

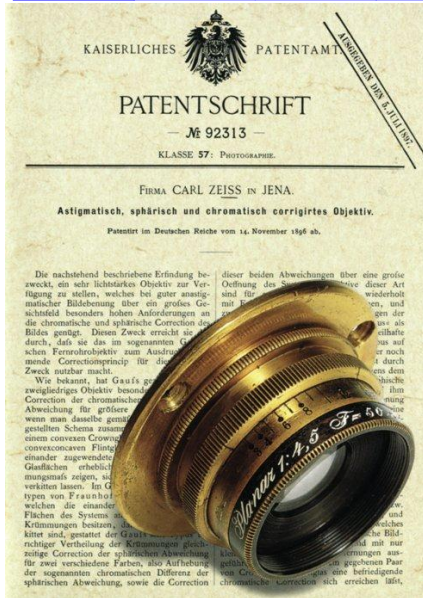
Technische Optik 08

1 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel



1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme



Eine wichtige Aufgabe der Technischen Optik liegt in der technischen Ausgestaltung der Abbildung.

Dafür werden Linsen und Linsensysteme benötigt. In diesem Beitrag werden wir uns mit einigen Berechnungsmöglichkeiten vertraut machen.

Das Bild zeigt die Patentschrift für die Reihe der Planar-Objektive von Zeiss aus dem Jahr 1898.

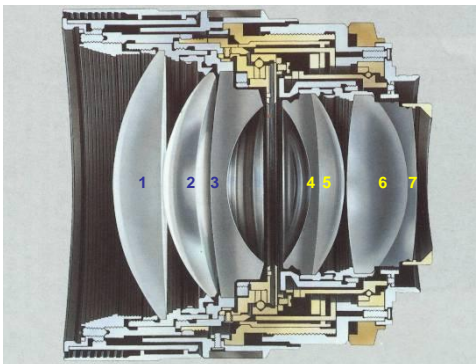
Technische Optik 08

2 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel



1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme



Das Ziel dieser Übersicht kann nicht die Fähigkeit sein, so ein hochentwickeltes Linsensystem wie das gezeigte 1,4 - 80 Summilux von Leica nachzubauen.-

Aber ein Verständnis für die großartige Leistung der Entwickler kann erreicht werden, die hier mit 7 Linsen hohe Anforderungen an die Abbildungsleistung erfüllen konnten.

Optische Systeme mit 7 einzelnen Linsen wurden erst möglich, als die optischen Oberflächen AR-Schichten bekamen (anti-reflex).

Eine gute optische Wirkung wird nur dann reproduzierbar erreicht, wenn auch die Mechanik hochwertig ausgeführt ist (Präzision und Zuverlässigkeit).

Technische Optik 08

3 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Für die Berechnung der Wirkung von Linsen auf Licht benutzt man die Vorstellung von Strahlen (englisch: "rays").

Was sind Strahlen? Isaac Newton (1643 - 1727) hat eine Definition gegeben:

"Mathematicians usually consider the rays of light to be lines reaching from the luminous body to the body to be illuminated."

"The ray is the least part of a beam."

Was soll man dem noch hinzufügen? Die Literaturstelle:

Isaac Newton: "Opticks", 1st ed. 1704 (im Gegensatz zur "Principia" in englischer Sprache).



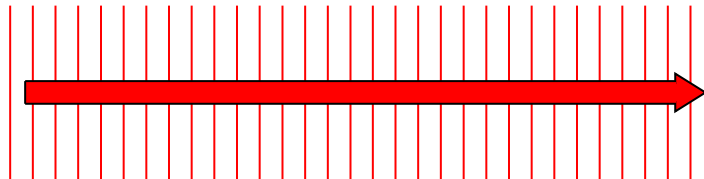
Technische Optik 08

4 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Strahlen sind neben den Wellen ein alternatives Konzept für das Licht, um die Ausbreitung zu analysieren.



Die Ausbreitung von Strahlen verläuft senkrecht zur Wellenfront (Huygenssches Prinzip).
Eine ebene Wellenfront hat parallele Strahlen (Laser).

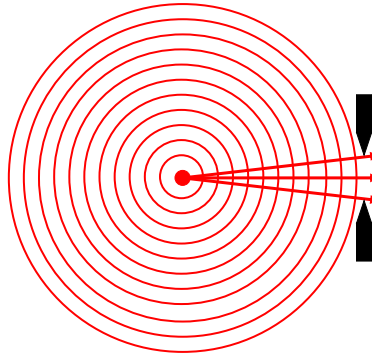
Technische Optik 08

5 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Strahlen, die aus einem Punkt kommen, werden durch eine Kugelwelle symbolisiert. In weiter Entfernung von der Quelle wird die Krümmung der Kugel kleiner und die Wellenfront einer ebenen Welle ähnlicher. Weit entfernte Objekte liefern fast paralleles Licht:



Allerdings ist die derartige Erzeugung paralleler Strahlen mit großem Intensitätsverlust verbunden.

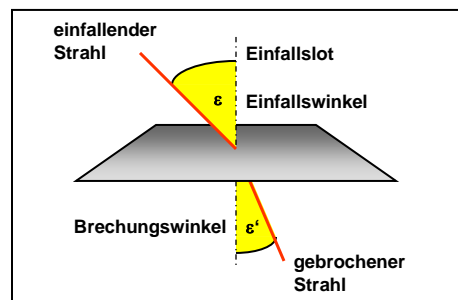
Technische Optik 08

6 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Beim Durchgang eines Lichtstrahls durch eine Grenzfläche zwischen zwei durchsichtigen Medien wird der Strahl gebrochen: Seine Ausbreitungsrichtung ändert sich.



Claudius Ptolemäus (c. 100 - 175 n. Chr.) hat an der Grenzfläche Luft/Wasser die Winkel ε und ε' gemessen und die Messwerte aufgeschrieben („Laborbericht“):

ε	20°	30°	40°	50°	60°	70°
ε'	$15,5^\circ$	$22,5^\circ$	29°	35°	$40,5^\circ$	$45,5^\circ$
$\frac{\sin(\varepsilon)}{\sin(\varepsilon')}$	1,28	1,31	1,33	1,34	1,33	1,32

Weil er die Sinus-Funktion noch nicht kannte, dauerte es noch 1500 Jahre, bis das Brechungsgesetz entdeckt wurde!

Technische Optik 08

7 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Das Brechungsgesetz wurde durch den Niederländer
Willebrord Snel van Rooyen (1580 - 1626) entdeckt:

$$n \cdot \sin(\varepsilon) = n' \cdot \sin(\varepsilon')$$

In dieser Gleichung sind ε und ε' Einfallswinkel und Brechungswinkel sowie n und n' Brechzahlen von Start- und Zielmedium (Materialkonstanten).

Daraus erkennen wir: Bei Brechung an einer Grenzfläche ist das Verhältnis der Sinus-Werte von Einfallswinkel und Brechungswinkel eine Konstante (hier n). Das haben wir soeben an den Messwerten von Claudius Ptolemäus erkannt. Luft hat $n = 1$, Wasser $n' = 1,33$. Für die optischen Gläser liegt der Wert zwischen 1,4 und 2,0, je nach Material und Wellenlänge.

Diese Konstante n nennt man Brechungsindex (oder auch Brechzahl, falls Sie keine unangenehmen Erinnerungen an eine Seefahrt haben sollten).

Bei Linsen wird die Berechnung komplizierter, denn sie haben meistens auf einer Seite eine sphärische Oberflächenform (manchmal auch auf beiden Seiten).



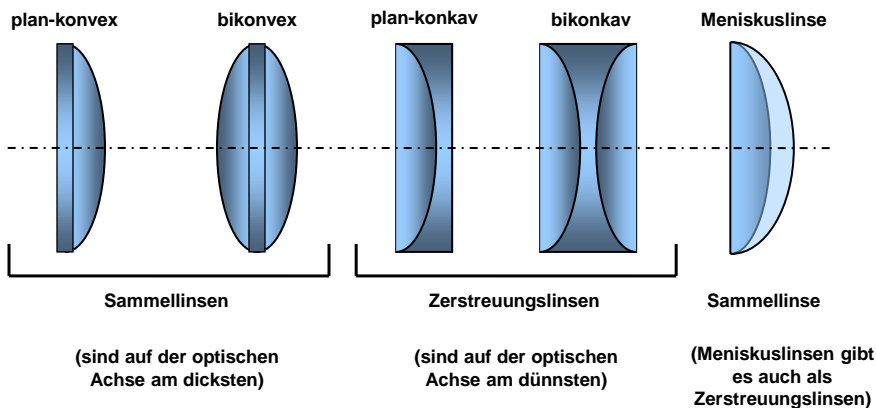
Technische Optik 08

8 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Eine einzelne Linse ist ein Glaskörper mit gewölbten Wirkflächen. Ihre Funktion hängt von der Form ihrer beiden Oberflächen ab: sie können konvex (= nach außen gewölbt) oder konkav (nach innen gewölbt) sein. Man zeichnet sie meistens als Schnittbild mit der optischen Achse (= Rotationsachse). Dann ist die optische Wirkung ohne Zentrierungs- oder Winkelfehler.



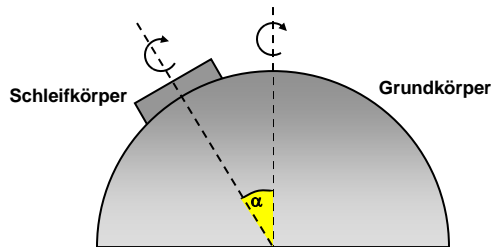
Technische Optik 08

9 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Glatte, sphärische Oberflächen lassen sich in einzelnen Bearbeitungsschritten durch einen Schleif- und den nachfolgenden Polierprozess fertigen. Ein sphärischer Grundkörper, auf den Glasplatten aufgeklebt sind (Hartwachs mit Schmelzpunkt bei 60 °C), rotiert um seine Achse; unter einem variierenden Winkel α drückt ein Schleifkörper auf ihn. Der Schleifkörper drückt mit konstanter Kraft und entfernt nach und nach Material in Form kleiner Abriebteilchen. Die Glasplatten bekommen dadurch nach und nach eine kugelförmige, gewölbte Oberfläche.



Heute benutzt man auch Gläser, die für das Form-Pressen im heißen Zustand geeignet sind. Dann können für kleine Linsen auch kompliziertere Oberflächen („Asphären“) kontrolliert und in großer Stückzahl hergestellt werden.

Technische Optik 08

10 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Durch Einführung moderner Mess- und Regelungstechnik während der Bearbeitung werden die alten Fertigungsverfahren auch heute noch weiter verbessert. Das ist für Einzelstückfertigung von Bedeutung.

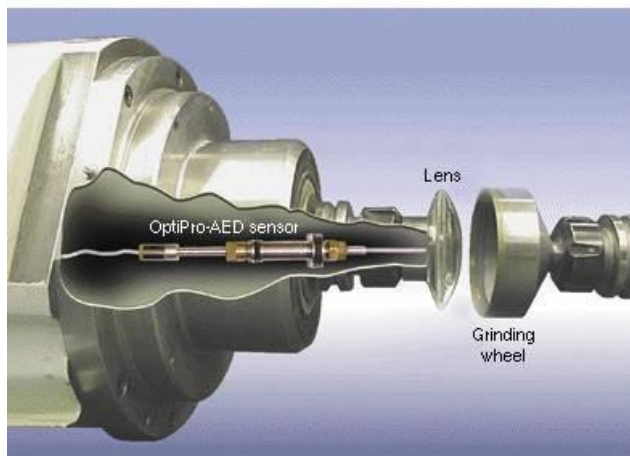


Figure 2. The OptiPro-AED automates the in-feeding rate of a fine-grinding tool. Its acoustic-emission pickup sensor inside the workpiece spindle transmits the signal to a signal processor and computer controller.

Technische Optik 08

11 von 33

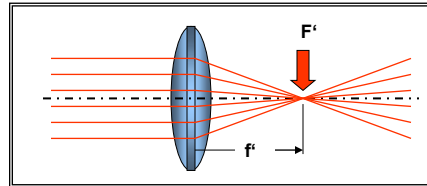
Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Die optische Wirkung einer Linse auf ein Strahlbündel wird deutlich, wenn wir es in einzelne, parallel zueinander verlaufende Strahlen auflösen.

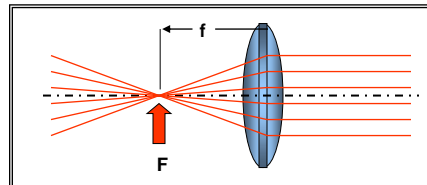
Auf ein parallel zur optischen Achse einfallendes Strahlbündel wirkt eine Sammellinse derartig, dass die Strahlen durch den Brennpunkt F' (rechts von der Linse) geleitet werden.

Brennweite: $f' > 0$



Lichtstrahlen, die aus dem Brennpunkt F (links von der Linse) kommen, werden von einer Sammellinse parallel gerichtet.

Brennweite: $f < 0$



Definition: Eine dünne Linse lenkt als Modell die Strahlen nur in der Linsenmitte ab.-

Erkenntnis: Eine Sammellinse hat einen positiven Wert der Brennweite f' und einen negativen für f .

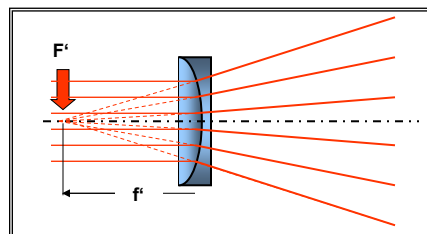
Technische Optik 08

12 von 33

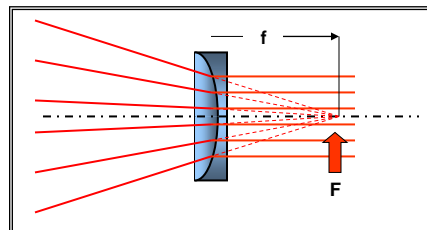
Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Auf parallel zur optischen Achse einfallende Strahlen wirkt eine Zerstreuungslinse derartig, dass die Strahlen aus dem Brennpunkt F' (links von der Linse) zu kommen scheinen.



Lichtstrahlen, die auf den Brennpunkt F (rechts von der Zerstreuungslinse) zulaufen, werden von ihr parallel gerichtet.



Erkenntnis: Eine Zerstreuungslinse hat einen negativen Wert der Brennweite f' und einen positiven Wert für f .

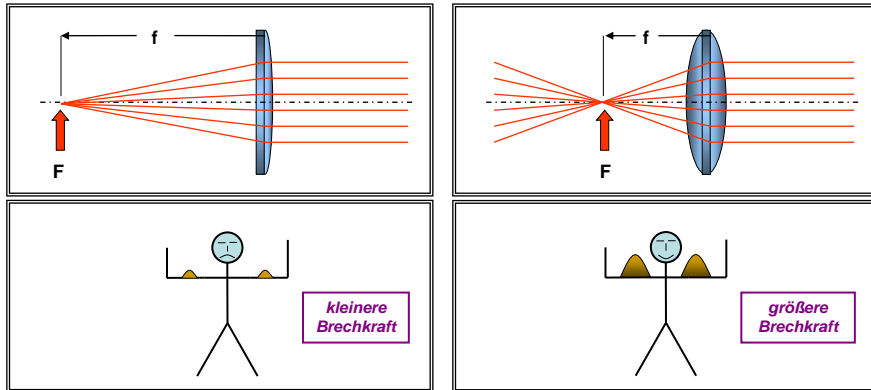
Technische Optik 08

13 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Ein Strahl, der die optische Achse entlang auf eine Linse trifft, wird nicht abgelenkt. Die Ablenkung der anderen Lichtstrahlen wird als Messgröße durch die **Brechkraft** D erfasst: Je größer die Brechkraft, desto stärker die Ablenkung eines bestimmten Strahls beim Durchgang durch die Linse und desto kleiner die Brennweite f : $D = 1/f$.



Auch bei Linsen tritt eine größere Brechkraft gewöhnlich bei stärkerer Wölbung auf.

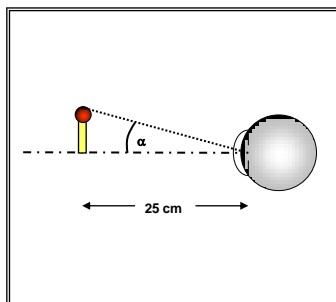
Technische Optik 08

14 von 33

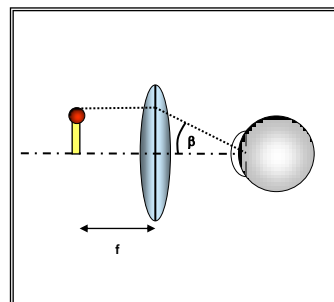
Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Eine Sammellinse kann als Lupe benutzt werden, um einen Gegenstand unter vergrößertem Winkel zu sehen. Als Vergrößerung M einer Lupe bezeichnet man das Verhältnis der Sehwinkel.



Um den Sehwinkel α möglichst groß zu bekommen, sollte das Objekt möglichst dicht vor das Auge genommen werden; aber für Normalsichtige sind Abstände kleiner als 25 cm auf Dauer anstrengend, vielleicht sogar unmöglich.



Eine Sammellinse führt bei gleichem Abstand zu einem größeren Sehwinkel β . Die Strahlen werden zueinander parallel ins Auge gelangen, wenn das Objekt ungefähr im Abstand der Brennweite links von der Linse steht; dadurch scheinen die Strahlen aus einem Objektpunkt parallel ins Auge zu kommen.

Technische Optik 08

15 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Von diesen Eigenschaften dünner Linsen ist Carl Friedrich Gauß (1777 – 1855, Professor für Astronomie in Göttingen) ausgegangen, um Linsen und Linsensysteme mathematisch beschreiben zu können. Daher spricht man von Gaußscher Optik.

Der berühmte französische Forscher Pierre-Simon Laplace (1749 - 1827) wurde gefragt, wen er für den größten Mathematiker Deutschlands halte. Er antwortete: „Johann Friedrich Pfaff!“ (1765 - 1825, Doktorvater von Gauß).

Auf die Frage, was er von Gauß halte, antwortete er: „Oh, Gauß! Das ist der größte Mathematiker der Welt!“



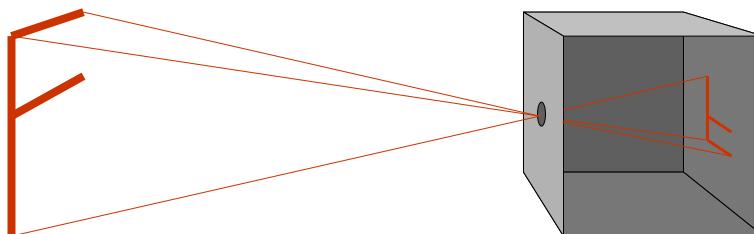
Technische Optik 08

16 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Man kann eine Kamera auch ohne Linsen konstruieren, die „Camera Obscura“ oder Lochkamera. Sie gibt ein perspektivisch richtiges Bild und wurde daher ab dem 15. Jahrhundert von Malern der niederländischen Renaissance (van Eyck) zur Erstellung einer Vorlage für Bilder mit korrekter Perspektive benutzt.



Ein Lichtstrahl, der von einem Punkt des Objekts ausgeht, tritt durch die Öffnung des Gehäuses. Beim Auftreffen auf der Rückwand bildet er einen leuchtenden Fleck. Das Bild ist seitenverkehrt und steht auf dem Kopf.

Um ein scharfes Bild zu bekommen, muss das Loch sehr klein sein; dann wird das Bild sehr dunkel und wird außerdem durch Beugung unscharf! Wenn durch ein geschicktes optisches Verfahren für jeden Punkt die übertragene Anzahl von Strahlen vergrößert werden kann, wird das Bild heller.

Technische Optik 08

17 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Manchmal findet man eine „Camera Obscura“ oder Lochkamera, wo man sie gar nicht erwartet, so wie hier in Form einer Spaghetti-Schöpfkelle, die Bilder der Sonne herstellt!



Zur Erklärung: Die Aufnahme entstand während einer Sonnenfinsternis .

Technische Optik 08

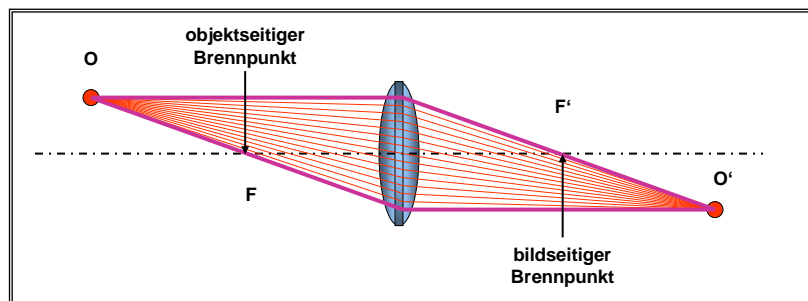
18 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Linsen übertragen mehr Lichtstrahlen als ein kleines Loch.

Eine Sammellinse hat (im Idealfall!) die Fähigkeit, ein **reelles Bild** zu erzeugen, wenn der Objektpunkt außerhalb der Brennweite (= jenseits von F) liegt. Dabei werden alle Strahlen, die den Objektpunkt O in verschiedene Richtungen verlassen und durch die Linse gehen, zu einem Bildpunkt O' geleitet.



Um die Lage von O' zu konstruieren, brauchen wir nicht alle Strahlen zu verfolgen, sondern nur zwei. Wo diese beiden sich schneiden, liegt dann O' .-

Wir nehmen dafür die Strahlen, deren Ausbreitung wir von der Fokussierung her kennen (lila gezeichnet)! Sie werden in der Linse scheinbar nur einmal abgelenkt.

Technische Optik 08

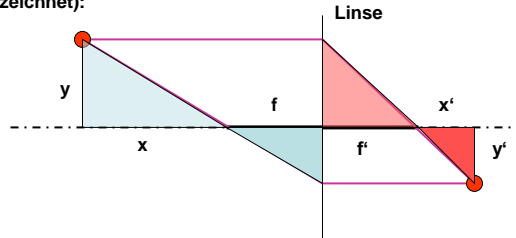
19 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Herleitung einer Abbildungsgleichung für eine Sammellinse: Erste Möglichkeit (von der Linse ist nur die wichtige Funktionsebene gezeichnet):

Wir nennen den Abstand der Brennpunkte F und F' von der Linsenmitte die Brennweiten f und f' ; sie sind gleich groß ($f = f'$). Nun suchen wir bei der Ausbreitung der soeben lila gezeichneten Strahlen nach ähnlichen Dreiecken.



$$x \cdot x' = f^2$$

Dies ist die Newton'sche Form der Abbildungsgleichung.

Sie hat den Nachteil, dass man die Lage der Brennpunkte kennen muss, um sie anwenden zu können.

Links von der Linse:

$$\frac{y'}{f} = \frac{y}{x}$$

oder:

$$\frac{y'}{y} = \frac{f}{x}$$

Rechts von der Linse:

$$\frac{y'}{x'} = \frac{y}{f'}$$

$$\frac{y'}{y} = \frac{x'}{f'}$$

$$\frac{f}{x} = \frac{x'}{f'}$$

Technische Optik 08

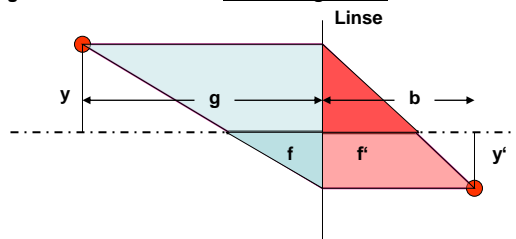
20 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Herleitung einer Abbildungsgleichung für eine Sammellinse: Zweite Möglichkeit

Es gibt eine andere Art, die Seiten ähnlicher Dreiecke miteinander ins Verhältnis zu setzen. Dabei berücksichtigen wir, dass sich für die Gegenstandsweite $g = x + f$ und für die Bildweite $b = x' + f'$ ergeben.



$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

Dies ist die bekanntere Form der Abbildungsgleichung.

Links von der Linse:

$$\frac{y + y'}{g} = \frac{y'}{f}$$

Rechts von der Linse:

$$\frac{y + y'}{b} = \frac{y}{f'}$$

Addition:
$$\frac{y + y'}{g} + \frac{y + y'}{b} = \frac{y + y'}{f}$$

Das können wir durch $(y + y')$ teilen.

Technische Optik 08

21 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Beispiel:

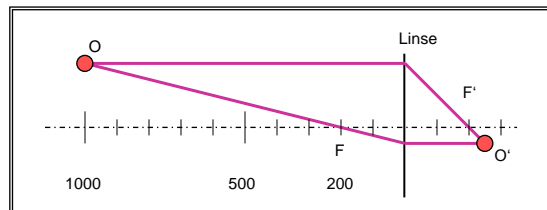
Eine dünne Linse hat eine Brennweite von $f = 200$ mm.

Ein Objekt wird im Abstand $g = 1000$ mm links von einer dünnen Linse aufgestellt. Wo muss der Schirm platziert werden, um ein scharfes Bild aufzufangen? (Für die Konstruktion des Abbildungs-Strahlengangs ist ein Objektpunkt O erforderlich, der nicht auf der optischen Achse liegt.)

Antwort:
$$\frac{1}{b} = \frac{1}{f'} - \frac{1}{g} = \frac{1}{200} - \frac{1}{1000} = \frac{1}{250}$$

Die Bildweite beträgt 250 mm.
Wichtig: $b > f'$ (immer!!!).

Das Bild ist $\frac{1}{4}$ so weit von der Achse und von der Linse entfernt wie das Objekt.



Das Bild zeigt eine Vertauschung von oben mit unten und rechts mit links. Die Bildgröße ist durch den Abstand von O' von der Achse gegeben: $\frac{1}{4}$ von der Objektgröße.

Technische Optik 08

22 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Beispiel:

Vergleichen Sie die Abbildung mit zwei Linsen mit unterschiedlichen Brennweiten f_1' und f_2' , aber gleicher Gegenstandsweite g . In welchem Größenverhältnis stehen die Bilder?

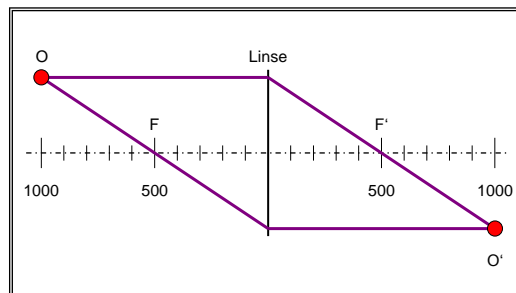
$$g = -1000 \quad f_1' = 200 \quad f_2' = 500$$

Antwort:

Für die Bildgröße bei einer Brennweite von 200 hatten wir $\frac{1}{4}$ von der Objektgröße gefunden. Für die Bildweite b_2 bei einer Brennweite von 500 erhalten wir 1000:

$$\frac{1}{b_2} = \frac{1}{f_2'} + \frac{1}{g} = \frac{1}{500} - \frac{1}{1000} = \frac{1}{1000}$$

Wenn die Bildweite dieselbe Größe hat wie die Gegenstandsweite, sind Bild und Objekt gleich groß. Daher ist das Bild jetzt viermal so groß wie für die kleinere Brennweite.



Mit einer größeren Brennweite werden größere Bilder erzielt!

Technische Optik 08

23 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Beispiel:

Wenn für ein Linsensystem die Brennweite f' verstellt werden kann, spricht man von einem **Zoom-Objektiv**.

Das gezeigte Zoom-Objektiv (was für ein wundervolles deutsches Wort!!!) kann von $f_1' = 28$ auf $f_2' = 125$ mm umgestellt werden. Wie groß sind die Bilder einer Blüte (Durchmesser 30 mm) im Abstand 1 m?



Die Anwendung der Abbildungsgleichung liefert die Bildweiten:

$$b_1' = 28,8 \text{ mm}$$

$$b_2' = 142,9 \text{ mm}$$

Weil $B/G = b/g$ ist können die Bildgrößen B_1 und B_2 leicht berechnet werden:

$$B_1 = 0,86 \text{ mm}$$

$$B_2 = 4,29 \text{ mm}$$

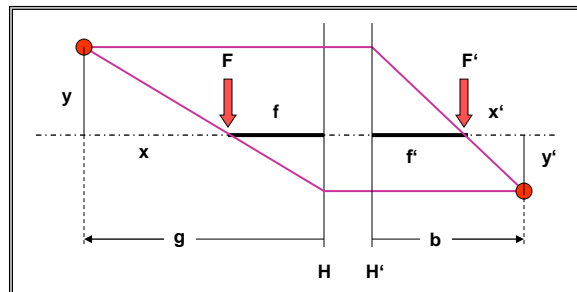
Technische Optik 08

24 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Die Abbildungsgleichung wurde hergeleitet unter der Annahme, dass die Lichtstrahlen in der Linse nur an einer Ebene ihre Ausbreitungsrichtung ändern. Das ist für ein Linsensystem oder eine Linse mit großer Mittendicke sicher falsch.



Regel: Die Abbildungsgleichung gilt auch dann; nur müssen Gegenstands- (g) und Bildweite (b) nun von der zugehörigen Hauptebene H oder H' aus gemessen werden.-

Regel: Lichtstrahlen aus dem Brennpunkt F werden an der ersten Hauptebe

Den Abstand zwischen den beiden Hauptebenen einer dicken Linse nennt man „hiatus“. In der Näherung einer dünnen Linse verschmelzen H und H' miteinander.

Technische Optik 08

25 von 33

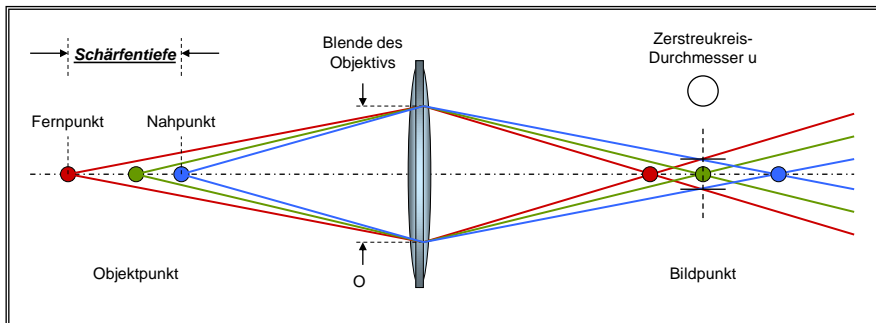
Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Ein Bild ist selbst bei optimaler Entfernungseinstellung (b und g) nicht beliebig scharf. Bei Abbildung eines axialen Objektpunktes wird das Bild noch als hinreichend scharf empfunden, wenn die tatsächliche Entfernung zwischen einem Fernpunkt F_p und einem Nahpunkt N_p liegt.

Dies wird **Schärfentiefe** bezeichnet.

Wie hängen Lage des Fernpunkts F_p und des Nahpunkts N_p , Schärfentiefe δg , Bildweite b und Zerstreuungskreis-Durchmesser u des noch als hinreichend scharf empfundenen Bildpunktes miteinander zusammen?



Technische Optik 08

26 von 33

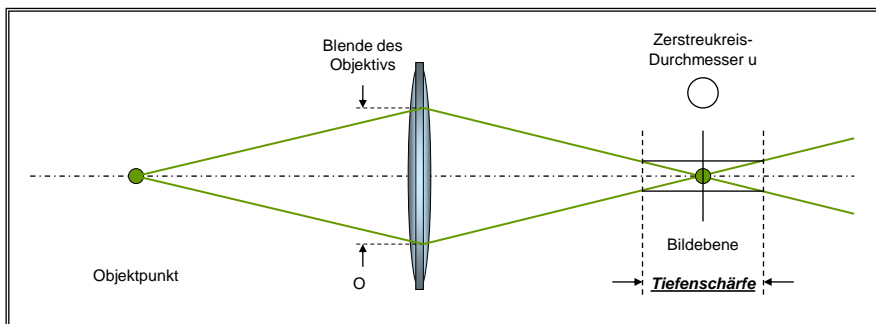
Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Ein Bild wird noch als hinreichend scharf empfunden, die Bildebene in einem Bereich um den besten axialen Punkt herum liegt.

Dies wird **Tiefenschärfe** bezeichnet.

Wie hängen Lage des Fernpunkts F_p und des Nahpunkts N_p , Schärfentiefe δg , Bildweite b und Zerstreuungskreis-Durchmesser u des noch als hinreichend scharf empfundenen Bildpunktes miteinander zusammen?



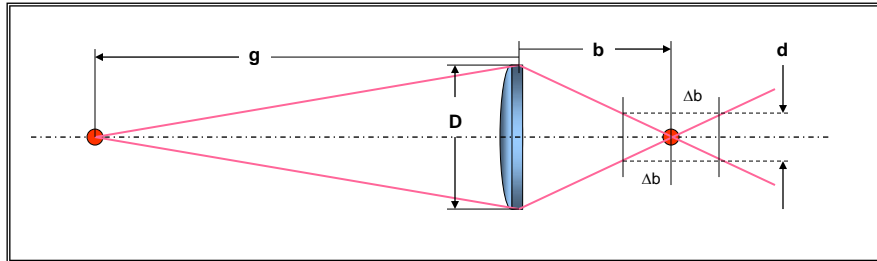
Technische Optik 08

27 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Beispiel: Wie groß ist die Tiefenschärfe bei $d = 30 \mu\text{m}$, Bildweite $b = 50 \text{ mm}$ und Blendenzahl $k = 8$?



Rechts von der Linse gibt es zwei ähnliche Dreiecke: $\frac{d}{\Delta b} = \frac{D}{b}$

Blendenzahl: $k = \frac{b}{D}$ (je kleiner D, desto größer k)

Tiefenschärfe: $2 * \Delta b = 2 * d * \frac{b}{D} = 2 * d * k = 2 * 30 \mu\text{m} * 8 = 0,48 \text{ mm}$

Technische Optik 08

28 von 33

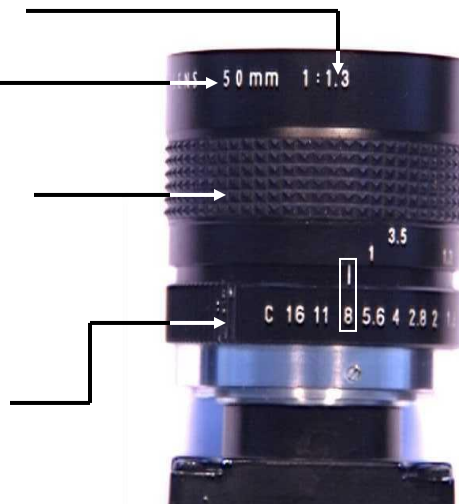
Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Das Bild zeigt die Kennzeichnung eines Kamera-Objektivs: Blendenzahl k für die maximale Lichtstärke und Brennweite.

Ring zur axialen Verschiebung der Linse; weil dadurch die Bildweite b verändert wird und das die Bildschärfe (Brennpunkt auf Englisch: "focus") beeinflusst, nennt man das die „Fokussierung“.

Blendenring zur Veränderung von D, dem Lichtbündel-Durchmesser an der Linse (C: "closed"; 8: $f' / D = k = 8$) durch eine variable Blende (z. B. Irisblende).



Technische Optik 08

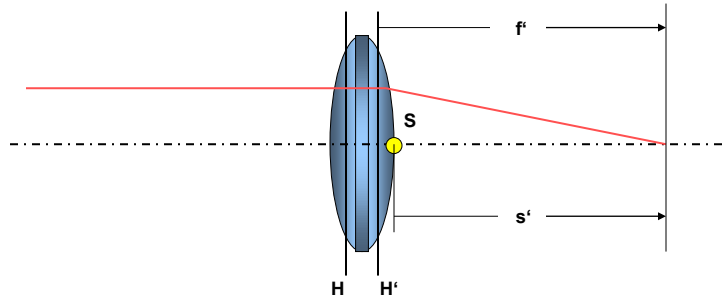
29 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Im Gegensatz zu einer dünnen Linse müssen wir zwischen **Brennweite f'** und **Schnittweite s'** für einen achsparallel einfallenden Strahl unterscheiden.

- ➔ Die Brennweite f' wird von der Hauptebene H' aus gemessen.
- ➔ Die Schnittweite s' wird vom Scheitelpunkt S aus gemessen.



Wo die optische Achse eine Oberfläche durchdringt, liegt der Scheitelpunkt S dieser Oberfläche. Eine Oberfläche hat nur einen Scheitelpunkt.

Technische Optik 08

30 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Beispiele

1. Eine Linse mit Brennweite $f' = 100 \text{ mm}$ soll für eine Abbildung eingesetzt werden, bei der ein Maßstab $M = -0.1$ auftritt.

$$M = \frac{b}{g} = -0.1 \Rightarrow g = -10 * b \Rightarrow \frac{1}{f'} = \frac{1}{b} - \frac{1}{g} = \frac{1}{b} - \frac{1}{-10 * b} = \frac{11}{10 * b} = 0.01$$

$$b = 110 \text{ mm}$$

$$g = -1100 \text{ mm}$$

2. Begründen Sie die Erfahrung, dass die richtige Entfernung bei der Abbildung leichter mit geöffneter Blende (kleine Blendenzahl k , richtige Belichtung bei geringer Helligkeit) eingestellt werden kann.

Bei geöffneter Blende mit kleiner Blendenzahl k ist der Durchmesser D des Strahlbündels an der Linse größer, somit die Tiefenschärfe δb geringer; die subjektiv empfundene Bildschärfe wird über einen kleineren Bereich entlang der optischen Achse als gut bewertet. Dieser Bereich ist also besser zu finden.

Technische Optik 08

31 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Beispiele

3. Nennen Sie einen Grund, warum es wichtig sein soll, sowohl Schnittweite s' als auch Brennweite f' für eine Abbildung zu kennen.

Bei bekannter Brennweite können Bild- und Gegenstandsweite für eine gegebene Abbildung eingestellt werden. Die Lage der Hauptebene, von der aus die Bildweite zu messen ist, ist jedoch unbekannt; daher ist es vorteilhaft, mit Kenntnis der Differenz von Schnitt- und Brennweite Abstandsmessungen auf den Scheitelpunkt zu beziehen.

4. Ein Lichtstrahl fällt unter 45 Grad auf die Grenzfläche zweier durchsichtiger Materialien: $n = 1.5$, $n' = 1$. Was geschieht?

Wir wenden das Snelliussche Brechungsgesetz an:

$$\sin(\varepsilon') = 1.5 * \sin(45^\circ) = 1.06$$

Weil der Wert der Sinusfunktion des Brechungswinkels ε' nach dem Brechungsgesetz größer als 1 ist, gibt es keinen reellwertigen Brechungswinkel ε' . Es findet Totalreflexion statt.

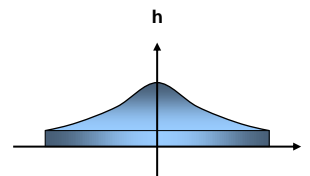
Technische Optik 08

32 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Für einige Aufgaben werden auch asphärische Linsen verwendet (z. B. in den Leuchten des TOP-Labors als Kondensor-Linse). Zur Beschreibung der Oberflächenkontur wird die Höhe h als Funktion des Achsabstandes r durch folgende Formel angegeben:



$$h(r) = \frac{r^2}{R * \left(1 + \sqrt{1 - (1+k) * \left(\frac{r}{R} \right)^2} \right)} + A_4 * r^4 + A_6 * r^6 + \dots$$

k = „konische Konstante“,
 R = Scheitelradius.

Quelle: Wikipedia

Technische Optik 08

33 von 33

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel



1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
3.1 Brechung	3.2 Paraxial	3.3 Meridional	3.4 Achromat	3.5 Zweilinsige Systeme

Ende des ersten Teils