

**Projekt Berzelius**

# **Workshop Mikroskopieren**

Modul:

**Linsenfehler**



## Modul Linsenfehler

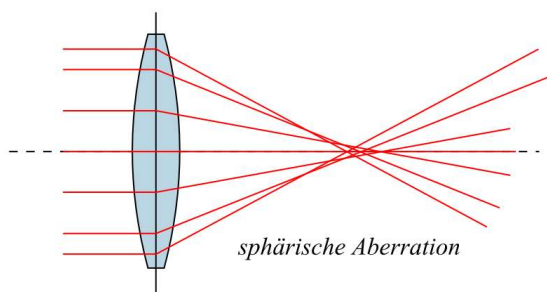
Die im Modul Optik hergeleiteten Abbildungen sind nur dann genau, wenn die optischen Linsen haargenau gefertigt sind und keinerlei Ungenauigkeiten beinhalten – also ideal sind. Sind die optischen Bauteile nicht ideal, entstehen verzerrte oder unscharfe Abbildungen. Abbildungsfehler (Aberrationen) sind vor allem bei Linsen mit kugelförmigen Oberflächen festzustellen. Man kann die Fehler durch entsprechende Linsenkonstruktionen beheben.

In diesem Modul werden die folgenden Abbildungsfehler besprochen:

- sphärische (kugelförmige) Aberration
- Bildfeldwölbung
- Verzeichnung
- Koma
- chromatische Aberration

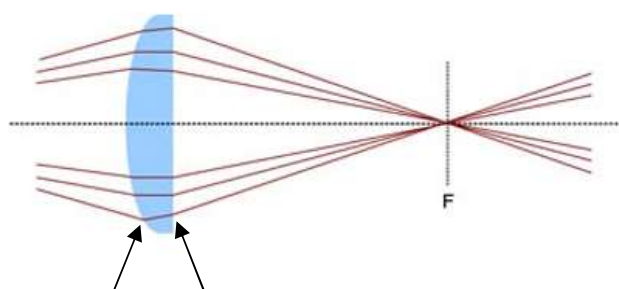
### 1 Sphärische Aberration

Die sphärische Aberration bezeichnet man auch als Öffnungsfehler oder Kugelgestaltsfehler. Sie ist ein Schärfefehler, in der Regel bei sphärisch geschliffenen Linsen, und bewirkt, dass achsparallel einfallende oder vom gleichen Objektpunkt auf der optischen Achse ausgehende Lichtstrahlen nach dem Durchgang durch das Linsen-System nicht mehr im gleichen Punkt zusammenlaufen. Der Brennpunkt «zerfließt». Die Folge ist ein leicht verschwommenes, unscharf wirkendes Bild. Im Allgemeinen ist die Abweichung umso stärker, je weiter aussen der Strahl verläuft.



#### 1.1 Möglichkeiten der Korrektur:

- Da Lichtstrahlen, die nahe am Rand der Linse verlaufen, am meisten zur Unschärfe beitragen, kann der Fehler am einfachsten durch Abblenden der Randstrahlen verringert werden.
- Durch geschickte Ausrichtung der Linse kann die gesamte Brechung der Lichtstrahlen gleichmässig auf beide Grenzflächen aufgeteilt werden. Dadurch erreicht man eine praktisch fehlerfreie Abbildung.

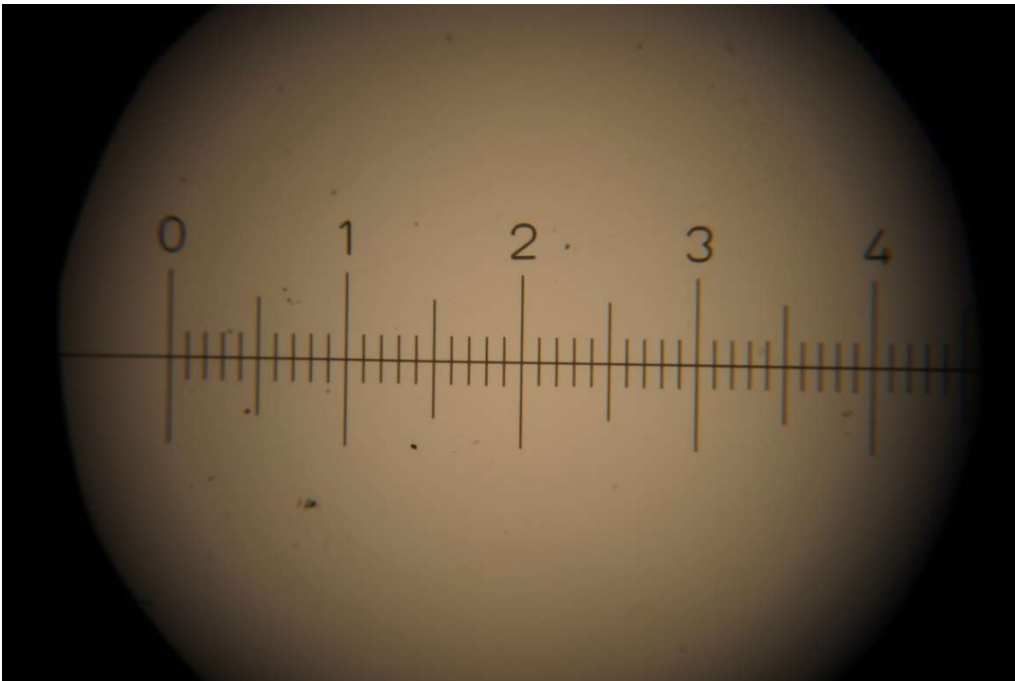


Die Brechkraft wird möglichst gleichmässig auf beide Grenzflächen verteilt

- Man verwendet asphärisch geschliffene Linsen. Bei diesen tritt dieser Fehler nicht auf, da bei ihnen der Radius der Oberflächensegmente nicht konstant ist, sondern von der Mitte zum Rand hin abnimmt. Diese Variante zeigt die beste Korrektur der sphärischen Aberration, sie ist aber mit hohen Herstellungskosten verbunden. Das Schleifen einer Kugeloberfläche deutlich einfacher und damit billiger als das Schleifen asphärisch gekrümmter Flächen. Der Einsatz mehrheitlich sphärischer Flächen beruht auf der Tatsache, dass ihre Abbildungseigenschaften gut genug sind, bei gleichzeitig akzeptablem Herstellungsaufwand. Die Kosten für asphärisch geschliffene Linsen relativieren sich bei Mehrlinsensystemen, da man gegebenenfalls mit weniger Linsen die gleiche Abbildungsgüte erzielen kann.

## 2 Bildfeldwölbung

Wenn eine Optik eine Bildfeldwölbung aufweist, wird das Bild nicht auf einer Ebene, sondern auf einer gewölbten Fläche erzeugt – es ist daher ein sogenannter Lagefehler. Die Position des Strahlenschnittpunkts längs der optischen Achse ist dann von der Bildgrösse abhängig, das heisst je weiter Objektpunkte und damit dessen Bildpunkte von der Achse entfernt sind, umso mehr sind die Bildpunkte in Achsrichtung verschoben (typischerweise nach vorn, zum Objektiv hin). Somit kann man auf einer ebenen Projektionsfläche das Bild eines ebenen Gegenstandes nicht auf der ganzen Fläche scharf abbilden. Wenn man auf die Bildmitte fokussiert, ist der Rand unscharf und umgekehrt.



Ein Objektmikrometer bei geringer mikroskopischer Vergrößerung (Vierfach-Objektiv); besonders an den Rändern des Bildes (bei 0 und 4) ist die Bildfeldwölbung an der Unschärfe der Skalierung zu erkennen.

### 2.1 Möglichkeiten der Korrektur:

- durch spezielle Anordnung der Linsen (Planfeldoptik).
- Durch die Verwendung einer Blende können die Randbereiche ausgeblendet werden; die Schärfentiefe (Mass für die Ausdehnen des scharfen Bereichs) wird dabei höher und die Bildfeldwölbung verliert an Bedeutung.
- Bei Digitalmikroskopen können gewölbte Bildsensoren eingesetzt werden, um den Bildfehler zu kompensieren.

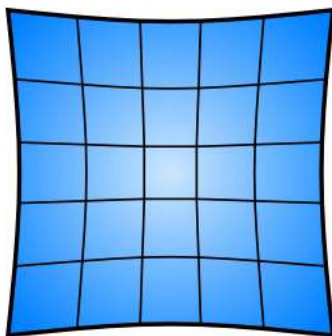
### 3 Verzeichnung

Verzeichnung ist ein Lagefehler. Darunter versteht man die nicht massstabsgetreue Abbildung eines Objektes. Dieser Fehler entsteht durch einen veränderten Abbildungsmaßstab bei weit von der optischen Achse entfernten Bildpunkten. Daraus resultiert, dass Linien die nicht durch den Bildmittelpunkt verlaufen gekrümmt dargestellt werden. Man beachte, dass hier der Begriff „Bildmittelpunkt“ den Punkt meint, wo die optische Achse die Bildebene schneidet. Dieser Punkt wird auch als Verzeichnungszentrum bezeichnet.

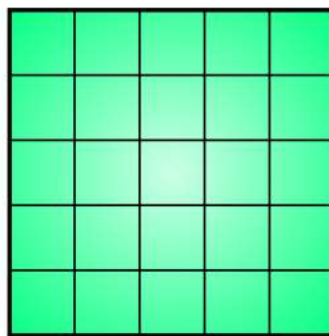
Wenn der Abbildungsmaßstab mit zunehmender Höhe abnimmt, nennt man dies tonnenförmige Verzeichnung. Dann wird ein Quadrat mit nach aussen gewölbten Seiten abgebildet, sieht also etwa wie eine Tonne aus. Den umgekehrten Fall nennt man kissenförmige Verzeichnung. Dann sieht das Quadrat aus wie ein Sofakissen.

Besonders stark tritt dieser Fehler in der Fotografie bei extremen Tele- oder Weitwinkelobjektiven (Fisheye-Objektive) auf.

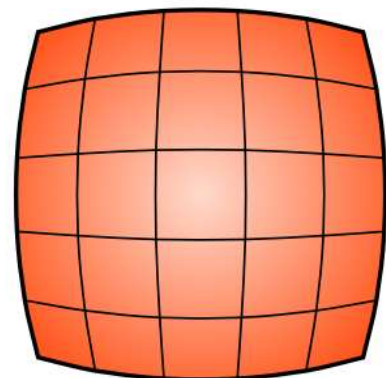
Es kann auch wellenförmige Verzeichnung auftreten, wenn sich verschiedene Ordnungen der Verzeichnung überlagern. Gerade Linien werden dann wie Wellenlinien nach beiden Seiten gekrümmt.



kissenförmige  
Verzeichnung



verzeichnungsfreie  
Abbildung



tonnenförmige  
Verzeichnung

#### 3.1 Möglichkeiten der Korrektur:

- Eine Korrektur ist nur mit speziellen Objektiven aus mehreren Linsen möglich, ein Ablenden der Randstrahlen zeigt in diesem Fall keinen Effekt.

## 4 Koma

Lichtstrahlen eines Objektes abseits der optischen Achse treffen als paralleles Strahlenbündel schräg auf die Linse und werden auch schräg wieder gebündelt. Bei unkorrigierten Optiken kann es zu einer verzerrten Abbildung kommen. Das Objekt wird mit einem zum Rand hin verlaufenden Schweif (der dem Phänomen den Namen gibt) abgebildet.

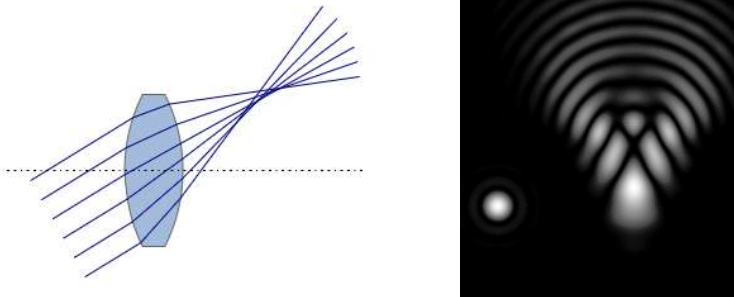


Bild links: schräger Strahlengang

Bild rechts: Abbildung eines Sterns mit korrigierter Optik (Stern erscheint als Kreis) und mit nicht korrigierter Optik (Die Abbildung des Sterns weist einen Schweif auf)

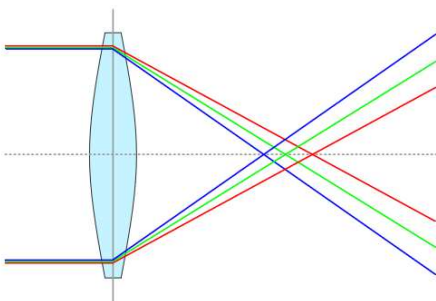
### 4.1 Möglichkeiten der Korrektur:

- Durch Ablenden der Randstrahlen kann die Erscheinung gemindert werden.

Koma kann sowohl bei Linsen als auch bei Spiegeloptiken auftreten. Optische Systeme bei denen sowohl die sphärische Aberration als auch die Koma vollständig korrigiert sind, heißen Aplanate.

## 5 Chromatische Aberration

Die Chromatische Aberration (Farblängsfehler, Farbquerfehler) tritt auf, weil am Rand der Linse Licht unterschiedlicher Wellenlänge verschieden stark gebrochen und wie bei einem Prisma in seine spektralen Bestandteile aufgespalten wird; dieser Effekt führt zu Farbsäumen am Bildrand.



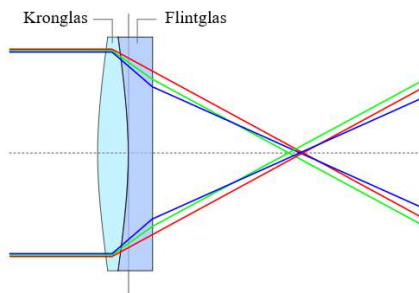
### 5.1 Möglichkeiten der Korrektur:

- Da wiederum der Rand der Linse den Grossteil der Aberration verursacht, kann der Fehler wie bei der sphärischen Aberration am leichtesten durch die Verwendung einer Blende gehoben werden.

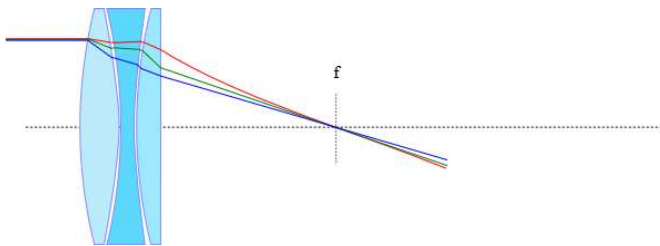
- Für hochwertigere Optiken wird die Korrektur durch die Kombination von zwei Linsen erreicht, welche zusammen einen so genannten Achromaten bilden. Die Linsen werden dabei so gewählt, dass die Linsengruppe für mehrere Wellenlängen annähernd die gleiche Brennweite besitzt.

Je nach verwendeten Glassorten können 2 oder 3 Farben zusammengeführt werden.

Achromat: die Linsen und Glassorten sind so gewählt, dass der rote und der blaugrüne Spektralteil zusammenfallen



Apochromat: stellt eine aufwändigere Konstruktion dar, bei der drei Wellenlängen (rot, grün und blau) zusammenfallen, dieser Mehraufwand lohnt sich insbesondere bei langen Brennweiten.



- Bei Spiegeloptiken tritt keine chromatische Aberration auf!