

# Optische Hochfrequenztechnik und Photonik

Herausgeber: B. Schmauß, R. Engelbrecht

Bernhard Höher

## Neue Methode zur Abbildung der Netzhaut des menschlichen Auges in Stand- und Bewegtbild bei kleiner Pupille

# **Neue Methode zur Abbildung der Netzhaut des menschlichen Auges in Stand- und Bewegtbild bei kleiner Pupille**

Der Technischen Fakultät der  
Universität Erlangen-Nürnberg

zur Erlangung des Grades

**Doktor-Ingenieur**

vorgelegt von

**Bernhard Höher**

aus Weiden

Als Dissertation genehmigt  
von der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung:  
07.06.2018

Vorsitzender des Promotionsorgans:  
Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch

Gutachter:  
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Schmauß  
Prof. Dr. hum.-biol. Dipl.-Ing. Achim Langenbucher

Optische Hochfrequenztechnik und Photonik

**Bernhard Höher**

**Neue Methode zur Abbildung der Netzhaut  
des menschlichen Auges in Stand- und Bewegtbild  
bei kleiner Pupille**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag  
Aachen 2018

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6159-8

ISSN 1866-6043

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Der Blick ins Innere des Auges . . . . .	1
1.2	Zielsetzung der vorliegenden Dissertation . . . . .	2
1.3	Ziel des Forschungsprojektes . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Technische Bilderzeugung</b>	<b>7</b>
2.1	Radiometrie . . . . .	7
2.1.1	Verwendete Koordinatensysteme . . . . .	7
2.1.2	Strahldichte . . . . .	9
2.1.3	Lichtstrahlen . . . . .	10
2.1.4	Lichtfeld . . . . .	11
2.1.5	Geometrische Optik und deren Grenzen . . . . .	11
2.1.6	Bestrahlungsstärke . . . . .	12
2.1.7	Strahlstärke . . . . .	12
2.1.8	Radiometrische Energiegrößen . . . . .	13
2.1.9	Photometrische Größen . . . . .	13
2.1.10	Spektrale strahlungsphysikalische Größen . . . . .	14
2.2	Matrizenoptik . . . . .	14
2.2.1	Kleinwinkelnäherung im paraxialen Gebiet . . . . .	14
2.2.2	Wichtige Transformationsmatrizen . . . . .	16
2.2.3	Brechkraft und die Hintereinanderschaltung von Linsen	18
2.3	Bildentstehung . . . . .	19
2.3.1	Bild und Luminanzfunktion . . . . .	19
2.3.2	Entstehung eines Bildes . . . . .	19
2.3.3	Lichtquellen . . . . .	20

2.3.4	Streucharakteristik . . . . .	21
2.3.5	Fernbild . . . . .	22
2.3.6	Fernsphäre . . . . .	23
2.4	Abbildung . . . . .	23
2.4.1	Abbildung durch Linsen . . . . .	24
2.4.2	Abbildungsgleichung und Fokussierung bei nahen Bildern . . . . .	25
2.4.3	Abbildungsmaßstab und Abbildungsfunktion bei nahen Bildern . . . . .	27
2.4.4	Abbildungsbrechkraft und Abbildungsfunktion bei ferneren Bildern . . . . .	28
2.4.5	Dicke Linsen, verschiedene Brechzahlen auf den beiden Linsenseiten . . . . .	29
2.4.6	Ersatzstrahlengang: Zerstreuungslinse und virtuelles Bild	31
2.4.7	Ersatzstrahlengang: Spiegel und Spiegelbild . . . . .	32
2.4.8	Orthogonale Bilder: Apertur- und Bildebene . . . . .	32
2.4.9	Feldlinsen . . . . .	33
2.4.10	Vignettierung, Pupillen und Aperturanpassung . . . . .	34
2.4.11	Ideale optische Abbildung . . . . .	35
2.4.12	Bildmaßstabsfehler und Verzeichnung . . . . .	35
2.4.13	Bildschärfefehler und Punktbildfunktion . . . . .	36
2.4.14	Farbfehler . . . . .	37
2.4.15	Absorber . . . . .	38
2.5	Polarisationserhaltung in optischen Systemen . . . . .	39
2.5.1	Lineare Doppelbrechung . . . . .	39
2.5.2	Zirkulare Doppelbrechung . . . . .	40
2.5.3	Metallreflexion . . . . .	42
2.5.4	Fresnelreflexion . . . . .	43
2.5.5	Streuung . . . . .	45
2.6	Digitale Bilderfassung . . . . .	47
2.6.1	Räumliche Abtastung: Pixel . . . . .	48
2.6.2	Zeitliche Abtastung: Belichtung . . . . .	49
2.6.3	Spektrale Abtastung: Farbe . . . . .	49

2.6.4	Digitalisierung . . . . .	51
2.6.5	Elektronische Bildsensoren und Bildrauschen . . . . .	51
<b>3</b>	<b>Aufbau des menschlichen Auges</b>	<b>57</b>
3.1	Anatomie des Auges . . . . .	57
3.2	Okulomotorik . . . . .	59
3.3	Naheinstellung und Akkommodation . . . . .	60
3.4	Fehlsichtigkeiten . . . . .	61
3.5	Augenmodelle . . . . .	64
<b>4</b>	<b>Augenspiegelung</b>	<b>67</b>
4.1	Direkte Augenspiegelung . . . . .	67
4.2	Aperturanpassung: Indirekte Augenspiegelung . . . . .	70
4.3	Purkinjebilder: Störende Rückreflexionen innerhalb des Auges	72
4.3.1	Intensität der Purkinjebilder . . . . .	72
4.3.2	Berechnung von Strahlengängen zur Modellierung der Purkinjebilder . . . . .	73
4.3.3	Parasitäre Überlagerung von Fundusbild und Purkinje- bildern . . . . .	78
4.4	Funduskameras . . . . .	78
4.4.1	Allgemeine Aspekte zur Funktionsweise von Fundus- kameras . . . . .	79
4.4.2	Funduskameras mit Ringbeleuchtung: Standardmethode	81
4.4.3	Streifenmethode: Neues Verfahren . . . . .	83
4.4.4	Vergleich der Streifenmethode mit herkömmlicher Ringbeleuchtung . . . . .	85
4.5	Erscheinungsbild des Fundus . . . . .	88
4.5.1	Erfahrungsbericht Augenspiegelung . . . . .	88
4.5.2	Fundusbilder . . . . .	89
4.5.3	Artefakte . . . . .	90
<b>5</b>	<b>Realisierung eines Demonstrators</b>	<b>91</b>
5.1	Anforderungen und Zielsetzung . . . . .	91
5.2	Gesamtkonzept . . . . .	91

5.3	Mechanischer Aufbau und Komponenten . . . . .	94
5.4	Aufbau der Optik . . . . .	95
5.5	Maßnahmen zur Unterdrückung von Rückreflexionen . . . . .	101
5.6	Auswahl optischer Komponenten . . . . .	103
5.7	Teilkomponenten und deren mechanische Justage . . . . .	105
5.8	Elektronik . . . . .	105
5.9	Patientenführung . . . . .	107
5.10	Bediensoftware . . . . .	109
5.11	Optische Sicherheit . . . . .	111
5.12	Digitale Bildverarbeitung . . . . .	115
5.12.1	Gewinnung von Farbbildern . . . . .	115
5.12.2	Entfernen von Artefakten . . . . .	115
5.12.3	Bildverbesserung durch mehrere Einzelbilder . . . . .	118
5.12.4	Anwendung einer Gradationsfunktion . . . . .	119
<b>6</b>	<b>Experimentelle Ergebnisse</b>	<b>121</b>
6.1	Experimentelle Prüfung der Modellvorhersagen über die Streifenmethode . . . . .	121
6.2	Fundusbilder . . . . .	123
6.3	Fundusvideos . . . . .	125
6.4	Stand der Technik . . . . .	125
6.4.1	Referenzgerät . . . . .	125
6.4.2	Handfunduskamera . . . . .	127
6.4.3	Test verschiedener aktueller Funduskameras . . . . .	127
6.5	Vergleich des Demonstrators mit dem Stand der Technik . . . . .	130
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>135</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>139</b>
	<b>Summary</b>	<b>145</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>149</b>

# Formelzeichen

Symbol	Einheit	Beschreibung
$A$	$m^2$	Fläche oder Apertur
$A$	1	Photochemische Bewertungsfunktion beim aphaken Auge
$A_{\text{Pixel}}$	$m^2$	Pixelfläche
$B$		Brechungsmatrix
$B$	1	Bewertungsfunktion der photochemischen Gefährdung
$c$	$\frac{m}{s}$	Lichtgeschwindigkeit im Medium
$c_0$	$\frac{m}{s}$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
$D$	dpt	Brechkraft
$d$	m	Räumliche Distanz
$dA$	$m^2$	Flächendifferential
$dA$	$m^2$	Betrag des Flächendifferentials $dA$
$d\Omega$	sr	Raumwinkeldifferential
$E$	$\frac{W}{m^2}$	Radiometrische Bestrahlungsstärke
$E_\lambda$	$\frac{W}{m^2 \cdot nm}$	Spektrale Bestrahlungsstärke
$e$	1	Einheitsvektor
$f$	m	Brennweite einer Linse
$f_{\text{Bild}}$	Hz	Bildfrequenz
$H$	$\frac{J}{m^2}$	Bestrahlung
$I$	$\frac{W}{sr}$	Strahlstärke
$K_m$	$\frac{sr \cdot lm}{W}$	Maximalwert des photometrischen Strahlungsäquivalents
$k$	1	Blendenzahl
$L$	$\frac{W}{m^2 \cdot sr}$	Radiometrische Strahldichte
$L$		Linsenmatrix
$L_i$	$\frac{J}{sr \cdot m^2}$	Zeitintegral der Strahldichte
$l_v$	nm	Verzögerungslänge
$m$	1	Abbildungsmaßstab
$N_Q$	1	Anzahl der Quantisierungsstufen des Pixelwertes $q$
$N_t$	1	Bildzahl einer Bildsequenz
$N_x$	1	Anzahl der Pixel in $x$ -Richtung

Symbol	Einheit	Beschreibung
$N_y$	1	Anzahl der Pixel in $y$ -Richtung
$n$	1	Brechungsindex
$n_Q$	1	Pixelwert
$n_t$	1	Zeitindex
$n_x$	1	Horizontale Pixelkoordinate
$n_y$	1	Vertikale Pixelkoordinate
$n_\lambda$	1	Farbindex
$P$	W	Lichtleistung
$P_Q$	W	Leistung des einfallenden Lichtstrahles
$P_r$	W	Leistung des reflektierten Lichtstrahles
$PSF$	1	Point spread function
$P_t$	W	Leistung des transmittierten Lichtstrahles
$P_\lambda$	$\frac{W}{nm}$	Spektrale Strahlungsleistung, spektrale Leistungsdichte
$Q$	J	Strahlungsenergie
$Q_{\text{Weiß}}$	J	Weißwert
$q$	1	Pixelwert
$\mathbf{R}$		Reflexionsmatrix
$R$	1	Reflektivität oder Streuung
$R$	1	Bewertungsfunktion der thermischen Gefährdung
$R_K$	m	Krümmungsradius einer optischen Grenzfläche
$R_{\parallel}$	1	Reflektivität der parallelen Polarisationskomponente
$R_{\perp}$	1	Reflektivität der senkrechten Polarisationskomponente
$\mathbf{r}$	1	Normierter Richtungsvektor
$r$	m	Radialkoordinate des sphärischen Koordinatensystems
$s$	m	Streckenlänge
$s$	1	Spektrale Abtastfunktion / Spektralwertkurve
$\mathbf{T}$	1	Translationsmatrix
$T$	1	Transmissivität
$t$	s	Zeit
$\mathbf{u}$	m	Ortsvektor
$V$	$\frac{lm}{W}$	Relativer spektraler Hellempfindlichkeitsgrad
$V$	1	Brechkraftverhältnis
$w_{\text{Pixel}}$	$\frac{1}{m^2}$	Relative Lichtempfindlichkeit über Pixelfläche
$x$	m	Koordinate des kartesischen Koordinatensystems
$y$	m	Koordinate des kartesischen Koordinatensystems
$z$	m	Koordinate des kartesischen oder Zylinderkoordinatensystems
$z_m$	m	Lage des Krümmungsmittelpunktes
$\alpha$	°	Ebener Winkel (allgemein)

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\epsilon$	$^\circ$	Winkel zwischen Flächendifferential $d\mathbf{A}$ und Richtung $r$
$\varepsilon$	$^\circ$	Winkel bezüglich der optischen Achse
$\vartheta$	$^\circ$	Polarwinkel des sphärischen Koordinatensystems
$\vartheta_G$	$^\circ$	Grenzwinkel der Totalreflexion
$\vartheta_Q$	$^\circ$	Winkel des einfallenden Lichtstrahles
$\vartheta_r$	$^\circ$	Winkel des reflektierten Lichtstrahles
$\vartheta_t$	$^\circ$	Winkel des transmittierten Lichtstrahles
$\kappa$	1	Absorptionsindex
$\lambda$	nm	Wellenlänge
$\varphi$	$^\circ$	Azimutkoordinate des sphärischen Koordinatensystems
$\rho$	$^\circ$	Radialkoordinate des Zylinderkoordinatensystems
$\phi$	$^\circ$	Polarwinkel des Zylinderkoordinatensystems
$\psi$	$^\circ$	Phasenverschiebung
$\Omega$	sr	Raumwinkel



# Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
A	Aperturbene
AMD	Altersbedingte Makuladegeneration
B	Bildebene
CCD	Charge-coupled Device
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor
E	Endbild
EP	Eintrittspupille
F	Brennpunkt
H	Hauptebene
K	Kontenpunkt
LED	Leuchtdiode
L	Linse
LZP	linkszirkular polarisiert
OLED	Organische Leuchtdiode
P1 - P4	Purkinjeebenen
PC	Personal Computer
RZP	rechtszirkular polarisiert
S	Spiegel
U	Urbild
VEGF	Vascular Endothelial Growth Factor
VL	Virtuelle Lichtquelle