmige Verformungen nach Gleichung (3.71) mit dem gemessenen maximalen Schwinkel des SF der Verformungen A bis H auf den lackierten Stahlblechen verglichen.

Hier stimmt zwar die Größenordnung für die Verformungen G, F, D, C und B mit den Messungen überein, für die übrigen Verformungen weicht $\hat{\theta}_{\max}$ jedoch stark vom linearen Trend ab. Dies liegt zum größten Teil, wie in Abschnitt 4.3.1

untersucht, an der teilweise großen Abweichung der realen Verformungen vom Defektmodell. Außerdem wird auch die Annahme einer ebenen Bezugsoberfläche teilweise verletzt. Die Approximation ist also unter den Voraussetzungen gültig, dass die Verformungen nicht zu stark vom Defektmodell abweichen, die Bezugsoberfläche relativ eben ist und die Ausprägung nicht zu weit von der Wahrnehmungsgrenze entfernt ist. Wie in Abbildung 4.25 ist die Steigung der Regressionsgeraden nicht 1, sodass ein systematischer Fehler vorliegt und ein Skalierungsfaktor eingeführt verwendet werden muss, um die Approximation nach Gleichung (3.71) an die Messung des realen maximalen Schwinkels des SF anzupassen. Durch die Linearisierung erhält man eine zunächst unbekannte systematische Abweichung.

4.5 Studien zur Wahrnehmung

Um zu überprüfen, ob die in Kapitel 3 vorgestellten Modelle zur Wahrnehmung spiegelnder Oberflächen mit der Realität übereinstimmen, wurden zwei Wahrnehmungsstudien durchgeführt. In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie die beiden Studien durchgeführt wurden. Die erste Studie in Abschnitt 4.5.1 erfolgte mit den lackierten Oberflächen, welche neben Verformungen auch eine variierende Rauheit und Welligkeit besitzen. Die zweite Studie in Abschnitt 4.5.2 erfolgte mit den gedrehten Oberflächenspiegeln, auf denen die Rauheit und die Welligkeit aufgrund ihrer schwachen Ausprägungen vernachlässigt werden können.

4.5.1 Studie mit lackierten Oberflächen

Die Studie wurde in einem vollständig abgedunkelten Raum mit 30 Teilnehmern durchgeführt. Einzige Lichtquellen waren ein Monitor, der wie in Abbildung 4.27 dargestellt in einem Tischaufbau eingebaut wurde, und eine Schreibtischlampe mit 58 cd neben dem Tischaufbau.



Abbildung 4.27: Studienaufbau zur Inspektion der spiegelnden Oberflächen. Auf dem Monitor wird ein Streifenmuster angezeigt, das sich in der lackierten Oberfläche der Testbleche spiegelt. Die Testbleche liegen auf einem Raster, das der Lokalisierung der gefundenen Formabweichungen dient.

Mittig unterhalb des Monitors wurde jeweils eines von insgesamt vier 300 mm x 300 mm großen Testblechen auf ein Raster gelegt. Das Raster hatte eine vertikale Einteilung von A bis J und eine horizontale Einteilung von 1 bis 10, also insgesamt 100 Teilbereiche. Die Testbleche durften von den Teilnehmern nicht berührt werden. Neben den Tischaufbau wurde ein DIN A4 Blatt mit dem gleichen Raster im Maßstab 1:2 gelegt.

Der Monitor hatte eine Größe von 520 mm x 325 mm. Als Muster wurde ein Streifenmuster mit einem kosinusförmigen Intensitätsverlauf in horizontaler Richtung und insgesamt 25 Streifen angezeigt. Damit ergibt sich eine Musterfrequenz $k_{\text{scr}} = 48 \text{ m}^{-1}$ auf dem Monitor. Der Monitor wurde im Tischaufbau mit einem Winkel von 30° und einer Höhe von 110–280 mm über den Tisch eingebaut. Bei Betrachtung der Reflexion des Streifenmusters über ein ebenes Blech mit einem typischen Betrachtungsabstand von 600 mm ergibt sich eine

Musterfrequenz von $k_{\text{eye}} \approx 0,5$ cpd. Die Teilnehmer haben die Oberfläche leicht schräg mit einem Winkel von $\beta_s > 70^\circ$ zur Oberflächentangenten betrachtet.

Die Anweisungen zur Studie wurden von den Teilnehmern vor Beantwortung der Fragebögen durchgelesen. Während der Studie wurden keine weiteren Instruktionen gegeben. Die Teilnehmer hatten für jedes Testblech eine Minute Zeit, um alle sichtbaren Formabweichungen auf dem Raster mit einer fortlaufenden Zahl zu kennzeichnen. Anschließend mussten die Teilnehmer beurteilen, wie schwierig das Auffinden jeder Formabweichung für sie war. Den Teilnehmern wurden nacheinander Testbleche mit einem Glanzgrad von 60 GU, 70 GU, 80 GU und 95 GU vorgelegt. Auf jedem der Testbleche sind insgesamt acht Formabweichungen. In Abbildung 4.28 ist die örtliche Anordnung der Formabweichungen auf den Testblechen dargestellt.

Die Verformungen werden im Folgenden nach einem einheitlichen Namensschema benannt. Beispielsweise wird die Verformung auf dem Testblech 60 GU in der 1. Reihe, 7. Spalte als 60 GU A7 bezeichnet. Wird eine Formabweichung an der richtigen Position auf dem Raster gekennzeichnet, gilt die zugehörige Aufgabe als gelöst. Die gesamte Anzahl der Formabweichungen auf einem Testblech wurde den Teilnehmern nicht mitgeteilt, somit gab es auch keine Beschränkung für die Anzahl der markierten Formabweichungen. Aufgrund der Zeitbeschränkung hat jedoch keiner der Teilnehmer mehr als acht Formabweichungen auf dem Raster markiert. Lag ein Defekt auf der Grenze eines Bereichs im Raster, galten beide Bereiche bei der Auswertung. Weitere Einzelheiten zur Studie sind in [Krü14] veröffentlicht.

4.5.2 Studie mit gedrehten Oberflächen

Die Studie wurde mit den drei in Abschnitt 4.1.3 beschriebenen präzisionsgedrehten Spiegeloberflächen durchgeführt. Auf den gedrehten Oberflächen kann der Einfluss von Rauheit und Welligkeit auf die Sichtbarkeit der Verformungen vernachlässigt werden. Die Studie wurde in einem abgedunkelten Konferenzraum mit 14 Teilnehmern durchgeführt; siehe Abbildung 4.29.

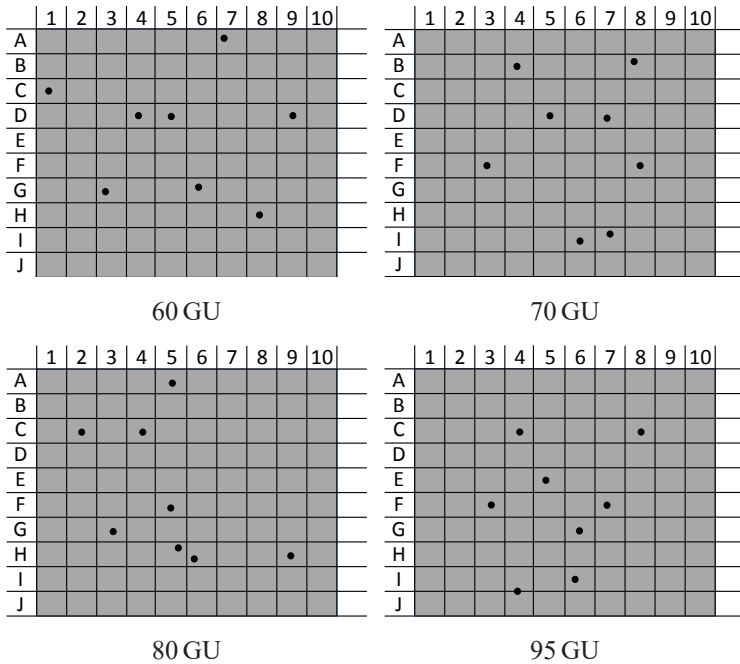


Abbildung 4.28: Verteilung der Formabweichungen auf den Testblechen.



Abbildung 4.29: Konferenzraum, in dem die Studie durchgeführt wurde. (links) Blick auf den Schirm auf der Stirnseite des Raums. (rechts) Blick von der Stirnseite auf die Halterung mit den drei Testoberflächen.

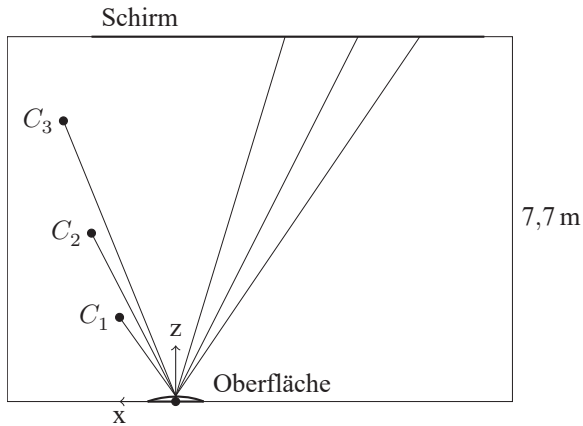


Abbildung 4.30: Beobachtungsstandpunkte in der Studie.

Auf der Stirnseite des Raums wurde von einem Projektor ein Muster auf die Wand projiziert. Auf der gegenüberliegenden Seite wurden die Spiegelflächen in einem Abstand von 7,7 m zur Projektionsfläche parallel zur Schirmebene montiert, siehe Abbildung 4.29 (rechts). Die Teilnehmer stellten sich nacheinander an den drei Punkten $C_1 = (0,1 \text{ m}, 0 \text{ m}, 0,3 \text{ m})^T$, $C_2 = (1 \text{ m}, 0 \text{ m}, 3 \text{ m})^T$, $C_3 = (1 \text{ m}, 0 \text{ m}, 4,9 \text{ m})^T$ im Raum auf, von denen aus sie die Reflexion des Schirms in den spiegelnden Oberflächen der drei Ronden beobachten konnten; siehe Abbildung 4.30.

Die Höhe der Halterung wurde jeweils auf die Augenhöhe der Testpersonen eingestellt. Jedem Teilnehmer wurden zwei Fragebögen ausgehändigt, auf denen die Stellen, an denen sich die Verformungen auf den Ronden befinden, bereits eingezeichnet waren. Die Teilnehmer mussten für jede Verformung entscheiden, ob sie diese wahrnehmen können, und dementsprechend die Stellen im Fragebogen markieren. Im Gegensatz zur Studie in Abschnitt 4.5.1 musste bei dieser Studie keine Aufgabe gelöst werden, daher kann hier keine Ratewahrscheinlichkeit für eine fälschlicherweise markierte Verformung angegeben werden. Nachdem von allen Positionen aus alle Verformungen auf den Ronden beurteilt wurden, wurde der Test mit einem neuen Schirmmuster wiederholt. Die

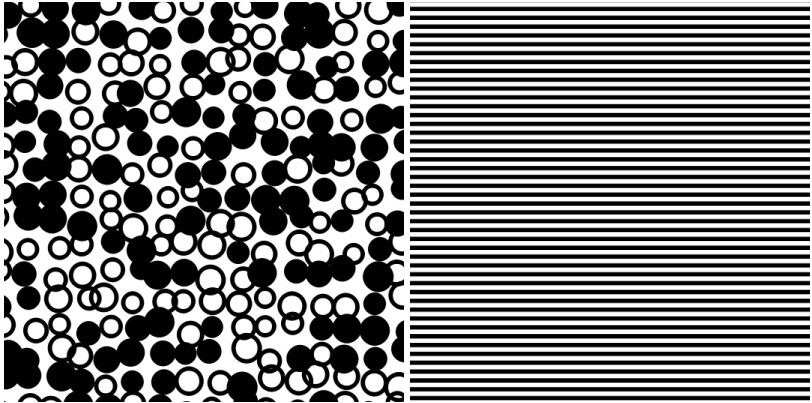


Abbildung 4.31: Ausschnitte des Punktemusters (links) und des Linienmusters (rechts).

Teilnehmer hatten beliebig viel Zeit zur Beantwortung der Fragen, haben die Studie aber im Schnitt unter einer halben Stunde beendet. Aus den Antworten der Studienteilnehmer wurde die Erkennungswahrscheinlichkeit p geschätzt, mit der eine Verformung als sichtbar markiert wurde.

Vor der eigentlichen Studie wurden verschiedene Muster untersucht, die für die Projektion auf den Schirm verwendet wurden. Für die Studie wurden dann zwei Muster ausgewählt, mit denen die Verformungen in einer Voruntersuchung sehr gut erkennbar waren. Das erste Muster ist unregelmäßig und setzt sich aus schwarzen Kreisen auf weißem Hintergrund zusammen. Die Kreise besitzen einen schwarzen Rand, sind zufällig schwarz oder weiß gefüllt und variieren leicht in Größe und Position. Im Folgenden wird dieses Muster als Punktemuster bezeichnet. Das zweite Muster ist ein regelmäßiges Linienmuster, bestehend aus horizontalen schwarzen und weißen Linien. Die Größe der Muster wurde so gewählt, dass die Breite der Kreisränder und der Linien vom Beobachtungsstandpunkt C_2 aus in der Spiegelung der Oberfläche gesehen $1'$ entspricht. Ausschnitte beider Muster sind in Abbildung 4.31 dargestellt.

Während das Linienmuster bereits ohne Bewegung des Beobachters viele Informationen über die Änderung der Linienbreite und -richtung enthält, sind diese

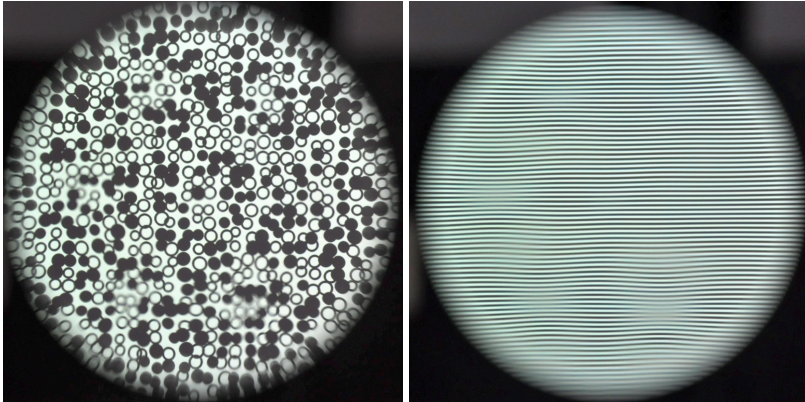


Abbildung 4.32: Abbildung des Schirmmusters über die spiegelnde Oberfläche der Ronde R2 von der Beobachtersposition C_2 mit einer Kamera gesehen. Abgebildet wird das Punktemuster (links) und das Linienmuster (rechts).

Informationen im Punktemuster zwar auch enthalten, aber aufgrund der meist nur kleinen Abweichungen schwer zu sehen. Erst die durch eine Bewegung des Beobachters verursachte Änderung des Texturgradienten ist für den Menschen einfach auswertbar. In Abbildung 4.32 ist das Spiegelbild beider Muster über die Oberfläche der Ronde R2 aus Sicht einer Kamera von Position C_2 mit einer Brennweite von 157 mm (entspricht einem Sichtfeld von $8,74^\circ$ für den 35 mm Sensor der Kamera) dargestellt. Nach Tabelle 2.1 ist das Sichtfeld etwas größer als das 5° Sichtfeld der Netzhautgrube des menschlichen Auges und mit $3,05 \cdot 10^6$ Pixel etwas geringer aufgelöst als die Netzhautgrube mit $6,4 \cdot 10^6$ Zapfen. Die Teilnehmer der Studie haben also die Muster etwas feiner aufgelöst, als dies mit der Kamera möglich war.

Ein Vergleich der Verzerrungen des gespiegelten Musters mit der Topographie der Oberflächen in Abbildung 4.7 zeigt, dass die größten vier Verformungen auf der Ronde R2 noch gut zu erkennen sind. Die Verzerrung des Schirmmusters ist sowohl beim Punktemuster als auch beim Linienmuster noch ohne Bewegung zu erkennen. Abbildung 4.33 zeigt die Sicht auf alle drei Ronden aus Sicht von Position C_3 . Hier sind neben den deutlich sichtbaren Verzerrungen des

Linienmusters auch weitere Effekte, wie beispielsweise eine Verzerrung der Muster in der Mitte zu erkennen. Dies entspricht auch der konvexen Verformung der drei Ronden ausgehend von der Mitte, was bereits in der Messung der Istoberflächen in Abbildung 4.7 erkennbar ist. Um die Verformungen der Ronden besser sichtbar zu machen, werden die Normalenabweichungen gegenüber einer ebenen Bezugsoberfläche berechnet und im Vergleich zu den Spiegelbildern über die Ronden dargestellt.

Wie im Vergleich der beiden Abbildungen 4.32 und 4.33 zu erkennen ist, wirkt sich der etwas größere Abstand zur Oberfläche $z = 4,9\text{ m}$ statt $z = 3\text{ m}$ bereits deutlich auf die Sichtbarkeit der Verformungen der Oberfläche aus. Die Messung der Ronde R1 zeigt ein Rauschen, das durch kleine Fehler beim Zusammensetzen der Einzelmessungen entsteht und durch das Ableiten verstärkt wird. Auf der Ronde R3 sind zwei Ringe infolge von Fertigungsfehlern zu erkennen, von denen einer sehr stark ausgeprägt ist. Diese Ringe wurden von 10 der 14 Teilnehmer als störend wahrgenommen und hatten Auswirkungen auf die Wahrnehmung der Verformungen.

In der Studie wurde die Sichtbarkeit der Markierungen an Nord- und Südpol der Ronde nicht untersucht, da diese nur für eine einfache Ausrichtung der Ronden vorgesehen waren. Diese Markierungen besitzen mit $r = 1\text{ mm}$ eine deutlich geringere Breite und somit trotz der geringen Höhe bzw. Tiefe von $a = \pm 1\mu\text{m}$ eine größere Sichtbarkeit als die in der Studie untersuchten Verformungen. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Markierungen gerade von nahen Distanzen zur Oberfläche gut sichtbar sind, diese Sichtbarkeit aber mit dem Abstand zur Oberfläche abnimmt, bis sie von C_3 nicht mehr erkennbar sind. Da der Schinkel der Markierungen für C_3 etwa $0,7'$ für R1 und $1,4'$ für R2 und R3 beträgt, stimmt dieses Ergebnis mit der Annahme des Elementarspiegelmodells in Abschnitt 3.3.1 überein, dass neben der Auflösung einer Verformung auf dem Schirm, auch die Auflösung auf der Oberfläche gegeben sein muss. Diese ist unterhalb $1'$ für einen normalsichtigen Beobachter nicht mehr gegeben.

Vor der eigentlichen Wahrnehmungsstudie wurde ein Sehtest wie in Abschnitt 2.4.6 beschrieben durchgeführt. Im Sehtest haben, bis auf eine Ausnahme, alle

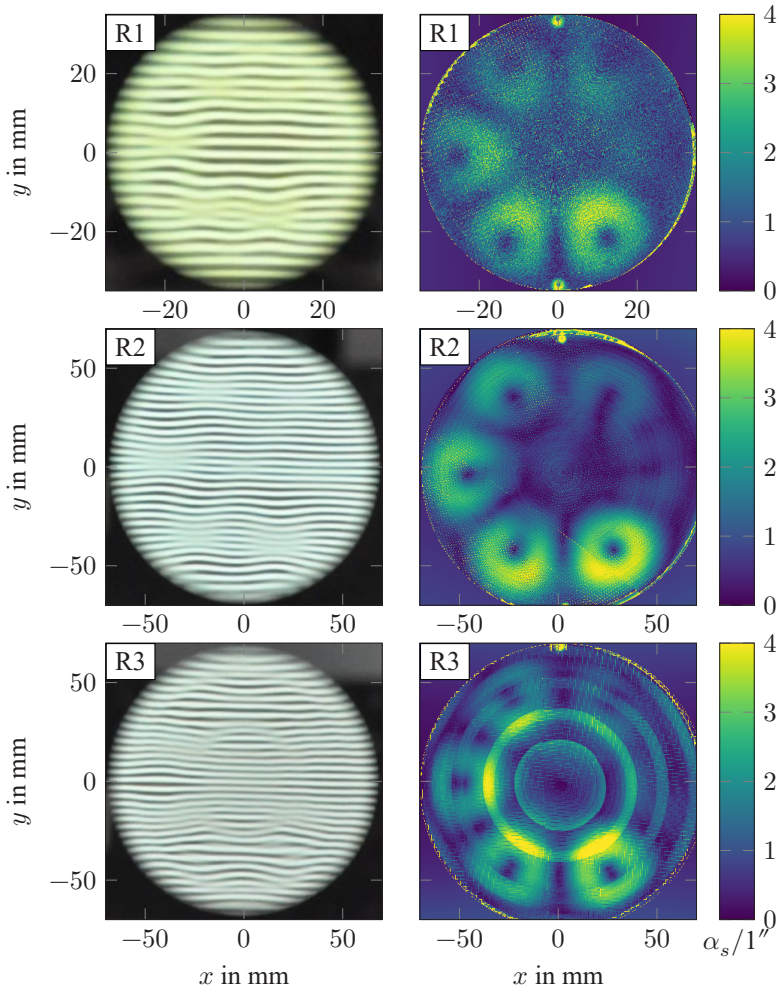


Abbildung 4.33: Spiegelbild eines Linienmusters in den Ronden R1, R2 und R3 von der Position C_3 aus gesehen (linke Spalte). Normalenabweichungen α der Oberfläche gegenüber einer ebenen Bezugsfläche (rechte Spalte).

Teilnehmer eine (binokulare) Winkelauflösung von $0,5\text{--}0,8'$ erreicht. Daher wurde auf eine individuelle Anpassung der Wahrnehmungsgrenze an die Studienteilnehmer verzichtet. Weitere Einzelheiten zur Studie sind in [Häu18] veröffentlicht.

4.6 Evaluation der Modelle

In den folgenden Abschnitten 4.6.1 und 4.6.2 werden das Elementarspiegelmodell und das SF-Modell evaluiert, indem die approximierten Wahrnehmungsgrenzen mit den Ergebnissen der beiden Studien verglichen werden. Dazu werden für die Studie mit den lackierten Stahloberflächen neben der Topographie der Verformungen auch die Welligkeit und Rauheit der jeweiligen Testoberfläche berücksichtigt. Für die Studie mit den gedrehten Oberflächen wird allein die Topographie der Oberfläche berücksichtigt. Verglichen wird der Quotient aus geschätzter Höhe a der Verformungen und vorhergesagter Wahrnehmungsgrenze (a_{\min} für das Elementarspiegelmodell und a_{\max} für SF-Modell) mit der Erkennungswahrscheinlichkeit in der Studie.

4.6.1 Evaluation des Elementarspiegelmodells

Setzt man die gerade noch sichtbaren Neigungsunterschiede α aus Gleichung (3.48) in das Defektmodell des Elementarspiegelmodells aus Gleichung (3.42) ein, erhält man die Höhe a_{\min} einer Verformung mit einer Breite r_t an der Wahrnehmungsgrenze.

$$a_{\min} \approx r_t \tan \left(\frac{(l_s + l_r) \sin^2 \beta_r \sin \theta_{\text{eye}}}{-l_s \cos(2\beta_r) + l_s \cos \theta_{\text{eye}} + (l_s + l_r) \sin \theta_{\text{eye}}} \right) \quad (4.18)$$

Da die Richtung der Beobachtung zur Spiegeloberfläche und Schirmoberfläche in beiden Studien nahezu rechtwinklig ist, vereinfacht sich Gleichung (4.18).

Eine exakte Bestimmung der Winkel war in der Studie nicht möglich, da die Teilnehmer ihre Köpfe bewegen durften. Falls die Winkel nicht senkrecht sind, werden kleine Verformungen nach dem Elementarspiegelmodell schlechter wahrgenommen. Für die rechten Winkel vereinfacht sich die Gleichung für die Wahrnehmungsgrenze a_{\min} in Abhängigkeit der lateralen Ausdehnung der Verformung r_t , einem Beobachtungsabstand l_s , einem Schirmabstand l_r , sowie einem Beobachter mit Sehstärke θ_{eye} .

$$a_{\min} = r_t \tan \left(\frac{l_s + l_r}{l_s + l_r + l_s \cot(\theta_{\text{eye}}/2)} \right) \quad (4.19)$$

Die Werte $a_{\min} = a$ und $r_t = r$ wurden aus dem Gauß-Defektmodell übernommen. Nach Gleichung (3.11) wird der maximale Gradient der Verformung somit um den Faktor $1/\sqrt{e} = 0,61$ unterschätzt, da der Gradient für die Elementarspiegel konstant $h'_x = \frac{a}{r}$ beträgt.

Evaluation mit lackierten Oberflächen

Wie in Abschnitt 4.5.1 beschrieben, sind die Parameter Beobachtungs- und Schirmabstand für die Studie $l_s \approx 600$ mm und $l_r \approx 200$ mm. Zudem wird $\beta_s \approx \beta_r \approx 90^\circ$ angenommen und somit Gleichung (4.19) zur Auswertung des Modells verwendet. Zur Berücksichtigung der Rauheit der Oberfläche wurden die Werte θ_{eye} aus Abbildung 4.19 verwendet. Die Welligkeit wurde entsprechend den Werten aus Abbildung 4.20 als untere Schranke für sichtbare Neigungsunterschiede $\alpha_{\text{o,max}}$ verwendet.

Um den Zusammenhang der Modellvorhersage über die Sichtbarkeit und den Antworten über die Sichtbarkeit der Verformungen herzustellen, wird eine logistische Regression verwendet. Die logistische Regression wird häufig verwendet,

um die Verteilung binärer Antworten auf eine beliebig skalierte unabhängige Variable x (beispielsweise $x = a/a_{\min}$) zu beschreiben.

$$F(x) = \frac{1}{1 + \exp\{-(\beta_0 + \beta_1 x)\}} \quad (4.20)$$

Diese Verteilung mit den Parametern β_0 und β_1 wird für jedes Streudiagramm geschätzt und als grobe Orientierung in das jeweilige Diagramm eingezeichnet. Da die Daten stark rauschen und nur relativ wenige Datenpunkte vorliegen, werden die angepassten Verteilungsfunktionen hier nicht weiter untersucht.

In der Evaluation hat sich herausgestellt, dass die Modelle den Einfluss der Welligkeit der Oberfläche auf die Sichtbarkeit der Verformungen überschätzen. Daher wird für die Auswertungen der lackierten Oberflächen in diesem Abschnitt und in Abschnitt 4.6.2 der Wert für $\alpha_{o,\max}$ mit dem empirisch ermittelten Faktor 0,05 korrigiert, da das Quantil mit 99,9 % vermutlich zu groß gewählt ist und sich eine Änderung des Quantils stark auf von Wert $\alpha_{o,\max}$ auswirkt; siehe Abbildung 4.20.

In Abbildung 4.34 sind die Ergebnisse des Elementarspiegelmodells für die Verformungen auf den vier lackierten Stahlblechen 60 GU bis 95 GU dargestellt.

Das Ergebnis zeigt, dass nur wenige Fehler (60 GU D9 und 70 GU B8) unterhalb der Wahrnehmungsgrenze (vertikale rote Linie) liegen. Die meisten Verformungen liegen mindestens um Faktor 2 über der Wahrnehmungsgrenze und wurden in der Studie durch alle Teilnehmer erkannt. Bei einigen Verformungen stimmt die vorhergesagte Sichtbarkeit nicht gut mit den Studienergebnissen überein. Die genauere Analyse der Verformungen zeigt, dass es verschiedene Gründe gibt, warum diese im Vergleich mit dem Wahrnehmungsmodell entweder über- oder unterdurchschnittlich erkannt wurden. Meist stimmt das Defektmodell nicht gut mit dem realen Defekt überein. Insbesondere für die Verformungen 60 GU H8, 70 GU F3, 95 GU C4 und 95 GU F7 weicht die Approximation durch das Defektmodell stark von der Messung ab, da sich diese nicht gut durch eine Gaußform beschreiben lassen. Für manche Verformungen gab es Bedingungen,

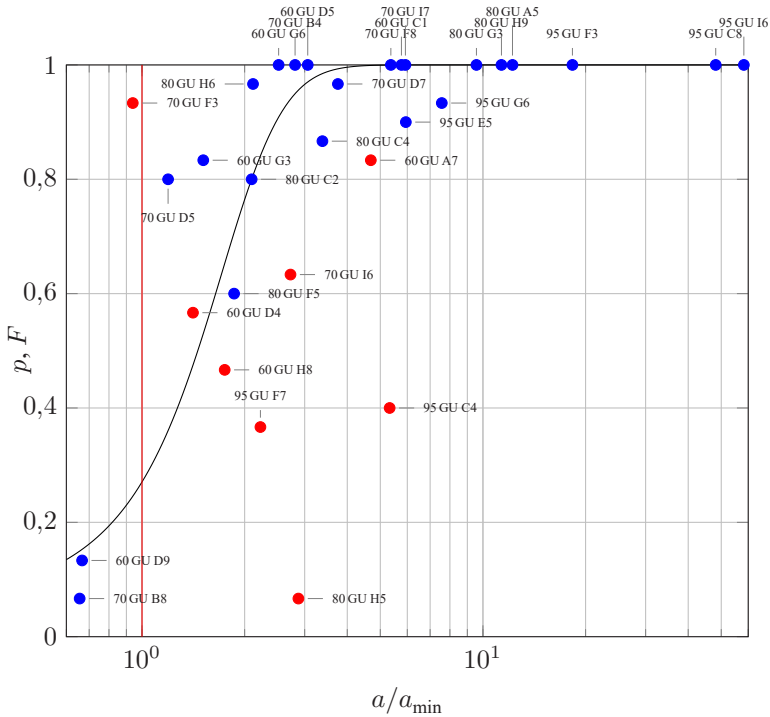


Abbildung 4.34: Vergleich der Größe einer Verformung a relativ zur jeweiligen Wahrnehmungsgrenze a_{\min} nach dem Elementarspiegelmodell mit der Erkennungswahrscheinlichkeit in der Wahrnehmungsstudie mit lackierten Oberflächen. Die Wahrnehmungsgrenze $a = a_{\min}$ ist in Rot dargestellt. Nicht repräsentative Ergebnisse sind rot markiert. Eine an die Daten angepasste logistische Verteilung für a/a_{\min} ist schwarz dargestellt. Die logistische Verteilung zeigte eine unscharfe Wahrnehmungsgrenze im Bereich einer Größenordnung des Quotienten a/a_{\min} . Diese Unsicherheit lässt sich auf eine Variation der Wahrnehmungsleistung im Teilnehmerfeld, eine unsichere Beschreibung der Verformungen durch das Defektmodell und unsichere Messungen der Rauheit und Welligkeit zurückführen.

die die Sichtbarkeit erschwert haben, die aber nicht durch das Modell berücksichtigt werden. So sind Verformungen, die sehr nah am Rand der Oberfläche liegen, schwerer zu erkennen, da die Schichtdicke des Lacks zum Rand hin abnimmt und die Oberfläche hier nicht mehr plan ist. Beispielsweise wurde die Verformung 60 GU A7 seltener erkannt, da sie sehr nah am Rand der Oberfläche liegt. Außerdem werden Verformungen, deren Abstand zueinander gering ist, häufig als eine gemeinsame Verformung erkannt. So liegt die Verformung 80 GU H5 sehr nah an der Verformung 80 GU H6, was dazu geführt hat, dass 80 GU H6 überdurchschnittlich häufig erkannt wurde, während 80 GU H5 relativ selten erkannt wurde. Das gleiche gilt für die Verformungen 70 GU I6 und 70 GU I7 sowie für 60 GU D4 und 60 GU D5. Hier sind die Verformungen jedoch, trotz ihres geringen Abstandes, noch gut einzeln erkennbar. Alle Verformungen, bei denen es aufgrund von einem der genannten Probleme starke Abweichungen gab, sind im Streudiagramm rot markiert.

Evaluation mit gedrehten Oberflächen

Wie in Abschnitt 4.5.2 beschrieben, ist der Abstand zwischen Oberfläche und Schirm $l_s = 7,7$ m, während die Beobachtungsposition und somit der Abstand l_s während der Studie verändert wurde. In Abbildung 4.35 sind die Ergebnisse des SF-Modells für die Verformungen für die drei Ronden R1, R2 und R3 für die Beobachtungspositionen C_1 , C_2 und C_3 sowie ein Punktemuster und ein Linienmuster auf dem Schirm dargestellt.

Die Korrelation des Elementarspiegelmodells mit dem Ergebnis der Studie ist gut. Die logistische Verteilung zeigte eine unscharfe Wahrnehmungsgrenze im Bereich einer Größenordnung des Quotienten a/a_{\min} . Diese Unsicherheit lässt sich auf eine Variation der Wahrnehmungsleistung im Teilnehmerfeld, eine unsichere Beschreibung der Verformungen durch das Defektmodell und unsichere Messungen der Rauheit und Welligkeit zurückführen. Mit zunehmender Sichtbarkeit der Verformungen steigt auch die Wahrscheinlichkeit, dass diese in der Studie erkannt wurden. Die Streuung der Ergebnisse ist allerdings relativ groß, gerade bei Verwendung des Linienmusters. Im direkten Vergleich sind die Studi-

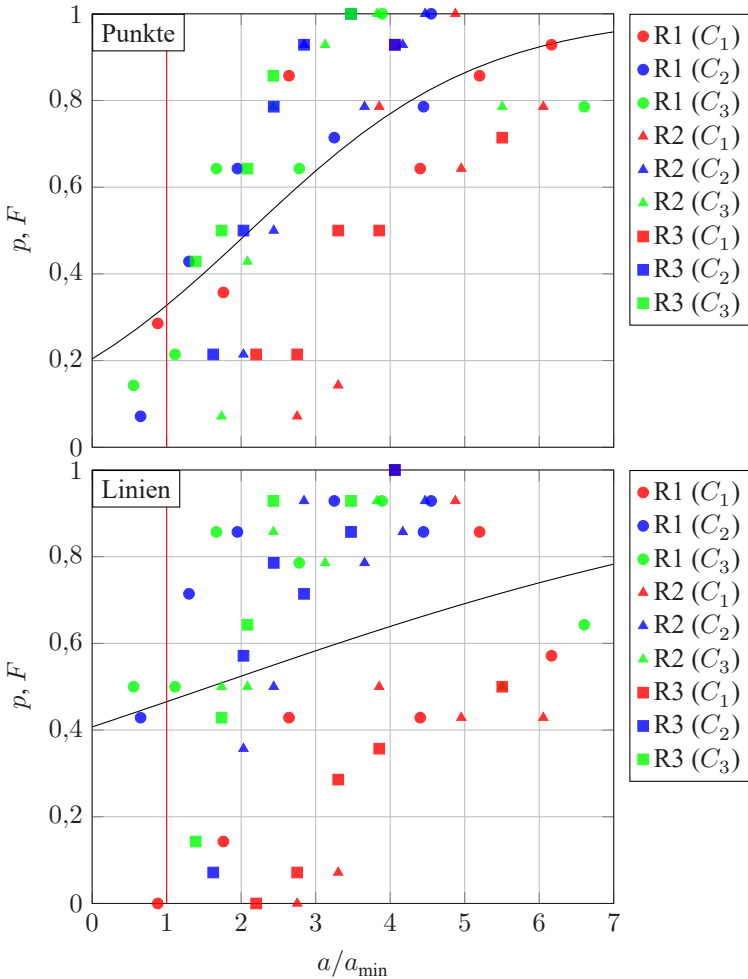


Abbildung 4.35: Vergleich der Größe einer Verformung a relativ zur jeweiligen Wahrnehmungsgrenze a_{\min} nach dem Elementarspiegelmodell mit der Erkennungswahrscheinlichkeit in der Wahrnehmungsstudie für ein Punktemuster und ein Linienmuster auf dem Schirm. Die Wahrnehmungsgrenze $a = a_{\min}$ ist in Rot dargestellt. Eine an die Daten angepasste logistische Verteilung für a/a_{\min} ist schwarz dargestellt.

energebnisse mit dem Linienmuster für große Entfernungen etwas besser als die Studienergebnisse mit dem Punktemuster, die wiederum für kleine Entfernungen deutlich besser sind. Vermutlich ist ein Grund hierfür, dass das Linienmuster für geringe Entfernungen zur Oberfläche sehr klein auf der Oberfläche erscheint, was eine Auswertung der Texturgradienten erschwert. Für große Entfernungen erscheint das Muster stark verzerrt auf der Oberfläche und lässt bereits ohne Bewegung einfache Rückschlüsse auf die Form der Oberfläche zu. Jedoch ist das Linienmuster gerade bei bewegter Beobachtung schwer auszuwerten, da eine Zuordnung der verzerrten Linienstruktur zu einer Position auf der Oberfläche schwierig ist. Mit etwas Erfahrung bei der Prüfung spiegelnder Oberflächen lassen sich mit dem Linienmuster gerade im Bereich der Wahrnehmungsgrenze noch Verformungen erkennen, die mit dem Punktemuster nicht mehr erkannt werden können. Ein weiterer Grund für die besseren Ergebnisse ist eine bessere Winkelauflösung bei Veränderungen des Linienmusters durch Hyperacuity (Abschnitt 2.4.5). Das Punktemuster ist hingegen gerade in der Bewegung und bei großen Verzerrungen einfacher auszuwerten. Da außerdem die einzelnen Strukturelemente des Punktemusters größer sind, sind die Verformungen gerade für kleine Entfernungen zur Oberfläche einfach auszuwerten. Insgesamt ist die Streuung der Studienergebnisse für das Punktemuster geringer, da diese auch von ungeübten Personen ausgewertet werden können, während die Auswertung der verzerrten Linienmuster Erfahrung voraussetzt.

4.6.2 Evaluation SF-Modell

In den folgenden beiden Abschnitten werden die Ergebnisse des SF-Modells mit den Ergebnissen der beiden Studien evaluiert. Wie bei der Auswertung des Elementarspiegelmodells wird die Erkennungswahrscheinlichkeit der jeweiligen Studie gegen den Quotienten a/a_{\max} aufgetragen. Die maximale Amplitude a_{\max} einer unsichtbaren Verformung wurde nach Gleichung (3.73) berechnet. Die Parameter der Verformungen wurden nach Gleichung (3.66) für die Beobachtungspositionen neu skaliert. Da für die Studie mit gedrehten Oberflächen keine Rauheit und Welligkeit der Oberfläche berücksichtigt werden muss, kann hier

auch direkt die Erkennungswahrscheinlichkeit mit dem maximalen Sehwinkel des SF θ_{\max} aus Gleichung (3.70) verglichen werden.

Evaluation mit lackierten Oberflächen

Das Ergebnis der Studie im Vergleich zur vorhergesagten Wahrnehmungsgrenze ist in Abbildung 4.36 zusammengefasst. Für die Berechnung der Wahrnehmungsgrenze nach Gleichung (3.73) wurde die Rauheit der Oberfläche berücksichtigt, also θ_{eye} nach den Werten aus Abbildung 4.19 gewählt. Außerdem wurden die Welligkeit der Oberfläche berücksichtigt und kleine Verformungen nach der Ungleichung (3.12) maskiert. Die maximalen Gradienten $\alpha_{o,\max}$ für die Testoberflächen sind in Abbildung 4.20 dargestellt.

Wie bereits in Abschnitt 4.6.1 diskutiert, sind die Ergebnisse für manche Verformungen nicht repräsentativ. Diese Verformungen wurden im Streudiagramm wieder rot markiert. Die Ergebnisse zeigen wieder eine gute Übereinstimmung des Modells mit den Ergebnissen der Studie, wenn man die nicht repräsentativen Ergebnisse vernachlässigt. Nur die Verformungen 80 GU C4 und 95 GU E5 wurden weniger häufig erkannt als erwartet.

Ein Grund hierfür kann der relativ kleine Schirmabstand sein, der den Annahmen des SF-Modells deutlich widerspricht. Weiterhin sind die Verformungen auf den Stahlblechen relativ groß ($a = 10\text{--}100\ \mu\text{m}$). Die Approximation in Gleichung (3.71) ist wie in Abbildung 3.23 dargestellt nur bis $a = 10\ \mu\text{m}$ für $r = 1\text{--}10\ \text{mm}$ gültig. Daher wurde für diese Auswertung um die Stelle $a = 10\ \mu\text{m}$ statt $a = 1\ \mu\text{m}$ approximiert. Auf einer hochspiegelnden Oberfläche wären alle Verformungen sichtbar. Die Sichtbarkeit wird hier stark von der Rauheit und Welligkeit der Oberfläche beeinflusst.

Evaluation mit gedrehten Oberflächen

In Abbildung 4.37 ist die Erkennungswahrscheinlichkeit aus der Studie gegen den maximalen SF θ_{\max} aus Gleichung (3.70) aufgetragen. Die logistische

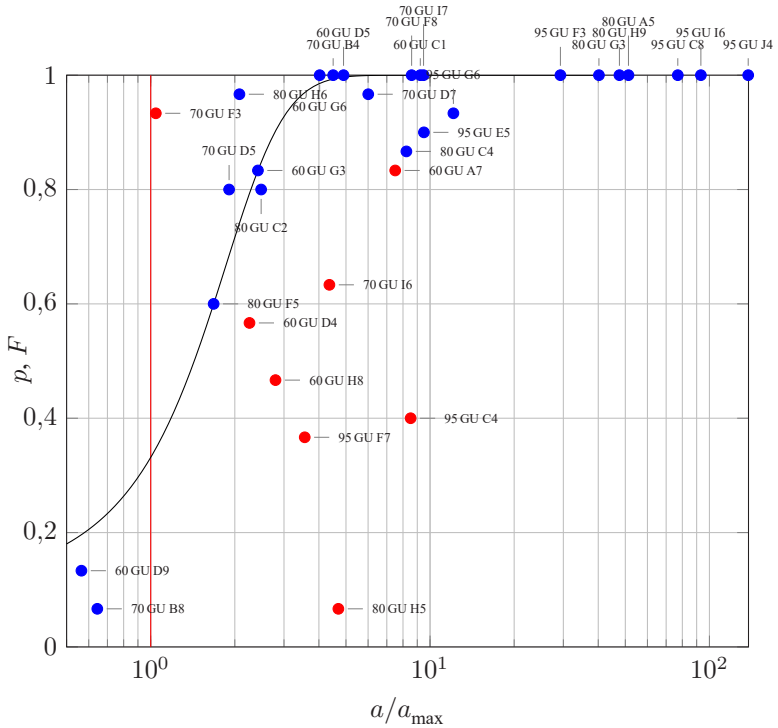


Abbildung 4.36: Vergleich der Größe einer Verformung a relativ zur jeweiligen Wahrnehmungsgrenze a_{\max} nach dem SF-Modell mit der Erkennungswahrscheinlichkeit in der Wahrnehmungsstudie. Die Wahrnehmungsgrenze $a = a_{\max}$ ist in Rot dargestellt. Nicht repräsentative Ergebnisse sind rot markiert. Eine an die Daten angepasste logistische Verteilung für a/a_{\max} ist schwarz dargestellt. Die logistische Verteilung zeigte eine unscharfe Wahrnehmungsgrenze im Bereich unter einer Größenordnung des Quotienten a/a_{\max} . Diese Unsicherheit lässt sich auf eine Variation der Wahrnehmungsleistung im Teilnehmerfeld und eine unsichere Beschreibung der Verformungen durch das Defektmodell zurückführen.

Verteilung zeigte eine unscharfe Wahrnehmungsgrenze im Bereich unter einer Größenordnung von θ_{\max} . Diese Unsicherheit lässt sich auf eine Variation der Wahrnehmungsleistung im Teilnehmerfeld und eine unsichere Beschreibung der Verformungen durch das Defektmodell zurückführen. Nur wenige Verformungen liegen unterhalb dieser Wahrnehmungsgrenze.

Die Korrelation des SF mit dem Ergebnis der Studie ist sehr gut, insbesondere für das Punktemuster auf dem Schirm. Da die meisten Studienteilnehmer beim Sehtest noch kleinere Winkelauflösungen erreicht haben, ist auch die Erkennung von kleineren Verformungen nicht ausgeschlossen; siehe Abschnitt 4.5.2. Entsprechend wurden die meisten Verformungen von mindestens einem Studienteilnehmer als erkannt markiert. Nur für das Linienmuster wurde die jeweils kleinste Verformung auf jeder Runde aus Sicht von C_1 von niemandem als erkannt markiert. Für einen direkten Vergleich mit der Evaluation des Elementarspiegelmodells ist in Abbildung 4.38 der Vergleich der Studienergebnisse mit dem Quotienten a/a_{\max} dargestellt.

Die Korrelation des maximalen SF mit dem Ergebnis der Studie ist gut und auf den ersten Blick ähnlich zu dem Ergebnis des Elementarspiegelmodells in Abbildung 4.35. Die logistische Verteilung zeigte eine unscharfe Wahrnehmungsgrenze im Bereich unter einer Größenordnung des Quotienten a/a_{\max} . Diese Unsicherheit lässt sich auf eine Variation der Wahrnehmungsleistung im Teilnehmerfeld und eine unsichere Beschreibung der Verformungen durch das Defektmodell zurückführen. Daher gelten die Schlussfolgerungen, die für das Elementarspiegelmodell getroffen wurden, auch hier. Der Unterschied beider Modelle wird im folgenden Abschnitt genauer untersucht.

4.6.3 Diskussion und Vergleich der Modelle

Die Korrelation beider Modelle mit den Ergebnissen der Studien ist gut. Unter der Annahme einer logistischen Verteilung korreliert die Sichtbarkeit nach dem SF-Modell etwas stärker mit den Studienergebnissen als die Sichtbarkeit nach dem Elementarspiegelmodell. Größere Unterschiede ergeben sich, wenn man

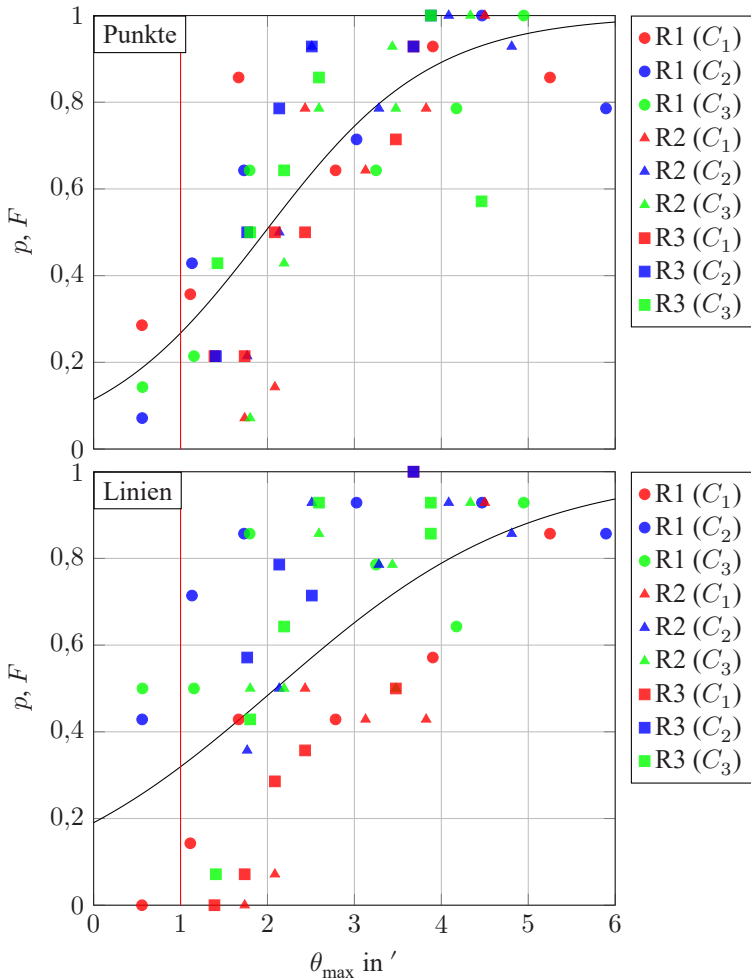


Abbildung 4.37: Vergleich des approxierten SF θ_{\max} einer Verformung mit der Erkennungswahrscheinlichkeit in der Wahrnehmungsstudie für ein Punktemuster und ein Linienmuster auf dem Schirm. Die Wahrnehmungsgrenze $\theta_{\max} = 1'$ ist in Rot dargestellt. Eine an die Daten angepasste logistische Verteilung für θ_{\max} ist schwarz dargestellt.

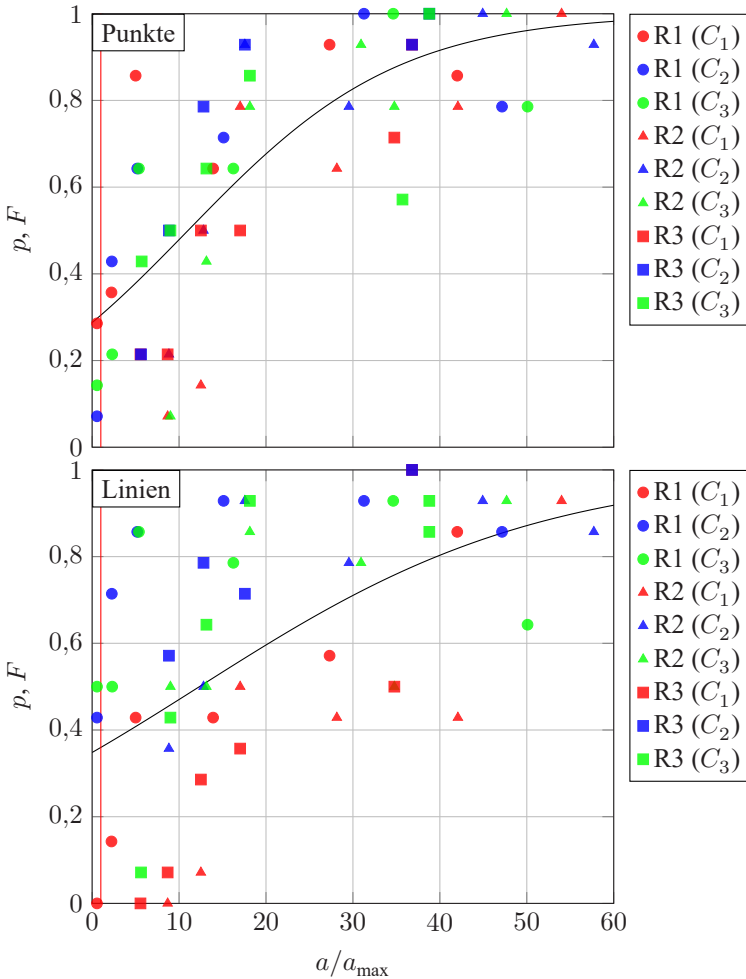


Abbildung 4.38: Vergleich der Größe einer Verformung a relativ zur jeweiligen Wahrnehmungsgrenze a_{\max} nach dem SF-Modell mit der Erkennungswahrscheinlichkeit in der Wahrnehmungsstudie für ein Punktemuster und ein Linienmuster auf dem Schirm. Die Wahrnehmungsgrenze $a = a_{\max}$ ist in Rot dargestellt. Eine an die Daten angepasste logistische Verteilung für a/a_{\max} ist schwarz dargestellt.

die mittlere Erkennungswahrscheinlichkeit aller Verformungen auf einer Ronde mit der mittleren Sichtbarkeit a/a_{\min} bzw. a/a_{\max} in Abhängigkeit der Beobachtungspositionen untersucht. In Abbildung 4.39 ist die mittlere Sichtbarkeit a/a_{\max} über alle Verformungen 1–6 für die drei Ronden (R1, R2, R3) und die Schirmmuster (Punkte- und Linienmuster) dargestellt.

Nach dem Elementarspiegelmodell nimmt die Sichtbarkeit mit der Entfernung l_s zur Oberfläche somit ab, während die Sichtbarkeit nach dem SF-Modell mit der Entfernung zur Oberfläche zunimmt. Eine Abnahme der Erkennungswahrscheinlichkeit bei zunehmender Sichtbarkeit ist nicht plausibel. Im Gegensatz dazu nimmt die Erkennungswahrscheinlichkeit der Sichtbarkeit nach dem SF-Modell zu. Berücksichtigt man zusätzlich das Schirmmuster, zeigt sich, dass die Erkennungswahrscheinlichkeit bei Verwendung des Linienmusters stärker vom Abstand l_s abhängt als bei Verwendung des Punktemusters. Dies entspricht den Beobachtungen in Abschnitt 4.5.2, dass die Erkennung der Verformungen mit dem Linienmuster auf dem Schirm bei geringen Beobachtungsabständen schlechter und bei großen Beobachtungsabständen besser als die Erkennung mit dem Punktemuster auf dem Schirm ist.

Die Breite aller in der Studie untersuchten Verformungen ist groß genug, um aus allen Beobachtungsentfernungen lateral auf der Oberfläche aufgelöst werden zu können. Wie in Abschnitt 4.5.2 beschrieben, befinden sich auch jeweils zwei Markierungen geringerer Breite auf den Ronden. Die Sichtbarkeit der Markierungen nimmt zunächst mit dem Abstand zu. Insbesondere die Markierungen auf der Ronde R1, die von der Beobachtungsposition C_3 , also aus etwa $l_s = 5$ m Entfernung, eine Breite unterhalb der lateralen Auflösungsgrenze auf der Oberfläche besitzen, verschwinden für größere Abstände. Die laterale Auflösung wird theoretisch von beiden Modellen berücksichtigt, wurde aber in der Studie nicht evaluiert.

Für die Approximation des SF wird ein unendlicher Schirmabstand vorausgesetzt. Obwohl der Schirmabstand mit etwa 200 mm in der Studie auf den lackierten Oberflächen in Abschnitt 4.6.2 sehr klein ist, stimmen die Ergebnisse des SF-Modells gut mit den Ergebnissen der Studie überein. Das SF-Modell liefert

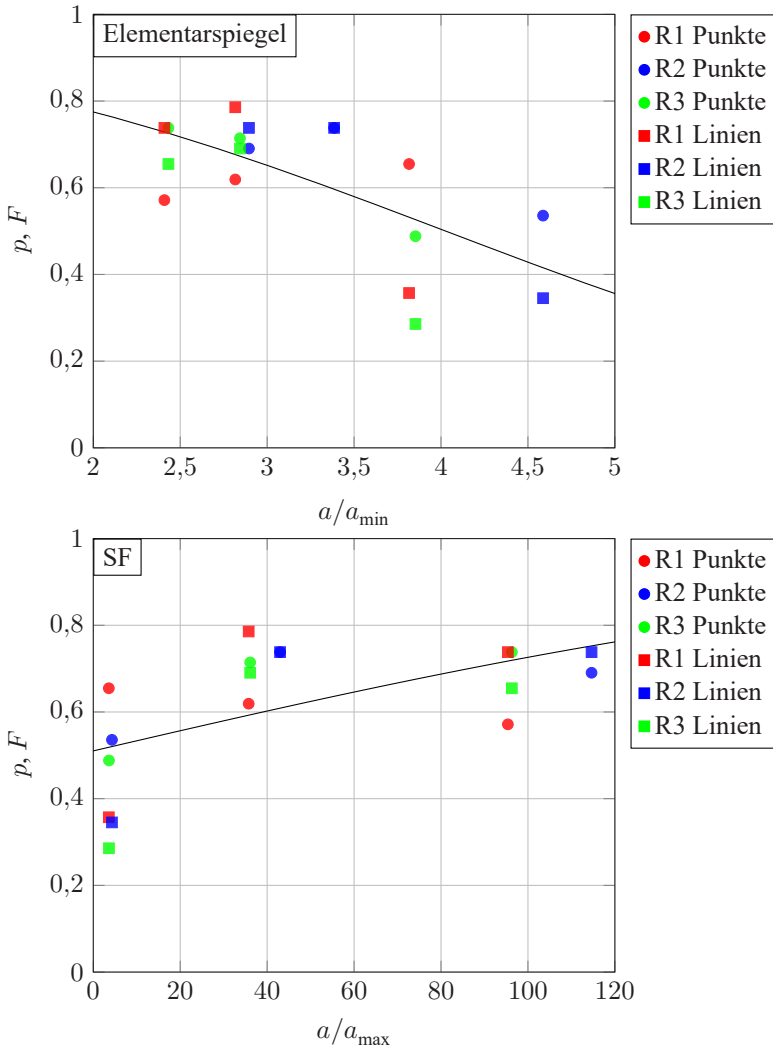


Abbildung 4.39: Streudiagramm der mittleren Erkennungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der mittleren Sichtbarkeit a/a_{\min} bzw. a/a_{\max} . Gemittelt wurde über alle Verformungen 1–6 auf einer Ronde (R1, R2, R3), jeweils für ein Punktemuster und ein Linienmuster auf dem Schirm und einen der drei Beobachtungsstandpunkte. Die logistische Verteilung für a/a_{\min} bzw. a/a_{\max} ist schwarz dargestellt.

also auch für kleinere Schirmabstände eine gute Beschreibung der Sichtbarkeit kleiner Verformungen.

In Abbildung 4.26 wurde die Approximation für kleine gaußförmige Verformungen auf einer ebenen Bezugsoberfläche überprüft. Dabei hat sich gezeigt, dass die Sichtbarkeit stark vom Modell abweicht, wenn die Verformung nicht gut durch das Defektmodell beschrieben wird. Wenn die Verformungen stark von der Gaußform abweichen, kann das SF-Modell durch ein besser passendes Defektmodell approximiert werden. Alternativ kann der SF direkt mittels einer topographischen Messung gegenüber einer ebenen Bezugsoberfläche nach Gleichung (3.63) im Anhang berechnet werden oder deflektometrisch wie Abschnitt 4.2.4 berechnet werden und das Maximum über den gesamten Bereich der Verformung bestimmt werden.

Wie in Abbildung 4.25 gezeigt, überschätzt die Approximation des SF-Modells für kleine gaußförmige Verformungen den realen SF leicht und ist außerdem nur für einen Bereich um die Entwicklungsstelle $a \approx 0$ in Gleichung (3.73) gültig.

Während das Elementarspiegelmodell die sichtbaren Neigungsunterschiede der Oberfläche beschreibt, wird durch das SF-Modell beschrieben, wie stark sich das Spiegelbild über eine Formabweichung gegenüber der Bezugsoberfläche ändert. Da die berechneten Wahrnehmungsgrenzen beider Modelle gut mit den Studienergebnissen übereinstimmen, können beide Modelle verwendet werden, um in der Messung einer spiegelnden Oberfläche die sichtbaren Formabweichungen zu markieren. Dazu werden die Bezugsoberfläche und die Bedingungen, unter denen die Oberfläche betrachtet wird, benötigt. Sollen jedoch allgemeine Regeln abgeleitet werden, dann sollte das SF-Modell verwendet werden, da es im Gegensatz zum Elementarspiegelmodell die Wahrnehmungsgrenzen auch für große Betrachtungsabstände korrekt beschreibt. Voraussetzung dafür ist, dass Bezugsoberfläche und Defektmodell die reale Oberfläche und typische Formabweichungen gut beschreiben.

Die Studie mit den gedrehten Oberflächenspiegeln hat gezeigt, dass beide Modelle eine brauchbare Wahrnehmungsgrenze für perfekt spiegelnde Oberflächen liefern. Die Wahrnehmungsgrenzen auf den lackierten Oberflächen weichen

jedoch von den Ergebnissen der Studie ab, wenn die Rauheit und Welligkeit der Oberfläche nicht berücksichtigt wird. So ist der Quotient a/a_{\max} nach dem Elementarspiegelmodell für gerade noch sichtbare Verformungen auf den hochspiegelnden Oberflächen 80 GU und 95 GU ungefähr 2–3, weicht also um das Dreifache von der Wahrnehmungsgrenze ab. Für Verformungen auf den Oberflächen 60 GU und 70 GU, die eine ausgeprägte Rauheit und Welligkeit besitzen, unterschätzt der Quotient die Wahrnehmungsgrenze sogar um den Faktor 6–7. Das Modell zur Beschreibung der Welligkeit überschätzt allerdings deren Einfluss und wurde wie in Abschnitt 4.6.1 mit dem empirisch ermittelten Faktor 0,05 korrigiert. Wird zur Beschreibung der Welligkeit ein kleineres Quantil (beispielsweise 50 % statt dem willkürlich gewählten 99,9 % Quantil) zur Bestimmung von $\alpha_{o,\max}$ verwendet, ist dieser empirische Korrekturfaktor unnötig. Da mit den vorliegenden Daten keine Evaluation des Einflusses der Welligkeit auf die Sichtbarkeit möglich ist, wurde dies jedoch nicht weiter verfolgt. Entscheidend bei der Schätzung der Verteilung der Gradientenabweichungen ist jedoch immer eine zum jeweiligen Beobachtungsabstand passende skalenbegrenzte Oberfläche.

Der in Abschnitt 3.2.2 vorgestellte Ansatz zur Beschreibung der Oberflächenwelligkeit als Statistik additive Überlagerung lokaler Verformungen, mit der die Oberfläche synthetisiert werden kann, wäre vermutlich besser geeignet, um den Einfluss der Welligkeit auf die sichtbaren Verformungen zu beschreiben. Da sich die Welligkeit der lackierten Oberflächen jedoch nicht gut durch eine additive Überlagerung lokaler gaußförmiger Verformungen beschreiben ließ, konnte dieser Ansatz nicht weiter untersucht werden.

4.7 Zusammenfassung der Evaluation

In diesem Kapitel wurden die Wahrnehmungsmodelle aus Kapitel 3 evaluiert. Zunächst wurden Testoberflächen und die Messverfahren, mit denen diese erfasst wurden, beschrieben. Mit den topographischen Messungen wurde überprüft, wie gut die erzeugten Verformungen auf den Testoberflächen durch die Gaußform des Defektmodells beschrieben werden. Außerdem wurden die Rauheit

Tabelle 4.2: Übersicht über die Abschnitte und Ergebnisse, in denen die Modelle evaluiert wurden. Gute Übereinstimmungen sind mit + markiert, problematische Evaluationen mit ○.

Modell	Plausibilität	Plausibilität	Evaluation	Evaluation
Oberfläche	simuliert	real	teil- spiegelnd	spiegelnd
Elementar- spiegel			+ 4.6.1	○ 4.6.1
SF	+ 4.4.1	+ 4.4.2		
SF mit Gauß	+ 4.4.3	○ 4.4.3	+ 4.6.2	+ 4.6.2

und Welligkeit der lackierten Testoberflächen mit den Modellen aus Kapitel 3 analysiert. Vor den Wahrnehmungsstudien wurde eine Plausibilitätsprüfung der Approximation des SF für simulierte und reale Oberflächen durchgeführt. Anschließend wurden die Durchführung der beiden Studien beschrieben und die Studienergebnisse mit den Ergebnissen des Elementarspiegelmodells und des SF-Modells verglichen.

In Tabelle 4.2 wird ein Überblick über die durchgeführten Evaluationen und deren Ergebnisse gegeben.

Die Evaluation hat ergeben, dass das Defektmodell viele auf den Testoberflächen eingebrachte Verformungen ausreichend gut beschreibt. Es hat sich jedoch gezeigt, dass einzelne Verformungen bereits deutlich von einer rotationssymmetrischen Gaußform abweichen, was in der Folge zu einer falschen Bewertung mit den Wahrnehmungsmodellen führt. Da die Analyse der Welligkeit stark von der betrachteten Wellenlänge abhängt, ist es notwendig, die Statistik der Normalen aus einer Ableitung der skalenbegrenzten Oberfläche zu berechnen. Der relevante Wellenlängenbereich konnte aufgrund der Eigenschaft der Welligkeit, die in Folge einer Spritzlackierung entsteht, eingeschränkt werden. Im Allgemeinen ist es jedoch nötig, den Wellenlängenbereich in Abhängigkeit der Beobachtungsentfernung zu wählen.

Bei der Plausibilitätsprüfung des SF hat sich gezeigt, dass dieser sehr gut mit den simulierten Daten übereinstimmt. Außerdem stimmt die Approximation für kleine gaußförmige Verformungen nahe der Wahrnehmungsgrenze gut mit den simulierten Daten überein. Bei der Plausibilitätsprüfung mit den realen Verformungen hat sich gezeigt, dass die relativ „glatte“ Messung des SF nur dann mit der Approximation übereinstimmt, wenn eine skalenbegrenzte Topographie verwendet wird. Hier muss der relevante Wellenlängenbereich abhängig vom verwendeten deflektometrischen Messaufbau gewählt werden.

Der Vergleich mit den Ergebnissen der Wahrnehmungsstudien hat ergeben, dass sich die Sichtbarkeit der Verformungen mit beiden Modellen gut vorhersagen lässt. Für die Studie mit lackierten Oberflächen müssen dazu jedoch die Rauheit und Welligkeit der Oberfläche über die in Abschnitt 4.3 angegebenen Werte berücksichtigt werden, da sowohl das SF- als auch das Elementarspiegelmodell sonst zu kleine Wahrnehmungsgrenzen schätzen. Da die gedrehten Oberflächen fast keine Welligkeit und auch kaum Rauheit besitzen, konnten die Wahrnehmungsmodelle hier ohne zusätzliche Anpassung mit den Studienergebnissen evaluiert werden. Bei beiden Modellen hat sich dabei eine gute Übereinstimmung gezeigt. Das Elementarspiegelmodell liefert jedoch unplausible Ergebnisse, da die vorhergesagte Sichtbarkeit entgegen der Studienergebnisse mit dem Beobachtungsabstand l_s abnimmt (zumindest solange die Verformung lateral auf der Oberfläche auflösbar bleibt).

5 Zusammenfassung

Moderne messtechnische Verfahren ermöglichen eine automatisierte Inspektion spiegelnder Oberflächen. Für Oberflächen, deren Nutzen hauptsächlich ästhetischer Natur ist, muss dabei Qualität gegen Kosten abgewogen werden. Ein Kunde unterscheidet bei sichtbaren Unvollkommenheiten auf solchen Oberflächen kaum nach Schwere. Daher ist es sinnvoll, davon auszugehen, dass jeder Fehler, der als solcher erkennbar ist, auch als störend empfunden wird. Auf der anderen Seite kann es sein, dass messbare Fehler für den Menschen überhaupt nicht mehr relevant sind, da die Sichtbarkeit von Verformungen auf spiegelnden Oberflächen stark von deren späterer Anwendung abhängt. Daher sollte eine aufwändige Nachbesserung von messbaren, aber für den Kunden unsichtbaren Oberflächenunvollkommenheiten vermieden werden. Außerdem ist eine Abschätzung der Größenordnung, in welcher sichtbare Verformungen auftreten, bereits vorab, bei der Auslegung eines Prüfsystems nötig.

Bisher gibt es keine Metrik, die die Sichtbarkeit von Verformungen auf spiegelnden Oberflächen bewertet. In dieser Arbeit wurden zwei Modelle vorgestellt und evaluiert, um die Sichtbarkeit kleiner Verformungen auf spiegelnden Oberflächen zu beschreiben. Außerdem wurden Modelle vorgestellt, um die Sichtbarkeit der Verformungen an teilspiegelnde oder wellige Oberflächen anzupassen.

Der Mensch verwendet für die Wahrnehmung von Tiefe eine Reihe von Hinweisreizen. Viele dieser Hinweisreize, insbesondere die Auswertung der Disparität beim binokularen Sehen, sind beim Betrachten spiegelnder Oberflächen oft unbrauchbar. Daher wird die Form meist durch die Auswertung einfacher Texturmerkmale aus dem gespiegelten Muster einer strukturierten Umgebung geschätzt. Bei spiegelnden Oberflächen werden somit keine absoluten Höhen, sondern

vielmehr die Neigung und die Krümmung der Oberfläche wahrgenommen. Dementsprechend werden beim ersten Modell (Elementarspiegelmodell) aus den kleinsten sichtbaren Veränderungen eines Umgebungsmusters im Vergleich zur Winkelauflösung des Menschen die wahrnehmbaren Neigungsunterschiede abgeleitet.

Beim zweiten Modell (SF-Modell) wird die Änderung, die ein beliebiges Muster durch Verformung der Oberfläche erfährt, mit der Auflösung des menschlichen Auges verglichen. Die durch die Modelle bestimmten Wahrnehmungsgrenzen stimmen gut mit den Ergebnissen einer Wahrnehmungsstudie auf hochspiegelnden Oberflächen überein. Bei dieser Studie wurden die Teilnehmer gebeten, die gerade noch sichtbaren Verformungen der spiegelnden Oberflächen zu markieren. Das SF-Modell beschreibt die Sichtbarkeit in Abhängigkeit des Beobachtungsabstands besser als das Elementarspiegelmodell, das hier nicht mit den Studienergebnissen übereinstimmt.

In einer zweiten Wahrnehmungsstudie wurde die Sichtbarkeit von Verformungen auf teilspiegelnden Oberflächen untersucht, die zudem einen für lackierte Oberflächen typischen Orangenschaleneffekt besitzen. Nach Berücksichtigung der Oberflächeneigenschaften stimmte die vorhergesagte Sichtbarkeit dieser Verformungen gut mit den Wahrnehmungsstudien überein. Für die Analyse der Oberflächeneigenschaften wurden mehrere Modelle untersucht. Für die Beschreibung der Oberflächenrauheit wurde ein Modell vorgestellt, das die Kontrastübertragung der Oberfläche mit der Kontrastempfindlichkeit des menschlichen Auges vergleicht. Die Welligkeit der Oberfläche wurde über die Statistik der Normalenabweichungen der Oberfläche beschrieben. Alternativ wurden Modelle vorgestellt, die die Welligkeit im Ortsfrequenzspektrum der Fourier-Transformation oder im Parameterraum von lokalen Verformungen beschreiben. Während die Statistik der Normalenabweichungen der Oberfläche gut zur Beschreibung geeignet ist, muss insbesondere die Beschreibung im Parameterraum von lokalen Verformungen noch verbessert werden, um hieraus Aussagen über die Sichtbarkeit abzuleiten.

Für die Evaluation der Modelle wurde ein Algorithmus vorgestellt, der überlappende Höhenmessungen optimal im Sinne des kleinsten Fehlerquadrats zusammensetzt. Außerdem wurde ein Algorithmus vorgestellt, um einen dichten (für jeden Bildpunkt) SF aus einer deflektometrischen Registrierung zu berechnen.

Die Ergebnisse der Wahrnehmungsmodelle werden im folgenden Abschnitt noch einmal vereinfacht dargestellt.

5.1 Faustregeln

In diesem Abschnitt werden die Sichtbarkeitsgrenzen für kleine Verformungen auf spiegelnden Oberflächen anhand des SF-Modells zusammengefasst. Da die Sichtbarkeit von der Oberflächenrauheit abhängt, werden hier zwei teilspiegelnde Oberflächen mit 60GE und 70GE, eine stark spiegelnde Oberfläche mit 95GE und eine perfekt spiegelnde Oberfläche (100GE) untersucht. Einen Eindruck der Rauheit gibt Abbildung 4.16, wobei der verwendete Oberflächenspiegel einer perfekt spiegelnden Oberfläche sehr nahe kommt. Die kleinste Winkelauflösung (siehe Abschnitt 2.4.5), mit der ein Muster über diese Oberflächen aufgelöst werden kann, wurde in Abschnitt 4.3.2 ermittelt und ist nach Abbildung 4.19 für 60 GU 95', für 80 GU 53', für 95 GU 1,8' und für 100 GU nicht besser als 0,5', also begrenzt durch das menschliche Auge. Für die genannten Oberflächen sind in Abbildung 5.1 die Wahrnehmungsgrenzen kleiner Verformungen mit Radius r und Höhe a dargestellt, die einen gaußförmigen Höhenverlauf besitzen (siehe Abbildung 3.21) und damit viele Arten von Oberflächenunvollkommenheiten abdecken. Dabei wird vorausgesetzt, dass über die spiegelnde Oberfläche eine kontrastreiche Umgebung abgebildet wird und sich der Beobachter in einem Abstand c_z zur Oberfläche (in Normalenrichtung) und einem Abstand von 1 m entlang der Oberfläche befindet. Für kleine Abstände c_z wird somit unter einem flachen Winkel auf die Oberfläche geschaut, während mit zunehmendem Abstand c_z der Winkel auf die Oberfläche steiler wird. Diese Abstände wurden ausgewählt, da sie typisch für eine Inspektion spiegelnder Oberflächen sind.

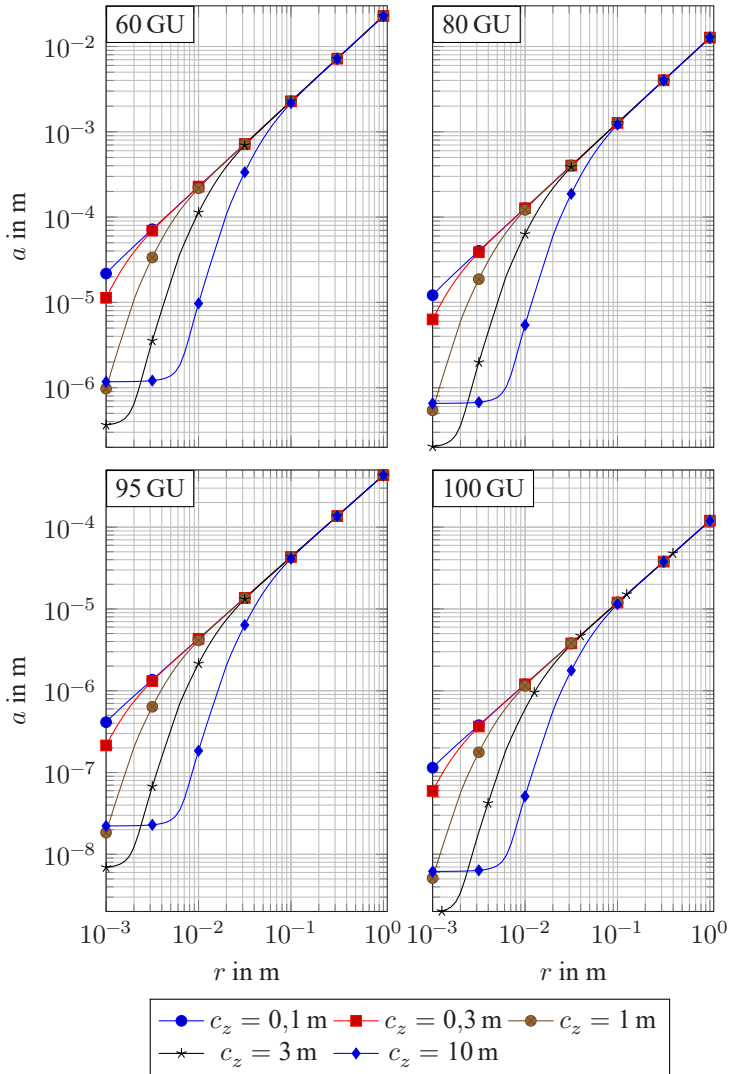


Abbildung 5.1: Wahrnehmungsgrenze einer gaußförmigen Formabweichung mit Radius r , Höhe a bei einer Beobachtung mit 1 m Abstand entlang der Oberflächentangente und Abstand c_z in Richtung der Oberflächennormale.

Betrachtet man beispielsweise eine Verformung mit $r = 10$ mm (entspricht ungefähr 40 mm Breite), dann ist diese auf einer teilspiegelnden Oberfläche (60 GU) ab 100–200 μm Höhe sichtbar. Entfernt man sich weiter von der Oberfläche, wird die Verformung bereits ab einer Höhe von 10 μm sichtbar. Betrachtet man die gleiche Verformung auf einer hochspiegelnden Oberfläche (95 GU), dann wird diese bereits ab 4 μm sichtbar und für große Abstände zur Oberfläche bereits ab 200 nm. Auf einer perfekt spiegelnden Oberfläche werden diese Grenzen nochmals um Faktor 4 kleiner, vorausgesetzt der Beobachter besitzt eine Winkelauflösung von $0,5'$ (das entspricht einer überdurchschnittlichen Sehstärke von 200 %).

5.2 Ausblick

Bei der Evaluation der Modelle haben sich noch offene Probleme und neue Herausforderungen herausgestellt. Diese werden in diesem Abschnitt kurz diskutiert und sollen als Anregung für neue Forschungsrichtungen dienen.

Skala In dieser Arbeit wurde die Skala von sichtbaren Gestaltabweichungen einer Oberfläche studiert. Für Formabweichungen der Oberfläche wurden diese im Kontext der Beobachtungsrichtung und des Beobachtungsabstandes mathematisch beschrieben. Da sich ebenfalls die Welligkeit und Rauheit auf die Sichtbarkeit der Formabweichungen auswirken, wurden auch hierfür Modelle vorgestellt, allerdings wird die Beobachtungsposition dabei nicht berücksichtigt. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass die laterale Ausdehnung der Rauheit und Welligkeit relativ zum Beobachtungsabstand einen wesentlichen Einfluss auf das Erscheinungsbild und die Sichtbarkeit von Formabweichungen hat. Hier schließen sich auch bisher unbeantwortete Fragen an, beispielsweise, wie aus der topographisch erfassten Rauheit einer Oberfläche die Reflektanz als BRDF abgeleitet wird.

Welligkeiten und Defektmodell Eine Möglichkeit, die Welligkeit als Bestandteil der Formabweichungen und somit in Abhängigkeit der Beobachungsposition zu betrachten, wurde in Abschnitt 3.2.1 vorgestellt. Dazu wird die Welligkeit als regelmäßig auftretende Wellenberge und Wellentäler im Parameterraum des Defektmodells beschrieben, das auch zur Beschreibung der Formabweichungen verwendet wird. Somit wäre hierdurch eine Berücksichtigung der Beobachungsposition möglich. Allerdings hat sich herausgestellt, dass die Welligkeit der Oberfläche nur unzureichend durch das Defektmodell mit seinem gaußförmigen Verlauf beschrieben wird. Mit einem alternativen Defektmodell könnten sowohl Formabweichungen als auch die Welligkeit der Oberfläche beschrieben werden. Beispielsweise könnten additive Überlagerungen lokaler Verformungen als Defektmodell verwendet werden, um beliebige Oberflächenunvollkommenheiten zu approximieren.

Eine robuste Schätzung der Breite und Höhe der „Wellenberge“ und „Wellentäler“ ist alternativ über den auf Seite 103 vorgestellten stochastischen Prozess möglich. Longuet-Higgins [Lon57b] gibt unter der Voraussetzung, dass das Spektrum der Oberfläche schmal ist, Wahrscheinlichkeitsdichten in Abhängigkeiten der ersten beiden Momente der Oberfläche an.

SF der Normalenverteilung der Welligkeit In Abschnitt 3.2.1 wurde ein Ansatz vorgestellt der die statistischen Normalenabweichungen durch die Welligkeit der Oberfläche mit dem Modell für kleine gaußförmige Verformungen verbindet. Stattdessen kann nach einer Methode zur direkten Approximation des SF aufgrund einer gemessenen Normalenverteilung gesucht werden und dieser SF zur Maskierung kleiner Verformungen, die einen kleineren SF besitzen, verwendet werden. Der Vorteil, dieses Ansatzes wäre, dass die relevante Skala, die sich durch den Beobachtungsabstand ergibt, explizit durch SF berücksichtigt wird.

Evaluation Rauheit und Welligkeit Die Modelle zur Beschreibung der Rauheit und Welligkeit der Oberfläche beruhen auf bewährten Konzepten, wie

beispielsweise der Beschreibung der Kontrastübertragung oder der Kontrastempfindlichkeit des menschlichen Auges. In der Evaluation wurden jedoch vor allem die Wahrnehmungsmodelle anhand der Studienergebnisse evaluiert. Eine separate Studie mit dem Fokus auf der Evaluation der Modelle zur Beschreibung der Rauheit und Welligkeit ist nötig, bevor diese angewendet werden können. Insbesondere ist hier die oben diskutierte Skala von Interesse.

Normung der Sichtbarkeit Für eine automatisierte Inspektion von spiegelnden Oberflächen mit primär ästhetischem Nutzen wird eine Klassifikation von fehlerhaften Bereichen benötigt, die bisher von menschlichen Gutachtern vorgenommen wird. In den Grundlagen wurde gezeigt, dass bisherige Industrienormen nicht zur Beschreibung der Sichtbarkeit von Unvollkommenheiten auf spiegelnden Oberflächen geeignet sind. Daher ist eine Normung der Sichtbarkeit ästhetischer Defekte, beispielsweise aufbauend auf den vorgestellten Methoden, nötig.

A Anhang

Algorithmus 3 Robuste Ausreißerdetektion nach [IH93]

```
from numpy import sqrt, NaN, median, isfinite
def remove_outliers(data, thresh=3.5):
    valid = isfinite(data)
    if valid.sum() > 0:
        tmp = data[valid].copy()
        dev = sqrt((tmp - median(tmp)) ** 2)
        valid[valid] = 0.6745 * dev < thresh * median(dev)
    return valid
```

Algorithmus 4 Robuste Schätzung einer Ausgleichsebene

```
from numpy import dot, vstack, hstack, linalg, ones
def detrend(xx, yy, zz):
    valid = remove_outliers(zzs, 3.5)
    data = vstack((xxs[valid], yys[valid], zzs[valid])).T
    # estimate plane on valid region
    A = hstack((data[:, :2], ones((data.shape[0], 1))))
    p = linalg.lstsq(A, data[:, 2])[0]
    n = (p[0], p[1], -1) / linalg.norm((p[0], p[1], -1))
    # subtract model from whole region
    zz -= (dot(p, n) - n[0] * xx - n[1] * yy) / n[2]
    return zz
```

Algorithmus 5 Interpolation ungültiger Messdaten

```
from numpy import grid, median, isnan, column_stack
from scipy.interpolate import NearestNDInterpolator
def nan_interpolation(xx, yy, zz):
    valid = ~isnan(zz)
    xy = column_stack((yy[valid], xx[valid]))
    grid = NearestNDInterpolator(xy, zz[valid], rescale=True)
    zz = grid(yy, xx)
    zz -= zz.min()
    return zz
```

Definition A.1: Vertiefungen

Nach innen gerichtete Oberflächenunvollkommenheiten:

- 1 **Riefe:** linienförmige Vertiefung mit gerundetem oder flachem Grund
- 2 **Kratzer:** Vertiefung unregelmäßiger Form in nicht festgelegter Richtung
- 3 **Riss:** linienförmige Vertiefung mit scharfem Grund, verursacht durch das Zerstören der Gleichförmigkeit von Oberfläche und Werkstoff des Werkstückes.
- 4 **Pore:** Vertiefung von geringer Größe mit steiler Böschung, üblicherweise scharfkantig. Die oberen Kanten der Vertiefung sind nicht höher als die Bezugsfläche.
- 5 **Lunker:** einzelne Vertiefung, verursacht durch das Herausfallen von fremdartigen Teilchen, durch Ätzen oder durch den Einfluss von Gasen
- 6 **Schrumpfloch:** Vertiefung, verursacht durch Schrumpfen während des Erstarrens eines Gussstückes, einer Schweißnaht usw.
- 7 **Bruch, Sprung, Spalt:** scharfkantige spaltförmige Öffnung von unregelmäßiger Form und kleiner Tiefe
- 8 **Kantenverrundung:** abgerundeter Teil der Oberfläche, der sich in der Schnittlinie zweier Werkstückoberflächen befindet
- 9 **Einbeulung (konkav):** Vertiefung der Oberfläche eines Bleches infolge örtlicher Biegung
- 10 **Delle:** Vertiefung, ohne erhobenen Anteil, wird häufig durch plastische Formabweichung infolge von Druck oder Schlag verursacht

Definition A.2: Buckel

Nach außen gerichtete Oberflächenunvollkommenheiten:

- 11 **Auswuchs:** wellen- oder hügelartige Erhöhung von kleiner Größe und geringer Höhe
- 12 **Blase:** örtliche Wölbung, verursacht durch Gas- oder Flüssigkeits-einschlüsse unter der Oberfläche
- 13 **Beule (konvex):** Wölbung auf der Oberfläche eines Bleches infolge örtlicher Biegung
- 14 **Schuppe:** schuppenförmige Ablagerung kleiner Dicke, die sich leicht ablöst, entsteht durch das Abblättern der Oberflächenschicht, die eine andere Struktur als Grundwerkstoff hat
- 15 **Einschluss:** verursacht durch das im Werkstoff des Werkstückes enthaltene Fremdteilchen
- 16 **Grat:** scharfkantige Erhöhung der Oberfläche, häufig mit einer Abrundung auf der gegenüberliegenden Seite
- 17 **Gratrippe:** vorstehender Grat, der entweder aus der Spalte zwischen Matrizeiten bzw. an Formteilen bei ihrer Formgebung (Gießen, Schmieden usw.) herausgedrückt wird, oder beim Bearbeiten senkrecht zur Pressrichtung entsteht
- 18 **Ablagerung:** Erhöhung auf einem Werkstück, hervorgerufen entweder durch einen Fremdwerkstoff oder durch den Werkstoff eines anderen Werkstückes

Definition A.3: Kombinierte Oberflächenunvollkommenheiten

Teilweise nach innen und teilweise nach außen gerichtete Oberflächenunvollkommenheiten:

- 19 **Krater:** Vertiefung mit einer kreisförmigen Kontur und erhöhten Kanten, die an den Krater eines Vulkanes erinnert, wobei die Kanten höher als die Bezugsoberfläche liegen
- 20 **Überlappung:** zungenförmige Erhöhung von geringer Dicke, meistens in Form einer Naht, durch eine Falte auf dem Werkstoff verursacht und beim Walzen, Schmieden usw. hineingedrückt
- 21 **Kerbschnitt:** aneinandergereihte Vertiefungen und Erhöhungen, verursacht durch Werkstoffablösen von der Werkstückoberfläche infolge der Bewegung eines Fremdkörpers
- 22 **Aufreiber:** bandförmige Erhöhungen, verursacht durch schlechte spanende Bearbeitung

Definition A.4: Stellenweise Oberflächenunvollkommenheiten; Unvollkommenheiten des Aussehens

Verstreute Oberflächenunvollkommenheiten in der äußersten Schicht der Oberfläche, meistens ohne scharfe Konturen und mit praktisch kaum messbarer Tiefe oder Höhe

- 23 **Abdruck:** Beschädigung der Oberfläche, wie zum Beispiel von Kugellagern, Rollen und Laufringen, mit silberartigem mattedem Aussehen, tritt stellenweise auf, wird durch periodisch auftretende Überlastung verursacht
- 24 **Erosion:** Beschädigung der Oberfläche infolge physikalischer Zerstörung oder Verschleiß der Oberfläche
- 25 **Korrosion:** Beschädigung der Oberfläche infolge chemischer Zerstörung der Oberfläche
- 26 **Grübchen:** Ausfressungen und kleine Löcher, meistens von großer Tiefe und verstreut über einen großen Bereich der Oberfläche
- 27 **Mikrorisse:** Netz von Ritzen auf einer Oberfläche
- 28 **Fleck:** Bereich, der sich visuell von der benachbarten Oberfläche unterscheidet
- 29 **Verfärbung:** verfärbter Bereich auf einer Oberfläche
- 30 **Streifen:** bandförmiger vertiefter Bereich auf der Oberfläche, meistens von geringer Tiefe, oder Bereich unterschiedlicher Oberflächen-textur
- 31 **Schichtartige Oberfläche:** verursacht durch das Ablättern einer Teilfläche der Oberflächenschicht eines Werkstückes

Literaturverzeichnis

- [AB11] Yair Adato und Ohad Ben-Shahar. „Specular Flow and Shape in One Shot“. In: *Proceedings of the British Machine Vision Conference*. 2011, S. 24.1–24.11 (siehe S. 80).
- [Ada+07] Yair Adato, Yuriy Vasilyev, Ohad Ben-Shahar und Todd Zickler. „Toward a Theory of Shape from Specular Flow“. In: *Proc. IEEE Int. Conference on Computer Vision*. 2007 (siehe S. 80).
- [Ada+10] Yair Adato, Yuriy Vasilyev, Todd Zickler und Ohad Ben-Shahar. „Shape from Specular Flow“. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence* 32.11 (Nov. 2010), S. 2054–2070 (siehe S. 80).
- [And09] Alf Andersson. „Evaluation and visualisation of surface defects on auto-body panels“. In: *Journal of Materials Processing Technology* 209.2 (2009), S. 821–837 (siehe S. 83).
- [Bal08] Jonathan Balzer. „Regularisierung des Deflektometrieproblems – Grundlagen und Anwendung“. Dissertation. Universität Karlsruhe. Universitätsverlag Karlsruhe, Feb. 2008 (siehe S. 65).
- [BB91] Andrew Blake und Heinrich Bülthoff. „Shape from specularities: Computation and psychophysics“. In: *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 331.1260 (1991), S. 237–252 (siehe S. 76).
- [BJ80] Peter Burt und Bela Julesz. „A disparity gradient limit for binocular fusion“. In: *Science* 208.4444 (1980), S. 615–617 (siehe S. 74).

- [Bla13] François Blateyron. „The Areal Field Parameters“. In: *Characterisation of Areal Surface Texture*. Springer, 2013, S. 45–65 (siehe S. 17).
- [Blo+08] Gunnar Blohm, Aarlenne Khan, Lei Ren, Kai Schreiber und Douglas Crawford. „Depth estimation from retinal disparity requires eye and head orientation signals“. In: *Journal of Vision* 8.16 (2008), S. 3–3 (siehe S. 58).
- [BP97] Jürgen Beyerer und Denis Pérard. „Automatische Inspektion spiegelnder Oberflächen anhand von Rasterreflexionen“. In: *tm – Technisches Messen* 64.10 (1997), S. 394–400 (siehe S. 89).
- [BPF12] Jürgen Beyerer, Fernando Puente León und Christian Frese. *Automatische Sichtprüfung: Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung*. Hrsg. von Jürgen Beyerer, Fernando Puente León und Christian Frese. Berlin Heidelberg: Springer, 2012 (siehe S. 27, 42, 69, 108, 113, 162).
- [Bro+01] Ilja Bronstein, Konstantin Semendjajew, Gerhard Musiol und Heiner Mühlig. *Taschenbuch der Mathematik*. 5. Frankfurt: Verlag Harri Deutsch, 2001 (siehe S. 102).
- [BT81] Harry Barrow und Jay Tenenbaum. „Interpreting line drawings as three-dimensional surfaces“. In: *Artificial Intelligence* 17.1-3 (1981), S. 75–116 (siehe S. 62).
- [Bur12] Jan Burke. „Phase Decoding and Reconstruction“. In: Hrsg. von Pramod Rastogi und Erwin Hack. Bd. *Optical Methods for Solid Mechanics: A Full-Field Approach*. Wiley, Weinheim, 2012. Kap. 3, S. 83–141 (siehe S. 162).
- [CA00] Min Chen und James Arvo. „Theory and Application of Specular Path Perturbation“. In: *ACM Transactions on Graphics* 19.4 (2000), S. 246–278 (siehe S. 80).

- [Can+09a] Guillermo Canas, Yuriy Vasilyev, Yair Adato, Todd Zickler, Steven Gortler und Ohad Ben-Shahar. „A linear formulation of shape from specular flow“. In: *Computer Vision, 2009 IEEE 12th International Conference on*. IEEE. 2009, S. 191–198 (siehe S. 80).
- [Can+09b] Guillermo Canas, Yuriy Vasilyev, Yair Adato, Todd Zickler, Steven Gortler und Ohad Ben-Shahar. *Unique specular shape from two specular flows*. Techn. Ber. 2009 (siehe S. 80).
- [CBS00] Frank Chen, Gordon Brown und Mumin Song. „Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods“. In: *Optical Engineering* 39.1 (2000), S. 10–22 (siehe S. 67).
- [CHA93] Ron Cagenello, Lynn Halpern und Aries Ardit. „Binocular enhancement of visual acuity“. In: *J. Opt. Soc. Am. A* 10.8 (Aug. 1993), S. 1841–1848 (siehe S. 50).
- [CT82] Robert Cook und Kenneth Torrance. „A Reflectance Model for Computer Graphics“. In: *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 1.1 (Jan. 1982), S. 7–24 (siehe S. 175).
- [Cur+90] Christine Curcio, Kenneth Sloan, Robert Kalina und Anita Hendrickson. „Human photoreceptor topography“. In: *The Journal of Comparative Neurology* 292.4 (1990), S. 497–523 (siehe S. 43).
- [Daw12] Nigel Daw. *How Vision Works*. Oxford University Press, Jan. 2012 (siehe S. 54, 61, 62).
- [DIN4760] Deutsches Institut für Normung e.V. *Gestaltabweichungen — Begriffe und Ordnungssystem (DIN 4760:1982)*. Norm DIN 4760:1982 (siehe S. 11–13, 20, 24).
- [DIN5031] Deutsches Institut für Normung e.V. *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik — Größen, Formelzeichen und Einheiten der Strahlungsphysik (DIN 5031:1982)*. Norm DIN 5031:1982 (siehe S. 37, 38).

- [DIN5340] Deutsches Institut für Normung e.V. *Begriffe der physiologischen Optik (DIN 5340:1998)*. Norm DIN 5340:1998 (siehe S. 38, 40, 43, 53, 57, 58).
- [Doe+11] Katja Doerschner, Roland Fleming, Ozgur Yilmaz, Paul Schrafer, Bruce Hartung und Daniel Kersten. „Visual Motion and the Perception of Surface Material“. In: *Current Biology* 21.23 (2011), S. 2010–2016 (siehe S. 70).
- [Don+15] Zhao Dong, Bruce Walter, Steve Marschner und Donald Greenberg. „Predicting appearance from measured microgeometry of metal surfaces“. In: *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 35.1 (2015), S. 9 (siehe S. 175).
- [Fab12] Christian Faber. „New Methods and Advances in Deflectometry“. Dissertation. FAU Erlangen. Erlangen Scientific Press, Aug. 2012 (siehe S. 88).
- [Fer13] Kedzie Fernholz. „Quantifying the visibility of surface distortions in class “A” automotive exterior body panels“. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 135.1 (2013), S. 011001 (siehe S. 83).
- [FTA04] Roland Fleming, Antonio Torralba und Edward Adelson. „Specular reflections and the perception of shape“. In: *Journal of Vision* 4.9 (2004) (siehe S. 66, 68).
- [GBA08] Herbert Gross, Fritz Blechinger und Bertram Aichtner. „Human Eye“. In: *Handbook of Optical Systems*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008, S. 1–87 (siehe S. 35, 36, 41, 43, 44, 48, 52, 57, 58, 63).
- [Gib50] James Gibson. *The perception of the visual world*. Boston: Houghton Mifflin, 1950 (siehe S. 60).
- [Gru13] Robin Gruna. „Beleuchtungsverfahren zur problemspezifischen Bildgewinnung für die automatische Sichtprüfung“. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2013 (siehe S. 31).

- [Gui+99] Antonio Guirao, Concepción González, Manuel Redondo, Edward Geraghty, Sverker Norrby und Pablo Artal. „Average optical performance of the human eye as a function of age in a normal population.“ In: *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 40.1 (1999), S. 203 (siehe S. 53).
- [Häu18] Philipp Häusser. „Studie über die Wahrnehmung von Defekten auf spiegelnden Oberflächen“. Masterarbeit. KIT, 31. März 2018 (siehe S. 195).
- [HCB12] Robert Held, Emily Cooper und Martin Banks. „Blur and Disparity Are Complementary Cues to Depth“. In: *Current Biology* 22.5 (2012), S. 426–431 (siehe S. 42).
- [Hel67] Hermann von Helmholtz. *Handbuch der physiologischen Optik*. Bd. 9. Leopold Voss, Leipzig, 1867, S. 874 (siehe S. 33, 43, 53, 65, 73).
- [HHK01] Gerd Häusler, Christoph Horneber und Markus Knauer. *Physical limits of phase measuring deflectometry*. Jahresbericht 2001. Erlangen: OSMIN - Optical Sensing, Metrology und INspection, 2001, S. 39 (siehe S. 89).
- [HN15] Jessica Holmin und Mark Nawrot. „Motion parallax thresholds for unambiguous depth perception“. In: *Vision Research* 115.Part A (2015), S. 40–47 (siehe S. 60, 63).
- [Höl08] Jörg Hölzing. *Die Kano-Theorie der Kundenzufriedenheitsmessung*. Springer, 2008 (siehe S. 9, 10).
- [Hsa06] Reda Hsakou. „Curvature: the relevant criterion for Class-A surface quality“. In: *Ondulo, Visual technologies* (2006) (siehe S. 82).
- [HSB99] Gunilla Haegerstrom-Portnoy, Marilyn Schneck und John Brabyn. „Seeing into old age: vision function beyond acuity.“ In: *Optometry and Vision Science* 76.3 (1999), S. 141–158 (siehe S. 52).

- [HWP03] Ian Hutchings, Pengzhu Wang und Glenn Parry. „An optical method for assessing scratch damage in bulk materials and coatings“. In: *Surface and Coatings Technology* 165.2 (2003), S. 186–193 (siehe S. 86).
- [Ick07] Ignacio Icke. *Schematische Darstellung des menschlichen Auges*. Hrsg. von Wikimedia Commons. [Online; aufgerufen 13. Oktober 2017], 3. März 2007 (siehe S. 33, 34).
- [IH93] Boris Iglewicz und David Hoaglin. *ASQC Basic References in Quality Control*. Bd. 16: *How to Detect and Handle Outliers*. ASQC Quality Press, 1993 (siehe S. 221).
- [IKM14] Iliya Ivanov, Daniel Kramer und Kathy Mullen. „The role of the foreshortening cue in the perception of 3D object slant“. In: *Vision Research* 94 (2014), S. 41–50 (siehe S. 62, 63).
- [ISO16610] Deutsches Institut für Normung e.V. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) — Filterung (ISO 16610:2015)*. Norm DIN EN ISO 16610:2015 (siehe S. 18).
- [ISO16610-21] Deutsches Institut für Normung e.V. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) — Filterung — Teil 21: Lineare Profilfilter: Gauß-Filter (ISO 16610-21:2013)*. Norm DIN EN ISO 16610:2013 (siehe S. 18).
- [ISO16610-22] Deutsches Institut für Normung e.V. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) — Filterung — Teil 22: Lineare Profilfilter: Spline-Filter (ISO 16610-22:2015)*. Norm DIN EN ISO 16610:2015 (siehe S. 181).
- [ISO25178] Deutsches Institut für Normung e.V. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) — Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft (ISO 25178:2016)*. Norm DIN EN ISO 25178:2016 (siehe S. 13, 17, 19, 20, 24, 118).
- [ISO2813] Deutsches Institut für Normung e.V. *Beschichtungsstoffe — Bestimmung des Glanzwertes unter 20°, 60° und 85° (ISO 2813:2014)*. Norm DIN EN ISO 2813:2014 (siehe S. 22, 24).

- [ISO4618] Deutsches Institut für Normung e.V. *Beschichtungsstoffe — Begriffe (ISO 4618:2014)*. Norm DIN EN ISO 4618:2014 (siehe S. 13, 19–21, 24).
- [ISO8596] Deutsches Institut für Normung e.V. *Augenoptik — Sehschärfeprüfung — Das Normsehzeichen und seine Darbietung (ISO 8596:2009)*. Norm DIN EN ISO 8596:2009 (siehe S. 46, 47).
- [ISO8785] Deutsches Institut für Normung e.V. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) — Oberflächenunvollkommenheiten — Begriffe, Definitionen und Kenngrößen (ISO 8785:1999)*. Norm DIN EN ISO 8785:1999 (siehe S. 13–16, 19, 24).
- [ISO9000] Deutsches Institut für Normung e.V. *Qualitätsmanagementsysteme — Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2015)*. Norm DIN EN ISO 9000:2015 (siehe S. 6–8).
- [Jak17] Wenzel Jakob. *Mitsuba renderer*. 10. Dez. 2017. URL: <http://www.mitsuba-renderer.org> (siehe S. 144, 145).
- [Jia+10] Han Jiang, Robert Browning, Mohammad Hossain, Hung-Jue Sue und Mikihiro Fujiwara. „Quantitative evaluation of scratch visibility resistance of polymers“. In: *Applied Surface Science* 256.21 (2010), S. 6324–6329 (siehe S. 87).
- [Kel79] Donald Kelly. „Motion and vision. II. Stabilized spatio-temporal threshold surface“. In: *J. Opt. Soc. Am.* 69.10 (Okt. 1979), S. 1340–1349 (siehe S. 50).
- [KFN17] Helga Kolb, Eduardo Fernandez und Ralph Nelson. *The Organization of the Retina and Visual System*. Hrsg. von Helga Kolb, Eduardo Fernandez und Ralph Nelson. 2017. URL: <http://webvision.med.utah.edu/> (siehe S. 35).
- [KM12] Jonathan Konieczny und Gary Meyer. „Computer rendering and visual detection of orange peel“. In: *Journal of Coatings Technology and Research* 9.3 (Mai 2012), S. 297–307 (siehe S. 70).

- [Koe86] Jan Koenderink. „Optic flow“. In: *Vision research* 26.1 (1986), S. 161–179 (siehe S. 55).
- [Kon09] Jonathan Konieczny. „Application, rendering and display of automotive paint.“ Dissertation. University of Minnesota, 2009 (siehe S. 70, 71).
- [Krü14] Benjamin Krüger. „Wahrnehmung von Defekten auf spiegelnden Oberflächen“. Masterarbeit. Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft, 31. März 2014 (siehe S. 188).
- [KT97] Manfred Kessler und Harald Traue. „Kundenklinik Fahrzeugoberfläche (Lack): Psychologische Untersuchungen zur Wahrnehmung von Oberflächenfehlern“. 1997 (siehe S. 10, 84, 85).
- [Lai+06] Justin Laird, Mitchell Rosen, Jeff Pelz, Ethan Montag und Scott Daly. „Spatio-velocity CSF as a function of retinal velocity using unstabilized stimuli“. In: *Human Vision and Electronic Imaging XI* 6057 (2006), S. 605705 (siehe S. 50).
- [Lap14] Joseph Lappin. „What is binocular disparity?“ In: *Frontiers in Psychology* 5 (2014), S. 870 (siehe S. 43).
- [LBH12] Paul Lovell, Marina Bloj und Julie Harris. „Optimal integration of shading and binocular disparity for depth perception“. In: *Journal of vision* 12.1 (2012), S. 1–18 (siehe S. 63).
- [Liu+11] Peng Liu, Robert Lee Browning, Hung-Jue Sue, Jiang Li und Scooter Jones. „Quantitative scratch visibility assessment of polymers based on Erichsen and ASTM/ISO scratch testing methodologies“. In: *Polymer Testing* 30.6 (2011), S. 633–640 (siehe S. 87).
- [Lon57a] Michael Longuet-Higgins. „Statistical properties of an isotropic random surface“. In: *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 250.975 (1957), S. 157–174 (siehe S. 76).

- [Lon57b] Michael Longuet-Higgins. „The statistical analysis of a random, moving surface“. In: *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 249.966 (1957), S. 321–387 (siehe S. 103–105, 116, 218).
- [Lon60a] Michael Longuet-Higgins. „Reflection and refraction at a random moving surface. I. Pattern and paths of specular points“. In: *JOSA* 50.9 (1960), S. 838–844 (siehe S. 76).
- [Lon60b] Michael Longuet-Higgins. „Reflection and refraction at a random moving surface. II. Number of specular points in a Gaussian surface“. In: *JOSA* 50.9 (1960), S. 845–850 (siehe S. 76).
- [Lon60c] Michael Longuet-Higgins. „Reflection and refraction at a random moving surface. III. Frequency of twinkling in a Gaussian surface“. In: *JOSA* 50.9 (1960), S. 851–856 (siehe S. 76).
- [LP80] Christopher Longuet-Higgins und Kvetoslav Prazdny. „The interpretation of a moving retinal image“. In: *Proc. R. Soc. Lond. B*. Bd. 208. 1173. The Royal Society. 1980, S. 385–397 (siehe S. 61).
- [LS15] Michael Langer und Ryan Siciliano. „Are blur and disparity complementary cues to depth?“ In: *Vision Research* 107. Supplement C (2015), S. 15–21 (siehe S. 42).
- [Mal+91] Hanspeter Mallot, Heinrich Bülthoff, Jim Little und Stefan Bohrer. „Inverse perspective mapping simplifies optical flow computation and obstacle detection“. In: *Biological Cybernetics* 64.3 (1991), S. 177–185 (siehe S. 168).
- [Mat+96] Kurt Matzler, Hans H Hinterhuber, Franz Bailom und Elmar Sauerwein. „How to delight your customers“. In: *Journal of Product & Brand Management* 5.2 (1996), S. 6–18 (siehe S. 9).
- [MBW13] Aidan Murphy, Hiroshi Ban und Andrew Welchman. „Integration of texture and disparity cues to surface slant in dorsal visual cortex“. In: *Journal of Neurophysiology* 110.1 (2013), S. 190–203 (siehe S. 55, 62).

- [MFW14] Alexander Muryy, Roland Fleming und Andrew Welchman. „Key characteristics of specular stereo“. In: *Journal of Vision* 14.14 (2014), S. 14 (siehe S. 74).
- [Mir+12] M. Miranda-Medina, Thomas Wagner, Johannes Böhm, Andras Vernes und Kurt Hingerl. „Optical analysis of orange peel on metallic surfaces“. In: *Optical Micro- and Nanometrology IV* 8430 (2012) (siehe S. 21).
- [Mis07] Peter Mischke. *Filmbildung in modernen Lacksystemen*. Vincentz Network, 2007 (siehe S. 21).
- [Mur+13] Alexander Muryy, Andrew Welchman, Andrew Blake und Roland Fleming. „Specular reflections and the estimation of shape from binocular disparity“. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110.6 (2013), S. 2413–2418 (siehe S. 73–75).
- [NS12] Mark Nawrot und Keith Stroyan. „Integration time for the perception of depth from motion parallax“. In: *Vision Research* 59.Supplement C (2012), S. 64–71 (siehe S. 59).
- [Ola14] Sabine Olawsky. „Beurteilung von Orangenhaut auf lackierten Blechen mittels Deflektometrie“. Masterarbeit. KIT, 31. Juli 2014 (siehe S. 118, 178).
- [Orb11] Guy Orban. „The Extraction of 3D Shape in the Visual System of Human and Nonhuman Primates“. In: *Annual Review of Neuroscience* 34.1 (2011), S. 361–388 (siehe S. 55).
- [OSS83] Cynthia Owsley, Robert Sekuler und Dennis Siemsen. „Contrast sensitivity throughout adulthood“. In: *Vision Research* 23.7 (1983), S. 689–699 (siehe S. 52).
- [Özk09] Muammer Özkul. „Qualitätsansprüche bezüglich des äußeren Erscheinungsbildes von Automobilen der Premiumklasse“. Dissertation. Technische Universität München, 23. Apr. 2009 (siehe S. 9).

- [Ped+07] Frank Pedrotti, Leno Pedrotti, Werner Bausch und Hartmut Schmidt. *Optik für Ingenieure: Grundlagen*. Springer, Berlin, 2007 (siehe S. 28, 32, 42, 52).
- [Pho75] Bui Tuong Phong. „Illumination for Computer Generated Pictures“. In: *Communications of the ACM* 18.6 (1975), S. 311–317 (siehe S. 77).
- [Ran+03] Pratima Rangarajan, Moitreyee Sinha, Vicki Watkins, Kevin Harding und John Sparks. „Scratch visibility of polymers measured using optical imaging“. In: *Polymer Engineering & Science* 43.3 (2003), S. 749–758 (siehe S. 86).
- [RB06] Stefan Roth und Michael Black. „Specular Flow and the Recovery of Surface Structure“. In: *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* 2 (2006), S. 1869–1876 (siehe S. 78).
- [SCP02] Silvio Savarese, Min Chen und Pietro Perona. „Second order local analysis for 3D reconstruction of specular surfaces“. In: *Proc. First International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission*. 2002, S. 356–361 (siehe S. 67).
- [Sin+04] Moitreyee Sinha, Pratima Rangarajan, Martha Gardner, Vicki Watkins und Deniz Senturk. „Models for predicting perception of an item of interest“. US 2004/0107077 A1. 3. Juni 2004 (siehe S. 86).
- [SLP04] Silvio Savarese, Fei-Fei Li und Pietro Perona. „What Do Reflections Tell Us About the Shape of a Mirror?“ In: *Proc. 1st Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*. APGV '04. Los Angeles, California: ACM, 2004, S. 115–118 (siehe S. 67).
- [SP01] Silvio Savarese und Pietro Perona. „Local analysis for 3D reconstruction of specular surfaces“. In: *Proc. IEEE Conference*

- on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Bd. 2. 2001, S. 738–745 (siehe S. 67).
- [Ste16] Thomas Stephan. „Beitrag zur Unterwasserbildrestauration“. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie. KIT Scientific Publishing, 19. Juli 2016, S. 244 (siehe S. 25, 26).
- [Sun+16] Hua-Chun Sun, Andrew Welchman, Dorita Chang und Massimiliano Di Luca. „Look but don’t touch: Visual cues to surface structure drive somatosensory cortex“. In: *NeuroImage* 128.Supplement C (2016), S. 353–361 (siehe S. 56).
- [TS67] Kenneth Torrance und Ephraim Sparrow. „Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces“. In: *Journal of the Optical Society of America* 57.9 (1967), S. 1105–1114 (siehe S. 175).
- [Vas+08] Yuriy Vasilyev, Yair Adato, Todd Zickler und Ohad Ben-Shahar. „Dense Specular Shape from Multiple Specular Flows“. In: *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2008, S. 1–8 (siehe S. 80).
- [Vas+11] Yuriy Vasilyev, Todd Zickler, Steven Gortler und Ohad Ben-Shahar. „Shape from specular flow: Is one flow enough?“. In: *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. IEEE. 2011, S. 2561–2568 (siehe S. 80).
- [VCT01] Alain Viguier, Gilles Clément und Yves Trotter. „Distance Perception within near Visual Space“. In: *Perception* 30.1 (2001), S. 115–124 (siehe S. 57, 63).
- [VDI3414] Verein Deutscher Ingenieure. *Beurteilung von Holz- und Holzwerkstoffoberflächen — Oberflächenmerkmale*. Entwurf VDI 3414 (siehe S. 23, 24).
- [Ved+16] Indu Vedamurthy, David Knill, Samuel Huang, Amanda Yung, Jian Ding, Oh-Sang Kwon, Daphne Bavelier und Dennis Levi. „Recovering stereo vision by squashing virtual bugs in a virtu-

- al reality environment“. In: *Phil. Trans. R. Soc. B* 371.1697 (2016) (siehe S. 55).
- [WA05] Andrew Watson und Albert Ahumada. „A standard model for foveal detection of spatial contrast.“ In: *Journal of vision* 5 (9 Okt. 2005), S. 717–740 (siehe S. 48, 49).
- [WB11] Stefan Werling und Jürgen Beyerer. „Oberflächenrekonstruktion mittels Stereodeflektometrie“. In: *tm – Technisches Messen* 78.9 (2011), S. 398–405 (siehe S. 162).
- [WD93] Stephen Waldon und Charles Dyer. „Dynamic shading, motion parallax and qualitative shape“. In: *Proc. IEEE Workshop Qualitative Vision*. Juni 1993, S. 61–70 (siehe S. 77).
- [Wei+06] Ulrich Weidenbacher, Pierre Bayerl, Heiko Neumann und Roland Fleming. „Sketching Shiny Surfaces: 3D Shape Extraction and Depiction of Specular Surfaces“. In: *ACM Trans. Appl. Percept.* 3.3 (Juli 2006), S. 262–285 (siehe S. 67, 70).
- [Wel+05] Andrew Welchman, Arne Deubelius, Verena Conrad, Heinrich Bühlhoff und Zoe Kourtzi. „3D shape perception from combined depth cues in human visual cortex“. In: *Nature Neuroscience* 8.6 (2005), S. 820–827 (siehe S. 55).
- [Wer11] Stefan Werling. „Deflektometrie zur automatischen Sichtprüfung und Rekonstruktion spiegelnder Oberflächen“. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie. KIT Scientific Publishing, 2011 (siehe S. 67, 88).
- [Wes79] Gerald Westheimer. „The spatial sense of the eye. Proctor lecture.“ In: *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 18.9 (1979), S. 893–912 (siehe S. 43).
- [WH90] William Warren und Danial Hannon. „Eye movements and optical flow“. In: *JOSA A* 7.1 (1990), S. 160–169 (siehe S. 61).
- [WS82] Günther Wyszecki und Walter Stiles. *Color Science: concepts and methods, quantitative data and formulae*. 2. Aufl. New York: Wiley, 1982 (siehe S. 38).

- [Zie+13] Mathias Ziebarth, Tan-Toan Le, Thomas Greiner und Michael Heizmann. „Multiskalige Oberflächeninspektion mit Wavelets und Deflektometrie“. In: *Photonik* 6 (2013) (siehe S. 118, 119).
- [Zie+14] Mathias Ziebarth, Markus Vogelbacher, Sabine Olawsky und Jürgen Beyerer. „Obtaining 2D Surface Characteristics from Specular Surfaces“. In: *Pattern Recognition – 36th German Conference, GCPR 2014, Münster, Germany, September 2-5, 2014, Proceedings*. 2014, S. 690–700 (siehe S. 21).
- [Zie15] Mathias Ziebarth. „Defect perception thresholds on specular surfaces“. In: *Proceedings of the 2014 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory*. Bd. 20. KIT Scientific Publishing. 2015, S. 123 (siehe S. 122, 124).

Eigene Veröffentlichungen

- [Bha+17a] Faraz Bhatti, Thomas Greiner, Michael Heizmann und Mathias Ziebarth. „A new FPGA based architecture to improve performance of deflectometry image processing algorithm“. In: *Proceedings of the 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*. 2017.
- [Bha+17b] Faraz Bhatti, Thomas Greiner, Michael Heizmann und Mathias Ziebarth. „An extended architecture to optimize execution time of 3D image processing deflectometry algorithm using FPGA“. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA)*. IEEE. 2017, S. 257–262.
- [BSZ18] Jan Burke, Thomas Stephan und Mathias Ziebarth. „Deflektometer, Referenzmuster und Verfahren zur Topografiebestimmung eines Objekts“. Europ. Patentanmeld. EP 2018 055 190. 2018.
- [Gre+16a] Thomas Greiner, Tan-Toan Le, Michael Heizmann und Mathias Ziebarth. „Image classification“. Europ. Pat. EP 2 977 933 A1. 2016.
- [Gre+16b] Thomas Greiner, Tan-Toan Le, Mathias Ziebarth und Michael Heizmann. „Multiscale surface inspection using wavelets and deflectometry“. In: *tm – Technisches Messen* 83.11 (2016).

- [Hah+13] Andreas Hahn, Mathias Ziebarth, Michael Heizmann und Andreas Rieder. „Defect Classification on Specular Surfaces Using Wavelets“. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Scale Space and Variational Methods in Computer Vision (SSVM)*. Springer, 2013.
- [Le+13] Tan-Toan Le, Mathias Ziebarth, Thomas Greiner und Michael Heizmann. „Inspection of specular surfaces using optimized M-channel wavelets“. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. 2013.
- [Le+14] Tan-Toan Le, Mathias Ziebarth, Thomas Greiner und Michael Heizmann. „Optimized size-adaptive feature extraction based on content-matched rational wavelet filters“. In: *Proceedings of the 22nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. 2014.
- [Le+16] Tan-Toan Le, Mathias Ziebarth, Thomas Greiner und Michael Heizmann. „Systematic design of object shape matched wavelet filter banks for defect detection“. In: *Proceedings of the 39th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*. IEEE. 2016.
- [Vog+14] Markus Vogelbacher, Mathias Ziebarth, Sabine Olawsky und Jürgen Beyerer. „Segmentation of varying degrees of waviness on coated surfaces“. In: *tm – Technisches Messen* 81.12 (2014).
- [VWZ12] Markus Vogelbacher, Stefan Werling und Mathias Ziebarth. „Beurteilung textiler Flächenhalbzeuge mittels variabler Beleuchtung“. In: *Forum Bildverarbeitung 2012*. KIT Scientific Publishing, 2012.
- [ZHB14] Mathias Ziebarth, Michael Heizmann und Jürgen Beyerer. „Sichtbarkeit von Dellen und Beulen auf spiegelnden Ober-

- flächen“. In: *Forum Bildverarbeitung 2014*. KIT Scientific Publishing, 2014.
- [Zie+12] Mathias Ziebarth, Tan-Toan Le, Thomas Greiner und Michael Heizmann. „Inspektion spiegelnder Oberflächen mit Wavelet-basierten Verfahren“. In: *Forum Bildverarbeitung 2012*. KIT Scientific Publishing, 2012.
- [Zie+13] Mathias Ziebarth, Tan-Toan Le, Thomas Greiner und Michael Heizmann. „Multiskalige Oberflächen-Inspektion mit Wavelets und Deflektometrie“. In: *Photonik 6/2013* (2013).
- [Zie+14] Mathias Ziebarth, Markus Vogelbacher, Sabine Olawsky und Jürgen Beyerer. „Obtaining 2D Surface Characteristics from Specular Surfaces“. In: *Proceedings of the 36th German Conference on Pattern Recognition (GCPR)*. 2014.
- [Zie+17] Mathias Ziebarth, Thomas Stephan, Sebastian Höfer und Jan Burke. „Creating patterns for phase shifting by rotation in deflectometry“. In: *DGaO Proceedings 2017*. Bd. 118. 2017.
- [Zie+18] Mathias Ziebarth, Niclas Zeller, Michael Heizmann und Franz Quint. „Modeling the unified measurement uncertainty of deflectometric and plenoptic 3D sensors“. In: *Journal of Sensors and Sensor Systems* (2018).
- [Zie13a] Mathias Ziebarth. „Methoden zur Inspektion spiegelnder Oberflächen mit Deflektometrie und Wavelets“. In: *Fachtagung Produktionsmesstechnik für die Praxis, Buchs*. 2013.
- [Zie13b] Mathias Ziebarth. „Methods for Multiscale Evaluation of Deflectometric Measurements“. In: *Proceedings of the 2012 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory*. KIT Scientific Publishing, 2013.

- [Zie14] Mathias Ziebarth. „Empirical Comparison of Defect Classifiers on Specular Surfaces“. In: *Proceedings of the 2013 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory*. KIT Scientific Publishing, 2014.
- [Zie15] Mathias Ziebarth. „Defect perception thresholds on specular surfaces“. In: *Proceedings of the 2014 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory*. KIT Scientific Publishing, 2015.

**SCHRIFTENREIHE AUTOMATISCHE SICHTPRÜFUNG UND BILDVERARBEITUNG
(ISSN 1866-5934)**

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Beyerer

- Band 1 **JONATHAN BALZER**
Regularisierung des Deflektometrieproblems Grundlagen
und Anwendung. 2008
ISBN 978-3-86644-230-6
- Band 2 **IOANA GHEȚA**
Fusion multivariater Bildserien am Beispiel eines Kamera-Arrays. 2011
ISBN 978-3-86644-684-7
- Band 3 **STEFAN BRUNO WERLING**
Deflektometrie zur automatischen Sichtprüfung
und Rekonstruktion spiegelnder Oberflächen. 2011
ISBN 978-3-86644-687-8
- Band 4 **JAN WASSENBERG**
Efficient Algorithms for Large-Scale Image Analysis. 2012
ISBN 978-3-86644-786-8
- Band 5 **MARTIN GRAFMÜLLER**
Verfahrensfortschritte in der robusten Echtzeiterkennung
von Schriftzeichen. 2013
ISBN 978-3-86644-979-4
- Band 6 **JÜRGEN BRAUER**
Human Pose Estimation with Implicit Shape Models. 2014
ISBN 978-3-7315-0184-8
- Band 7 **MARKUS MÜLLER**
Szeneninterpretation unter Verwendung multimodaler Sensorik
und Salienzmaßen. 2017
ISBN 978-3-7315-0240-1
- Band 8 **ROBIN GRUNA**
Beleuchtungsverfahren zur problemspezifischen Bildgewinnung
für die automatische Sichtprüfung. 2015
ISBN 978-3-7315-0313-2
- Band 9 **THOMAS STEPHAN**
Beitrag zur Unterwasserbildrestauration. 2017
ISBN 978-3-7315-0579-2

- Band 10 **JAN-PHILIP JARVIS**
A Contribution to Active Infrared Laser Spectroscopy
for Remote Substance Detection. 2017
ISBN 978-3-7315-0725-3
- Band 11 **MIRO TAPHANEL**
Chromatisch konfokale Triangulation – Hochgeschwindigkeits 3D-Sensorik
auf Basis der Wellenlängenschätzung mit optimierten Filtern. 2018
ISBN 978-3-7315-0646-1
- Band 12 **SEBASTIAN HÖFER**
Untersuchung diffus spiegelnder Oberflächen mittels
Infrarotdeflektometrie. 2017
ISBN 978-3-7315-0711-6
- Band 13 **MATTHIAS RICHTER**
Über lernende optische Inspektion am Beispiel der
Schüttgutsortierung. 2018
ISBN 978-3-7315-0842-7
- Band 14 **MATHIAS ZIEBARTH**
Wahrnehmungsgrenzen kleiner Verformungen auf
spiegelnden Oberflächen. 2019
ISBN 978-3-7315-0890-8

In dieser Arbeit werden zwei Modelle entwickelt und evaluiert, die Wahrnehmungsgrenzen kleiner Formabweichungen auf spiegelnden Oberflächen beschreiben. Beide Modelle berücksichtigen die Eigenschaften eines reflektierten Musters und führen die Sichtbarkeit auf die Winkelauflösung des menschlichen Auges zurück. Neben der Form verändern noch weitere Eigenschaften der Oberfläche sowie der Umgebung die Sichtbarkeit einer Formabweichung. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist daher die Erweiterung der Modelle um Oberflächenrauheiten, die den Kontrast reflektierter Muster verringern. Außerdem werden die Modelle um Welligkeiten der Oberfläche erweitert, die das reflektierte Muster verzerren und damit kleine Defekte maskieren. Abschließend werden die vorhergesagten Wahrnehmungsgrenzen für bekannte Formabweichungen mit den Daten zweier durchgeführter Wahrnehmungsstudien verglichen.

