

Dieser Text ist für interessierte Leser gedacht, die sich über die klausur-relevanten, physiologischen Grundlagen hinaus mit der Optik des Auges beschäftigen wollen!

Physikalische Grundlagen: **Strahlengang durch optische Systeme**

Der adäquate Reiz für das Sinnesorgan "Auge" ist sichtbares Licht, das sind elektromagnetische Strahlen der Wellenlängen 400-750 nm. Dieses Licht wird im Auge an zahlreichen Grenzflächen zwischen Medien mit unterschiedlicher optischer Dichte gebrochen, bevor es die Retina erreicht. Die optische Dichte eines Mediums ist durch den Brechungsindex "n" charakterisiert. Im Vakuum ist $n = 1$!

"n" ist eine dimensionslose Größe, die das Verhältnis aus der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ($c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s) und der Lichtgeschwindigkeit im untersuchten Medium (c_n) darstellt:

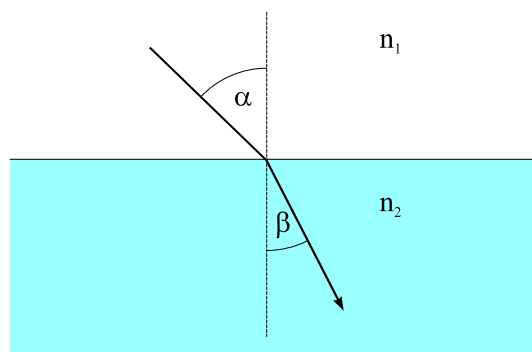
$$n = \frac{c}{c_n}$$

Da die Lichtgeschwindigkeit (c_n) in jedem Medium kleiner als im Vakuum (c) ist, ist der Brechungsindex "n" stets größer als 1.

Medium	Brechungsindex "n"
Vakuum	1
Luft	1,0003
Wasser	1,333
Auge:	
Kammerwasser und Glaskörper	1,336
Cornea	1,376
Linse	~ 1,4
Kronglas (Brillenglas)	1,523

Was geschieht, wenn ein Lichtstrahl von einem optisch dünneren in ein optisch dichteres Medium übertritt?

Sofern der Lichtstrahl nicht senkrecht zur Grenzfläche in das optisch dichtere Medium (Brechungsindex "n₂") eintritt, wird er an der Grenzfläche zum Lot hin gebrochen.

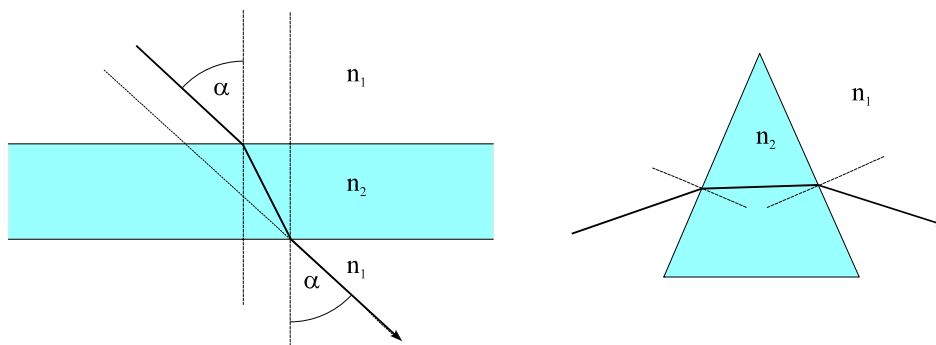


Das Brechungsgesetz beschreibt die Abhängigkeit der Winkel α und β von den Brechungsindizes n_1 und n_2 :

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

Beachte: Der Strahlenverlauf durch optische Systeme ist immer umkehrbar => Beim Übergang vom optisch dichten zum optisch dünnen Medium wird der Strahl vom Lot weg gebrochen!

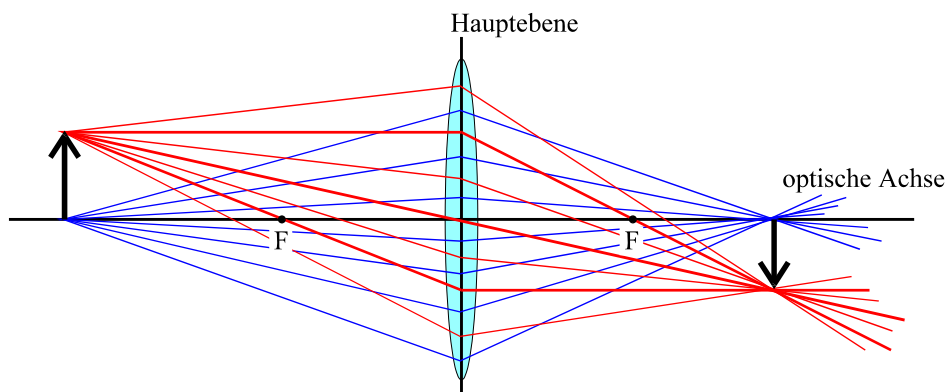
Strahlendurchtritt durch eine Scheibe und durch ein Prisma



Beim Strahlendurchtritt durch eine Scheibe wird das Licht erst zum Lot hin und dann vom Lot weg gebrochen. Das Resultat ist eine Parallelverschiebung. Beim Strahlengang durch ein Prisma wird der Strahl ebenfalls zunächst zum Lot hin, dann vom Lot weg gebrochen. Aufgrund der Geometrie ergibt sich aber eine zweimalige Brechung in die gleiche Richtung.

Beachte: Der Brechungsindex "n" ist wellenlängenabhängig. Rotes Licht wird schwächer, blaues Licht wird stärker gebrochen. Daraus ergibt sich am Prisma eine Zerlegung von weißem Licht in seine Spektralfarben. Dieser Vorgang heißt "Dispersion".

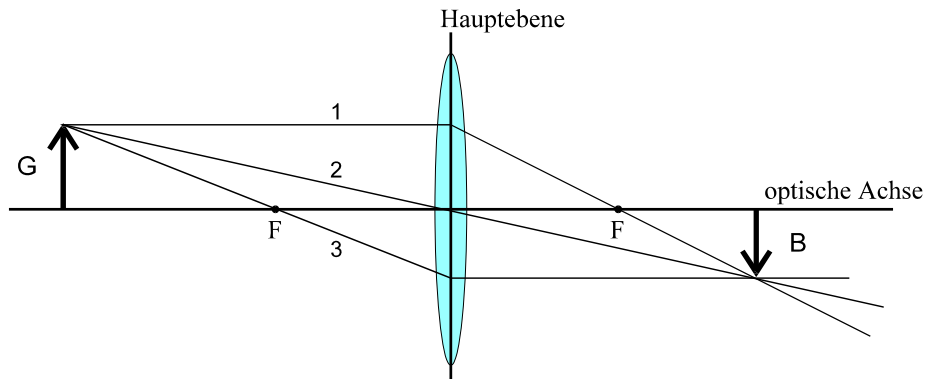
Strahlengang durch eine Linse



Eine Linse entspricht einem zusammengesetzten Körper aus vielen Prismen. Lichtstrahlen, die durch eine bikonvexe, sammelnde Linse treten, werden an den Grenzflächen der Linse gebrochen. Alle Strahlen, die divergent von einem Punkt eines Gegenstandes ausgehen,

vereinigen sich in einem Bildpunkt hinter der Linse. Der Abstand der Bildebene von der Linse ist von der Brennweite bzw. Brechkraft der Linse abhängig (s.u.).

Konstruktion des Strahlengangs durch eine dünne Linse

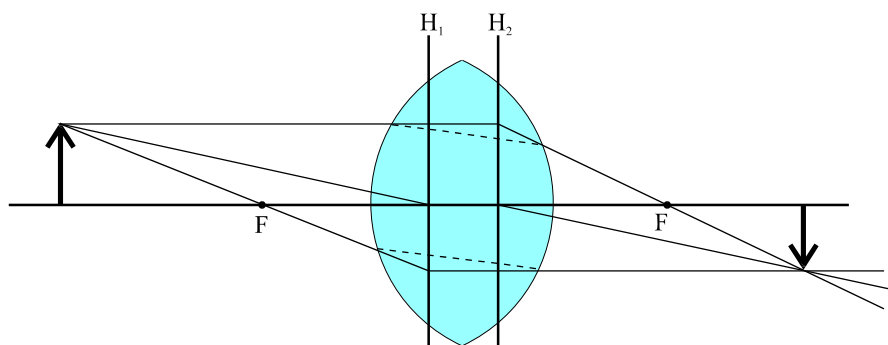


Ein dünner Linsenkörper wird im Gegensatz zu einem dicken Linsenkörper (s.u.) durch eine einzige Hauptebene dargestellt, die im Hauptpunkt senkrecht auf der optischen Achse steht. Die Linse hat eine vordere und eine hintere Brennweite (= Abstand zwischen Hauptpunkt und Brennpunkt "F").

Eine Konstruktion der Abbildung (B = Bild) des Gegenstandes (G) in der Bildebene ist durch mindestens zwei der folgenden Strahlen möglich:

1. Parallelstrahl: Ein Strahl, der parallel zur optischen Achse auf die Linse trifft, wird so gebrochen, dass er durch den hinteren Brennpunkt (F) geht.
2. Mittelpunktstrahl: Ein Strahl, der durch den Schnittpunkt von optischer Achse und Hauptebene verläuft, wird nicht gebrochen.
3. Brennpunktstrahl: Ein Strahl, der vor der Linse durch den Brennpunkt geht, tritt parallel zur optischen Achse aus der Linse aus.

Konstruktion des Strahlengangs durch eine dicke Linse

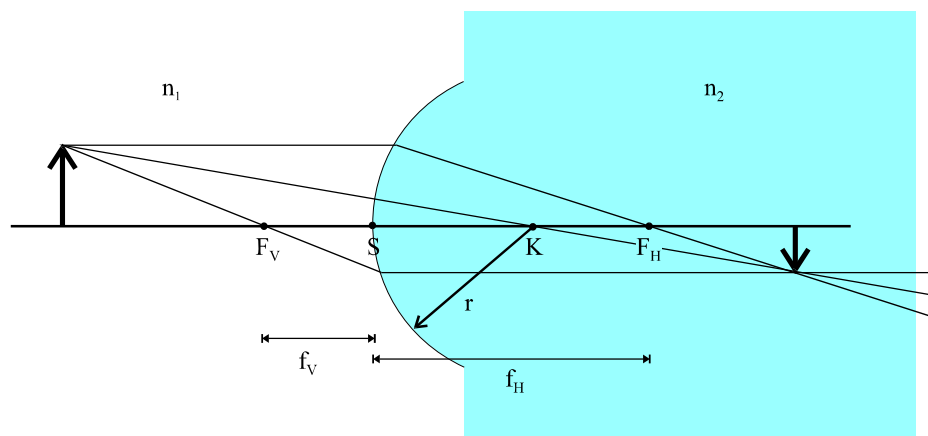


Die gestrichelten Linien innerhalb des Linsenkörpers zeigen den tatsächlichen Verlauf der Lichtstrahlen mit jeweils einer Lichtbrechung an jeder Grenzfläche der Linse. Für die Konstruktion der Abbildung ist der Strahlenverlauf innerhalb der Linse aber nicht von Interesse. Deshalb vereinfacht man den Strahlengang, indem man eine einmalige

Lichtbrechung innerhalb der Linse an den Hauptebenen H_1 und H_2 annimmt. Die Lage der vorderen Hauptebene H_1 resultiert aus dem Schnittpunkt der Verlängerung des Brennpunktstrahls und der rückwärtigen Verlängerung des achsenparallel austretenden Strahls. Die Lage der hinteren Hauptebene H_2 resultiert aus dem Schnittpunkt der Verlängerung des achsenparallel eintretenden Strahls und der rückwärtigen Verlängerung des austretenden Strahls durch den hinteren Brennpunkt. Dementsprechend wird bei der Konstruktion der Abbildung der Parallelstrahl an der hinteren Hauptebene, der Brennpunktstrahl an der vorderen Hauptebene gebrochen. Der Mittelpunktstrahl erfährt zwischen den Hauptebenen eine Parallelverschiebung vom ersten zum zweiten Hauptpunkt. Bei dünnen Linsen liegen die beiden Hauptebenen so nah beieinander, dass man sie näherungsweise durch eine einzige Hauptebene ersetzen kann (s.o.). Die mathematische Bestimmung der Lage der Hauptebenen ist komplex und wird an dieser Stelle nicht erläutert.

Lichtbrechende Eigenschaften einer einzelnen sphärischen Grenzfläche

Bisher wurden Abbildungseigenschaften von Linsen mit zwei lichtbrechenden Grenzflächen besprochen. Aber auch eine einzige, sphärische (kugelige) Grenzfläche zwischen Medien mit unterschiedlichen Brechungsindices bildet einen Gegenstand in einer Bildebene hinter der Grenzfläche scharf ab.



Dieses einfache optische System aus nur einer Grenzfläche hat zwei unterschiedliche Brennweiten: 1) eine vordere Brennweite f_V , die dem Abstand zwischen dem vorderen Brennpunkt F_V und dem Scheitelpunkt S der Grenzfläche entspricht und 2) eine hintere Brennweite f_H , die dem Abstand zwischen dem Scheitelpunkt S und dem hinteren Brennpunkt F_H entspricht. Die Brennweiten lassen sich berechnen, wenn die Brechungsindices n_1 und n_2 und der Krümmungsradius " r " der Grenzfläche bekannt sind. Der Knotenpunkt K ist der Mittelpunkt der Kugeloberfläche, deren Ausschnitt die lichtbrechende Grenzfläche darstellt. Ein Strahl, der durch den Knotenpunkt geht, trifft senkrecht auf die sphärische Grenzfläche und wird nicht gebrochen. Der Abstand zwischen dem Knotenpunkt und dem hinteren Brennpunkt ist gleich dem Abstand zwischen dem vorderen Brennpunkt und dem Scheitelpunkt der Grenzfläche.

Berechnung der Brennweiten

$$\boxed{f_V = \frac{n_1 \cdot r}{n_2 - n_1} \qquad f_H = \frac{n_2 \cdot r}{n_2 - n_1}}$$

mit	f_V	vordere Brennweite [m]
	f_H	hintere Brennweite [m]
	n_1	Brechungsindex des gegenstandseitigen Mediums
	n_2	Brechungsindex der bildseitigen Mediums
	r	Krümmungsradius der sphärischen Grenzfläche [m]

Berechnung der Brechkraft

Die Brechkraft D der sphärischen Grenzfläche kann berechnet werden, wenn einer der Brechungsindices und die zugehörige Brennweite bekannt sind:

$$\boxed{D = \frac{n_1}{f_V} = \frac{n_2}{f_H}}$$

mit	D	Brechkraft [dpt]
	n_1, n_2	Brechungsindex des gegenstandseitigen bzw. bildseitigen Mediums
	f_V, f_H	vordere bzw. hintere Brennweite [m]

Die Einheit der Brechkraft ist die Dioptrie [$\text{dpt} = 1/\text{m}$].

Beachte: Häufig wird die Brechkraft als Kehrwert der Brennweite angegeben. Dies ist nur im Vakuum richtig und gilt näherungsweise für Luft. So hat eine Linse mit einer Brechkraft von 2 dpt in Luft ($n = 1$) eine Brennweite von 0,5 m. In Wasser ($n = 1,333$) ist die Brennweite der gleichen Linse wesentlich größer und die Brechkraft wesentlich kleiner.

Bsp: Betrachte den Strahlengang durch eine plan-konvexe Linse mit einem Krümmungsradius von 0,25 m. Der Brechungsindex des Linsenmaterials sei 1,5.

Die Brennweite der Linse in Luft beträgt $f_{\text{Luft}} = \frac{n_{\text{Luft}} \cdot r}{n_{\text{Linse}} - n_{\text{Luft}}} = \frac{1 \cdot 0,25\text{m}}{1,5 - 1} = 0,5\text{m} .$

Die Brechkraft in Luft ist $D = \frac{n_{\text{Luft}}}{f_{\text{Luft}}} = \frac{1}{0,5\text{m}} = 2\text{dpt} .$

Die Brennweite der Linse in Wasser ist $f_{\text{Wasser}} = \frac{n_{\text{Wasser}} \cdot r}{n_{\text{Linse}} - n_{\text{Wasser}}} = \frac{1,333 \cdot 0,25\text{m}}{1,5 - 1,333} = 2\text{m} .$

Die Brechkraft in Wasser ist $D = \frac{n_{\text{Wasser}}}{f_{\text{Wasser}}} = \frac{1,333}{2\text{m}} = 0,667\text{dpt} .$

In einem optischen System aus zwei lichtbrechenden Grenzflächen (z.B. eine dicke Linse) ist die Gesamtbrechkraft nicht gleich der Summe der Einzelbrechkräfte der Grenzflächen, sondern muss mit der sog. Gullstrand-Formel berechnet werden:

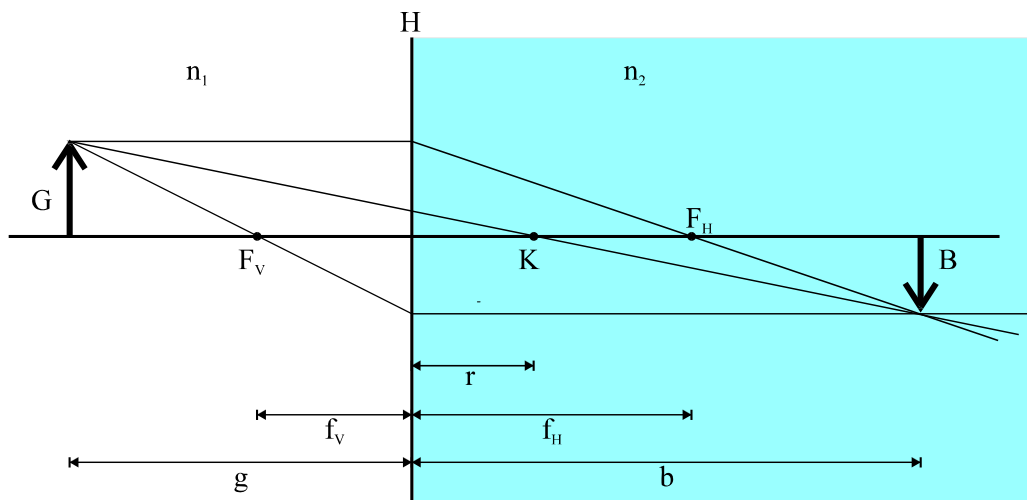
$$D_{\text{Ges}} = D_1 + D_2 - \frac{d}{n} \cdot D_1 \cdot D_2$$

- mit D_{Ges} Gesamtbrechkraft [dpt]
 D_1 Brechkraft der Grenzfläche 1 [dpt]
 D_2 Brechkraft der Grenzfläche 2 [dpt]
 d Abstand zwischen den Grenzflächen 1 und 2 [m]
(z.B. Mittendicke einer dicken Linse)
 n Brechungsindex des Mediums zwischen den Grenzflächen

Je größer der Abstand zwischen den Grenzflächen ist, desto stärker weicht die Gesamtbrechkraft von der Summe der Einzelbrechkräfte ab. Dies ist bei der Berechnung der Gesamtbrechkraft des Auges aus den Brechkräften der Cornea und der Linse zu beachten.

Allgemeine Linsengleichung

In einer vereinfachten Darstellung kann eine sphärische Grenzfläche durch eine Hauptebene dargestellt werden, die die optische Achse im Scheitelpunkt der Grenzfläche schneidet.



Die "Allgemeine Linsengleichung" gibt den Zusammenhang zwischen der Gegenstandsweite (g), der Bildweite (b) und der Brennweite (f_v bzw. f_h) des optischen Systems wieder:

$$\frac{n_1}{f_v} = \frac{n_1}{g} + \frac{n_2}{b} = \frac{n_2}{f_h}$$

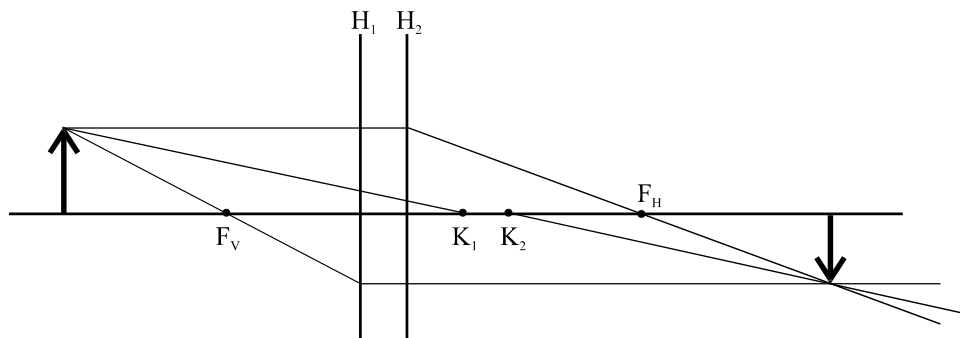
Wenn der Gegenstand unendlich weit entfernt ist ($g = \infty$), so ist die Bildweite b gleich der hinteren Brennweite f_h .

Folgende Formel gibt den gleichen Zusammenhang wieder und ist um die Brechkraft und die Berechnung der Brechkraft mit Hilfe des Krümmungsradius erweitert. Mit Kenntnis dieser Gleichung lassen sich viele Aufgaben der geometrischen Optik lösen:

$$D = \frac{n_1}{f_V} = \frac{n_2}{f_H} = \frac{n_1}{g} + \frac{n_2}{b} = \frac{n_2 - n_1}{r}$$

mit	D	Brechkraft [dpt]
	n_1	Brechungsindex des gegenstandseitigen Mediums
	n_2	Brechungsindex des bildseitigen Mediums
	f_V	vordere, gegenstandseitige Brennweite [m]
	f_H	hintere, bildseitige Brennweite [m]
	g	Gegenstandsweite [m]
	b	Bildweite [m]
	r	Krümmungsradius der sphärischen Grenzfläche [m]

Strahlengang durch ein Linsensystem mit 2 Hauptebenen und unterschiedlicher vorderer und hinterer Brennweite



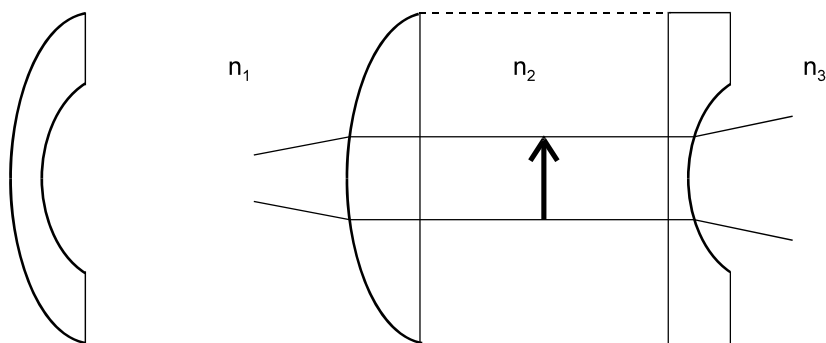
Die Abbildung des Gegenstandes in der Bildebene kann problemlos durch den Parallelstrahl und den Brennpunktstrahl konstruiert werden. Der Knotenpunktstrahl erfährt eine Parallelverschiebung zwischen den Knotenpunkten K_1 und K_2 ! Die Lage der Knotenpunkte ergibt sich aus dem Abstand von F_V zu H_1 , der dem Abstand von F_H zu K_2 entspricht. Die Distanz zwischen den Knotenpunkten entspricht der Distanz zwischen den Hauptebenen (\Rightarrow spiegelsymmetrische Anordnung).

Die Schnittpunkte der Hauptebenen mit der optischen Achse heißen Hauptpunkte. Die Hauptpunkte, die Knotenpunkte und die Brennpunkte heißen Kardinalpunkte des optischen Systems.

Der optische (dioptrische) Apparat des Auges

Das Auge ist ein zusammengesetztes, optisches System aus mehreren gekrümmten, lichtbrechenden Grenzflächen. Die Cornea und die Linse des Auges sind für die scharfe Abbildung der Umwelt auf der Retina die wichtigsten lichtbrechenden Strukturen. Das optische System bildet einen betrachteten Gegenstand umgekehrt und verkleinert auf der Retina ab. Zur Ermittlung der Gesamtbrechkraft des Auges benötigt man Angaben über 1) die Brechungsindices der Medien im Auge, 2) die Krümmungsradien optischer Grenzflächen und 3) deren Abstände im Auge. Diese notwendigen Werte wurden von Gullstrand anhand einer großen Anzahl "normalsichtiger" Augen ermittelt und ein schematisches "Normalauge" entworfen, das die anatomischen Gegebenheiten des Auges gut in ein optisches System umsetzt. Dabei gibt es unterschiedliche Stufen der Vereinfachung des optischen Systems bis zur Darstellung des gesamten dioptrischen Apparats des Auges durch eine einzige lichtbrechende Grenzfläche (= "Reduziertes Auge"). Gemäß der unterschiedlichen Vereinfachungen tauchen in den Lehrbüchern unterschiedliche Zahlenwerte für die Brechkräfte des Auges und seiner einzelnen Strukturen auf. Grundlage für die folgenden Berechnungen ist das "exakte schematische Auge" nach Gullstrand.

Berechnung der Brennweite und der Brechkraft der Cornea



Die Cornea ist eine Linse mit einer konvexen und einer konkaven Grenzfläche. Man kann sich diese Linse aus einer konvex-planen und einer plan-konkaven Linse zusammengesetzt vorstellen und bei der Konstruktion des Strahlengangs jeweils von einem Gegenstand ausgehen, der zwischen den Linsen liegt. Da die Cornea ein optisch dichteres Medium ist als Luft und Kammerwasser, wirkt die vordere Corneafläche als Sammellinse und die hintere Corneafläche als Zerstreuungslinse. Folgende Werte sind für die Berechnung der Brennweiten und der Brechkräfte notwendig:

vorderer Krümmungsradius	r_v	=	7,7 mm
hinterer Krümmungsradius	r_h	=	6,8 mm
Brechungsindex der Luft	n_1	=	1
Brechungsindex der Cornea	n_2	=	1,376
Brechungsindex des Kammerwassers	n_3	=	1,336
Abstand der Grenzflächen	d	=	0,5 mm

Berechnung der vorderen, gegenstandseitigen Brennweite f_v der Cornea:

$$f_v = \frac{n_1 \cdot r_v}{n_2 - n_1} = \frac{1 \cdot 7,7 \text{ mm}}{1,376 - 1} = 20,48 \text{ mm}$$

Berechnung der Brechkraft D_v der vorderen Corneafläche:

$$D_v = \frac{n_1}{f_v} = \frac{1}{0,02048 \text{ m}} = 48,83 \text{ dpt}$$

Berechnung der hinteren, bildseitigen Brennweite f_h der Cornea:

$$f_h = \frac{n_3 \cdot r_h}{n_3 - n_2} = \frac{1,336 \cdot (-6,8) \text{ mm}}{1,336 - 1,376} = -227,12 \text{ mm}$$

Berechnung der Brechkraft D_h der hinteren Corneafläche:

$$D_h = \frac{n_3}{f_h} = \frac{1,336}{-0,22712 \text{ m}} = -5,88 \text{ dpt}$$

Die Gesamtbrechkraft D_{Cornea} der Cornea wird mit Hilfe der Gullstrand-Formel berechnet:

$$D_{\text{Cornea}} = D_v + D_h - \frac{d}{n} \cdot D_v \cdot D_h$$

mit d Abstand der Grenzflächen [m] hier $d = 0,0005 \text{ m}$
 n Brechungsindex des Mediums zwischen den Grenzflächen hier $n = n_2$

Nach Einsetzen der Werte ergibt sich für die Gesamtbrechkraft:

$$D_{\text{Cornea}} = 48,83 \text{ dpt} - 5,88 \text{ dpt} + \frac{0,0005 \text{ m}}{1,376} \cdot 48,83 \text{ dpt} \cdot 5,88 \text{ dpt} = 43,05 \text{ dpt}$$

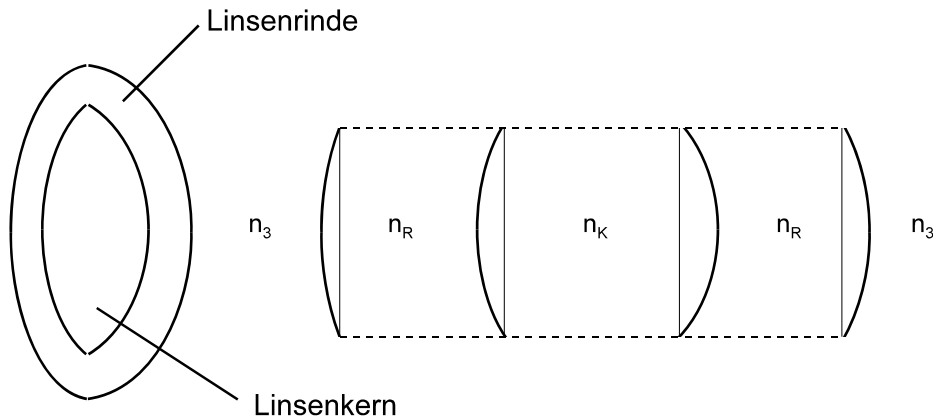
Beachte:

1) Da "d" sehr klein ist, entspricht die Gesamtbrechkraft der Cornea in guter Näherung der Summe aus vorderer und hinterer Brechkraft.

2) Die Einheit "dpt" ergibt sich gemäß der Formel aus "dpt + dpt + m · dpt · dpt = dpt", da $m \cdot \text{dpt} = 1$ ist.

Berechnung der Brennweiten und der Brechkräfte der fernakkommodierten Linse

Die Linse des Auges ist bikonvex und wirkt wie eine Sammellinse. Die Linse ist in sich aber nicht homogen. Vereinfachend können ein Linsenkern und eine ihn schalenförmig umgebende Linsenrinde unterschieden werden. Das optische System der Linse setzt sich so aus 4 sphärischen Linsenflächen zusammen. Da der Linsenkern einen höheren Brechungsindex als die Rinde hat, wirkt jede dieser optischen Grenzflächen als Sammellinse.



Folgende Werte sind für die Berechnung der Brennweiten und der Brechkräfte notwendig:

Krümmungsradius

der vorderen Rindenfläche	r_1	=	10,0 mm
der vorderen Kernlinsefläche	r_2	=	7,911 mm
der hinteren Kernlinsefläche	r_3	=	-5,76 mm
der hinteren Rindenfläche	r_4	=	-6,0 mm

Lage (= Abstand vom Corneascheitel)

der vorderen Rindenfläche	S_1	=	3,6 mm
der vorderen Kernlinsefläche	S_2	=	4,146 mm
der hinteren Kernlinsefläche	S_3	=	6,565 mm
der hinteren Rindenfläche	S_4	=	7,2 mm

Brechungsindex

des Kammerwassers und des Glaskörpers	n_3	=	1,336
der Linsenrinde	n_R	=	1,386
des Linsenkerns	n_K	=	1,406

Berechnung der Brennweiten und Brechkräfte der 4 Grenzflächen der Linse

Berechnung der bildseitigen Brennweite f_1 der vorderen Linsenrindenfläche:

$$f_1 = \frac{n_R \cdot r_1}{n_R - n_3} = \frac{1,386 \cdot 10 \text{ mm}}{1,386 - 1,336} = 277,20 \text{ mm}$$

Berechnung der Brechkraft D_1 der vorderen Linsenrindenfläche:

$$D_1 = \frac{n_R}{f_1} = \frac{1,386}{0,2772 \text{ m}} = 5,0 \text{ dpt}$$

Berechnung der bildseitigen Brennweite f_2 der vorderen Kernlinsenfläche:

$$f_2 = \frac{n_K \cdot r_2}{n_K - n_R} = \frac{1,406 \cdot 7,911 \text{ mm}}{1,406 - 1,386} = 556,14 \text{ mm}$$

Berechnung der Brechkraft D_2 der vorderen Kernlinsenfläche:

$$D_2 = \frac{n_K}{f_2} = \frac{1,406}{0,55614 \text{ m}} = 2,528 \text{ dpt}$$

Berechnung der bildseitigen Brennweite f_3 der hinteren Kernlinsenfläche:

$$f_3 = \frac{n_R \cdot r_3}{n_R - n_K} = \frac{1,386 \cdot (-5,76) \text{ mm}}{1,386 - 1,406} = 399,17 \text{ mm}$$

Berechnung der Brechkraft D_3 der hinteren Kernlinsenfläche:

$$D_3 = \frac{n_R}{f_3} = \frac{1,386}{0,39917 \text{ m}} = 3,472 \text{ dpt}$$

Berechnung der bildseitigen Brennweite f_4 der hinteren Linsenrindenfläche:

$$f_4 = \frac{n_3 \cdot r_4}{n_3 - n_R} = \frac{1,336 \cdot (-6) \text{ mm}}{1,336 - 1,386} = 160,32 \text{ mm}$$

Berechnung der Brechkraft D_4 der hinteren Linsenrindenfläche:

$$D_4 = \frac{n_3}{f_4} = \frac{1,336}{0,16032 \text{ m}} = 8,33 \text{ dpt}$$

Die Summe aus den Brechkraften der vier Grenzflächen ergibt in erster Näherung die Gesamtbrechkraft der Augenlinse D_{Linse} :

$$D_{\text{Linse}} = D_1 + D_2 + D_3 + D_4 = 19,33 \text{ dpt}$$

Eine genaue Berechnung der Gesamtbrechkraft erfolgt schrittweise mit Hilfe der Gullstrand-Formel. Diese Berechnung ist aufwendig, weil eine Verschiebung der Hauptebenen der Teilsysteme berücksichtigt werden muss, die in die Abstandsvariable "d" der Formel eingeht. Die Rechnung wird hier nicht ausgeführt. Das Ergebnis ist eine Gesamtbrechkraft der Linse von 19,11 dpt.

Berechnung der Gesamtbrechkraft des fernakkommodierten Auges

Zur Ermittlung der Gesamtbrechkraft des Auges werden die Brechkraft der Cornea D_{Cornea} und die Brechkraft der Linse D_{Linse} nach der Gullstrand-Formel miteinander verrechnet. Dabei ist $d = 5,7286 \text{ mm}$ der Abstand zwischen dem bildseitigen Hauptpunkt der Cornea ($-0,0506 \text{ mm}$) und dem gegenstandseitigen Hauptpunkt der Linse ($5,678 \text{ mm}$) und "n" ist der Brechungsindex des Kammerwassers (1,336).

$$D_{\text{Auge}} = D_{\text{Cornea}} + D_{\text{Linse}} - \frac{d}{n} \cdot D_{\text{Cornea}} \cdot D_{\text{Linse}}$$

$$D_{\text{Auge}} = 43,05 \text{ dpt} + 19,11 \text{ dpt} - \frac{0,0057286 \text{ m}}{1,336} \cdot 43,05 \text{ dpt} \cdot 19,11 \text{ dpt} = 58,63 \text{ dpt}$$

Gullstrand gibt die Gesamtbrechkraft des Auges mit 58,64 dpt an.

Beachte: In den Lehrbüchern wird die Gesamtbrechkraft der fernakkommodierten Linse unterschiedlich angegeben: 15 dpt - 20,53 dpt. Dabei ist eine Brechkraft von 15 dpt sicher als falsch zu werten! Die Brechkraft des Auges ändert sich bei einem Verlust der Linse (= aphakes Auge) zwar nur um etwa 15 dpt. Daraus kann aber nicht geschlossen werden, dass die Brechkraft der Linse 15 dpt beträgt! Für die korrekte Bestimmung der Gesamtbrechkraft des Auges ist der Abstand zwischen Cornea und Linse unbedingt zu berücksichtigen. Eine einfache Addition der Brechkraften von Cornea und Linse ist nicht zulässig. Ebenso kann nicht die Brechkraft der Linse einfach als Differenz zwischen Gesamtbrechkraft und Corneabrechkraft angenommen werden.

Vergleich verschiedener Augenmodelle

Zu unterscheiden sind

- 1) das exakte schematische Gullstrandaug
- 2) das vereinfachte schematische Gullstrandaug
- 3) das reduzierte Auge

1) Das "exakte schematische Gullstrandaug" gibt die anatomischen Verhältnisse im Auge am besten wieder und setzt sie in ein optisches System um. Wie oben beschrieben wird die Brechkraft der Cornea über ihre zwei Krümmungsradien, ihre Mittendicke und ihren Brechungsindex ermittelt. Die Augenlinse wird in Kern und Rinde unterteilt. Cornea und Augenlinse werden als getrennte Linsen mit je zwei Hauptebenen betrachtet.

Brechkraft der Cornea	43,05 dpt.
Brechkraft der Linse	19,11 dpt
Gesamtbrechkraft des Auges	58,64 dpt

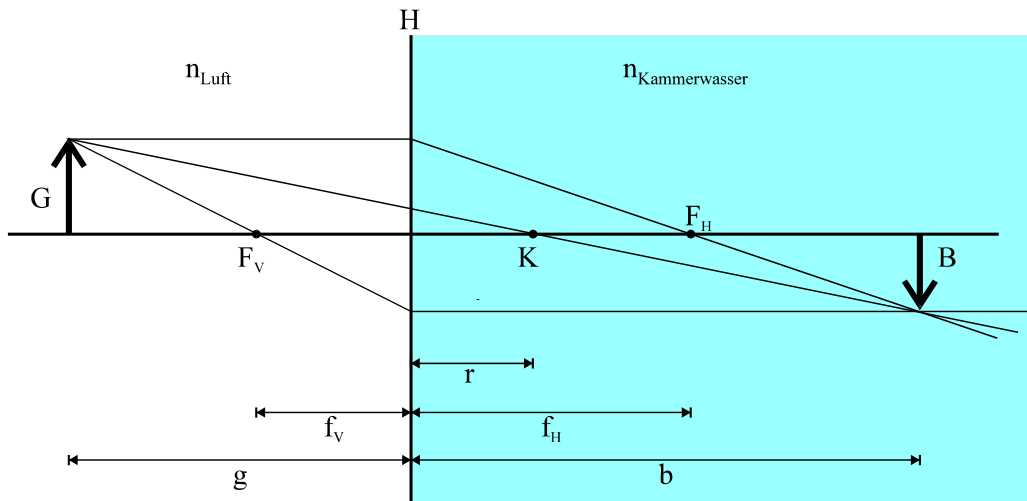
2) Im "vereinfachten schematischen Gullstrandaug" wird die Cornea nur noch durch eine einzige lichtbrechende Grenzfläche mit einem Krümmungsradius von 7,8 mm dargestellt. Der Hauptpunkt fällt mit dem Corneascheitel zusammen. Die Augenlinse wird durch eine dünne homogene Linse mit einem Hauptpunkt und einem einheitlichen Brechungsindex von 1,413 ersetzt.

Brechkraft der Cornea	43,08 dpt.
Brechkraft der Linse	20,53 dpt
Gesamtbrechkraft des Auges	59,74 dpt

3) Das "reduzierte Auge" stellt die größte Vereinfachung des dioptrischen Apparats dar. Das gesamte optische System wird hier auf eine einzige, gekrümmte, lichtbrechende Grenzfläche reduziert, die den Luftraum ($n = 1$) vom Kammerwasser ($n = 1,336$) trennt. Der Krümmungsradius der Grenzfläche ist 5,7 mm. Die Brechkräfte von Cornea und Linse werden hier also nicht unterschieden.

Gesamtbrechkraft des Auges	58,6 dpt
gegenstandseitige Brennweite	17,06 mm
bildseitige Brennweite	22,8 mm
Lage des Hauptpunkts	1,5 mm hinter dem anatomischen Corneascheitel
Lage des Knotenpunkts	7,2 mm hinter dem anatomischen Corneascheitel
Krümmungsradius	5,7 mm = 7,2 - 1,5 mm

Der Strahlengang durch das reduzierte Auge entspricht dem Strahlengang durch eine einzelne sphärische Grenzfläche:



Die vordere Brennweite des reduzierten fernakkommodierten Auges beträgt:

$$f_v = \frac{n_{\text{Luft}}}{D_{\text{Auge}}} = \frac{1}{58,6 \text{ dpt}} = 17,06 \text{ mm}$$

$$= \frac{n_{\text{Luft}} \cdot r}{n_{\text{Kammerwasser}} - n_{\text{Luft}}} = \frac{1 \cdot 5,7 \text{ mm}}{1,336 - 1}$$

Die hintere Brennweite des reduzierten fernakkommodierten Auges beträgt:

$$f_H = \frac{n_{\text{Kammerwasser}}}{D_{\text{Auge}}} = \frac{1,336}{58,6 \text{ dpt}} = 22,8 \text{ mm}$$

Gemäß der allgemeinen Linsengleichung gilt:

$$\frac{n_{\text{Kammerwasser}}}{f_H} = \frac{n_{\text{Luft}}}{g} + \frac{n_{\text{Kammerwasser}}}{b}$$

Für den Fall, dass die Gegenstandsweite $g = \infty$ ist, ist $f_H = b$. Die hintere Brennweite entspricht im fernakkommodierten Auge der Bildweite und damit der "optischen Bulbuslänge" (Abstand zwischen Hauptebene und Retina).

Beachte: Mit diesem Augenmodell ist auf einfache Weise die Bildgröße "B" auf der Retina in Abhängigkeit von der Gegenstandsgröße "G" und der Gegenstandsweite "g" zu berechnen, weil nach dem Strahlensatz das Verhältnis B/G gleich dem Verhältnis der Strecken $(b-r)/(g+r)$ ist (s. Praktikum).