

Technische Optik 11

1 von 28

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

Schon Isaac Newton wusste:

Bei Verwendung von einer Linse wird immer ein Farbfehler entstehen.-

Was er noch nicht wusste:

Durch Einsatz von zwei Linsen kann die Größe dieses Fehlers stark verkleinert werden.

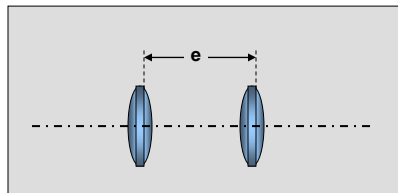
Technische Optik 11

2 von 28

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

Wir betrachten zunächst ein System aus zwei Linsen von gleichem Material (d. h.: möglicherweise verschiedene Brennweiten wegen unterschiedlicher Oberflächen). Daher nehmen wir für die erste Linse c_1 und c_2 sowie n , für die zweite Linse c_3 und c_4 sowie als Brechungsindex ebenfalls n .



Wie groß ist die Variation der Brennweite dieses Zweilinsers mit der Wellenlänge?

Für die Antwort auf diese Frage berechnen wir die Ableitung der gesamten Brennweite nach der Wellenlänge (nur der Brechungsindex hängt von λ ab, aber nicht die Krümmungen).

Technische Optik 11

3 von 28

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 paraxiale Brechkraft $1/f'$ (bei gegebener Brennweite f') einer dünnen Linse ($d = 0$; Krümmungen c_1 und c_2) hatten wir berechnet:

$$\frac{1}{f'} = (c_1 - c_2) * (n - 1)$$

In paraxialer Näherung kann man aus zwei dünne Linsen (Brennweiten f_1 und f_2) im Abstand e ein System mit einer Gesamtbrennweite f'_{gesamt} bilden. Die Brechkraft (Kehrwert der Brennweite) des gesamten Systems beträgt:

$$\frac{1}{f'_{\text{gesamt}}} = \frac{1}{f_1'} + \frac{1}{f_2'} - \frac{e}{f_1' * f_2'}$$

Eingesetzt erhalten wir für die Brechkraft des Systems (Kehrwert der Brennweite):

$$\frac{1}{f'_{\text{gesamt}}} = (c_1 - c_2) * (n - 1) + (c_3 - c_4) * (n - 1) - e * (c_1 - c_2) * (c_3 - c_4) * (n - 1)^2$$

Technische Optik 11

4 von 28

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 Ableitungen der drei Summanden rechts vom Gleichheitszeichen nach der Wellenlänge λ bekommen wir (die Brechzahl n ist von λ abhängig):

$$\left[\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{f_1'} \right) = \frac{dn}{d\lambda} * (c_1 - c_2) \right] \quad \left[\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{f_2'} \right) = \frac{dn}{d\lambda} * (c_3 - c_4) \right] \quad \left[\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{e}{f_1' * f_2'} \right) = 2e * (n - 1) * (c_1 - c_2) * (c_3 - c_4) * \frac{dn}{d\lambda} \right]$$

Jeder Summand besitzt denselben Faktor $dn/d\lambda$. Wenn dieses System einen verschwindenden Farbfehler haben soll, muss die Brechkraft des Gesamtsystems von der Wellenlänge unabhängig sein, und wir können gemeinsame Faktoren eliminieren:

$$\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{f'_{\text{gesamt}}} \right) = 0 \quad \Rightarrow \quad 2e * (n - 1) * (c_1 - c_2) * (c_3 - c_4) = (c_1 - c_2) + (c_3 - c_4)$$

Das können wir nach dem Abstand e der beiden Linsen auflösen:

$$e = \frac{1}{2} * \left(\frac{1}{(n - 1) * (c_1 - c_2)} + \frac{1}{(n - 1) * (c_3 - c_4)} \right) = \frac{1}{2} * (f_1' + f_2')$$

Ergebnis: Die Brennweite eines zweilinsigen Systems aus Linsen gleichen Glasmaterials ist genau dann von der Wellenlänge des Lichts unabhängig, wenn der Abstand e gleich dem arithmetischen Mittel der Brennweiten f_1' und f_2' ist.

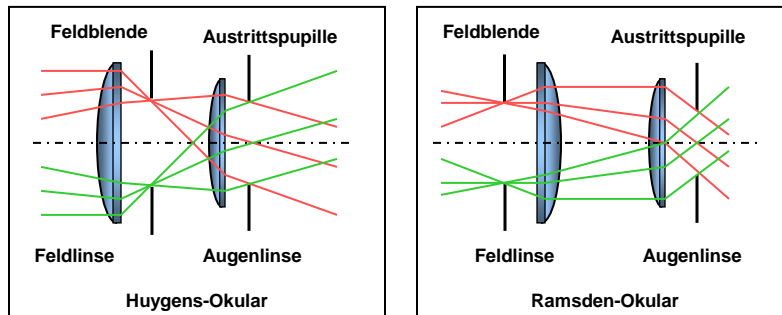
Technische Optik 11

5 von 28

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

Diese Erkenntnis wird in zwei Typen von Okularen für Mikroskope und Fernrohre angewendet, dem **Huygens-Okular** (Christiaan Huygens, 1629 - 1695) und dem **Ramsden-Okular** (Jesse Ramsden, 1735 - 1800). Ein Okular ist eine Gruppe von Linsen, die wie mit einer Lupe das vergrößerte Bild vom Objektiv ansehen lässt. Beide erfüllen die soeben berechnete Bedingung für den Linsenabstand e .



An der Position der Feldblende entsteht das reelle Bild eines Objektpunktes. Dort können "reticles" (Strichplatten) eingesetzt werden, um Größen-Messungen an beobachteten Objekten durchzuführen. Diese Bilder werden durch die Augenlinse vergrößert betrachtet. Das entspannte Auge braucht parallel einfallende Strahlen.

Technische Optik 11

6 von 28

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

Der Strahldurchgang lässt erkennen, dass diese Okulare kein reelles Bild erzeugen (Strahlen aus einem Objektpunkt werden in einen Bildpunkt zusammen geleitet). Okulare erzeugen ein virtuelles Bild (Strahlen aus einem Objektpunkt werden parallel gerichtet). Warum unterschiedliche Linsenformen (bei plankonvexer Form gekrümmte Seite wo?) die Eigenschaft beeinflussen, kann man in der paraxialen Näherung nicht verstehen.

Simple Huygenian and Ramsden Eyepieces

Die Abbildung zeigt, dass auch für heutige Mikroskope die soeben hergeleiteten Entwürfe nach Huygens oder Ramsden aus dem 17. und 18. Jahrhundert noch verwendet werden.

Bildquelle:

www.micro.magnet.fsu.edu


Technische Optik 11

7 von 28

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

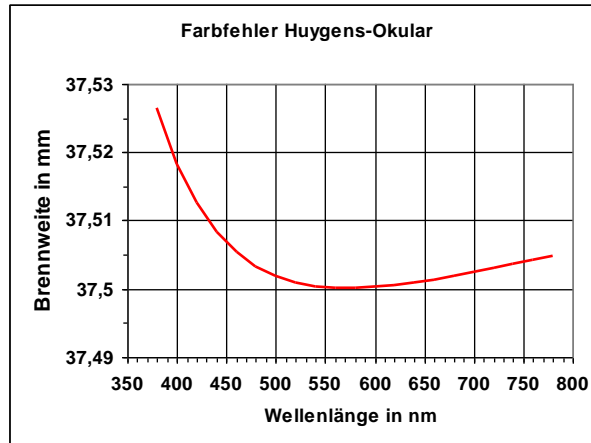
Beispiel: Berechnen Sie mit der Näherung der dünnen Linse den Farbfehler der Brennweite eines Huygens-Okulars aus zwei Linsen gleichen Glasmaterials (BK 7). Der Brechungsindex als Funktion der Wellenlänge ist mit den Konstanten aus „Linsen (B)“ zu berechnen. Die Brennweiten der Linsen sollen bei der d-Linie 50 und 30 mm, der Abstand $e = 40$ mm betragen.

Antwort:

$$\frac{1}{f_{\text{gesamt}}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{e}{f_1 * f_2}$$

Wir erkennen einen sehr kleinen verbleibenden Farbfehler. Die Brennweite variiert um weniger als 0,1 % für die sichtbaren Wellenlängen (außer am kurzwelligen Ende des Spektrums).-

Ist die Qualität wirklich so gut?



Technische Optik 11

8 von 28

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: Berechnen Sie den Farbfehler der Schnittweite s' in paraxialer Näherung.

Antwort: Wir wenden paraxiale Strahldurchrechnung an. Die erste Linse ist plankonvex und besitzt als erste Oberfläche eine Krümmung $c_1 = 0,0387$ ($c_2 = 0$). Das sorgt bei Verwendung von BK 7 bei der d-Linie ($\lambda = 588$ nm) für $f_1' = 50$ mm. Genauso kümmern wir uns um die zweite Linse: $c_3 = 0,0645$ ($c_4 = 0$), was zu $f_2' = 30$ mm führt. Die Tabelle bekommt folgende Form (vier Oberflächen!):

c	0,0387		0		0,0645		0	
d	5		40		2			
n	1,51680		1		1,51680		1	
-D	-0,02000		0		-0,03333		0	
σ	0	-0,013185		-0,02		-0,016132		-0,024469
h	1		0,9340712		0,1340648		0,1018008	
$n \cdot \sigma$	0	-0,02		-0,02		-0,024469		-0,024469

$$f' = -\frac{h}{\sigma} = \frac{1}{0,024469} = 40,868$$

$$s' = -\frac{h'}{\sigma'} = \frac{0,1018008}{0,024460} = 4,160$$

Technische Optik 11

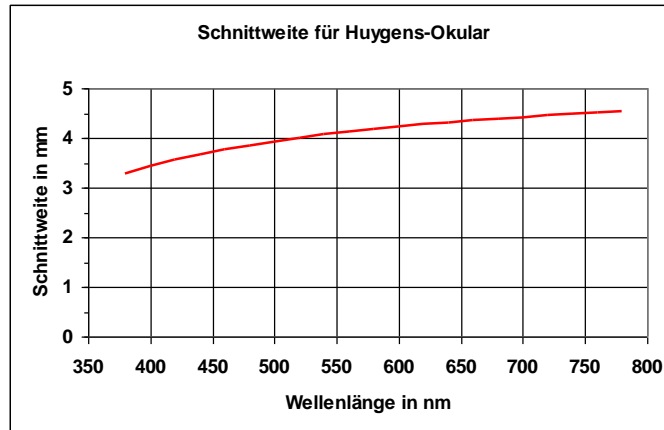
9 von 28

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

Wir stellen die berechnete Schnittweite als Funktion der Wellenlänge dar.

Während der Farbfehler der Brennweite nicht mehr bedeutend ist, ändert sich die Schnittweite um mehr als 1 mm. Das führt zu einem Farbsaum.



In einem Okular, mit dem gute Beobachtungsqualität erzeugt werden soll, kann dieser Farbfehler durch **Achromatisierung** der Augenlinse korrigiert werden.

Technische Optik 11

10 von 28

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 die Verwendung **gleicher** Glasmaterialien in einem Zweilinsler bei einem bestimmten Linsenabstand e wird der Farbfehler klein.

Achromat: Alternativ können wir versuchen, einen ähnlichen Effekt durch **zwei dünne, dicht zusammen gestellte Linsen aus verschiedenem Glasmaterial** ($e = 0$; n_1, n_2 ; $v_{d,1}, v_{d,2}$) zu erreichen.

$$\frac{1}{f_{\text{gesamt}}} = (c_1 - c_2) * (n_1 - 1) + (c_3 - c_4) * (n_2 - 1)$$

$$\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{f_{\text{gesamt}}} \right) = (c_1 - c_2) * \frac{dn_1}{d\lambda} + (c_3 - c_4) * \frac{dn_2}{d\lambda}$$

Dieser Ausdruck muss bei Abwesenheit von Farbfehlern gleich Null sein. Wir verwenden Abbessche Zahl v_d :

$$v_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad n_d = n(588 \text{ nm}); n_F = n(486 \text{ nm}); n_C = n(656 \text{ nm}).$$

Die Abbessche Zahl wird größer sein, wenn die Dispersion kleiner ist. Weil im Nenner eine Differenz aus Brechzahlen bei verschiedenen Wellenlängen steht, wird v_d kleiner, wenn die Dispersion (= Stärke der Abhängigkeit der Brechzahl von der Wellenlänge) größer wird.

Technische Optik 11

11 von 28

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

Näherungsweise können wir ersetzen:

$$dn = n_F - n_C$$

$$\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{f_{\text{gesamt}}} \right) = (c_1 - c_2) * \frac{dn_1}{d\lambda} + (c_3 - c_4) * \frac{dn_2}{d\lambda}$$

$$= \frac{1}{d\lambda} * \left[\frac{(c_1 - c_2) * (n_{d,1} - 1)}{v_{d,1}} + \frac{(c_3 - c_4) * (n_{d,2} - 1)}{v_{d,2}} \right]$$

In der eckigen Klammer steht die Summe aus zwei Brüchen; in den beiden Zählern stehen Brechkräfte, d. h. die Kehrwerte der Brennweiten.

Damit der Farbfehler verschwindet, muss die eckige Klammer gleich Null sein:

$$\frac{1/f_1'}{v_{d,1}} + \frac{1/f_2'}{v_{d,2}} = 0$$

Da die Abbeschen Zahlen alle positiv sind, ist diese Gleichung nur zu erfüllen, wenn die eine Linse eine positive ($f' > 0$) und die andere eine negative Brennweite ($f' < 0$) hat und die Brennweiten mit den Abbeschen Zahlen zusammen passen.

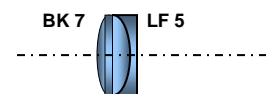
Technische Optik 11

12 von 28

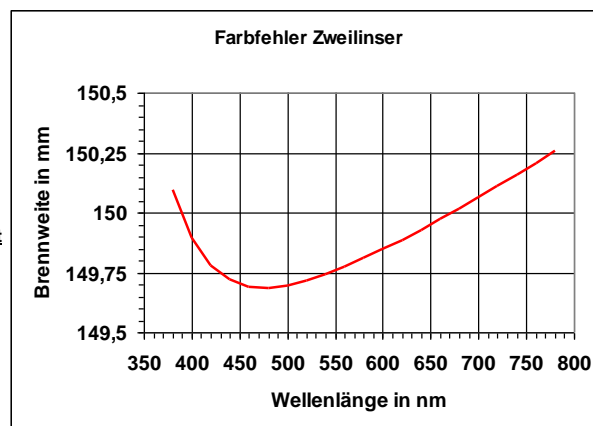
Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

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

Wir nehmen eine plankonkave Linse aus LF 5; dann wird $c_3 = -0,020092$, $c_4 = 0$. Wenn wir die konvexe Linse aus BK 7 „dicht“ herstellen wollen, ist es sinnvoll die Krümmungen an der Kontaktfläche anzupassen: $c_2 = -0,020092$; das ergibt $c_1 = 0,015412$. Damit können wir eine Berechnung in paraxialer Näherung mit einer Tabellenkalkulation (MS-Excel) durchführen (Modell: dünne Linse).



Das Ergebnis zeigt einen sehr kleinen Farbfehler für die Brennweite. Der Verlauf ist nicht monoton zunehmend, sondern er zeigt ein Minimum mit einer für sichtbares Licht nur noch sehr geringen Variation (0,3 %).



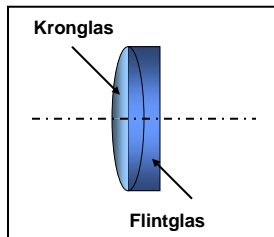
Technische Optik 11

13 von 28

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 Sammellinse wird sehr oft als bikonvexe Linse ausgeführt, die Zerstreuungslinse als plankonkave Linse. Wenn dann die Krümmungen an der Berührungsfläche gleich gestaltet werden, entsteht ein verkittetes Linsensystem dieser Art:



In einigen optischen Entwürfen (z. B. hier im Kellner-Okular) wird dies zur weiteren Verringerung des Farbfehlers benutzt.

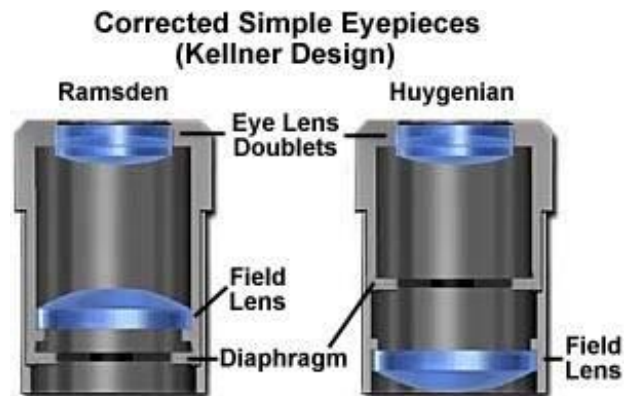


Figure 3

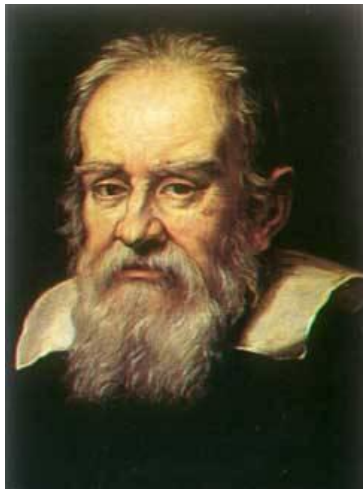
Technische Optik 11

14 von 28

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

Es gibt zwei historisch sehr wichtige Systeme aus zwei Linsen, das Galilei-Teleskop (Galileo Galilei, 1564 - 1642) und das Kepler-Teleskop (Johannes Kepler, 1571 - 1630).



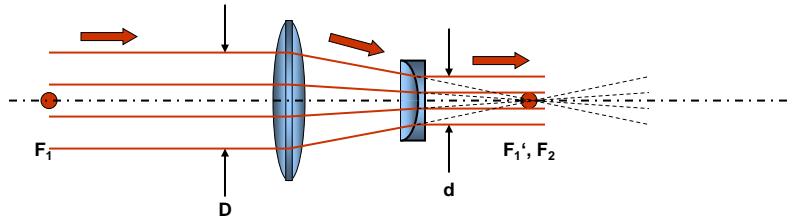
Technische Optik 11

15 von 28

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

1.) Das Galilei-Teleskop (erfunden um 1608 durch Hans Lipperhey, einen niederländischen Brillenmacher, der von 1570 - 1619 lebte)



Es besteht aus einer Sammel- ($f_1' > 0$) und einer Zerstreuungslinse ($f_2' < 0$). Sie stehen im Abstand der Summe der beiden Brennweiten. Die Pfeile deuten an: Ein „oben“ einfallender Strahl wird „oben“ beobachtet.

Wirkung: Ein parallel einfallendes Lichtstrahlbündel (D) wird in ein paralleles Bündel mit kleinerem Querschnitt (d) umgewandelt.

Wir erinnern uns: Das entspannte Auge braucht parallele Strahlen, um das reelle Bild eines entfernten Punktes auf der Netzhaut zu erzeugen.

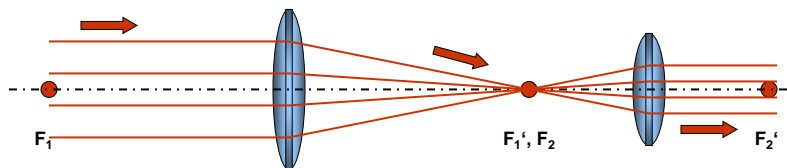
Technische Optik 11

16 von 28

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

2.) Das Kepler-Teleskop (erfunden 1611 durch Johannes Kepler)



Es besteht aus zwei Sammellinsen ($f_1' > 0, f_2' > 0$). Sie stehen im Abstand der Summe der beiden Brennweiten. In dieser Skizze ist der Deutlichkeit wegen $f_1' = 2 \cdot f_2'$ gewählt.

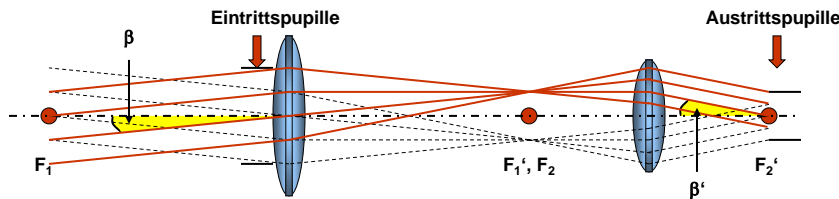
Wirkung: Ein parallel einfallendes Lichtstrahlbündel (D) wird in ein paralleles Bündel mit kleinerem Querschnitt (d) umgewandelt. Dabei findet eine Vertauschung von oben und unten sowie rechts und links statt (anders als beim Galilei-Teleskop).

Technische Optik 11

17 von 28

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

Erläuterung der vergrößernden Wirkung des Kepler-Teleskops:

Ein unendlich weit entfernter Objektpunkt, der nicht auf der optischen Achse liegt, sendet Strahlen aus, die parallel zueinander verlaufen, aber nicht parallel zur optischen Achse. Ein einfallendes paralleles Strahlbündel wird beim Brennpunkt F_1' gebündelt. Die zweite Linse macht aus diesen Strahlen ein Bündel, dessen Strahlen wieder parallel zueinander verlaufen. Der Winkel β' ist um das Verhältnis aus den Brennweiten f_1' und f_2' vergrößert gegenüber dem Einfallswinkel β .

Diejenigen Strahlen, die durch die Eintrittspupille an Linse #1 fallen, kommen durch die Austrittspupille mit verkleinertem Querschnitt. Der Faktor der Querschnittsverkleinerung ist gleich dem der Winkelvergrößerung.

Am Ort der Austrittspupille sollte die Eintrittspupille des Auges (= Iris) liegen. Dann gelangen alle Strahlen, die durch die Eintrittspupille gelangen, auf die Netzhaut.

Technische Optik 11

18 von 28

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 Vergleich zeigt den Unterschied in der praktischen Anwendung. Aufbau: $f_1' = 1000 \text{ mm}$; $f_2' = -50 \text{ mm}$ für Galilei-Teleskop und $f_2' = +50 \text{ mm}$ für Kepler-Teleskop. Beide Linsen plankonvex, plane Seite nach innen. Die rechte Aufnahme wurde weniger beschnitten als die linke (englisch: "cropped").



Mit dem Galilei-Teleskop wird bei kleinen Abständen von der optischen Achse das Bild bereits unscharf und dunkel. Die bessere optische Qualität des Kepler-Teleskops zeigt sich durch verringerte Vignettierung (= kleinerer Lichtverlust für achsferne Punkte) und ein schärferes Bild.

Technische Optik 11

19 von 28

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 optische Qualitätskontrolle sind optische Messverfahren nötig. Die Messung der Größe geschieht oft mit einer digitalen Kamera mit programm-gesteuerter Auswertung.

Damit keine perspektivischen Fehler durch das abbildende Linsensystem entstehen, verwendet man gern telezentrische Linsen. Angestrebt wird gleiche Bildgröße für geringe Änderungen des Objektstandes.

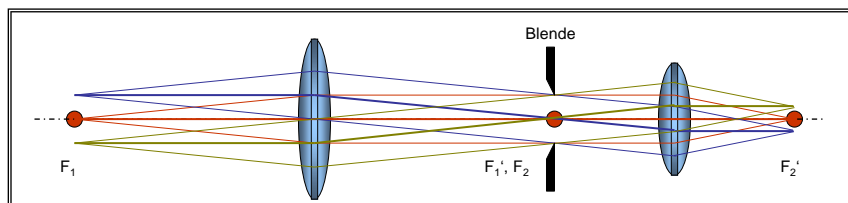
Technische Optik 11

20 von 28

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 mit dem Kepler-Teleskop auch reelle Bilder erzeugen:



Ein Objektpunkt, der im Abstand der Brennweite f_1 links von der ersten Linse liegt, sendet ein Bündel aus, das an der Position F_1' , F_2 aus parallelen Strahlen besteht. Diese werden im Abstand der Brennweite f_2' hinter der zweiten Linse gebündelt; dort entsteht also das Bild. Die Abbildung zeigt drei Punkte mit jeweils drei Strahlen.

Wenn an der Position F_1' , F_2 eine Blende eingeführt wird, werden nur die im gezeigten Winkelbereich liegenden Strahlen übertragen, weiter außen liegende blockiert.

Die dick gezeichneten Strahlen werden als Hauptstrahlen ("chief rays"), die dünnen als Randstrahlen ("marginal rays") bezeichnet. Eine kleine Verschiebung der Objektpunkte nach rechts oder links lässt die Bildgröße unverändert (es wird nur unscharf): Wir bekommen eine telezentrische Abbildung.

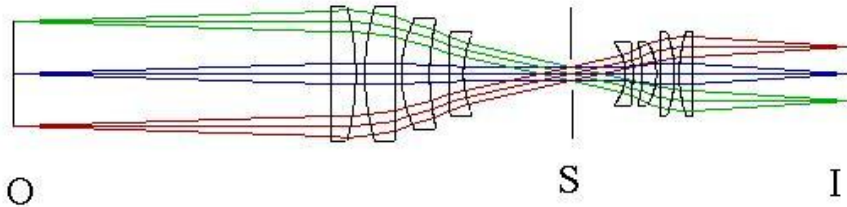
Technische Optik 11

21 von 28

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

Zur Beseitigung von Abbildungsfehlern werden anstatt von Einzellinsen meistens Systeme aus verschieden geformten Linsen verwendet. Das Merkmal eines telezentrischen Objektivs ist der Brennpunkt an der Stelle der Blende (S), in dem sich Strahlen schneiden, die zunächst parallel zueinander sind (auch wenn sie nicht parallel zur optischen Achse verlaufen). Nur diejenigen Strahlen, die durch die Blende hindurch gehen, können im Bild zur Helligkeit beitragen.



www.opto-engineering.com

Wichtiger Nachteil: Der Durchmesser der Linsen links von der Blende muss größer sein als das Objekt. Es ist also schwierig, den Kölner Dom (160 m) mit einem derartigen System aufzunehmen.

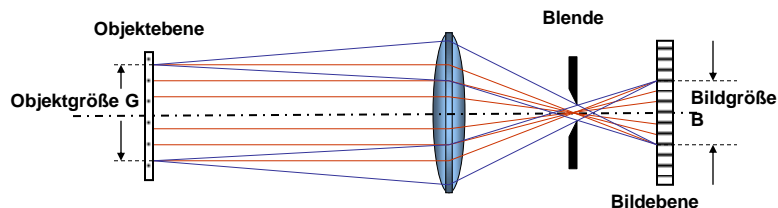
Technische Optik 11

22 von 28

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

Es gibt Linsen, in denen eine **objektseitige Telezentrie** vorliegt. Sie haben eine Blende zwischen Linse und Bildebene an der Stelle des Linsen-Brennpunkts F' .

**Vorteil:**

Die Objektebene kann - ohne die Bildgröße zu ändern - verschoben werden.

Nachteil:

Bei fehlerhafter Position der Bildebene (ungenauere Entfernungseinstellung) ändert sich die Größe des Bildes!

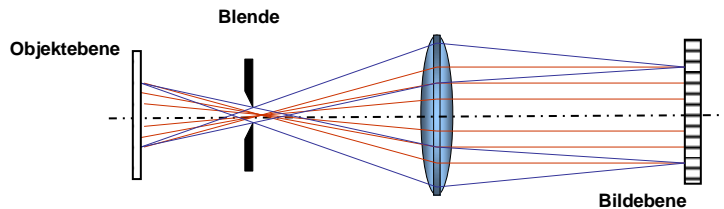
Technische Optik 11

23 von 28

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 eine andere Blendenposition (am Brennpunkt F vor der Linse) wird **bildseitige Telezentrie** erreicht.



Vorteil: Die Hauptstrahlen fallen auf die Bildebene unter 0° ein. Das kann für elektronische Kameras nützlich sein, weil die Photonen gleiche Chancen haben, die nötige Eindringtiefe in das Halbleitermaterial für optimale Quantenausbeute zu erreichen.

Nachteil: Geringe Lichtstärke. Bei einer Änderung des Abstandes g zum Objekt ändert sich die Bildgröße B .

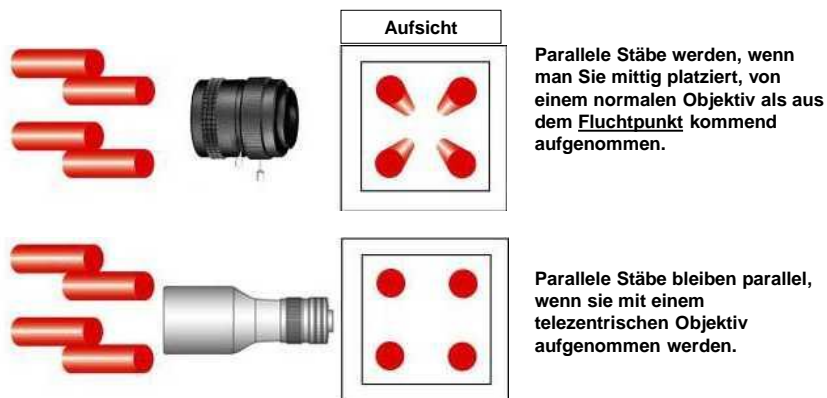
Technische Optik 11

24 von 28

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

Dass die Hauptstrahlen bei einem telezentrischen Linsensystem parallel zur optischen Achse sind, hat bei der Aufnahme räumlicher Objekte für die Perspektive eine nützliche Konsequenz.



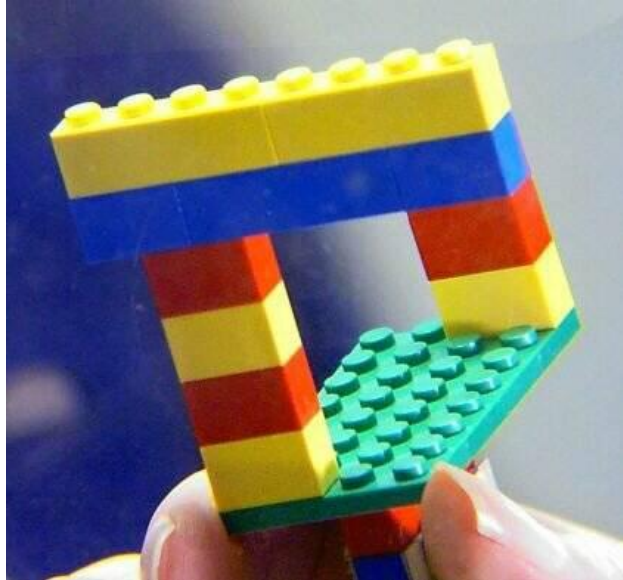
Technische Optik 11

25 von 28

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

Es ist amüsant, mit einem
telezentrischen Objektiv
optische Illusionen zu
fotografieren.



Technische Optik 11

26 von 28

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:

1.) Brennweite und Abbesche Zahl für eine Kronglaslinse betragen

$$f_1' = 54.5 \text{ mm}, v_{d,1} = 64.17,$$

für eine Flintglaslinse

$$f_2' = -85.6 \text{ mm}, v_{d,2} = 40.85.$$

Ist das System achromatisiert, das entsteht, wenn wir diese beiden Linsen dicht aneinander stellen
($e = 0$)?

Wir hatten gezeigt: Zwei Linsen aus verschiedenem Glas
sind bei dichter Aufstellung achromatisch, wenn die
folgende Bedingung erfüllt ist:

$$\frac{1/f_1'}{v_{d,1}} + \frac{1/f_2'}{v_{d,2}} = 0$$

Eingesetzt:

$$\frac{0.018348}{64.17} + \frac{-0.011682}{40.85} = 0.00028593 - 0.00028598 \approx 0$$

Das System ist also achromatisiert; für die beiden Wellenlängen, die durch die Fraunhofer-Linien F und C symbolisiert sind, verschwindet der Farbfehler (dies sind die Wellenlängen für die blaue und die rote Farbe in der Abbeschen Zahl v_d).

Technische Optik 11

27 von 28

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:

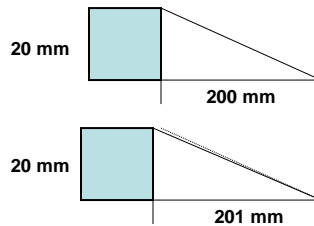
2.) Gegeben ist ein telezentrisches Objektiv mit einem Winkel der Hauptstrahlen im Objektbereich von 2 mrad gegen die optischen Achse (idealerweise sollte dieser Winkel gleich Null sein!). Die axiale Toleranz, mit der ein Objekt von 20 mm Größe für die Messung zur Verfügung gestellt wird, soll 1 mm betragen. Vergleichen Sie den Einfluss auf den Sehwinkel, wenn stattdessen ein „normales“ Objektiv im Abstand $g = -200$ mm verwendet wird.

A) „Normales“ Objektiv:

Der Sehwinkel wird bei größerem Abstand kleiner; das entspricht einem kleineren Objekt.

$$\frac{20}{201} = \frac{x}{200} \quad x = 19.9$$

$$\Delta x = 0.1 \text{ mm}$$

**B) Telezentrisches Objektiv:**

$$\Delta x = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \text{ mm}$$

$$\Delta x = 0.004 \text{ mm}$$

Die Unterschiede in der Bildgröße betragen 0.1 mm für ein normales und 0.004 mm für ein telezentrisches Objektiv.

Technische Optik 11

28 von 28

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

Schlussbemerkung:

Die zuletzt gezeigten, telezentrischen Systeme aus zwei Linsen sind nicht ohne Farbfehler. Sie beruhen auf der Wirkung der Fokussierung; eine wesentliche Verbesserung der optischen Leistung ist zu erwarten, wenn beide Komponenten für sich achromatisiert werden.

Eine Aufhebung der oben-unten- und rechts-links-Vertauschung beim Kepler-Teleskop kann durch Prismen geschehen. Das ist ein weiteres interessantes Thema der Technischen Optik. In Kameras ist diese Bildumkehr jedoch unnötig.