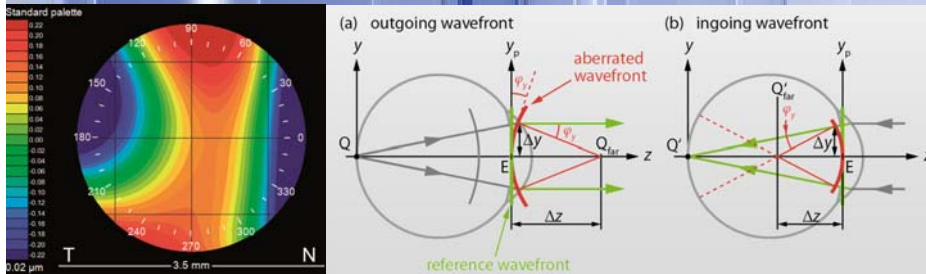


Optische Systeme in der Medizintechnik

Vorlesung 5 : Diagnose refraktiver Sehfehler

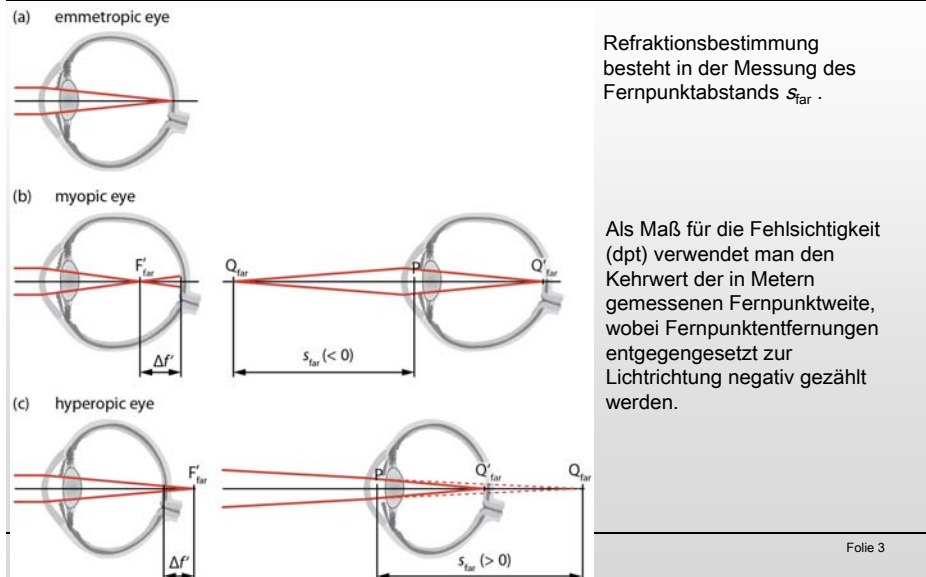


Einführung

Die häufigste Ursache für Sehbehinderungen sind Refraktionsfehler.

- ca. 30 bis 50 % aller Menschen haben korrekturwürdige Refraktionsfehler
- Zahl der Fehlsichtigen (ohne Altersweitsichtigkeit - Presbyopie):  
2 Milliarden (weltweit) , 200 Millionen (EU)
- Zahl der Presbyopen weltweit:  
gegenwärtig: 590 Millionen  
2020 geschätzt: 1 Milliarde
- Refraktionsbestimmung zum Auffinden des Refraktionsdefizits ist daher eine sehr häufige Untersuchung
- Marktvolumen für Refraktionskorrektur durch Brille und Kontaktlinse: 30 Milliarden \$ /Jahr (USA)

Refraktionsbestimmung - Grundlagen



Subjektive Verfahren

## Refraktionsbestimmung - Grundlagen

### Verfahren zur Refraktionsbestimmung :

- subjektive Verfahren mit Messbrille oder ähnliches
- objektiv-visuelle Refraktometrie mit Skiaskop
- objektive Messung mit Refraktometer oder Aberrometer

### Subjektive Methoden:

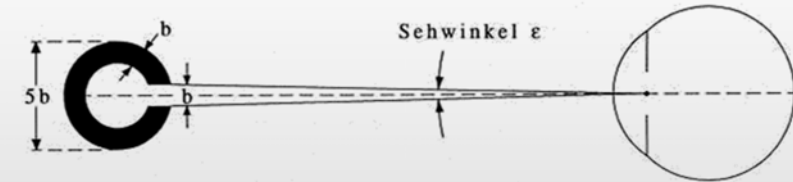
- Wahrnehmung eines physikalisch objektiven Reizes (Sehzeichen auf Prüftafel) wird geprüft  
→ Bestimmung des Korrekturglases für bestkorrigierte Sehschärfe
- Ist eine psycho-physikalische Messung, welche die Funktionsfähigkeit des gesamten visuellen Systems erfasst

Sehzeichen ⇒ optisches System ⇒ Retina ⇒ Gehirn



## Subjektive Refraktionsbestimmung

Wahrnehmung eines physikalisch objektiven Reizes  
(Sehzeichen auf Prüftafel) wird geprüft



Normsehzeichen ist der Landolt-Ring = Kreisring mit Öffnung  $b$

- Ringöffnung kann in acht Richtungen angeboten werden
- Lage der Öffnung muß erkannt werden
- Für  $\text{Visus} = 1$  (entspricht Sehwinkel von 1 Winkelminute) beträgt  $b = 1,74\text{mm}$  für eine Prüferfernung von 6m

## Objektiv-visuelle Refraktometrie mit Skiaskop

## Objektiv-visuelle Refraktometrie mit Skiaskop

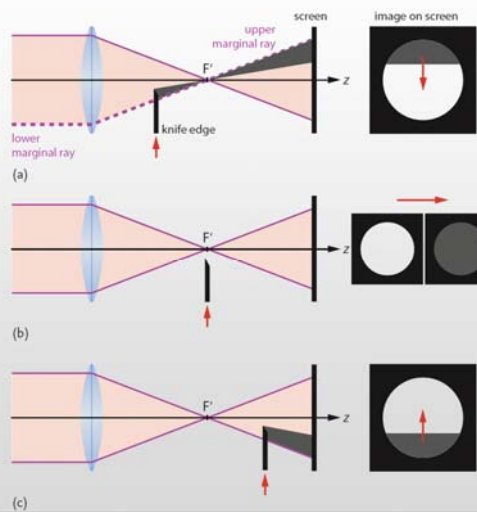
**Fernpunkt** des Auges wird mit speziellen optischen Geräten (Skiaskop, Refraktor, Aberrometer) gemessen

- ⇒ nur optische Daten des Auges werden ermittelt! (Abbildungsgüte)
- ⇒ keine Information über die weiteren Prozesse des Sehvorgangs („Bildverarbeitung“)
- ⇒ endgültige Bestimmung des Korrekturglases erfordert Feinabgleich mittels nachfolgender subjektive Methoden

Stellenwert der objektiven Refraktionsbestimmung:

- ⇒ ermöglicht einen schnellen Überblick über vorliegende Fehlsichtigkeit
- ⇒ ermittelte objektive Werte sind guter Startpunkt für subjektive Refraktionsbestimmung (⇒ Zeitersparnis!)

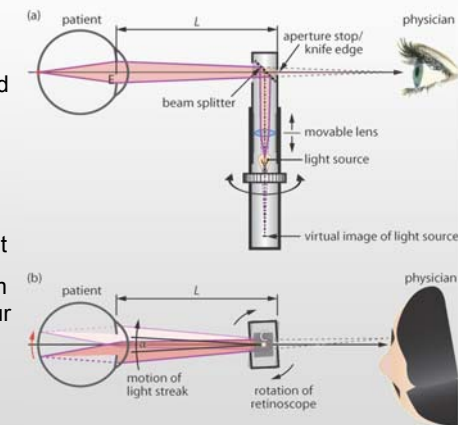
### Refraktometrie mit Skiaskop (Foucault-Schneiden-Prinzip)



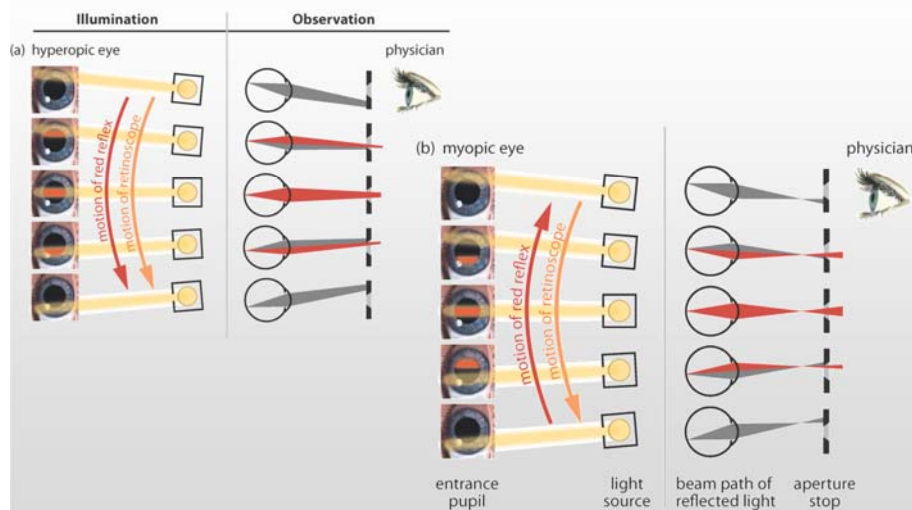
- bei Schneidverfahren wird eine Schneide bewegt und Lichtband ist fix
  - bei Skiaskopie wird Lichtband bewegt und Schneide (ist der Pupillenrand) bleibt fix
- ↳ In beiden Fällen wird resultierende Bewegung einer Licht-Schattengrenze zur Bestimmung des Refraktionszustandes benutzt

### Objektiv-visuelle Refraktometrie mit Skiaskop

- Projektion eines seitlich verschiebbaren Lichtspaltes oder Lichtfleckes auf die Pupille
- Aufleuchten der Pupille (Retinareflex) wird durch das Spiegelloch beobachtet
- beim Drehen des Lochspiegels wandert Retinareflex
  - gleichläufig oder gegenläufig zum Lichtspalt, wenn Fehlsichtigkeit vorliegt
  - wenn Fernpunkt des Auges gleich dem Arbeitsabstand  $L$ , blitzt Retinareflex nur kurz auf (Flackerpunkt)
- durch Einschwenken von Zusatzoptiken (Skiaskopiergläser) wird Flackerpunkt bei Arbeitsabstand  $L$  aufgesucht



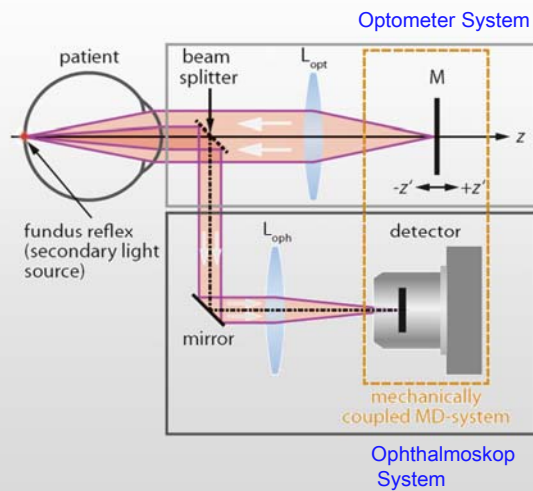
### Objektiv-visuelle Refraktometrie mit Skiaskop



## Objektive Messung mit Refraktometer

### Automatische Augenrefraktometer - Messprinzip

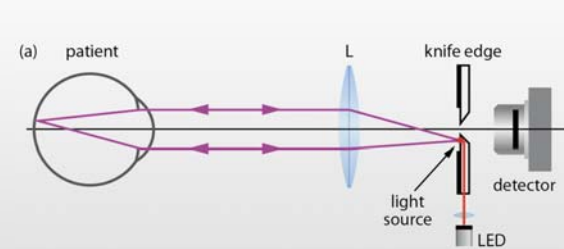
- Projektion einer Testfigur auf Netzhaut mit **infrarotem** Licht  $\Rightarrow$  **Projektionssystem**
  - Erfassung der Bildschärfe mittels Detektor  $\Rightarrow$  **Detektionssystem**
  - automatische Einstellung des Projektionssystems auf maximale Bildschärfe  $\Rightarrow$  **Messwert**
- oder besser:
- automatische Verschiebung des Tests bei laufender Registrierung **Bildschärfe** und rechnerische Bestimmung der maximalen Bildschärfe  $\Rightarrow$  Messwert



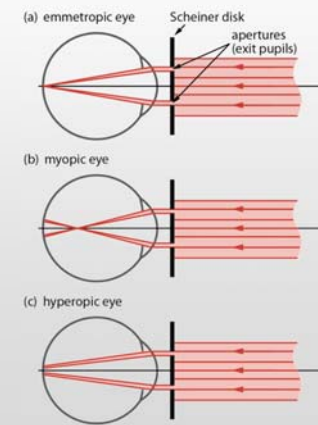
### Automatische Augenrefraktometer: Schneiden-, Scheiner-Methode

Verfahren zur Ermittlung der optimalen Bildschärfe bzw. Fernpunktrefraktion:

Schneiden-Prinzip (Knife Edge Method):

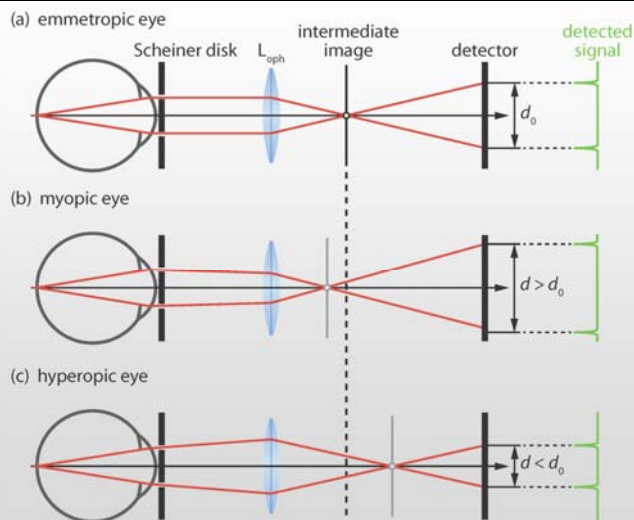


Scheiner-Prinzip (Scheiner Method):



### Automatische Augenrefraktometer: Bildmessverfahren

Strahl-Ablenkungs-Methode (Ray Deflection Method):



### Automatische Augenrefraktometer: Beispiele

Modell	AR-600	Acuitus 5010	HARK 599
<b>Hersteller</b>	Nidek / Oculus /7/	Carl Zeiss Meditec /8/	
<b>Messprinzip</b>	Scheiner	Skioskopie	Schneiden
<b>Genauigkeit</b>	0,12 / 0,25 dpt (Anzeigewert) aber Abweichung Ergebnisse Autorefraktor - subjektive Refraktion ca. +/- 0,5 dpt		
<b>Hauptfehler</b>	Gerätemyopie infolge Akkommodation		

## Objektive Messung mit Aberrometer

## Refraktion durch Aberrationsmessung

Die bisherigen Verfahren zur Refraktionsbestimmung beschränken sich auf die Messung

- **sphärischer** Abbildungsfehler (**Myopie** oder **Hyperopie**) oder
- **zylindrischer** Abbildungsfehler (**Astigmatismus**).

→ sphäro-zylindrische Fehler oder Abbildungsfehler (Aberrationen) 2. Ordnung

→ Diese Fehlerzuordnungen werden vor allem bei Brillen- und Kontaktlinsenanpassungen verwendet.

→ Auge weist außer diesen Fehlern noch weitere Fehler höherer Ordnung auf (Bestimmung mittels Wellenfrontanalysatoren).

## Klinische Relevanz der Wellenfrontanalyse

### Refraktometer neuester Generation

⇒ umfassende Analyse der Abbildungsgüte des Auges

### Refraktive Laser Chirurgie

⇒ Wellenfrontdaten als Eingangsgröße für Berechnung des Ablationsprofils

### Refraktive Laser Chirurgie

⇒ Wellenfrontdaten als Eingangsgröße für Berechnung des Ablationsprofils

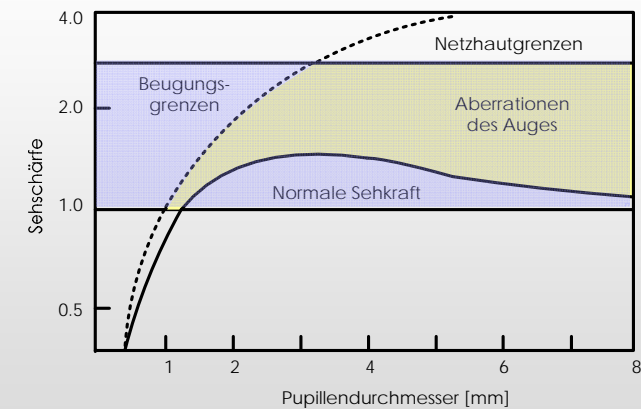
### Kontaktlinsen, die auch Aberrationen höherer Ordnung korrigieren

⇒ Wellenfrontdaten als Eingangsgröße für Herstellung

### Hochauflösendes Fundus Imaging

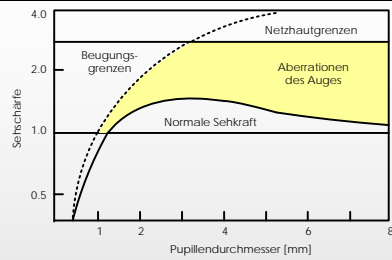
⇒ Korrektur der gemessenen Aberrationen mittels adaptiv-optischer Systeme

## Aberrationen - Grenzen der Sehleistung

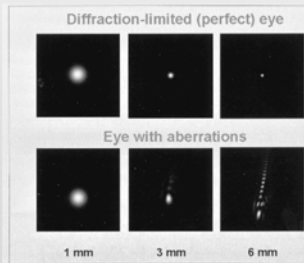


- Die Kurve zu den Aberrationen hängt sehr stark von Alter, Akkomodation und Helligkeit ab.

### Aberrationen - Grenzen der Sehleistung

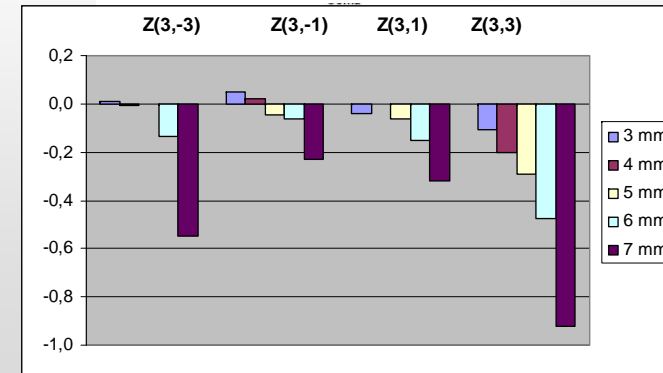
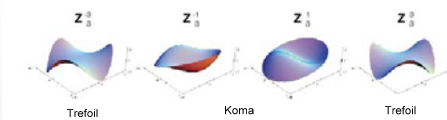


Angulare Auflösung eines beugungsbegrenzten optischen Systems:  $\alpha = 2.44 \lambda / d$   
 -> Sehschärfe/Visus =  $1 / \alpha \sim d$



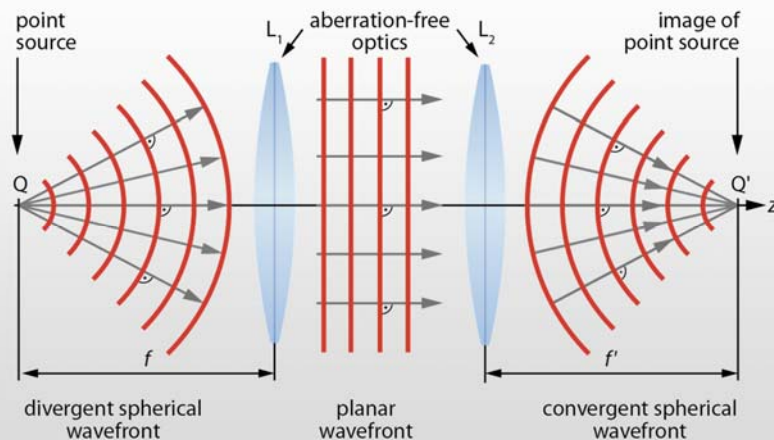
Radius Airy-Scheibchen bei beugungsbegrenztem Auge:  
 $D_{Airy} = 2.44 \lambda f / D_{Iris}$   
 Bild eines Objektpunktes kann auch als Point Spread Function (PSF) (Punktverbreiterungsfunktion) verstanden werden.

### Anwendung Auge: Aberrationen und Pupillengröße

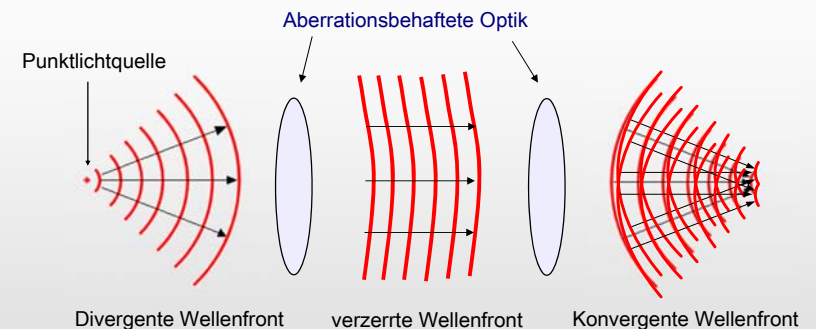


Koeffizienten der Aberrationen höherer Ordnung nehmen mit der Pupillengröße zu.

### Wellenfrontanalyse: Ideal Abbildung



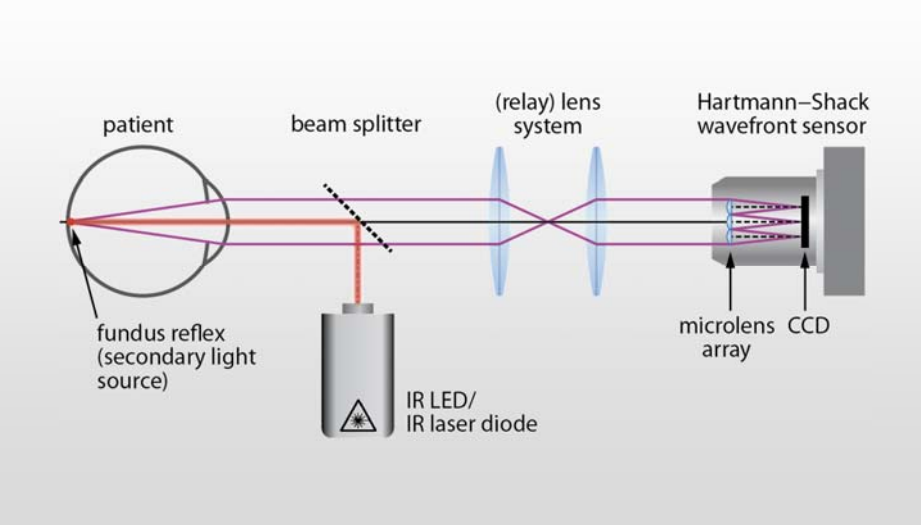
### Wellenfrontanalyse: Verzerrte Abbildung



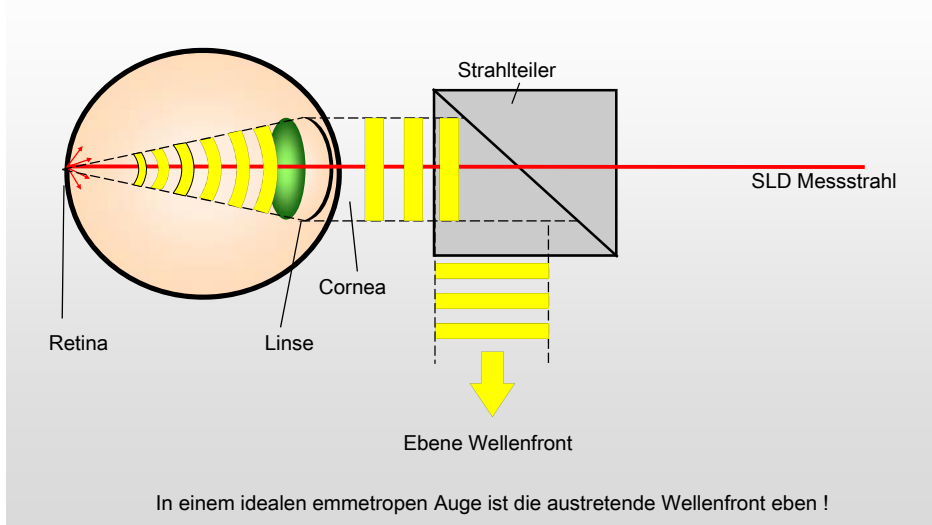
Jede Abweichung von einer idealen oder vorgegebenen Wellenfrontform bezeichnet man als **Wellenfront - Aberration**

Die Wellenfront - Aberration ist ein Maß für die Abbildungsgüte der Optik

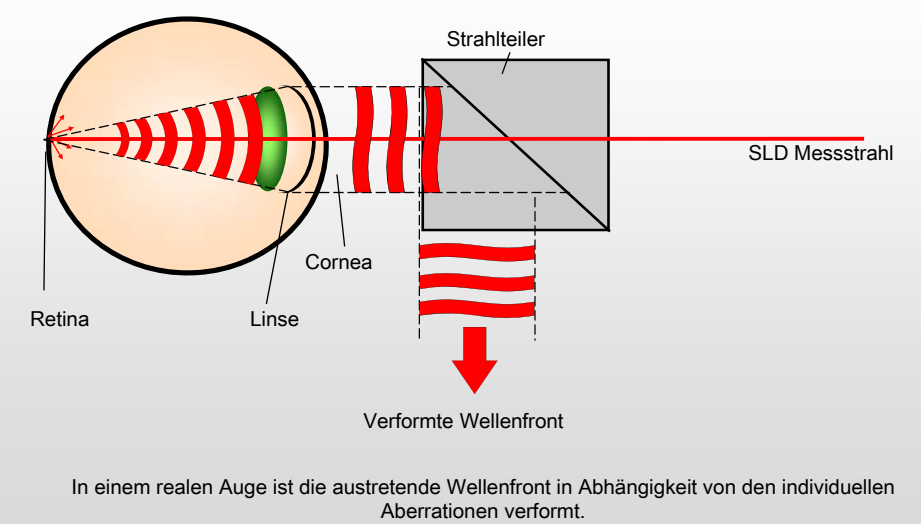
### Wellenfrontanalyse: Hartmann-Shack Aberrometer



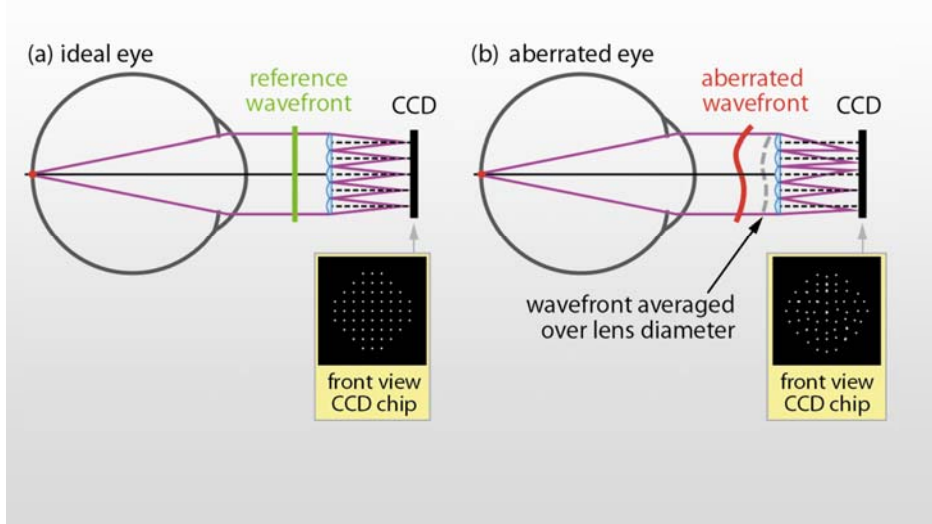
### Wellenfrontanalyse: Hartmann-Shack Aberrometer



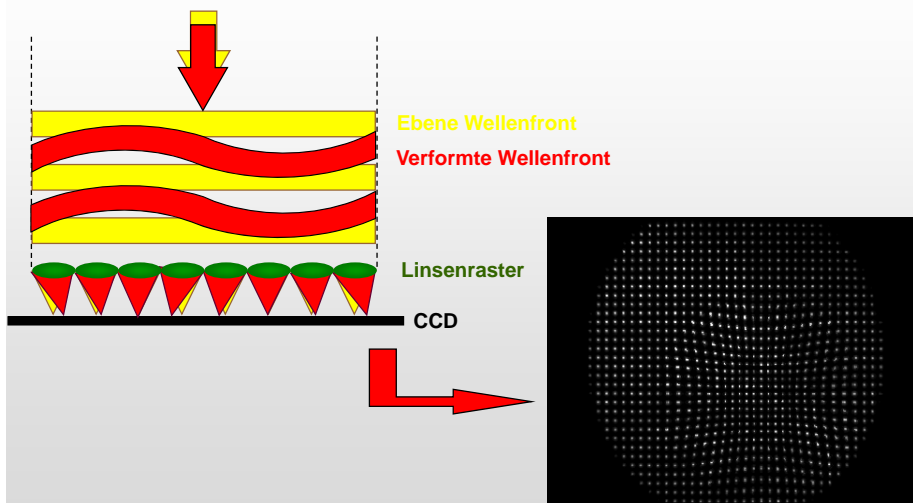
### Wellenfrontanalyse: Hartmann-Shack Aberrometer



### Wellenfrontanalyse: Hartmann-Shack Aberrometer



### Wellenfrontanalyse: Hartmann-Shack Aberrometer



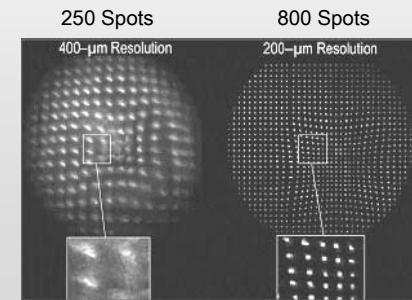
### Wellenfrontanalyse: Hartmann-Shack Aberrometer

Sensortyp :	Shack-Hartmann
Messpunkte :	1452 (800 in 7mm )
Auflösung :	210 $\mu\text{m}$
Messbereich :	-15 dpt to +7 dpt, 5 dpt Zyl.
Genauigkeit :	$\pm 0.15$ dpt
Reproduzierbarkeit :	0.1 dpt (Standardabweichung)
Messdauer :	13 ms



Je feiner das Lenslet-Array, umso mehr Teststrahlen (Spots) stehen für eine detaillierte Wellenfrontanalyse zur Verfügung.

Es sinken aber gleichzeitig SNR pro Subapertur.



## Aberrations-Theorie im Detail

### Aberrationstheorie – Überblick

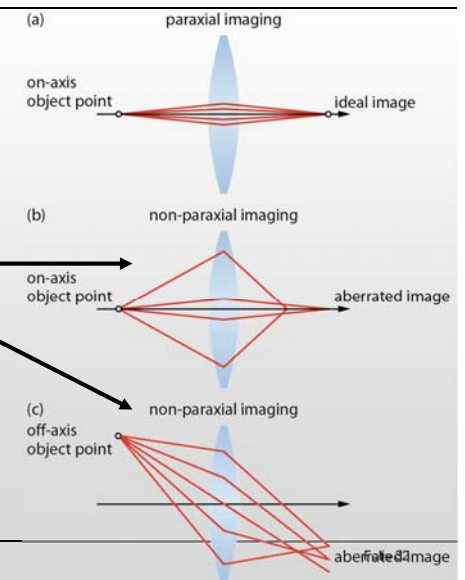
**Motivation:**

Berechnung messbarer Wellenfront-Aberrationen mit dem Ziel, einen Bezug zwischen Messwerten und Bildfehlern eines optischen Systems herstellen zu können.

**Es gibt drei Arten von Bildfehlern in optischen Systemen:**

- Longitudinale Aberration (Abweichung der geometrischen Paraxialoptik)
- Transversale Aberration (Abweichung der geometrischen Paraxialoptik)
- Wellenfront (Weglängen) Aberration

Im Folgenden soll nur die Wellenfront (Weglängen) Aberration behandelt werden.





## Aberrationstheorie – Überblick

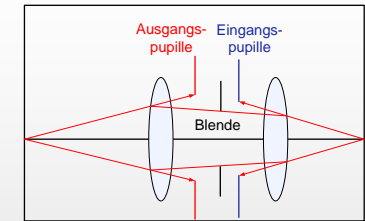
### Vorteile der Charakterisierung von Systemen mittels Wellenaberrationen:

1. Die Wellenlänge dient als universelles Skalenmaß → Vergleichbarkeit für alle Spektralbereiche.
2. Die Beschreibung der Wellenaberrationen durch Zernike-Polynome erlaubt (für niedrige Ordnungen) einen direkten Bezug zu den primären Bildfehlern (Öffnungsfehler, Astigmatismus, Koma,...).
3. Wellenaberrationen lassen sich z.B. über Wellenfrontanalyse und Interferometrie direkt messen.

## Aberrationstheorie – Definition Pupille

Die **Aperturblende** liegt zwischen Eintritts- und Austrittsöffnung des Systems und begrenzt den Raumwinkel aller konusförmigen Strahlenbündel deren Spitzen im Bildraum liegen.

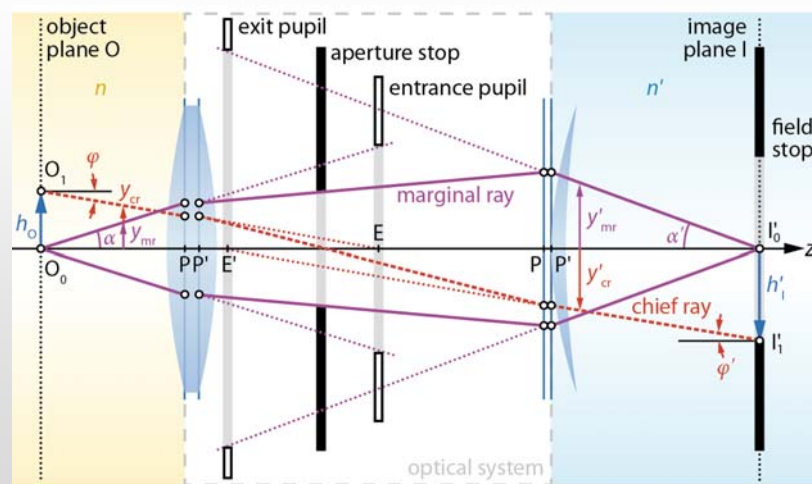
Sie kontrolliert so die Helligkeit, die Schärfentiefe, die Auflösung und den perspektivischen Seheindruck.



Als **Austrittspupille** bezeichnet man das bildseitige Bild der Aperturblende eines optischen Systems. Sie ist der Eintrittspupille konjugiert. Bei afokalen optischen Instrumenten zur direkten visuellen Beobachtung - z.B. Teleskopen und Ferngläsern - wird als Austrittspupille auch der Durchmesser des Strahlenbündels bezeichnet.

Die **Eintrittspupille** ist eine fiktive oder reelle Öffnung, welche die in ein optisches System einfallenden Strahlenbündel begrenzt. Sie ist das objektseitige Bild der Aperturblende. Befinden sich vor der Aperturblende keine abbildende Fläche mehr, so sind Eintrittspupille und Aperturblende identisch.

## Aberrationstheorie – Definition Pupille



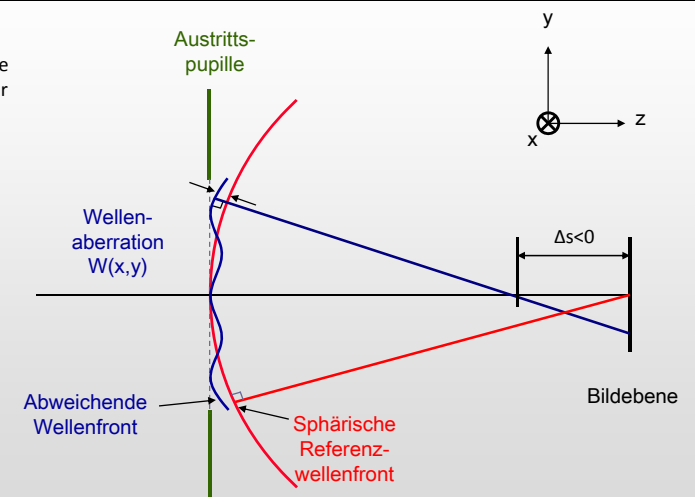
## Aberrationstheorie – Wellenaberrations-Funktion $W(x,y)$

$W(x,y)$  ist die Differenz der optischen Weglänge zur Referenzkugel in der Austrittspupille

**Vorzeichen der Wellenaberration  $W$ :**

$W > 0$ : außen stärker konvergent, Schnittweite  $\Delta s < 0$

$W < 0$ : außen stärker divergent, Schnittweite  $\Delta s > 0$



### Aberrationstheorie – Vorzeichenkonvention

Wellenaberration : grundsätzlich Bezug auf Referenzkugel

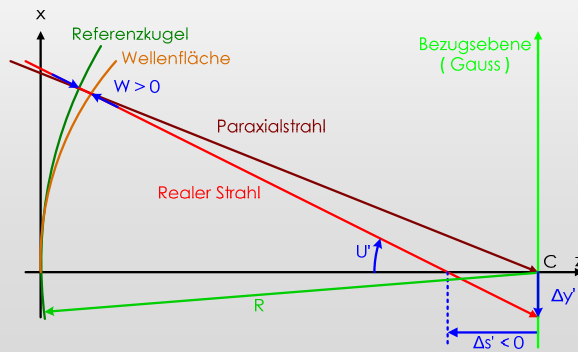
Definition der Referenzkugel : verschwindender Mittelwert von W

$$\langle W(x, y) \rangle = \frac{1}{F_{AP}} \iint W(x, y) dx dy = 0$$

Vorzeichen der Wellenaberration W:

W>0: außen stärker konvergent, Schnittweite Δs<0

W<0: außen stärker divergent, Schnittweite Δs>0



### Aberrationstheorie – Zernike Polynome

$$W(r, \alpha) = \sum_n^k \sum_{m=-n}^n c_n^m Z_n^m(r, \alpha)$$

$$W(r, \alpha) = \sum_{j=0}^{j_{max}} c_j Z_j(r, \alpha)$$

**ACHTUNG:** Unterschätztes praktisches Problem: Zernike-Koeffizienten hängen empfindlich vom Normierungsradius ab. Eine exakte Bestimmung des Pupillenrandes ist daher sehr wichtig. Fehler im Radius wirken auf alle Koeffizienten. (siehe Übungsaufgabe)

### Aberrationstheorie – Zernike Polynome

Warum **Zernike** Polynome ?

- Viele System haben **runde Pupillen**
- Anwendung von experimentellen Daten braucht eine „**Data Fitting Procedure**“
- Wellenfront Aberrationen werden in **Koeffizienten** einer Funktionsdarstellung ausgedrückt.

**Zernike** Polynome bilden eine vollständige **Orthogonalbasis** über den Einheitsradius.

- Untere Terme können abgezogen werden (Sphäre, Zylinder) und es bleiben nur die höheren Ordnungen übrig.
- Anwendbar in Polarkoordinaten oder kartesischen Koordinaten

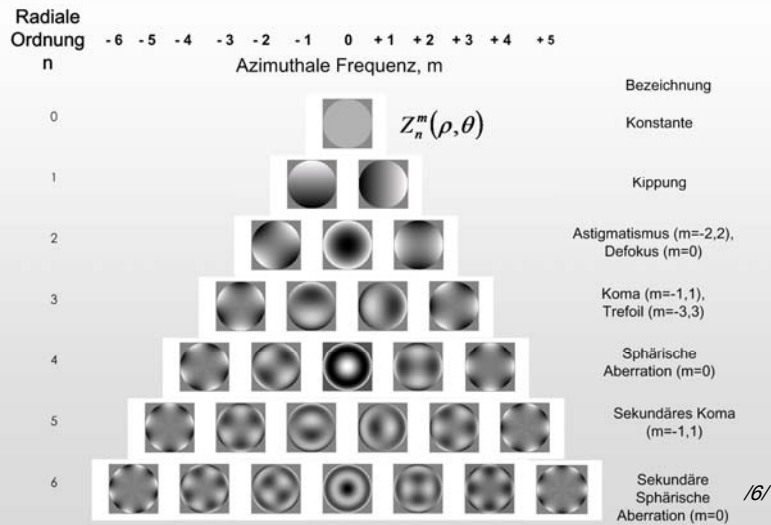
Darstellung in **Zernike-Polynome** erfolgt meist eingeschränkt für nur einen Feldpunkt (Achspunkt).

Beliebige Wellenfront Aberrationen eines optischen Systems lassen sich als gewichtete Summe von Zernike Polynomen darstellen.

### Aberrationstheorie – Zernike Polynome

Modus	Radiale Ordnung	Azimuthale Ordnung	$Z_n^m(\rho, \theta)$	Bedeutung
j	n	m		
0	0	0	1	Konstante
1	1	-1	$2\rho \sin(\theta)$	Kippung y - Richtung
2	1	1	$2\rho \cos(\theta)$	Kippung x - Richtung
3	2	-2	$\sqrt{6}\rho^2 \sin(2\theta)$	Astigmatismus ± 45°
4	2	0	$\sqrt{3}(2\rho^2 - 1)$	Defokussierung
5	2	2	$\sqrt{6}\rho^2 \cos(2\theta)$	Astigmatismus 0°
6	3	-3	$\sqrt{8}\rho^3 \sin(3\theta)$	
7	3	-1	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\sin(\theta)$	Koma y - Schnitt
8	3	1	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\cos(\theta)$	Koma x - Schnitt
9	3	3	$\sqrt{8}\rho^3 \cos(3\theta)$	
10	4	-4	$\sqrt{10}\rho^4 \sin(4\theta)$	
11	4	-2	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\sin(2\theta)$	Sekundär - Astigmatismus
12	4	0	$\sqrt{5}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	Sphärische Aberration
13	4	2	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\cos(2\theta)$	Sekundär - Astigmatismus
14	4	4	$\sqrt{10}\rho^4 \cos(4\theta)$	
⋮	⋮	⋮	⋮	

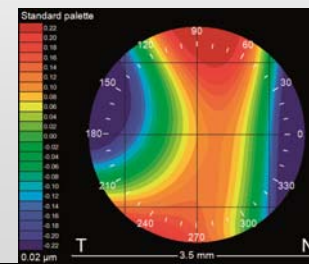
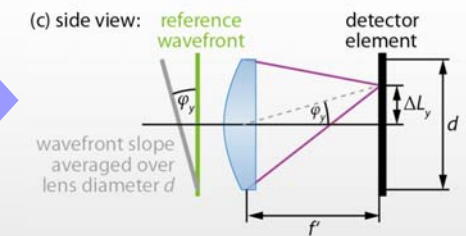
### Aberrationstheorie – Zernike Polynome



Zurück zur Anwendung:  
Wie kann diese Aberrationsfunktion  $W$  nun experimentell bestimmt werden?

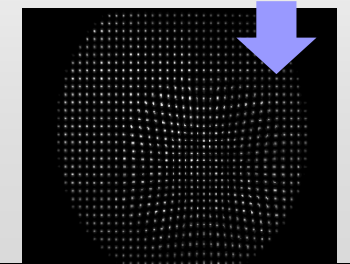
- Bestimmung der Verkrümmung an jedem Punkt der Wellenfront (Hartmann-Shack-Aberrometer) → in der Ophthalmologie

### Anwendung am Auge – Typische Daten eines Aberrometers



$$\frac{dW}{dx_p} = \phi_x$$

$$\frac{dW}{dy_p} = \phi_y$$

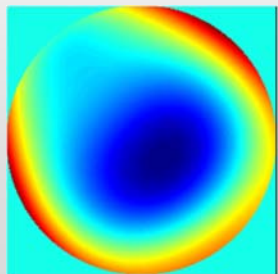


Anwendung: Simulation der opt. Fehler eines menschlichen Auges

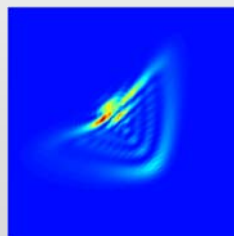
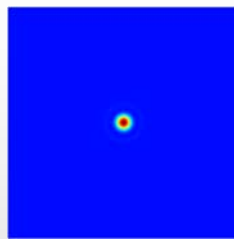
Messung der Wellenfrontfehler eines realen Auges

Wellenlänge :  $\lambda = 500 \text{ nm}$

- a) Wellenfront
- b) Zernike Koeffizienten
- c) Punktbild
- d) Zum Vergleich perfektes Punktbild

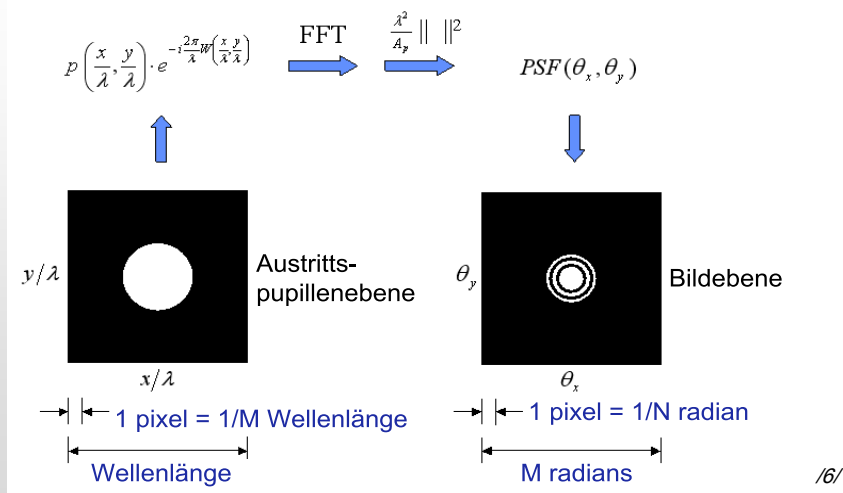


Mode j	Coefficient ( $\mu\text{m}$ )	RMS Coefficient ( $\mu\text{m}$ )
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	1.02	0.416413256
4	0	0
5	0.33	0.134721936
6	0.21	0.074246212
7	-0.26	-0.091923882
8	0.03	0.010606602
9	-0.34	-0.120208153
10	-0.12	-0.037947332
11	0.05	0.015811388
12	0.19	0.084970583
13	-0.19	-0.060083276
14	0.15	0.047434165
Total RMS Wavefront Error ( $\mu\text{m}$ )		0.484608089



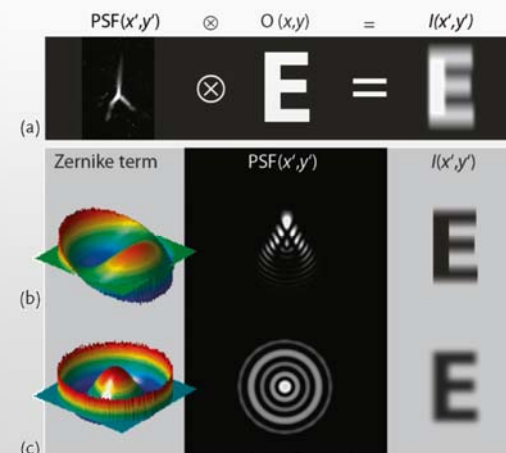
2. Bildebenen-Metrik  
(Analyse der Point Spread Function)  
→ bei technischen Linsensystemen

Berechnung der Point Spread Function (PSF)



Berechnung der Point Spread Function (PSF)

Bildliche Darstellung der Faltung (Convolution) eines Objektes  $O(x,y)$  mit PSF:

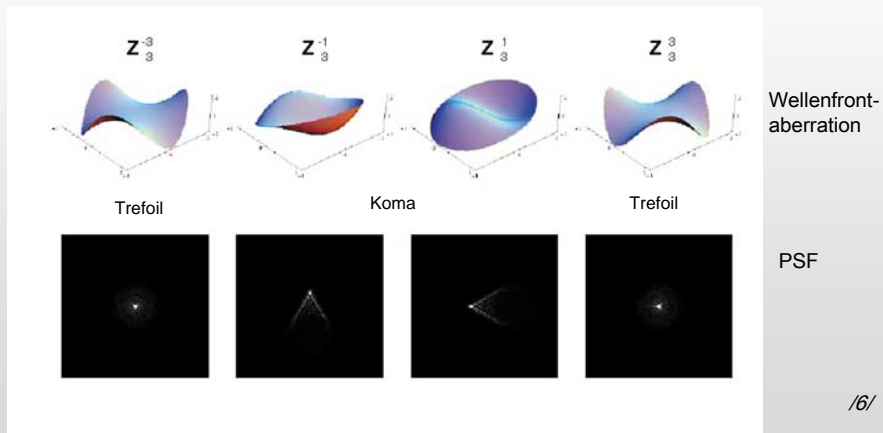


Jeder Punkt des Objektes  $O$  (Scheitels E) wird durch die entsprechende PSF verzerrt  
Ergebnis: verschwommenes Retinabild

Frage: Wie kann man die PSF messen?  
Antwort: Indirekt über die Wellenfrontaberrationsmessung (Wellenfrontanalyse)

### Anwendung Auge: Aberrationen und Sehleistung PSF

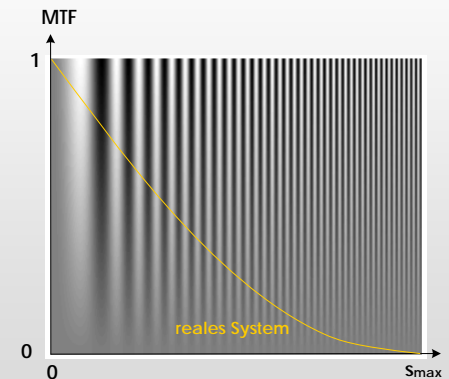
#### Zernike Polynome für Aberrationen 3. Ordnung



/6/

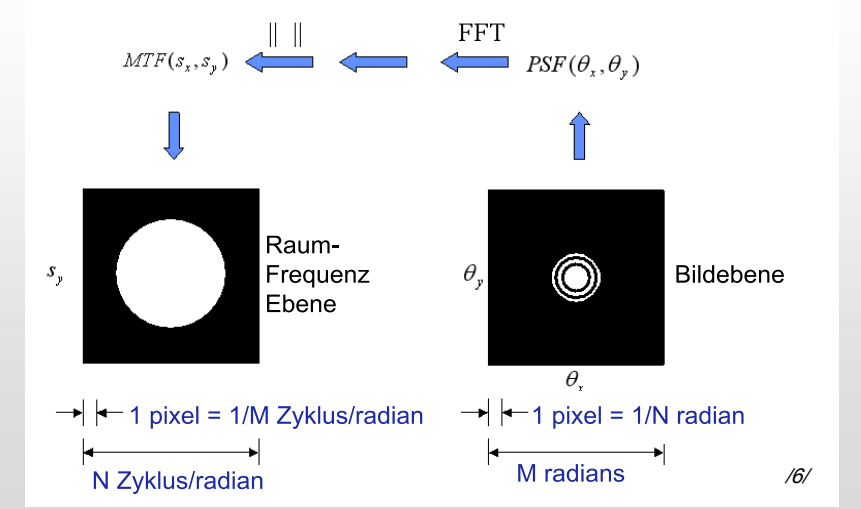
### Modulation Transfer Function (MTF)

Die MTF beschreibt die Abbildungsleistung hinsichtlich Auflösung und Kontrast. Kleinere Strukturen werden mit geringerem Kontrast übertragen.



/3/

### Berechnung der Modulation Transfer Function (MTF)



/6/

### Literatur und Quellenangaben

- /1/ M. Kaschke, K. Donnerhacke, M.-S. Rill, Optical Devices in ..., Wiley 2014
- /2/ B. Rassow: Moderne Augenrefraktometer; Enke-Verlag 1984
- /3/ Private Information Dr. H. Gross, Oberkochen und H. Gross (Hrsg.); Handbook of Optical Systems; Vol. 2, Wiley 2005, Vol. 4, Wiley 2008 (Feb)
- /4/ Handbuch für Augenoptik; Carl Zeiss 1992
- /5/ W. Straub: Augenärztliche Untersuchungsmethoden ; Enke-Verlag 1995
- /6/ <http://scien.stanford.edu/class/psych221/projects/03/pmaeda/index.html>
- /7/ F. Grehn; Augenheilkunde; Springer 2006
- /8/ D.A. Atchison, G. Smith: Optics of the Human Eye; Butterworth 2002
- /7/ M. Sachsenweger: Augenheilkunde; Thieme-Verlag 2003
- /8/ Informationen Carl Zeiss Meditec AG
- /9/ G. Smith, D.A. Atchinson: The Eye and Visual Optical Instruments; Cambridge University 1997
- /10/ F. Caimi, R. Brancato: The Aberrometers, Fabiano Editore 2003
- /11/ Ronald R. Krueger et al: Wavefront customized visual corrections, Slack 2004
- /12/ W. Grimm, Ch. Ucke, D. Friedburg: Strichskioskopie, Enke-Verlag 1992



## Exercises

### P5.1 Retinoscope

1. Show that the accuracy of a retinoscope can be determined by the equation

$$\Delta D = \pm \frac{\lambda}{d_{pupil}^2} \quad (5.38)$$

2. Derive the Newton formula

$$z \cdot z' = f_L \cdot f_L' \quad (5.39)$$

from the thin lens equation (A12).

### P5.2 Hartmann–Shack wavefront sensor:

1. The wavefront aberrations for defocus and spherical aberration at a wavelength of  $\lambda = 550 \text{ nm}$  of a collimated beam with a diameter of  $3 \text{ mm}$  are to be measured with a Hartmann–Shack wavefront sensor. The CCD detector has a pixel size of  $7 \mu\text{m}$ . With suitable algorithms, the centroid can be determined to within  $1/20^{\text{th}}$  of a pixel. Which focal length should a microlens have to allow the determination of defocus as a Zernike coefficient down to  $\lambda/20$ . How accurately can the Zernike coefficient of the aperture error be determined for this focal length? What causes this difference?
2. If the finite size  $a$  of the detector elements is taken into consideration, then in the case of standard evaluation algorithms for the centroids, the dynamic range of the sensor is given by a spot leaving the surface assigned to the detector element on the sensor. In a simple geometric image, what is the extent of the maximal measurable defocus of the above sensor if  $N = 30$  elements are assumed across the beam diameter and the fill factor is set to 1? If you assume that the lenses are diffraction-limited in the small elements, then finite-sized spots are obtained. What is the above-calculated maximal defocus when taking diffraction into consideration? Remember that the detector elements are squared (Figure 5.23).

## Exercises

### P5.3. Aberrometry

Figure 5.28 shows the ocular wavefront table measurement as obtained by a ZEISS i.Profiler<sup>Plus</sup>. In the red box, the determined Zernike coefficients for an eye with a pupil diameter of  $3.0 \text{ mm}$  (analysis aperture) are listed in micrometers up to the order  $n = 4$ . On the left, the calculated metric values are shown:

1. Calculate the spherocylindrical refraction values (polar notation) for a vertex distance of  $12 \text{ mm}$ .
2. Calculate the root mean square wavefront error  $RMS_{wfe}$  for the lower-order aberrations ( $n = 2$ ), higher-order aberrations ( $n > 2$ ), and the total  $RMS_{wfe}$ .