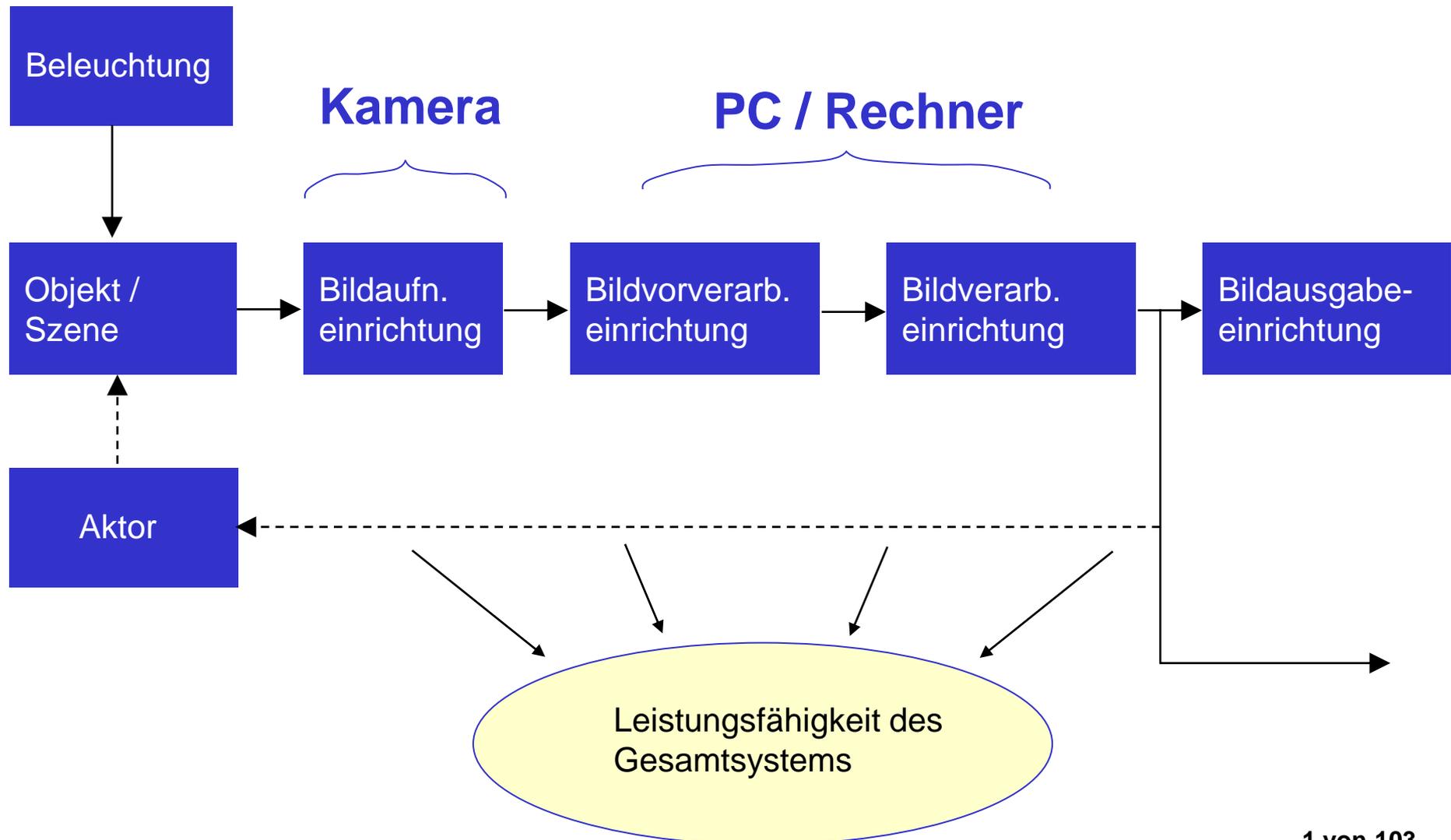


## Technische Komponenten von DBV-Systemen

### Prinzipieller Aufbau:



## Gliederung

1. Grundlagen zur technischen Optik und Lichttechnik
2. Beleuchtung
3. Das System Kamera
  - 3.1 Abbildungsoptik
  - 3.2 Sensorelement / Aufnahmesystem
  - 3.3 Farbkameras
  - 3.4 Verarbeitungselektronik
4. Rechnerschnittstelle / Bilderfassung
5. Software
6. Literatur / Quellen



## Gliederung

1. Grundlagen zur technischen Optik und Lichttechnik
2. Beleuchtung
3. Das System Kamera
  - 3.1 Abbildungsoptik
  - 3.2 Sensorelement / Aufnahmesystem
  - 3.3 Verarbeitungselektronik
4. Rechnerschnittstelle / Frame Grabber
5. Software

Licht: elektromagnetische Wellen im Wellenlängenbereich 400nm .. 750nm  
(für das Auge sichtbarer Bereich)



## Licht besitzt sowohl Strahlen- als auch Wellencharakter

Beschreibung mittels

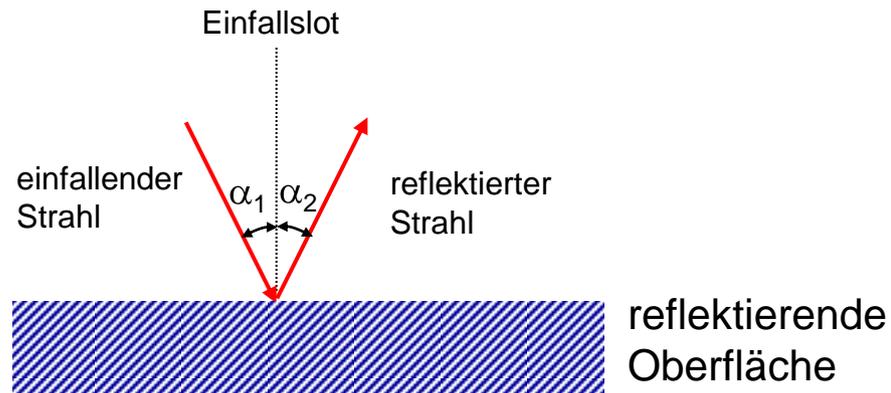
- Strahlenoptik (geometrische Optik)
- Wellenoptik
- Quantenphysik / Quantenoptik

Licht: elektromagnetische Welle mit Schwingungen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung  
(Transversalwelle)

## Reflexionsgesetz

Für glatte (spiegelnde) Oberflächen mit  $R_a$  (Rauigkeit der Oberfläche)  $\ll \lambda$

gilt (gerichtete Reflexion): Einfallswinkel = Ausfallswinkel  $\rightarrow \sin\alpha_1 = \sin\alpha_2$



Spiegelnde Oberflächen sind als Objekte der Bildverarbeitung weniger geeignet (hohe Lichtintensität in kleinem Bildbereich des direkten Reflexes, ansonsten sehr geringe Intensitäten im Bild, Neigung zu Überstrahlung und „Blooming“ mit Informationsverlust)

Raue Oberflächen führen zu einer diffusen Reflexion mit gleichmäßiger Abstrahlung (diffuse Streuung) in alle Richtungen des Halbraumes (**Lambertsches Gesetz**)



Weißes, leicht angerautes Papier kommt einer ideal diffus reflektierenden Oberfläche sehr nahe

Beim Übertritt von einem transparenten Medium zu einem transparenten Medium einer anderen optischen Dichte gilt das

**Brechungsgesetz:**  $n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \alpha_2$

### 1. Fall Brechung zum Lot

tritt auf beim Übergang des Lichts von einem optisch dünneren in ein optisch dichteres Medium.

$$\sin \alpha_1 > \sin \alpha_2, \text{ wobei } c_1 > c_2$$

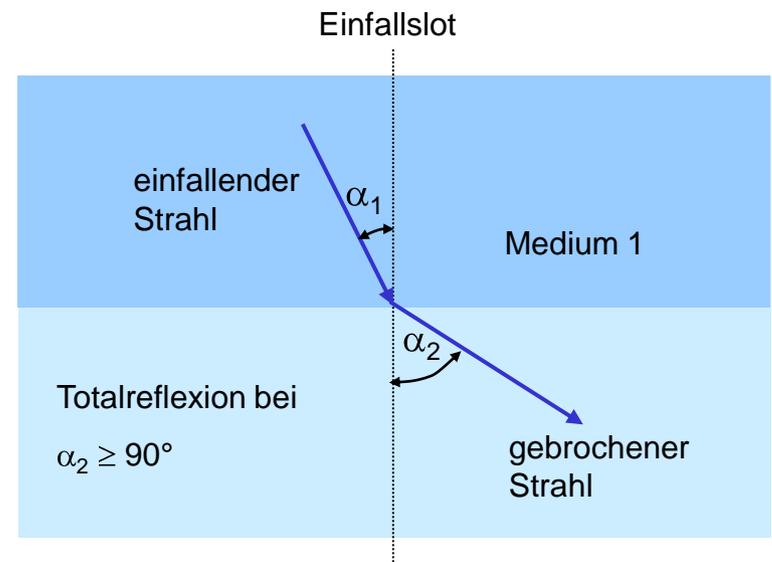
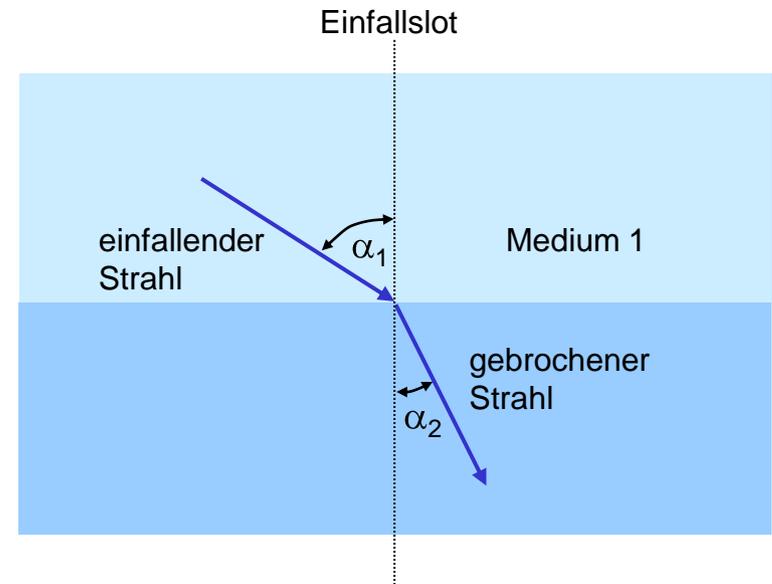
### 2. Fall Brechung vom Lot weg

tritt auf beim Übergang des Lichts von einem optisch dünneren dichteren in ein optisch dünneres Medium.

$$\sin \alpha_1 < \sin \alpha_2, \text{ wobei } c_1 < c_2$$

$n$  – Brechungsindex =  $c_0/c$

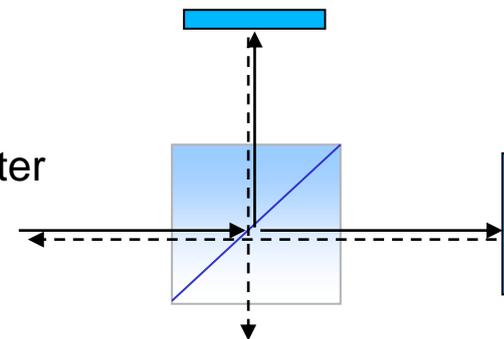
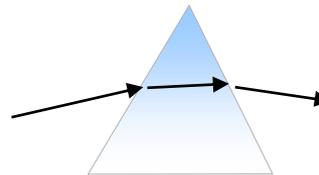
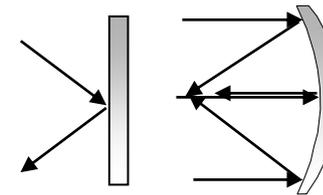
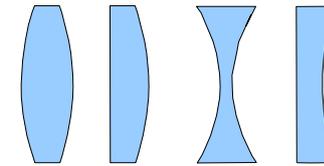
$c$  - Ausbreitungsgeschwindigkeit



Gleichzeitige Reflexion und Brechung an Grenzflächen zwischen transparenten Medien: siehe hierzu: **Fresnel-Gleichungen** 6 von 103

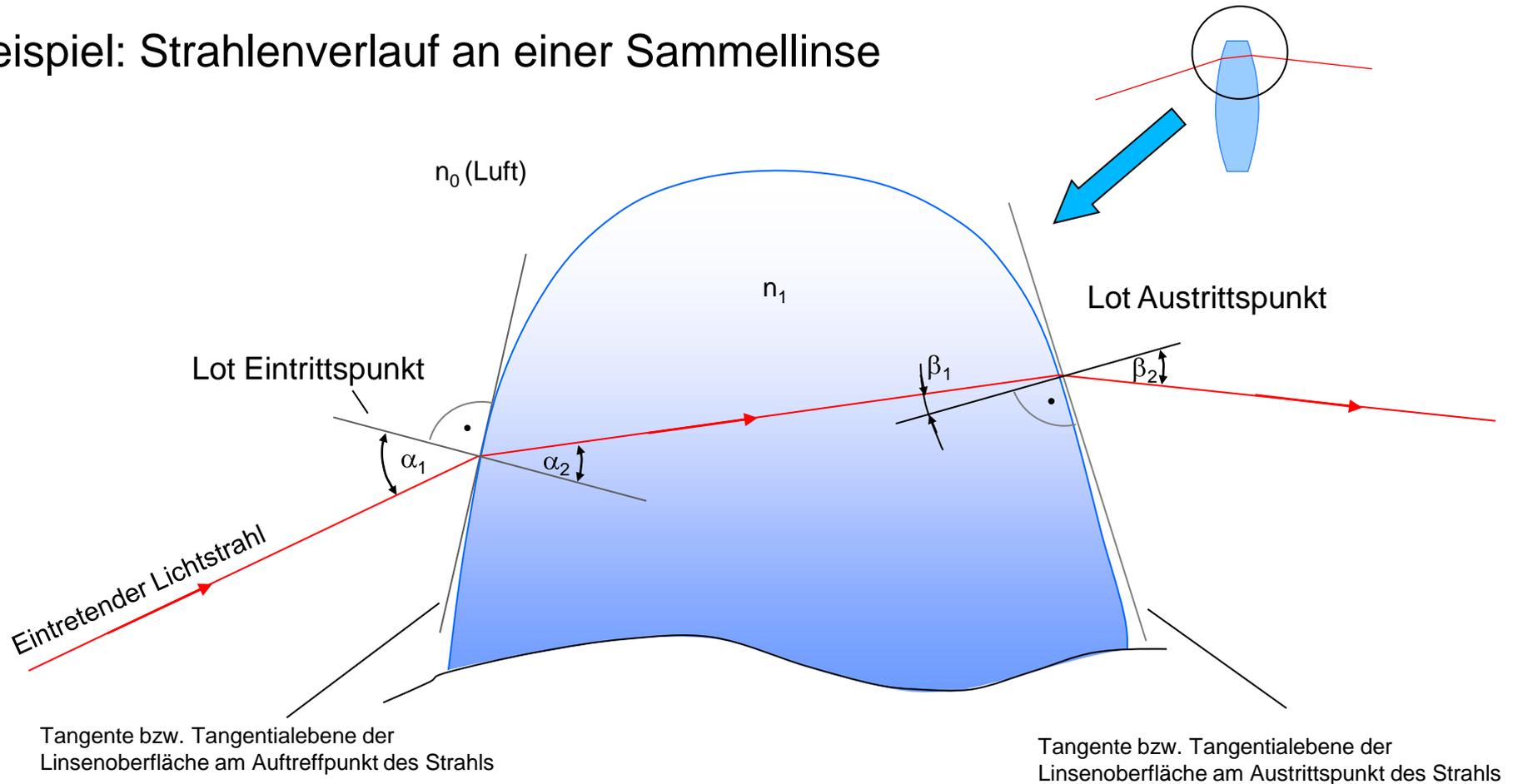
## Optische Komponenten mit Anwendung des Reflexions- bzw. Brechungsgesetzes

- Linsen (Sammellinsen, Zerstreuungslinsen)
  - Optische Abbildung, Vergrößerung (Lupe)
  
- Spiegel (ebene Spiegel, Hohlspiegel, Parabolspiegel)
  - Umlenkung von Strahlengängen, Optische Abbildung, Sat-Empfang
  
- Prismen
  - z.B. Spektralzerlegung
  
- Teilerwürfel / halbdurchlässige Spiegel
  - Aufteilung von Strahlengängen z.B. für Interferometer



## Anwendung des Brechungs- bzw. des Reflexionsgesetzes

Beispiel: Strahlenverlauf an einer Sammellinse

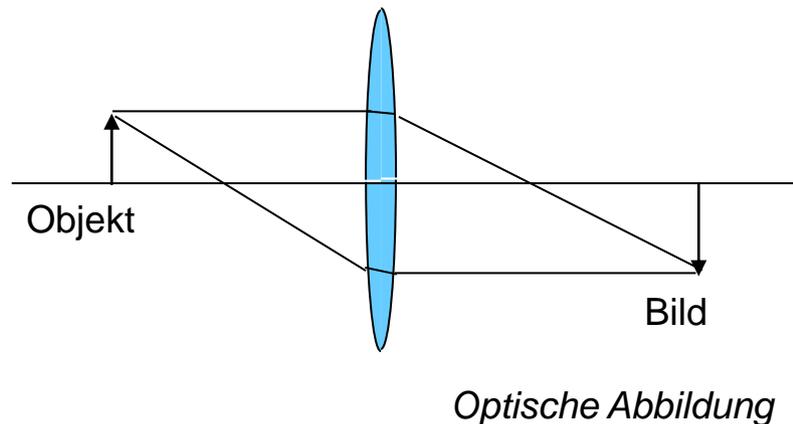


Es gilt:  $n_0 \cdot \sin \alpha_1 = n_1 \cdot \sin \alpha_2$  und  $n_1 \cdot \sin \beta_1 = n_0 \cdot \sin \beta_2$

## Optische Komponenten: Linsen

Optisch wirksames Bauelement mit zwei lichtbrechenden Flächen, mindestens eine davon mit konkaver oder konvexer Wölbung

Form der Wölbung: sphärisch (vergleichsweise einfache Herstellung) oder asphärisch (aufwändige Herstellung)



### Wichtige Eigenschaft von Linsen und Linsensystemen:

Optische Abbildung: Erzeugung eines Bildes durch Vereinigung von Licht, das von einem Punkt eines Gegenstands ausgeht, mittels eines optischen Systems in einem Bildpunkt, das Bild entsteht durch die Übertragung aller Objektpunkte an den Ort des Bildes

## Optische Komponenten: Linsen

### Wichtige Kenngrößen von Linsen

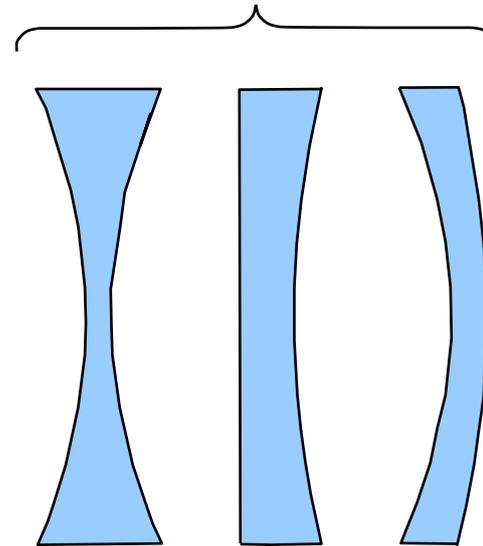
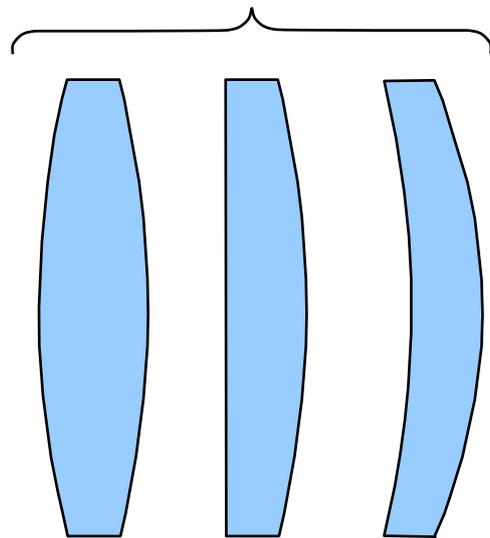
- Material: Glas- bzw. Kunststoffsorte mit Einfluss auf die Brechzahl und die Absorption / Transmission, ggf. Fehler im Volumen, wie z.B. Blaseneinschlüsse, oder an der Oberfläche wie z.B. Kratzer, Schlieren oder Risse
- Oberflächenqualität (Rauigkeit) mit Einfluss z. B. auf das Streulichtverhalten
- Brechungsindex (Brechzahl)
- Brennweite: Entfernung des Bildpunktes eines parallelen Strahlenbündels von der Linse (Kehrwert: Brechwert in Dioptrien)
- Abbesche Zahl: wellenlängenabhängige Brechzahl (Dispersion)
- Apertur: Durchmesser der optisch wirksamen Fläche einer Linse
- Linsenform

## Optische Komponenten: Linsen / Linsenformen

Konvexe Linsen /  
Sammellinsen

Meniskus

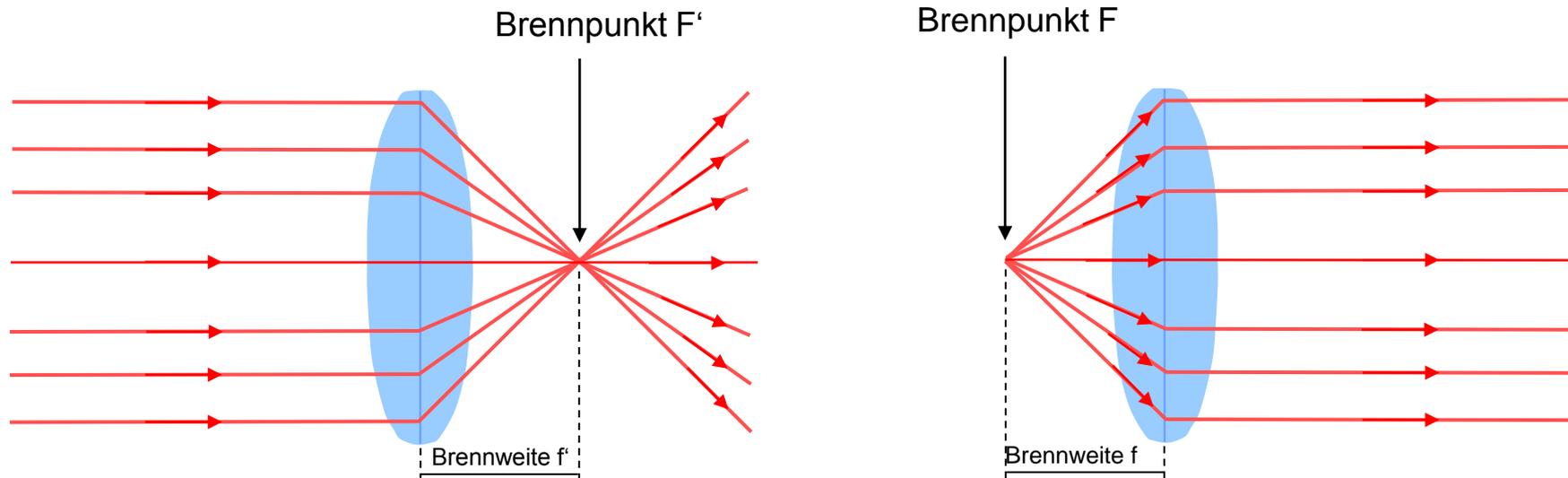
Konkave Linsen /  
Zerstreuungslinsen



bikonvex plankonvex konkavkonvex

bikonkav plankonkav konvexkonkav

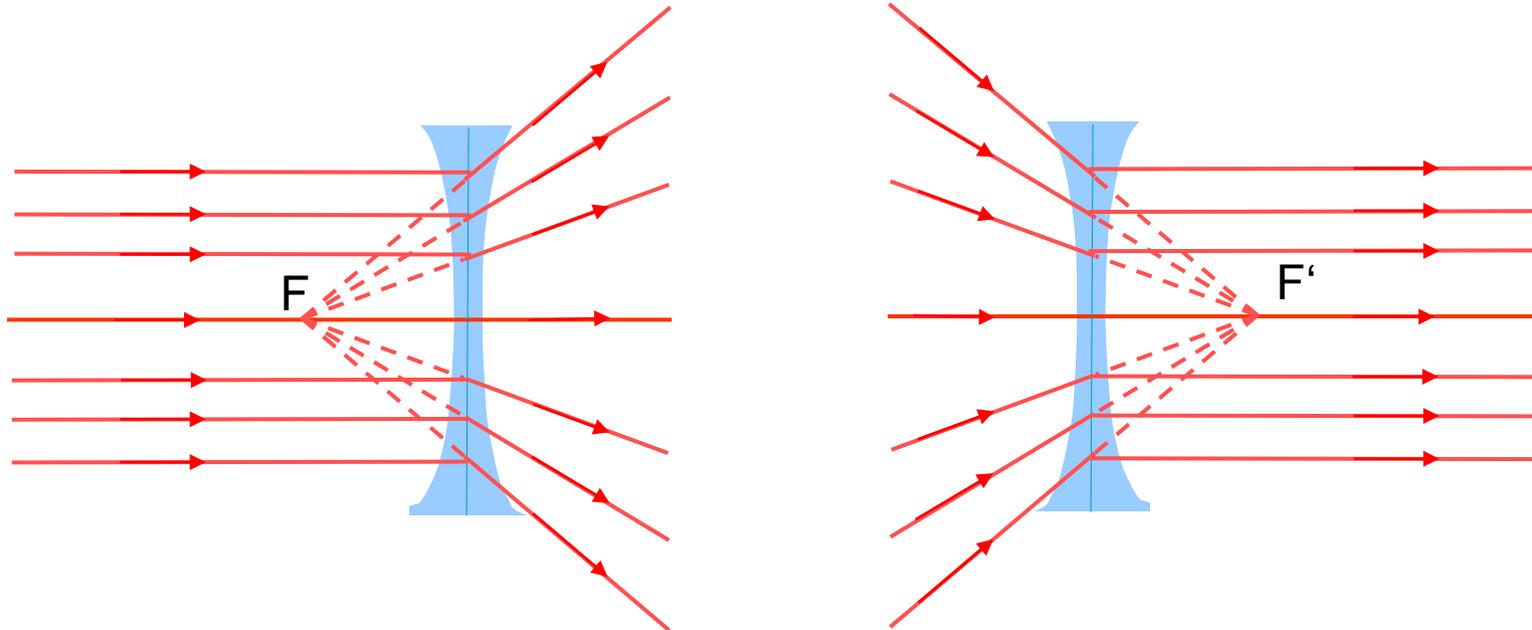
## Optische Komponenten: Sammellinsen



### Sammellinsen: bikonvexe und plan-konvexe Linsen

- parallel einfallende Lichtstrahlen treffen (idealerweise) im Brennpunkt  $F'$  zusammen (links)
- vom Brennpunkt  $F$  ausgehende Strahlen werden zu Parallelstrahlen gebrochen (rechts)
- Brennweite  $f / f'$ : Abstand des objektseitigen Brennpunktes  $F$  bzw. des bildseitigen Brennpunktes  $F'$  von der Linse

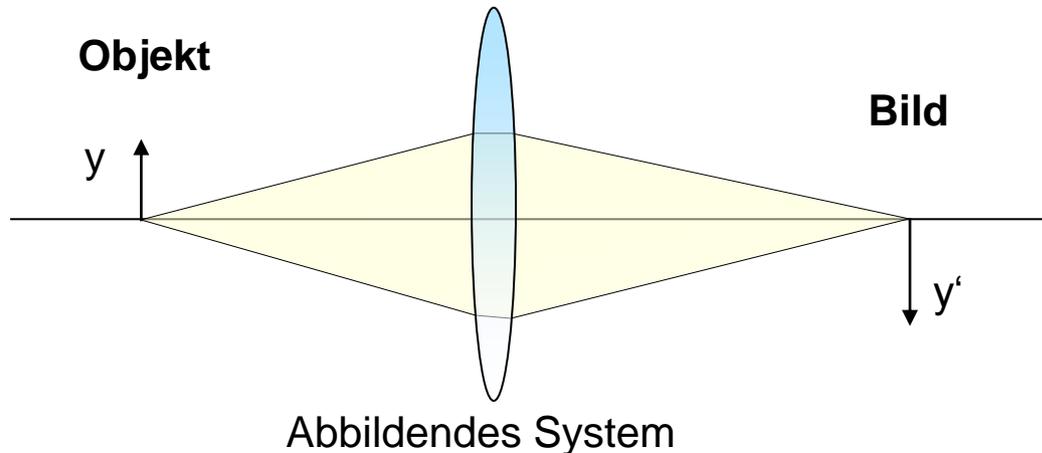
## Optische Komponenten: Zerstreuungslinsen



### Zerstreuungslinsen: bikonkave und plan-konkave Linsen

- parallel einfallende Lichtstrahlen werden so gebrochen, dass sich ihre rückwärtigen Verlängerungen im Brennpunkt F schneiden (links)
- Auf den Brennpunkt  $F'$  gerichtete, einfallende Strahlen werden zu Parallelstrahlen gebrochen (rechts)

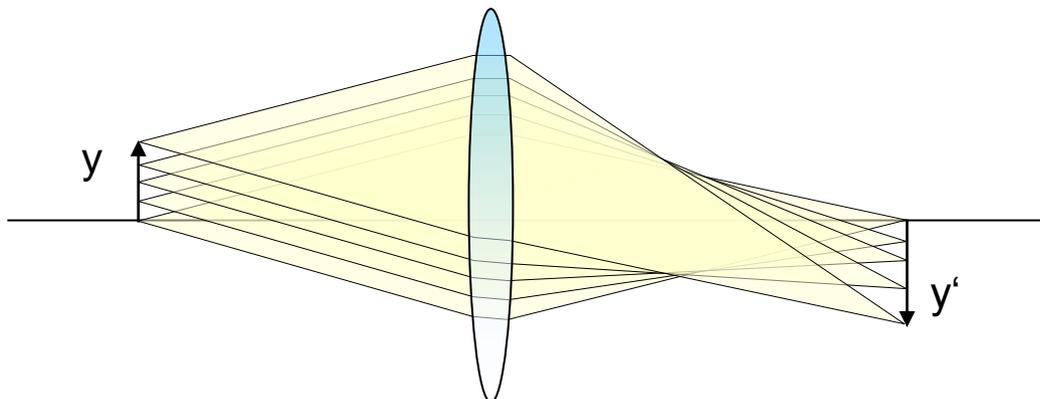
## Die optische Abbildung: grafische und rechnerische Ermittlung von Kenngrößen



Abbildendes System, z.B.:

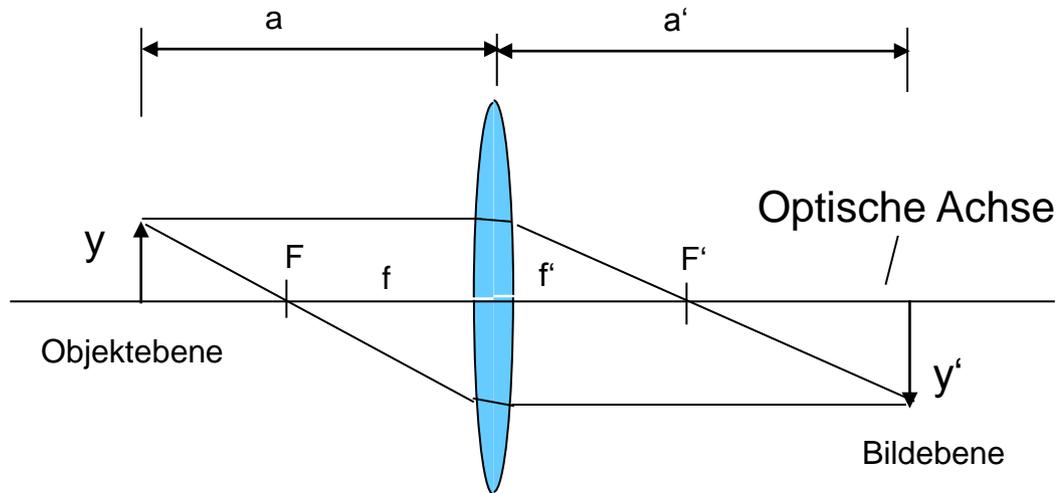
- Einfache Lochblende
- Einfachlinse
- Linsengruppe

Das von einem Objektpunkt in der Objektebene ausgesendete kegelförmige Strahlenbündel wird durch das abbildende System wiederum auf einen Punkt in der Bildebene fokussiert



Dieser Vorgang findet für alle im Erfassungsbereich liegenden Objektpunkte statt, sodass in der Bildebene das Bild entsteht, welches z.B. auf einem Schirm dargestellt oder mit einem Bildsensor erfasst werden kann

## Die optische Abbildung: grafische und rechnerische Ermittlung von Kenngrößen



$a / a'$  – Objekt (Gegenstands)weite / Bildweite  
 $F / F'$  - objekt- bzw. bildseitiger Brennpunkt  
 $f / f'$  – objekt- bzw. bildseitige Brennweite  
 Paraxiales Gebiet: in Nähe der optischen Achse

### Konstruktionsvorschrift (Gültigkeit in guter Näherung für das paraxiale Gebiet)

- Der objektseitige Parallelstrahl wird zum Brennpunktstrahl und objektseitige Brennpunktstrahl wird zum Parallelstrahl
- Mittelpunktstrahlen gehen ungebrochen und ohne Parallelversatz durch die Linse hindurch,
- Ein Bildpunkt ergibt sich durch die Konstruktion nach der Vorschrift als Schnittpunkt von 2 der drei charakteristischen Strahlen. Umgekehrt kann auch ein Objektpunkt aus einem Bildpunkt ermittelt werden
- Brennweiten beziehen sich auf die sogenannten Hauptebenen, siehe nächste Folien

### Abbildungsgleichungen: (Gültigkeit in guter Näherung für das paraxiale Gebiet)

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f}$$

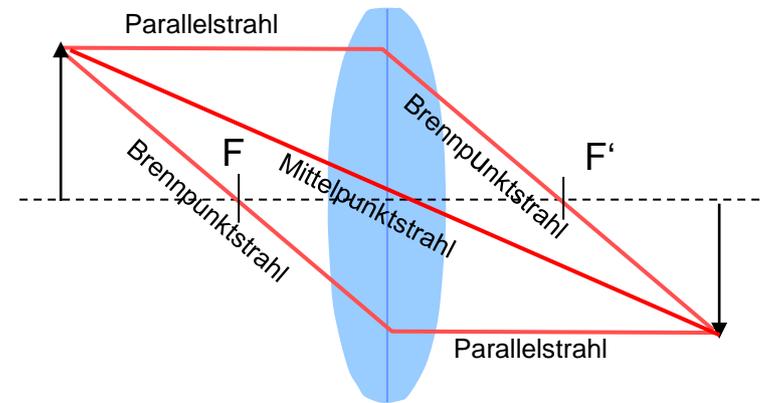
$$\frac{y'}{y} = -\frac{a'}{a} \quad (\text{Vergrößerung})$$

15 von 103

## Die optische Abbildung: Linsen als abbildende Systeme

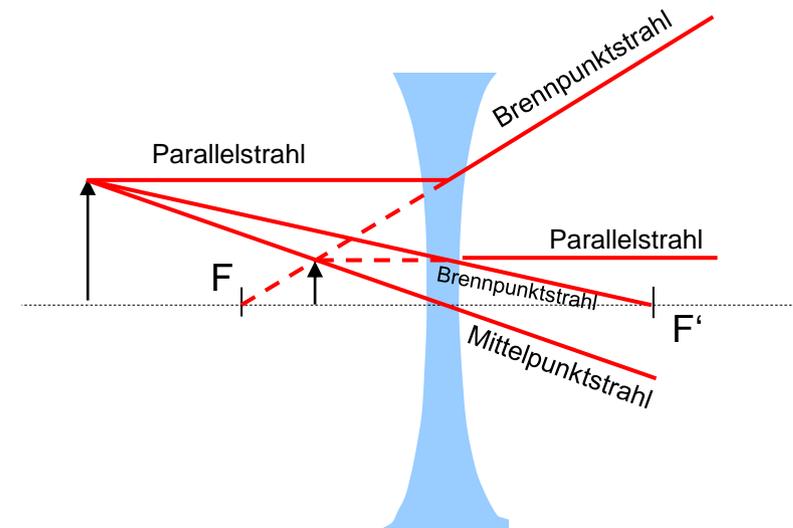
### Abbildung durch Sammellinsen

- Bildort: Schnittpunkt von Zentralstrahl, Parallelstrahl und Brennpunktstrahl (zur Konstruktion genügen 2 der 3 Strahlen)
- Erzeugung eines reellen Bild eines Objektes; die Sammellinse hat hierbei die Funktion eines Objektivs

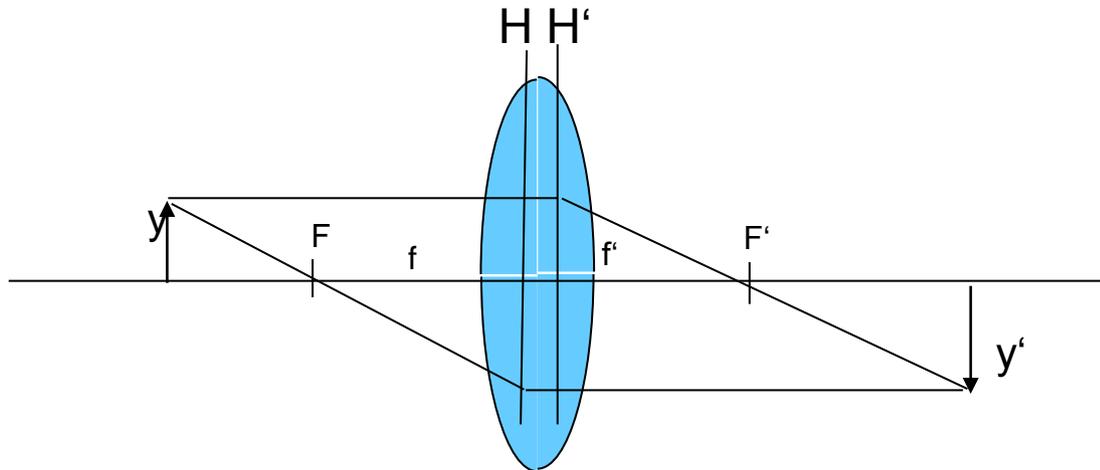


### Abbildung durch Zerstreuungslinsen

- wegen der Lichtzerstreuung keine Erzeugung eines reellen Bildes
- Strahlen (z.B. Parallel-, Brennpunkt- und Zentralstrahl) scheinen vom Punkt eines verkleinerten Objektes zu kommen (virtuelles Bild);
- Konstruktion: objektseitiger Parallelstrahl wird bildseitig zum Strahl durch den (objektseitigen) Brennpunkt; objektseitiger auf den bildseitigen Brennpunkt gerichteter Strahl wird bildseitig zum Parallelstrahl; der Schnittpunkt der rückwärtigen Verlängerung beider Strahlen ergibt den Bildpunkt (auch mit Mittelpunktstrahl möglich)



## Die optische Abbildung: Hauptebenen



Einführung von Hauptebenen H und H' mit Abstraktion von den tatsächlichen konstruktiven Abmessungen, auf welche sich alle relevanten Abstände beziehen: Objekt und Bildweite, objekt- und bildseitige Brennweite

Bezug zu den tatsächlichen konstruktiven Abmessungen: bei „dünnen“ Linsen fallen H und H' zusammen und liegen im Linsenmittelpunkt; bei „dicken“ Linsen Informationen in zugehörigen Datenblättern.

## Die optische Abbildung: Linsensysteme

Systeme mehrerer hintereinander angeordneter Linsen lassen sich rechnerisch ebenfalls auf ein System mit zwei Hauptebenen und zwei Brennpunkten zurückführen.

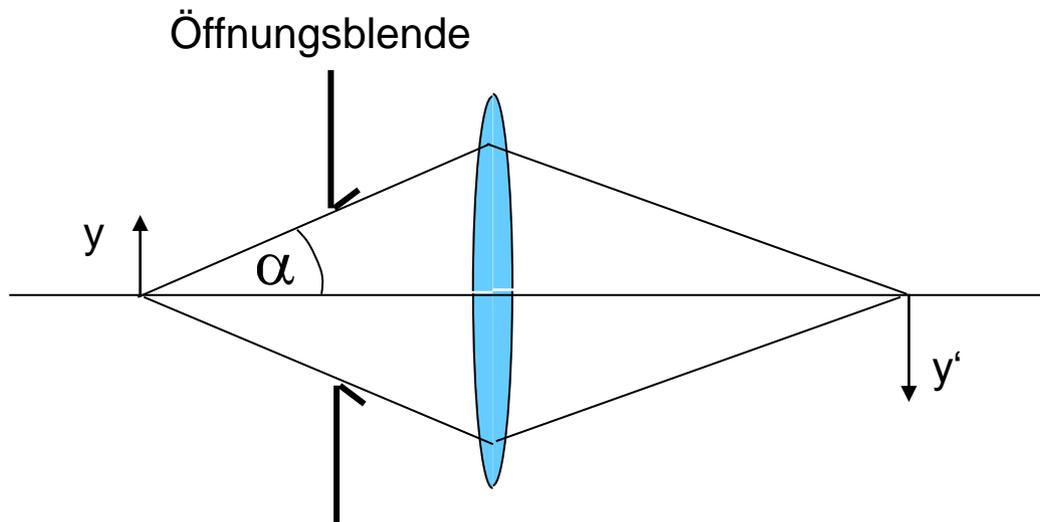
Für die Gesamtbrennweite zweier dünner Linsen gilt z.B.:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 \cdot f_2}$$

$d$  – Abstand der Linsen voneinander

## Die optische Abbildung: Numerische Apertur

Apertur: Öffnung bzw. Öffnungsblende oder Aperturblende (meist kreisförmig) für den Lichteintritt in ein optisches System



Ist keine Blende als Bauelement vorhanden, so wirkt die Linsenfassung als „natürliche“ Blende.

Öffnungsblenden begrenzen die einfallende Lichtstärke, nicht jedoch das Objektfeld – eine Objektfeldbegrenzung wird durch zusätzliche Feldblenden bewirkt.

### Numerische Apertur NA

$$NA = n \cdot \sin \alpha$$

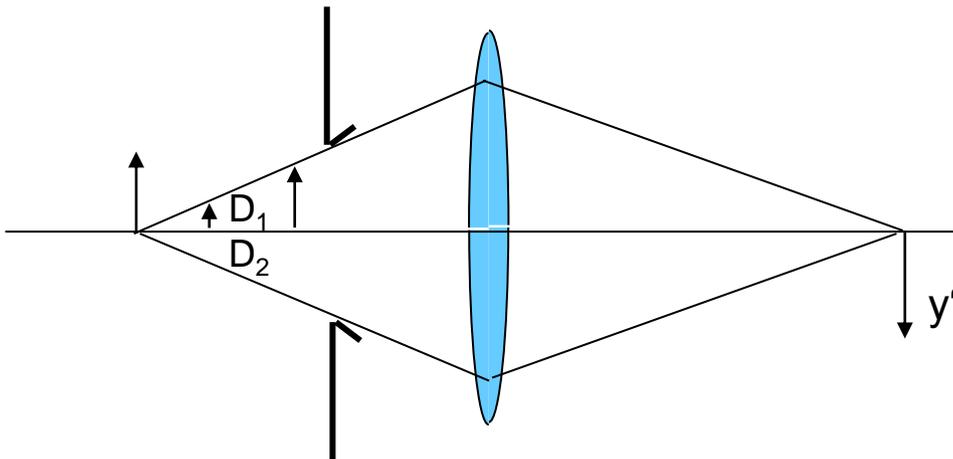
$\alpha$  – halber objektseitiger Öffnungswinkel (Akzeptanzwinkel)

$n$  – Brechzahl des Mediums zwischen Objekt und erster Linse des Systems (meist Luft, also  $n = 1$ )

## Die optische Abbildung: Numerische Apertur

### Eigenschaften der numerischen Apertur

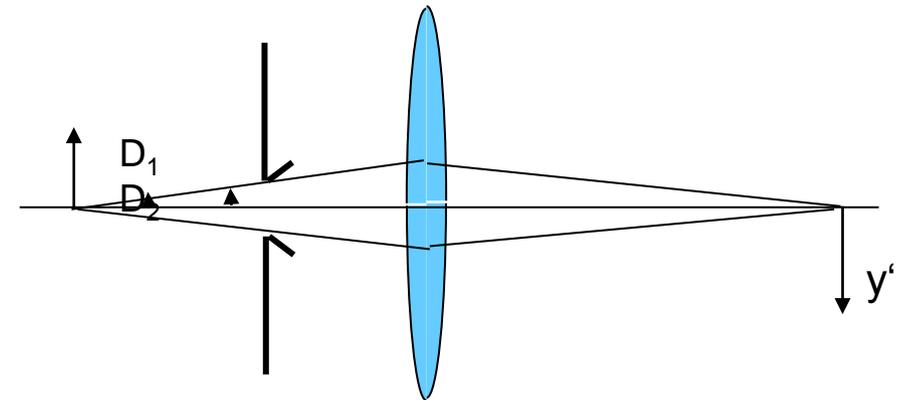
- Die Lichtausbeute und die optische Auflösung nehmen mit größerer numerischer Apertur zu (s. a. Folie zur beugungsbegrenzten Auflösung)
- Die Schärfentiefe nimmt mit zunehmender numerischer Apertur ab.



Öffnungswinkel  
vergleichsweise groß

$\Delta D = D_2 - D_1$  groß

Schärfentiefe gering



Öffnungswinkel  
vergleichsweise klein

$\Delta D = D_2 - D_1$  klein

Schärfentiefe groß

## Die optische Abbildung: Numerische Apertur / Öffnungsverhältnis

Weitere gebräuchliche Kenngröße (insbes. in der Fotografie): Öffnungszahl

Öffnungsverhältnis

$D / f$

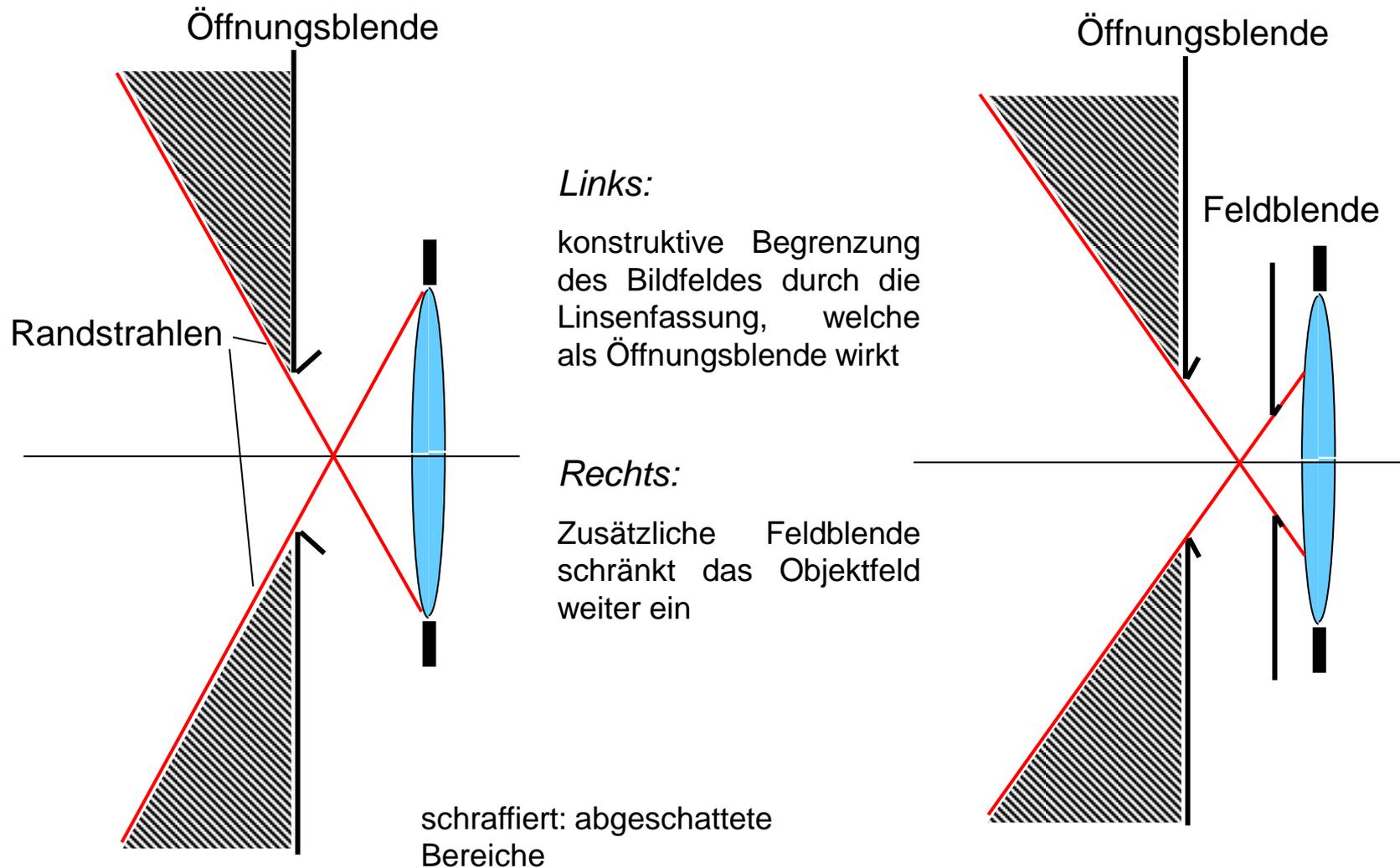
Öffnungszahl bzw. Blendenzahl

$1 / \text{Öffnungsverhältnis}$

Schreibweise	Beispiel
$1 : \kappa$	1:1,4
$1 / \kappa$	1/1,4
$f / \kappa$	f/1,4
$F \kappa$	F 1,4

Typische Schreib- bzw.  
Ausdrucksweisen

## Die optische Abbildung: Öffnungs- und Feldblenden



Die Öffnungsblende begrenzt gemeinsam mit der Feldblende den maximalen Winkel und somit den Ausschnitt, welcher, abhängig von der Objektweite, abgebildet wird.

22 von 103

## Die optische Abbildung: Abbildungsfehler bei Linsen

### Abbildungsfehler von Linsen

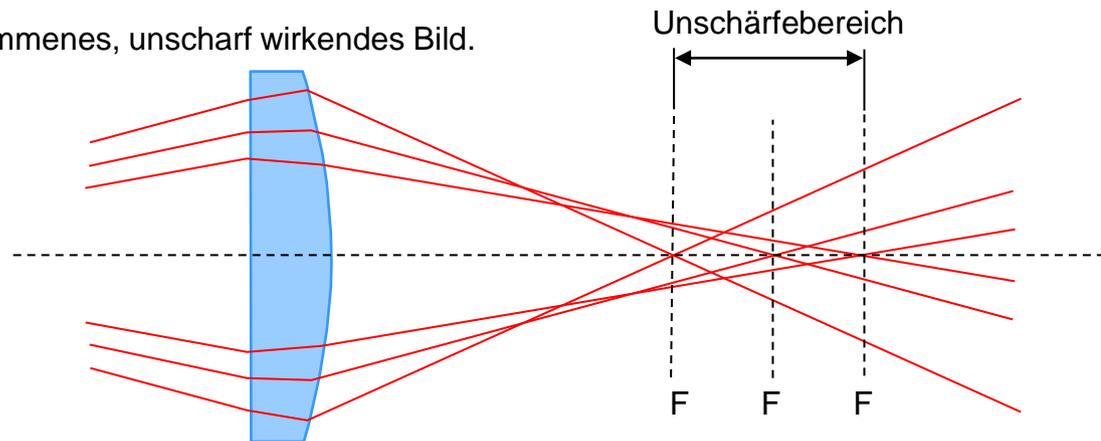
- mit zunehmender Entfernung von der optischen Achse Abweichung des realen Verhaltens optisch abbildender Systeme von den Gesetzen der geometrischen Optik,
- Folge: Abweichungen von der maßstabgerechten Abbildung (Abbildungsfehler) in unterschiedlichster Form,
- Verringerung, Korrektur (je nach Fehlerart und gerechtfertigtem Aufwand): Verwendung mehrerer Linsen, Verwendung asphärischer Linsen, Wegblenden besonders fehlerträchtiger Strahlen (meist Randstrahlen)

## Die optische Abbildung: Abbildungsfehler bei Linsen

### sphärische Abberation

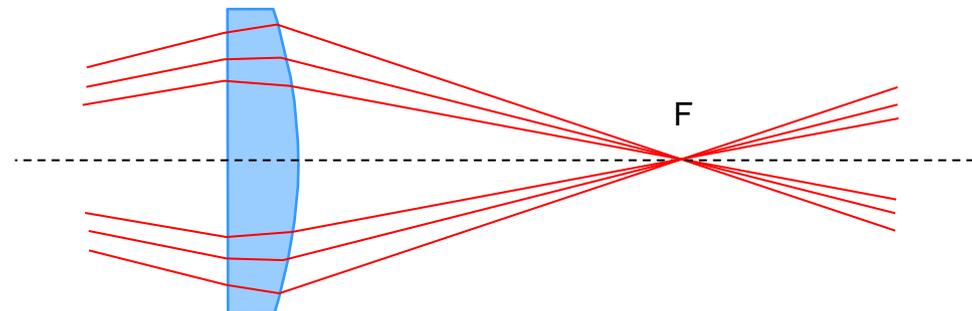
Auftreten bei einfachen sphärischen Linsen: stärkere Brechung von Randstrahlen und somit Fokussierung auf einen näher liegenden Brennpunkt

Folge: leicht verschwommenes, unscharf wirkendes Bild.



### Korrektur:

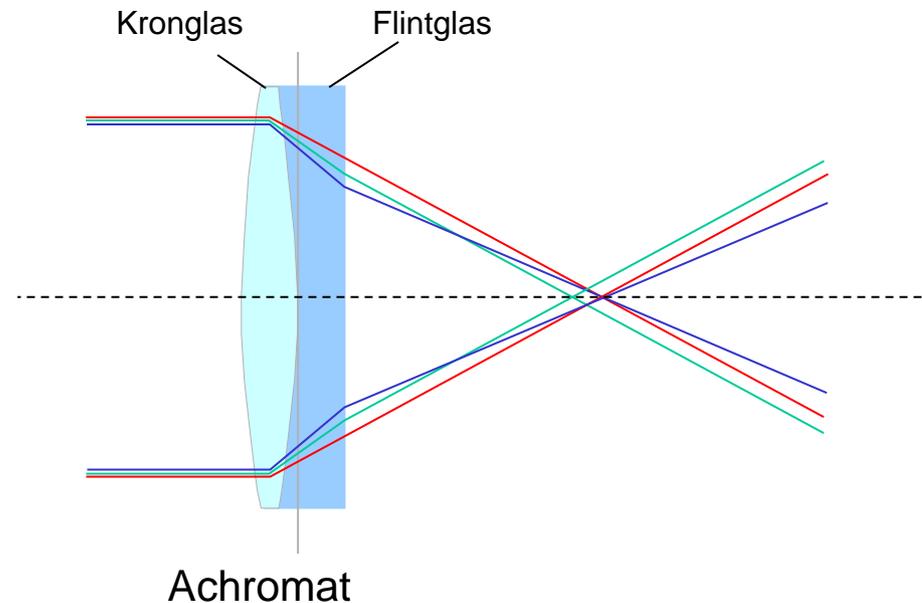
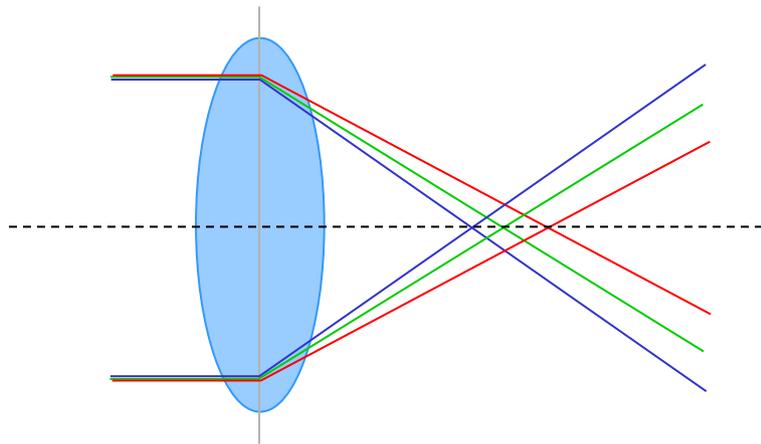
- Abblenden der Randstrahlen
- Verwendung von Linsen mit zwei unterschiedlichen Krümmungsradien
- Linsen bester Form: zwei unterschiedliche Krümmungsradien mit gleichmäßiger Verteilung der Brechkraft auf beide Grenzflächen
- Verwendung asphärischer Linsen (Linsenradius nimmt zum Rand hin ab): beste Korrekturmöglichkeit, allerdings teuer



## Die optische Abbildung: Abbildungsfehler bei Linsen

### chromatische Aberration (Farblängsfehler)

- Licht unterschiedlicher Wellenlänge wird unterschiedlich stark gebrochen (Dispersion); Effekt nimmt zum Linsenrand hin zu
- Erscheinung: Farbsäume am Bildrand



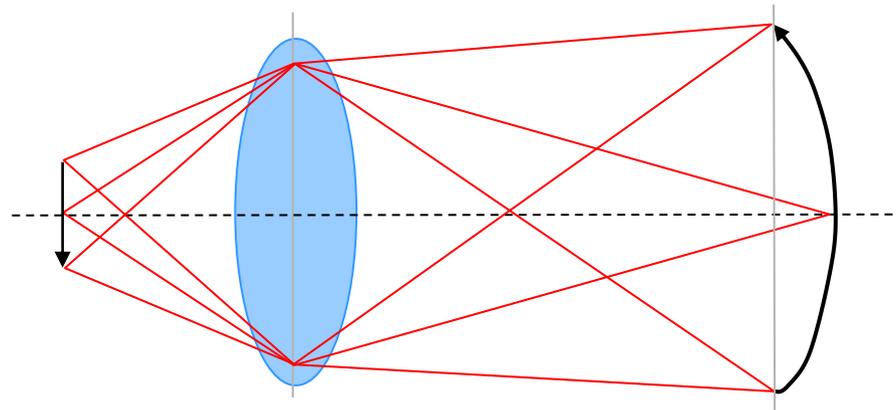
#### Korrektur:

- Abschattung der Randstrahlen durch Verwendung einer Blende
- Für hochwertigere Optiken Kombination von zwei Linsen (Achromat) so, dass die Linsengruppe für mehrere Wellenlängen annähernd die gleiche Brennweite besitzt; je nach verwendeter Glassorte Zusammenführung von 2 oder 3 Farben

## Die optische Abbildung: Abbildungsfehler von Linsen

### Bildfeldwölbung

- Je nach Einstellung ist somit der Rand oder das Zentrum unscharf
- Abbildung auf eine Ebene mit spärlichen Linsen nur (näherungsweise) im paraxialen Gebiet; ansonsten auf eine gewölbte Fläche



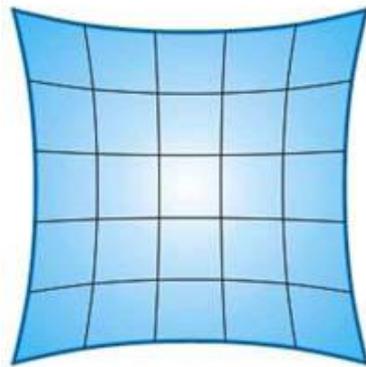
Korrektur:

- Verwendung einer Blende (Ausblendung von Randbereichen); dabei gleichzeitig Verbesserung der Schärfentiefe insgesamt
- bei hochwertigen Optiken: Kombination mehrerer Linsen

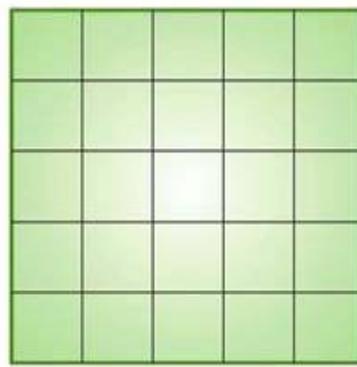
## Die optische Abbildung: Abbildungsfehler von Linsen

### Verzeichnung

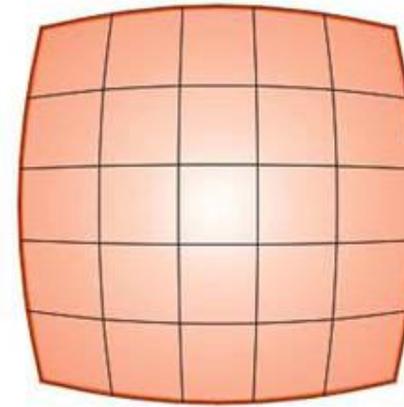
- Kontinuierliche Änderung des Abbildungsmaßstabes vom Bereich der optischen Achse zum Randbereich hin



*kissenförmig*



*ohne Verzeichnung*



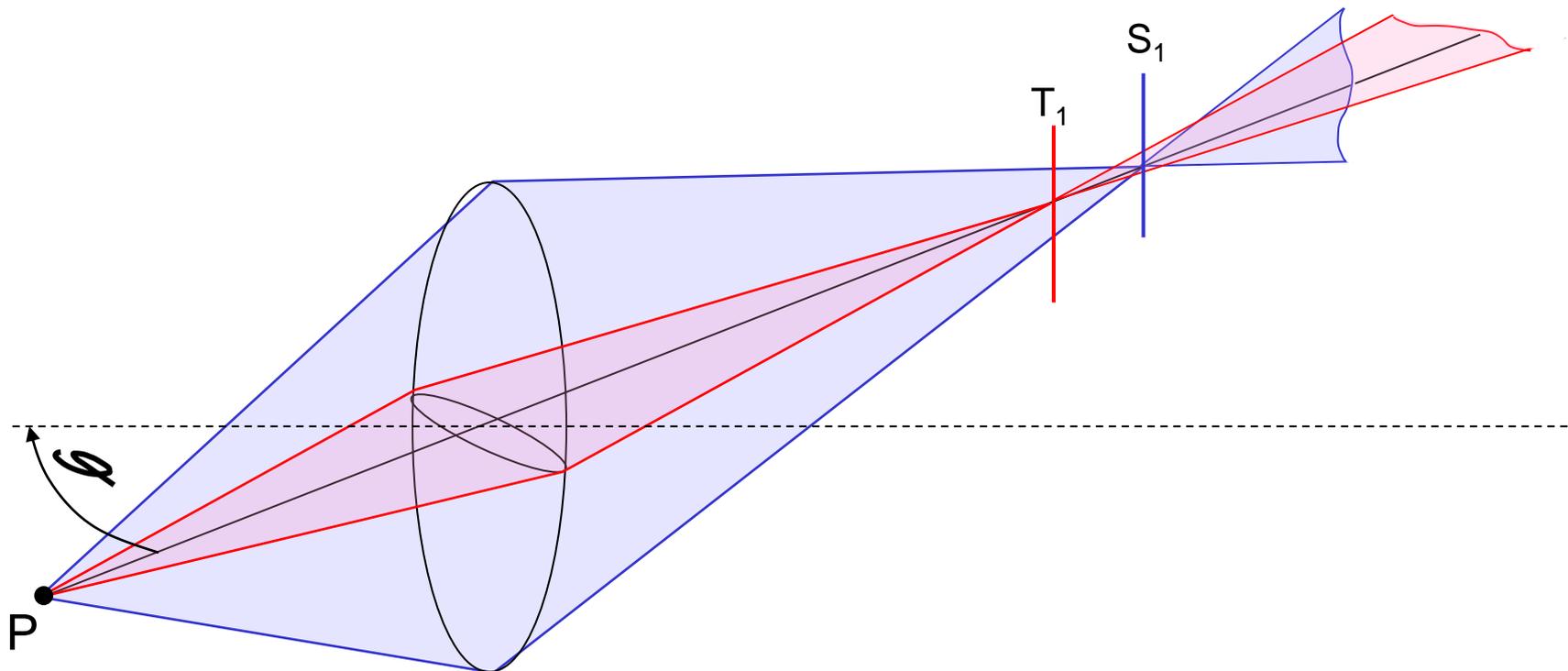
*tonnenförmig*

- Folge: gekrümmte Darstellung von Linien, die nicht durch den Bildmittelpunkt verlaufen
- gekrümmt dargestellt werden.
- kissen- oder tonnenförmige Verzeichnung abhängig davon, ob der Abbildungsmaßstab zum Bildrand hin zu oder abnimmt
- Markant insbesondere in der Fotografie bei extremen Tele- oder Weitwinkelobjektiven
- Korrektur: nur mit speziellen Objektiven aus mehreren Linsen möglich, Abblenden der Randstrahlen bewirkt keine Verbesserung

## Die optische Abbildung: Abbildungsfehler von Linsen

### Astigmatismus

- Versatz der Bildpunkte zwischen den Strahlenbündeln in der Meridionalebene (rot) und der Saggitalebene (blau) bei schiefem Einfall (P außerhalb der optischen Achse)



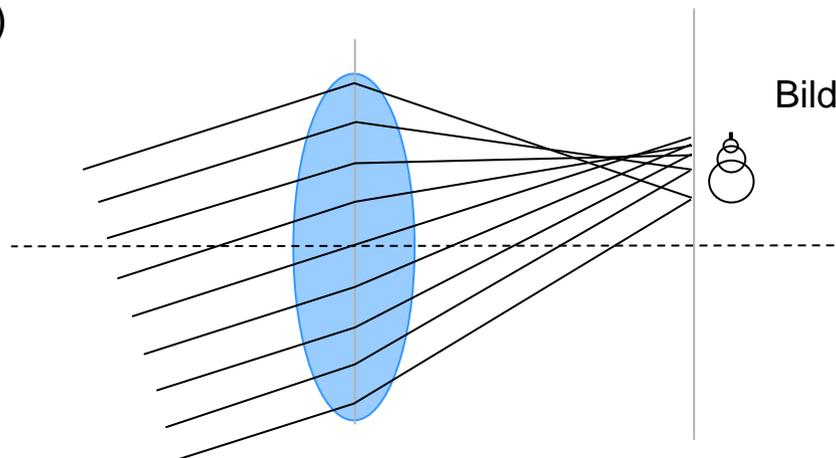
## Die optische Abbildung: Abbildungsfehler von Linsen

### Koma

- Schräg eintreffende parallele Strahlenbündel eines Objektes außerhalb der optischen Achse werden auch schräg wieder gebündelt, dadurch Überlagerung von sphärischer Abberation und Astigmatismus
- Folge: Abbildung des Objektes mit einem zum Rand hin verlaufenden Schweif

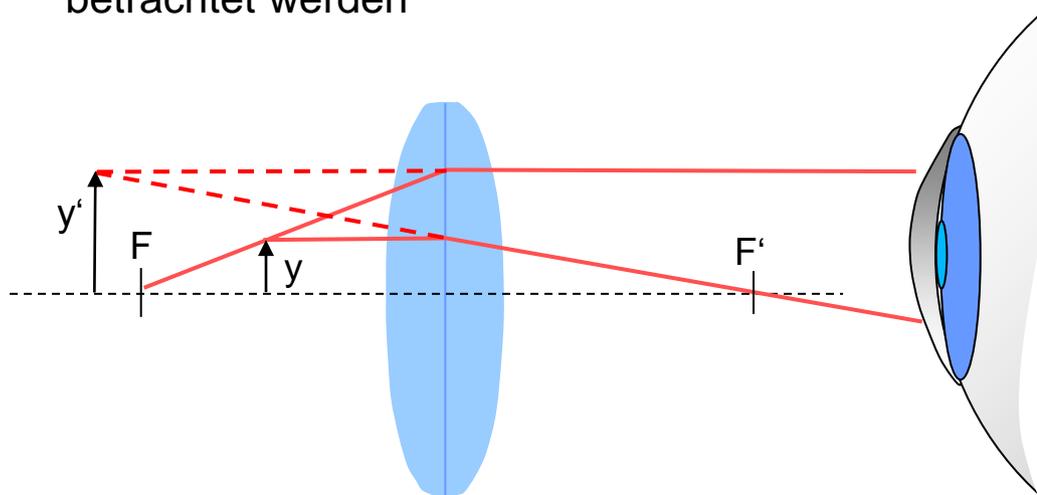
### Korrektur

- leichte Fehlerbehebung durch Randstrahlablendung
- vollständige Korrektur nur durch speziell konstruierte Optiken (aplanate Linsensysteme)



## Optische Geräte: Lupe

- Position des Objektes  $y$ : zwischen dem objektseitigen Brennpunkt und der Linsenvorderkante bzw. der Hauptebene
- Erzeugung eines aufrecht stehenden, gegenüber dem Objekt vergrößerten virtuelles Bildes  $y'$
- vergrößertes Bild wird über die Linse des Auges auf die Netzhaut projiziert und kann somit betrachtet werden



Interpretation virtuelles Bild: von der Linse gehen Strahlen aus, als würden sie von einem gegenüber dem Objekt  $y$  vergrößerten Objekt vor dem objektseitigen Brennpunkt stammen.

- Virtueller Bildpunkt: Schnittpunkt der rückwärtig verlängerten Strahlen (z.B. Brennpunkt- Parallelstrahl)
- häufige Verwendung einer Lupe als Okular in anderen optischen Geräten zur Möglichkeit der Betrachtung mit dem menschlichen Auge
- Okular: Linse oder Linsensystem, durch das man mit dem Auge (lat. oculus) in ein optisches System blickt, Funktionsweise häufig wie eine Lupe

## Optische Geräte: Fernrohr und Lichtmikroskop

### Fernrohr

Gerät mit meist 2 Linsensystemen:

- Objektiv: bildet ein weit entferntes Objekt in eine Zwischenebene ab, es entsteht ein umgekehrtes reelles Bild
- Okular: vergrößert dieses Bild und ermöglicht die Betrachtung mit dem Auge (häufig wie eine Lupe)

### Lichtmikroskope

- erzeugen stark vergrößerte Bilder von kleinen Objekten
- Technische Ausführungen: einfache Varianten mit Linsen oder Linsensystemen (im Prinzip stark vergrößernde Lupen) oder Systeme mit Objektiv (erzeugt reelles Zwischenbild) und Okular zur Betrachtung

**Viele Optische Geräte und Funktionsweisen lassen sich mit Kameras ausrüsten, was die Erfassung, Abspeicherung und computergestützte Verarbeitung der Bilddaten ermöglicht**

## Optische Geräte: Spezialausführungen von Lichtmikroskopen

### Unterteilt nach dem lichtmikroskopischen Prinzip, z.B.

- Phasenkontrast-, Interferenzkontrastmikroskopie,
- Fluoreszenzmikroskopie,
- Polarisationsmikroskopie,
- Konfokalmikroskopie

### Unterteilt nach der Anwendung, z.B.

- Messmikroskope: konventionelle Lichtmikroskope mit angepassten, meist hochwertigen Objektiven und Zusatzausrüstungen (z.B. Einblendung von Fadenkreuzen, Positioniersysteme) zur Bestimmung von Längen und Abständen von Objekten in Bildern

## Wellenoptik

### Lichteigenschaften: Kohärentes und inkohärentes Licht

Allg.: Maß für die Interferenzfähigkeit

Inkohärentes Licht: kurze Wellenzüge unterschiedlicher Phasenlage; Nachweis wellenoptischer Eigenschaften (Beugung, Interferenz), schwer bzw. nicht möglich

Kohärentes Licht (Nachweis wellenoptischer Eigenschaften möglich): lange Wellenzüge ( $l \gg \lambda$ ) gleicher Phasenlage (zeitliche Kohärenz); Wellen müssen räumlich so zueinander angeordnet sein, dass tatsächlich Interferenz stattfindet und nachgewiesen werden kann (räumliche Kohärenz)

Erzeugung:

- Punktlichtquellen (z.B. mittels Lochblende) z.B. in Verbindung mit Farbfiltern
- Laser

## Wellenoptik: Interferenz

**Interferenz:** Überlagerung von 2 oder mehr Wellen nach dem Superpositionsprinzip

**Interferenzoptische Effekte** lassen sich erzielen und darstellen bei kohärentem Licht gleicher Wellenlänge

**Beispiel:** Überlagerung von 2 Wellen gleicher Amplitude  $A$ , gleicher Wellenlänge, Schwingungsebenen und der Phasendifferenz  $\varphi$ :

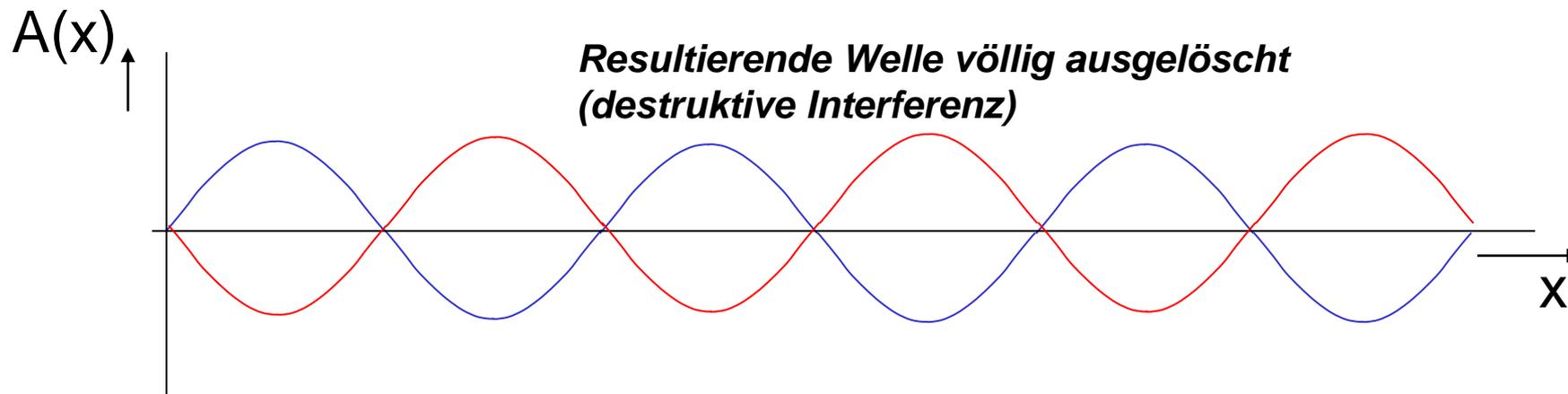
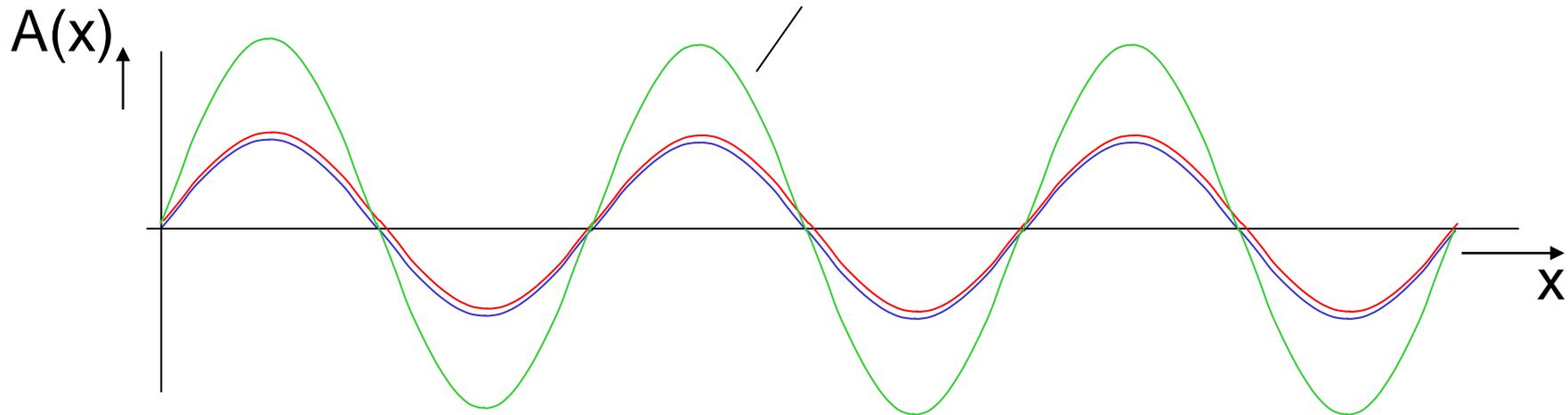
Im Falle gleicher Phasenlage ergibt sich die Amplitude der resultierenden Welle aus der Summe der Teilwellen, also  $A_{\text{res}} = 2A$ , die Phasenlage entspricht der ursprünglichen (gleichen) Phasenlage beider Wellen. Hier findet also eine Vergrößerung der ursprünglichen Amplituden statt: **konstruktive Interferenz**

Im Falle einer Phasenverschiebung beider Wellen um  $\varphi = \pi$  löschen sich beide Wellen vollständig aus: **destruktive Interferenz**

Für **beliebige Phasenverschiebungen** kann man die Amplitude und die Phasenverschiebung der resultierenden Welle z.B. mit trigonometrischen Beziehungen (Kosinussatz) oder der symbolischen Methode (Zeigeraddition) ermitteln.

## Wellenoptik: Interferenz

**Resultierende Welle (konstruktive Interferenz)**



**Resultierende Welle völlig ausgelöscht  
(destruktive Interferenz)**

## Wellenoptik: Huygenssches Prinzip

**Huygenssches Prinzip:** Jeder Punkt einer Wellenfront ist Ausgangspunkt einer neuen Elementarwelle.

### Das bedeutet im Raum:

Jeder Punkt einer halbkugelförmigen Wellenfront ist wiederum Ausgangspunkt einer sich halbkugelförmig ausbreitenden Elementarwelle.

### In der Ebene:

Jeder Punkt einer halbkreisförmigen Wellenfront ist wiederum Ausgangspunkt einer sich halbkreisförmig ausbreitenden Elementarwelle.

Eine Ausbreitung der neuen Elementarwelle nach hinten findet nicht statt; deshalb halbkugel- bzw. halbkreisförmige Ausbreitung in der ursprünglichen Richtung.

Die neu entstanden Elementarwellen überlagern sich (interferieren) nach dem Superpositionsprinzip mit der ursprünglichen Welle und den anderen Elementarwellen.

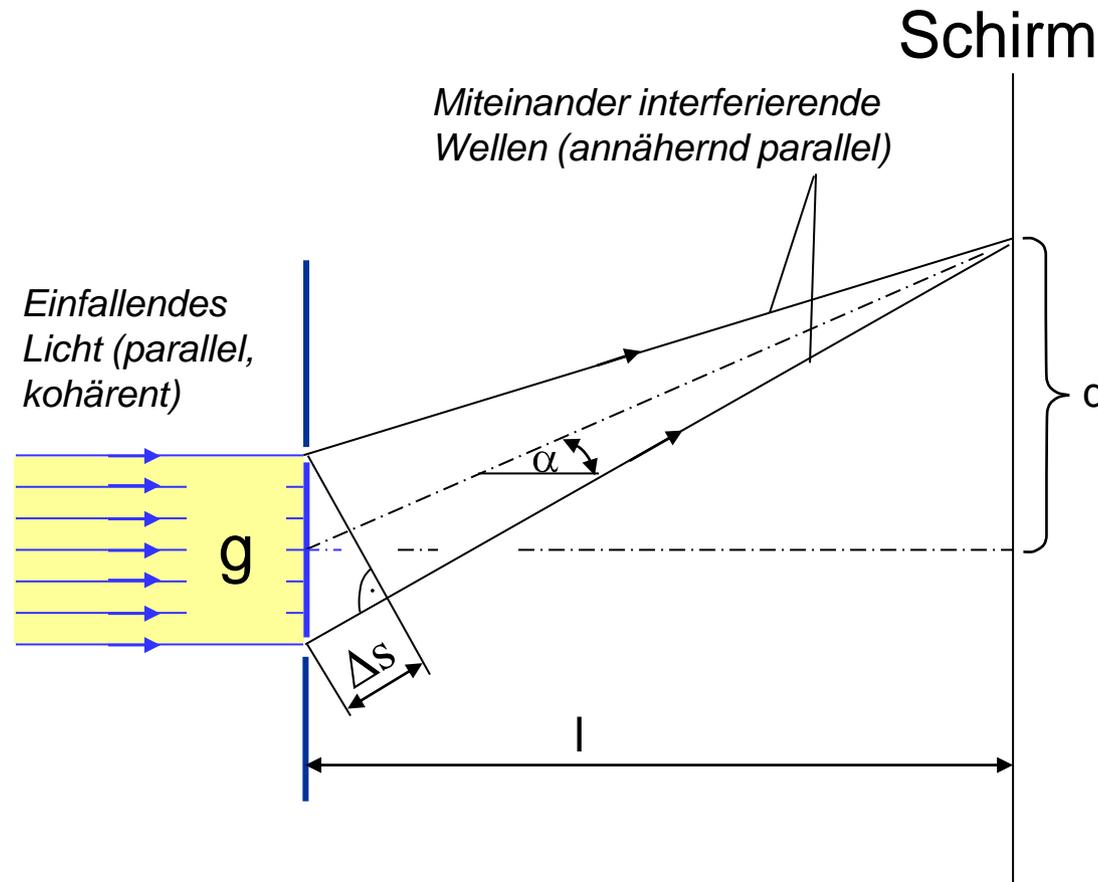
## Wellenoptik: Huygenssches Prinzip

### Schlussfolgerungen aus dem Huygensschen Prinzip

Eine Welle, welche sich ohne Hindernisse ausbreitet, interferiert mit den neu entstandenen Elementarwellen dergestalt, dass sich alle Anteile, welche von der ursprünglichen Ausbreitungsrichtung abweichen, gegenseitig aufheben, das Huygenssche Prinzip ist also in diesem Falle nicht nachweisbar.

Trifft eine Welle auf ein Hindernis, so befinden sich dahinter ein oder mehrere Gebiete, welche von der ursprünglichen Welle nicht erfasst werden. Die neuen Elementarwellen interferieren hier und heben sich mit den Anteilen der ursprünglichen Welle nicht auf. Es lassen sich Interferenzerscheinungen beobachten und nachweisen.

## Wellenoptik: Interferenz / Beugung am Doppelspalt



Es gilt:

$$A_1(t, x) = A \sin\left(\omega t + x \cdot \frac{2\pi}{\lambda}\right)$$

$$A_2(t, x) = A \sin\left(\omega t + x \cdot \frac{2\pi}{\lambda} + \Delta\varphi\right)$$

weiterhin:

$$\Delta s = g \cdot \sin \alpha$$

**Voraussetzungen:  $l \gg g \rightarrow$  interferierende Wellen sind nahezu parallel (Fraunhofersche Beugung); beide Wellen haben die gleiche Amplitude  $A$**

**Beide Wellen überlagern sich summarisch (Interferenz)**

## Wellenoptik: Interferenz / Beugung am Doppelspalt

Für das Amplitudenquadrat der resultierenden Welle ergibt sich nach dem Kosinussatz

$$I \sim A_{res}^2 = 2A^2(1 - \cos(\pi - \Delta\varphi)) = 2A^2(1 + \cos\Delta\varphi) = 4A^2 \cos^2 \frac{\Delta\varphi}{2}$$

Dieses ist definitionsgemäß proportional zur *Lichtintensität*  $I$ .

Mit  $\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta s}{\lambda}$  und  $\Delta s = g \cdot \sin \alpha$

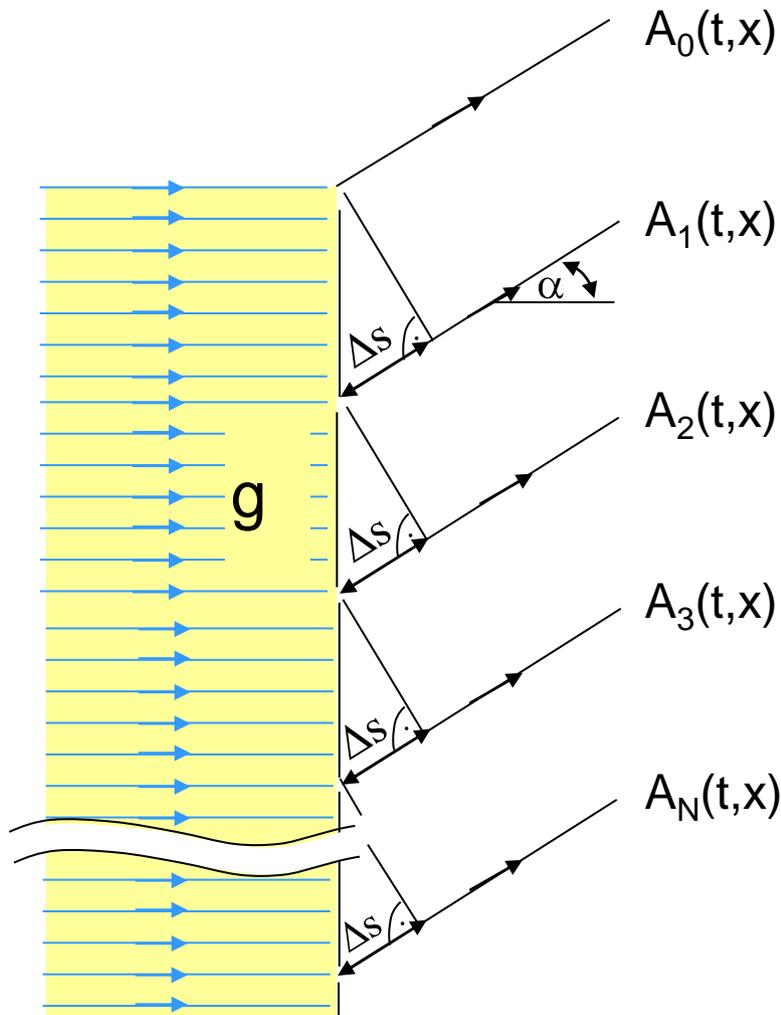
sowie der Definition  $I_0 = A^2$

erhält man: 
$$I = 4I_0 \cdot \cos^2 \left( 2\pi \cdot \frac{g \cdot \sin \alpha}{2 \cdot \lambda} \right)$$

Anwendung der Kleinwinkelnäherung:  $\sin \alpha \approx \tan \alpha = \frac{d}{l}$

$$\rightarrow I = 4I_0 \cdot \cos^2 \left( \pi \cdot \frac{d \cdot g}{\lambda \cdot l} \right)$$

## Wellenoptik: Interferenz / Beugung am Mehrfachspalt (Gitter)



$$A_0(t, x) = A \sin\left(\omega t + x \cdot \frac{2\pi}{\lambda}\right)$$

$$A_1(t, x) = A \sin\left(\omega t + x \cdot \frac{2\pi}{\lambda} + \Delta\varphi\right)$$

$$A_2(t, x) = A \sin\left(\omega t + x \cdot \frac{2\pi}{\lambda} + 2\Delta\varphi\right)$$

:

$$A_N(t, x) = A \sin\left(\omega t + x \cdot \frac{2\pi}{\lambda} + \frac{N}{2} \Delta\varphi\right)$$

## Wellenoptik: Interferenz / Beugung am Mehrfachspalt (Gitter)

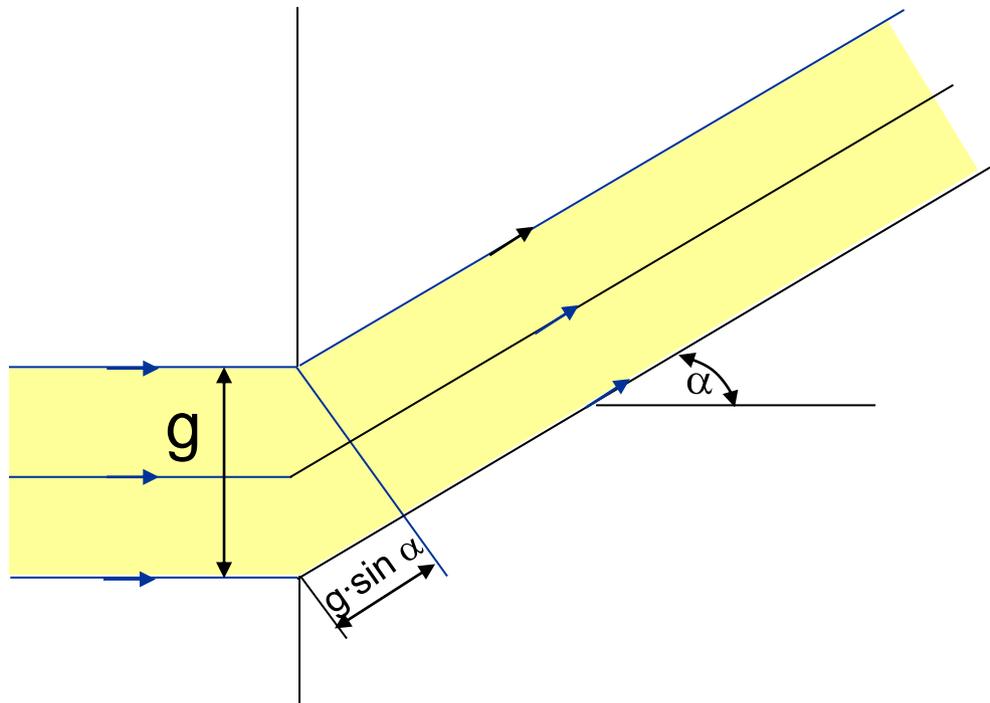
Zusammenfassung mit Hilfe trigonometrischer Beziehungen bzw. Zeigerarithmetik:

$$A_{res}(\Delta\varphi) = A \frac{\sin\left(N \frac{\Delta\varphi}{2}\right)}{\sin \frac{\Delta\varphi}{2}}; \quad \text{Intensität: } I(\Delta\varphi) = A_{res}^2(\Delta\varphi) = A^2 \frac{\sin^2\left(N \frac{\Delta\varphi}{2}\right)}{\sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2}}$$

mit  $\Delta\varphi = 2\pi \frac{g \cdot \sin \alpha}{\lambda}$  und  $\sin \alpha \approx \tan \alpha = \frac{d}{l}$  (Kleinwinkelnäherung):

$$I(\alpha) = A_{res}^2(\alpha) = A_0^2 \frac{\sin^2\left(N\pi \frac{g \cdot d}{\lambda \cdot l}\right)}{\sin^2\left(\pi \frac{g \cdot d}{\lambda \cdot l}\right)}$$

## Wellenoptik: Interferenz / Beugung am Einfachspalt



Übergang vom Mehrfachspalt mit endlichen Gitterabständen zum Einfachspalt mit beliebig dichten Gitterabständen und einer unendlichen Spaltanzahl ( $N \rightarrow \infty$ )

Gangunterschied zwischen benachbarten Teilwellen bei insgesamt  $N$  Teilwellen

$$\Delta s = \frac{g \sin \alpha}{N}$$

Daraus ergibt sich der Phasenunterschied zwischen benachbarten Wellen ( $2\pi$  entspricht  $\lambda$ )

$$\Delta \varphi = 2\pi \cdot \frac{\Delta s}{\lambda} = 2\pi \cdot \frac{g \cdot \sin \alpha}{N \cdot \lambda}$$

## Wellenoptik: Interferenz / Beugung am Einfachspalt

Einsetzen in Gl. Für Mehrfachspalt und Grenzübergang  $N \rightarrow \infty$

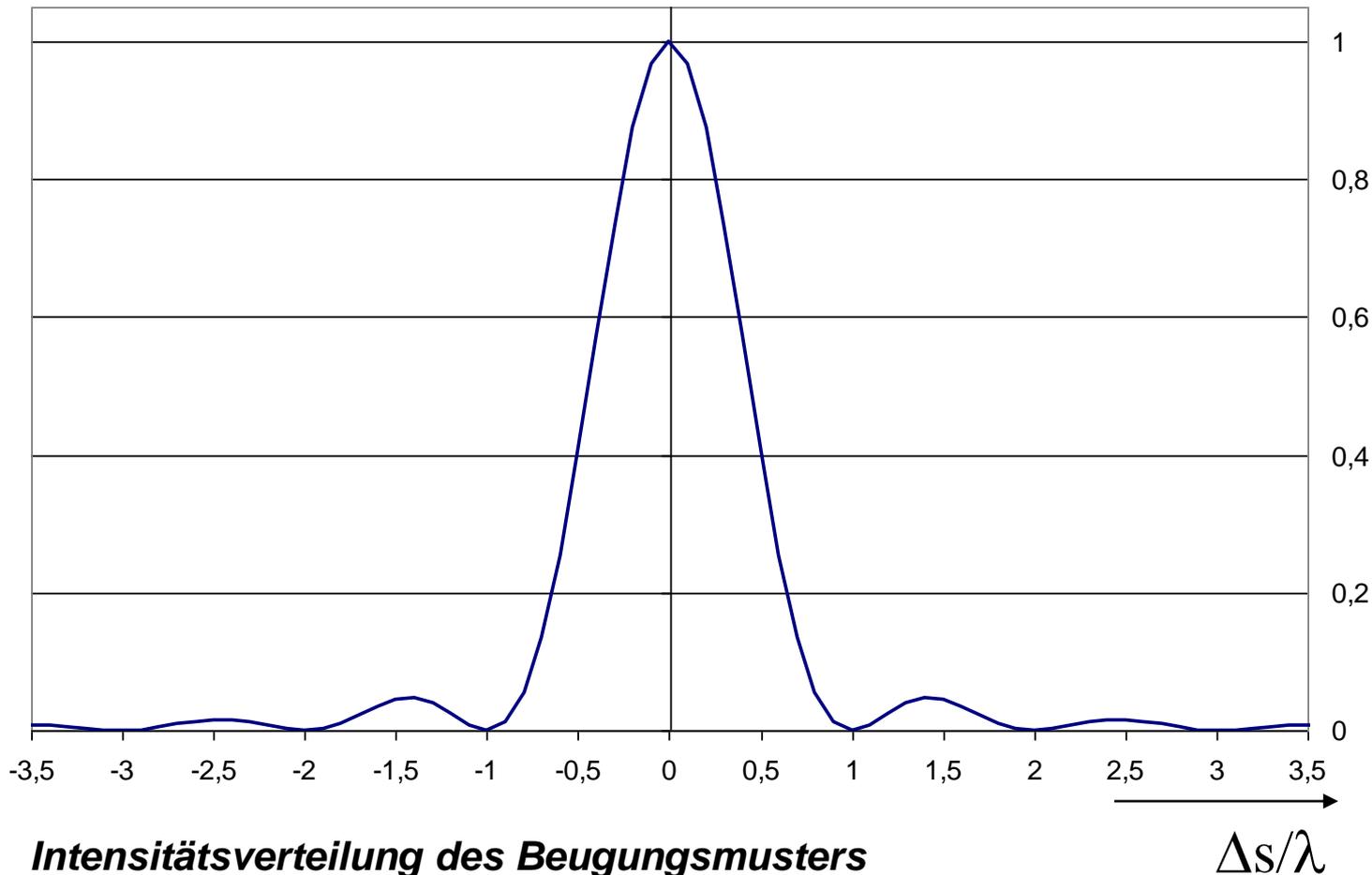
$$I = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{I_0}{N^2} \cdot \left( \frac{\sin\left(N \cdot \frac{\Delta\varphi}{2}\right)}{\sin \cdot \frac{\Delta\varphi}{2}} \right)^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{I_0}{N^2} \cdot \left( \frac{\sin\left(N \cdot \frac{\frac{2\pi}{\lambda} \cdot g \cdot \sin \alpha}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\frac{2\pi}{\lambda} \cdot g \cdot \sin \alpha}{2}\right)} \right)^2$$

Wegen  $N \rightarrow \infty$  Anwendung der Kleinwinkelnäherung  $\sin \alpha \approx \alpha$  im Nenner:

$$I = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{I_0}{N^2} \cdot \left( \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} \cdot g \cdot \sin \alpha\right)}{\frac{1}{N} \cdot \frac{\pi}{\lambda} \cdot g \cdot \sin \alpha} \right)^2 = I_0 \cdot \frac{\left( \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} \cdot g \cdot \sin \alpha\right) \right)^2}{\left( \frac{\pi}{\lambda} \cdot g \cdot \sin \alpha \right)^2}$$

grafische Darstellung siehe nächste Seite

## Wellenoptik: Interferenz / Beugung am Einfachspalt



Maxima bei  
 $0; k+0,5; -(k+0,5)$   
 $k=1;2;3 \dots$

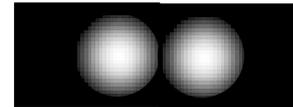
Minima bei  $k$   
 $k=1;2;3 \dots$

**Intensitätsverteilung des Beugungsmusters  
am Einfachspalt**

## Wellenoptik: Beugungsbegrenzung der Auflösung

**Relaygh-Kriterium** für die **Beugung am Spalt**: die Hauptmaxima der Beugungsfiguren zweier punktförmiger Objekte müssen mindestens soweit entfernt sein wie das Hauptmaximum vom ersten Minimum. Aus den Gleichungen für die Beugung am Spalt folgt dann für den Winkelabstand (Spaltbreite  $d$ ):

$$\alpha_{\min} = \arcsin\left(\frac{\lambda}{d}\right) \approx \frac{\lambda}{d}$$



Übertragung auf die **Beugung an einer kreisförmigen Blende** (Blendendurchmesser  $d$ ):

$$\alpha_{\min} = \arcsin\left(1,22 \cdot \frac{\lambda}{d}\right) \approx 1,22 \cdot \frac{\lambda}{d}$$

Umrechnung in den kleinsten auflösbaren Abstand  $a_{\min}$  (Numerische Apertur NA)

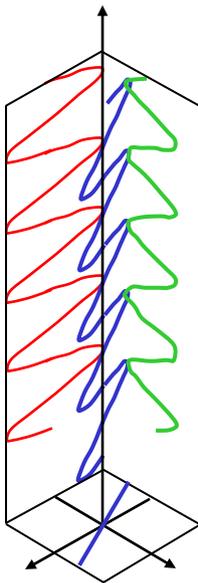
$$a_{\min} = \frac{1,22\lambda}{2 \cdot NA} \quad (\text{Abbesche Auflösungsgrenze des Mikroskops})$$

## Wellenoptik: Polarisation

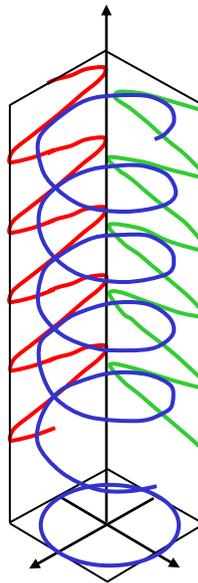
- Licht: elektromagnetische Welle mit Schwingungsrichtung transversal zur Ausbreitungsrichtung, in dieser Ebene nach allen Raumrichtungen möglich
- Unpolarisiertes Licht: Überlagerung von Wellen, die nach allen Richtungen schwingen.
- Polarisiertes Licht: Wellen schwingen in der gleichen Ebene
- Auftreten der Polarisation: natürlich z.B. bei Reflexion an bestimmten Oberflächen oder Brechung bei bestimmten Materialien, künstlich nmittels spezieller Anordnungen zur Polarisation (z.B.  $\lambda/4$ -Plättchen)
- Anwendung der Polarisation in der Bildverarbeitung: z.B. Herausfiltern des direkten Reflexes bei stark spiegelnden Oberflächen (der direkte direkte Reflex ist häufig polarisiert, sodass bei Einsatz eines Polarisationsfilters entsprechender Orientierung der direkte Reflex herausgefiltert werden kann)

## Wellenoptik: Polarisation

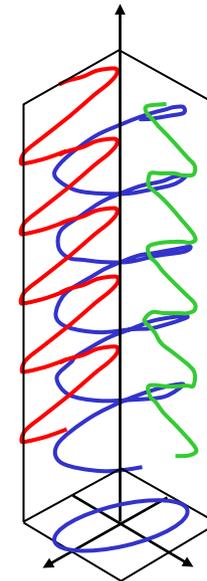
### 3 Formen von polarisiertem Licht:



**Linear polarisiertes Licht:** Schwingungen in einer bestimmten Richtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung.



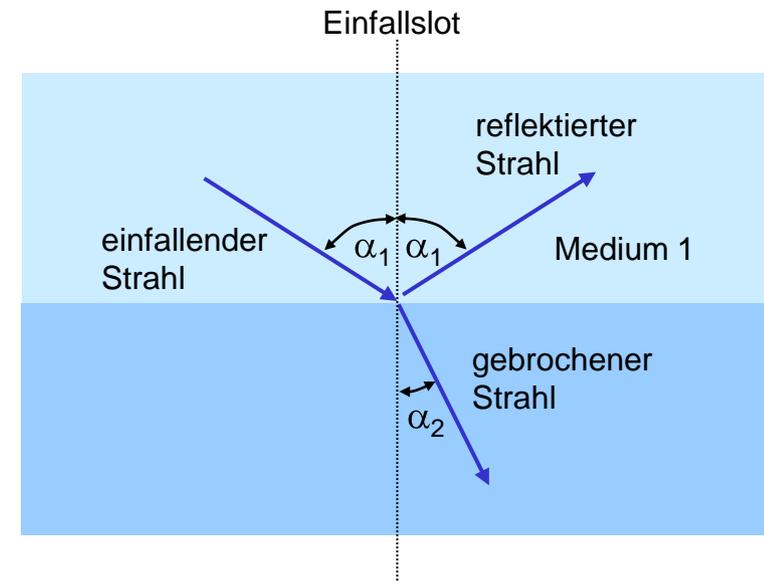
**Zirkular polarisiertes Licht:** Die Schwingungsebene des elektrischen Feldes dreht sich bei konstanter Feldstärke.



**Elliptisch polarisiertes Licht:** Ähnlich wie zirkular polarisiertes Licht, nur ändert sich hier die Feldstärke der elektromagnetischen Welle elliptisch.

## Fresnel-Gleichungen

Trifft ein Lichtstrahl auf eine transparente Oberfläche, so treten unter bestimmten Umständen sowohl Brechung als auch Reflexion auf. Die jeweiligen Anteile lassen sich mit den Fresnel-Gleichungen ermitteln. Diese sind aus den Maxwell'schen Gleichungen abgeleitet



### **Fresnel-Gleichungen**

$\rho$  - Reflexionsverhältnis der Amplituden;  $\sigma$  - Transparenzverhältnis (jeweils bezogen auf einfallenden Strahl)

$\vec{E}$  - Vektor des elektrischen Feldes der Welle

**$\vec{E}$  senkrecht zur Einfallsebene**

$$\rho = -\frac{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)}$$

$$\sigma = \frac{2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)}$$

**$\vec{E}$  parallel zur Einfallsebene**

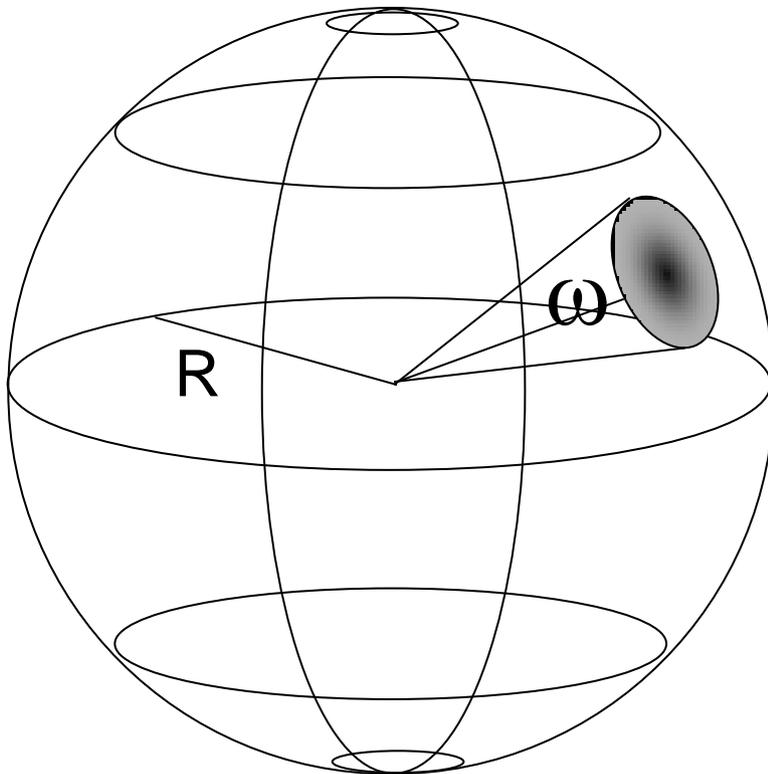
$$\rho = -\frac{\tan(\alpha_1 - \alpha_2)}{\tan(\alpha_1 + \alpha_2)}$$

$$\sigma = \frac{2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2) \cos(\alpha_1 - \alpha_2)}$$

48 von 103

## Lichttechnik: Raumwinkel

### Definition des Raumwinkels $\Omega$



Der Raumwinkel ist definiert als Fläche auf einer Einheitskugel mit dem Radius 1m, welche durch einen Kegel herausgeschnitten wird, dessen Spitze sich im Kugelmittelpunkt befindet. Die Maßeinheit heißt sr (Steradian):  $1 \text{ sr} = 1 \text{ m}^2/\text{m}^2$ .

Es gilt:

$$\Omega = 2\pi \left(1 - \cos \frac{\omega}{2}\right)$$

mit  $\omega$  – ebener Öffnungswinkel des Kegels

Ein Raumwinkel von **1sr** entspricht einem ebenen Winkel  $\omega$  **von 66°**

Der Raumwinkel einer Vollkugel beträgt

$$\Omega = 4\pi \text{ sr}$$

## Lichttechnik: strahlungsphysikalische und lichttechnische (fotometrische) Größen

Physikalische Größe	SI-Einheit	fotometrische Entsprechung	SI-Einheit
Strahlungsenergie $Q_e$	J	Lichtmenge	lm·s
Strahlungsfluss $\Phi_e$	W	Lichtstrom $\Phi$	lm (lumen)
Bestrahlung $H_e$	J/m <sup>2</sup>	Belichtung $H$	lm·s·m <sup>-2</sup>
Strahlstärke $I$	W/sr	Lichtstärke $I_v$	cd (candela)
Bestrahlungsstärke $E_e$	W/m <sup>2</sup>	Beleuchtungsstärke $E$	lx (lux)
Strahldichte $L$ ; $L_\Omega$	W·m <sup>-2</sup> ·sr <sup>-1</sup>	Leuchtdichte $L$	cdm <sup>-2</sup>

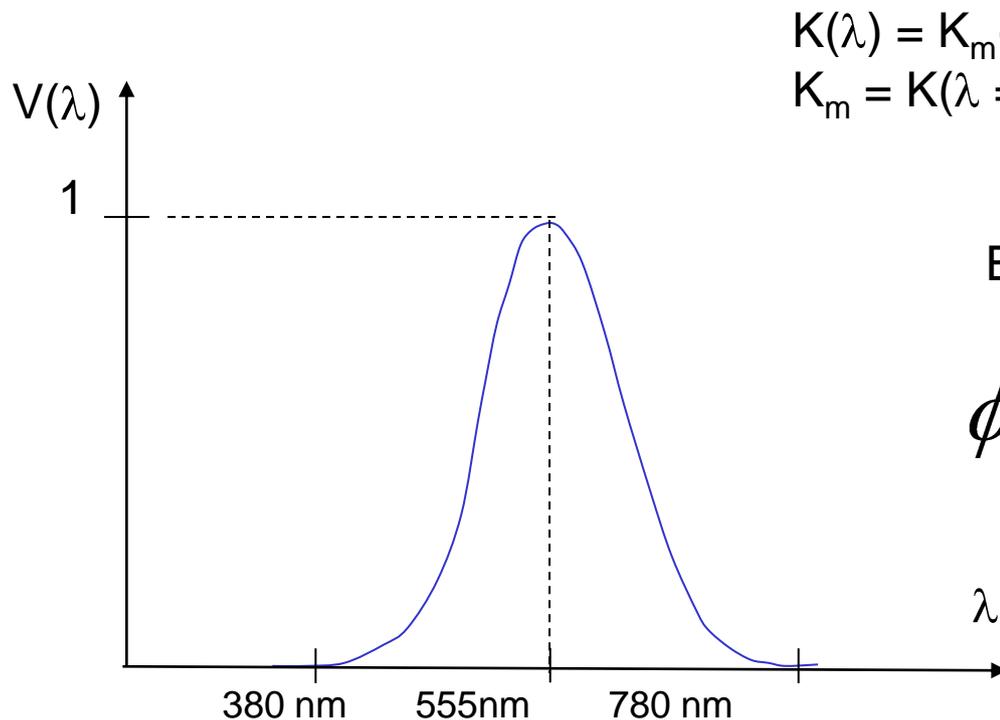
### Beziehungen zwischen den fotometrischen Größen

$$1 \text{ lx} = 1 \text{ lm} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$1 \text{ cd} = 1 \text{ lm sr}^{-1}$$

## Lichttechnik: strahlungsphysikalische und lichttechnische (fotometrische) Größen

Basis für die Umrechnung zwischen strahlungsphysikalischen und lichttechnischen Größen: **Fotometrisches Strahlungsäquivalent**



$$K(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda)$$

$$K_m = K(\lambda = 555\text{nm}) = 683 \text{ lumen / Watt}$$

Es gilt:

$$\phi_v = K_m \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \frac{\partial \phi_e}{\partial \lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda$$

Hellempfindlichkeit des Auges (Tagsehen)

## Lichttechnik: Schwarzer Strahler / Temperaturstrahler und Normlichtarten

**Schwarzer Strahler:** idealisierter Körper

- absorbiert ihn treffende elektromagnetische Strahlung bei jeder Wellenlänge vollständig;
- In Umkehrung der Absorption ist er eine ideale thermische Strahlungsquelle, deren charakteristisches elektromagnetisches Spektrum ausschließlich von der Temperatur abhängt.
- Realisierung z.B. mit sogenanntem „Hohlraumstrahler“

**Stefan-Boltzmann-Gesetz:**

beschreibt den Zusammenhang zwischen der emittierte Lichtleistung eines schwarzen Körpers („schwarzer Strahler“, „Planckscher Strahler“) und der Abhängigkeit von der Temperatur und der abstrahlenden Fläche.

## Lichttechnik: Schwarzer Strahler / Temperaturstrahler und Normlichtarten

**Plancksches Strahlungsgesetz:** Spektrale Verteilung des emittierten Lichtes eines schwarzen Strahlers in Abhängigkeit von der Temperatur

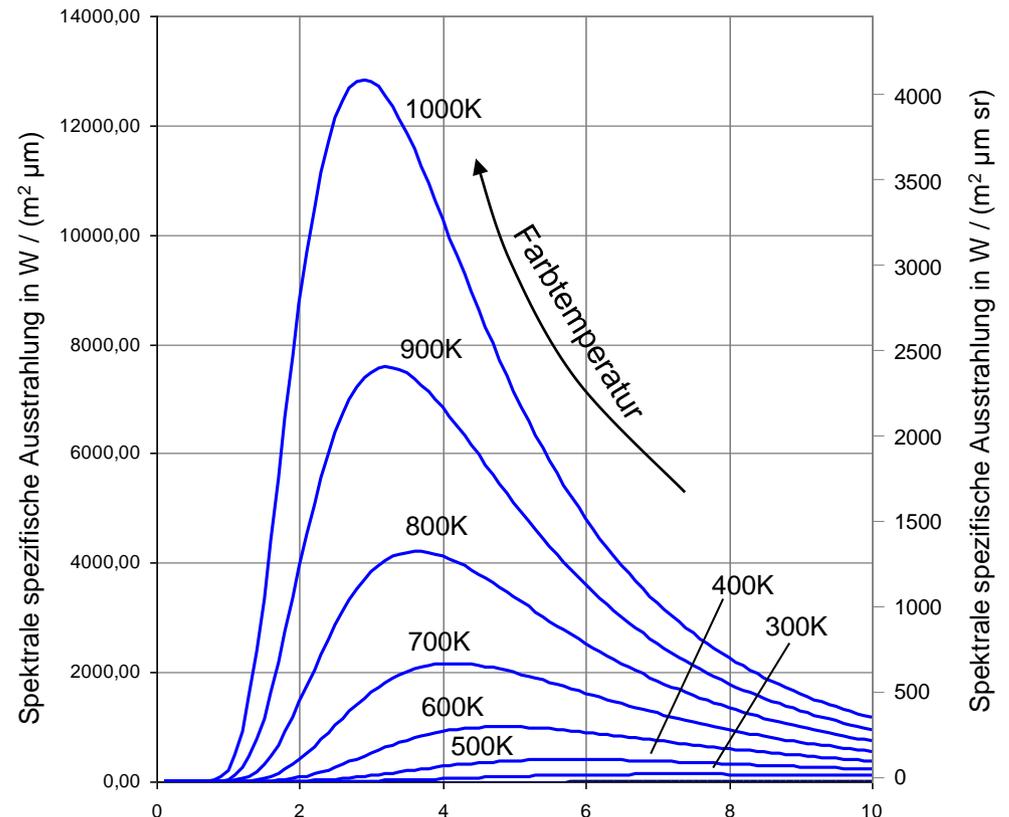
**Spektrale Spezifische Ausstrahlung:**

$$M_{\lambda}^0(\lambda, T) dA d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{\lambda T}\right)} - 1} dA d\lambda$$

Leistung, welche von einem Flächenelement  $dA$  im Wellenlängenbereich zwischen  $\lambda$  und  $\lambda+d\lambda$  in den gesamten Halbraum (entspricht 3,14 sr) abgestrahlt wird; der Ausdruck  $M_{\lambda}^0$  hat den Charakter einer auf die Fläche und die Wellenlänge bezogenen Leistungsdichte

Ebenfalls üblich: die Angabe der spezifischen Leistung, bezogen auf den Raumwinkel 1sr (rechte Ordinate)

Plancksches Strahlungsspektrum



## Lichttechnik: Schwarzer Strahler / Temperaturstrahler und Normlichtarten

### *Wienscher Verschiebungssatz:*

Maximum der spektralen Verteilung der Lichtleistung in Abhängigkeit von der Temperatur:

$$\lambda_{\max} = \frac{1897,8 \mu\text{mK}}{T}$$

### *Normlichtarten:*

genormte Spektralverteilungen charakteristischer Strahler (häufig entsprechend der Farbtemperaturen des schwarzen Strahlers)

### *Beispiele*

- Normlicht A: entspricht der konventionellen Glühlampe (Farbtemp. 2856K)
- Normlicht C: entspricht dem Tageslicht (Farbtemp. 6774K)
- Eine der Spektralverteilung des menschlichen Auges annähernde Verteilung erhält man mit Normlicht A und einem zusätzlich angepassten IR-Filter

## Gliederung

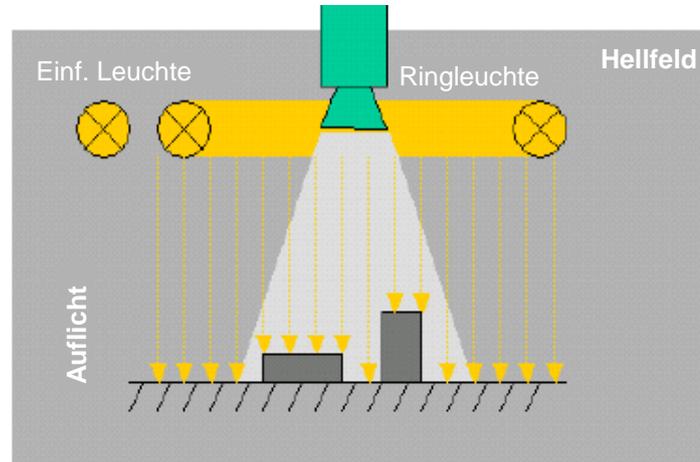
1. Allgemeiner Überblick / Wiederholung
2. **Beleuchtung**
3. Das System Kamera
  - 3.1 Abbildungsoptik
  - 3.2 Sensorelement / Aufnahmesystem
  - 3.3 Verarbeitungselektronik
4. Rechnerschnittstelle / Frame Grabber
5. Software

Enteilung der Beleuchtungen nach der Position von Kamera, Lichtquelle und Objekt

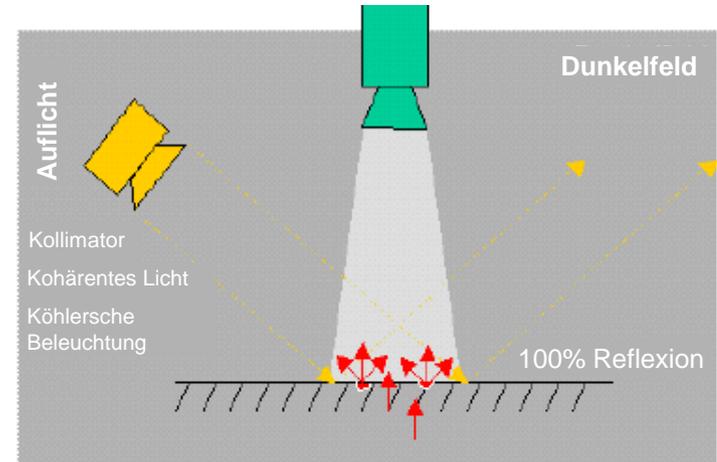
2 Möglichkeiten des Lichtweges bezüglich des Objektes: **Auflicht** / **Durchlicht**

2 Möglichkeiten des Ursprungs des auf die Kamera treffenden Lichtes: direkt reflektierte Strahlung: **Hellfeld**;  
vom Objekt gestreutes oder gebeugtes Licht: **Dunkelfeld**

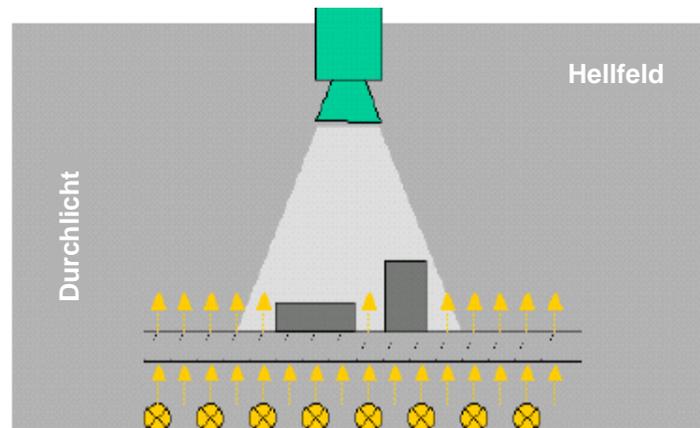
Die Kombination dieser Varianten ergibt 4 mögliche Beleuchtungsarten:



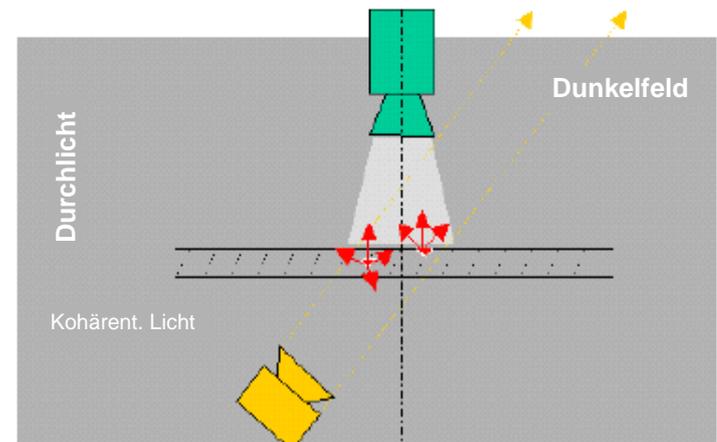
Anwendung: nur, wenn Objekte nicht durch Silhouette unterscheidbar



Anwendung: Inspektion von reflektierenden Flächen



Paralaxenfehler beachten → Kameraabstand >> Objektdicke !

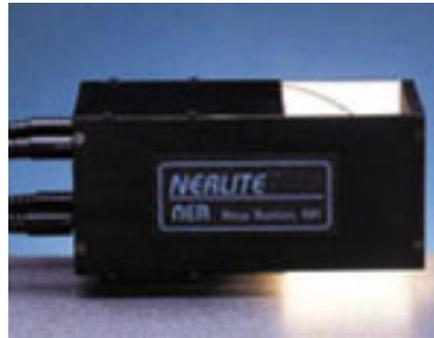


Anwendung: Oberflächen und Volumeninspektion von durchsichtigen Platten

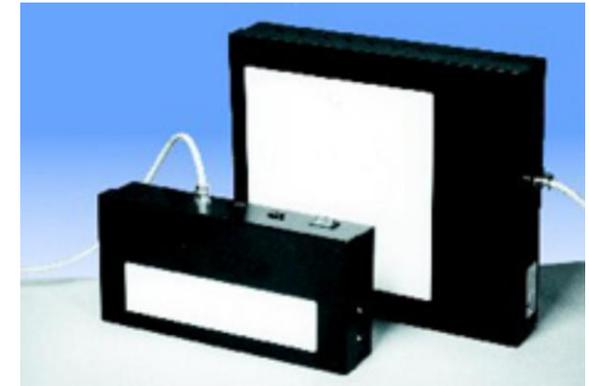
## Handelsübliche Lichtquellen und Zubehör



Hochfrequenz-Ringleuchten



Spezial-Auflichtbeleuchtung



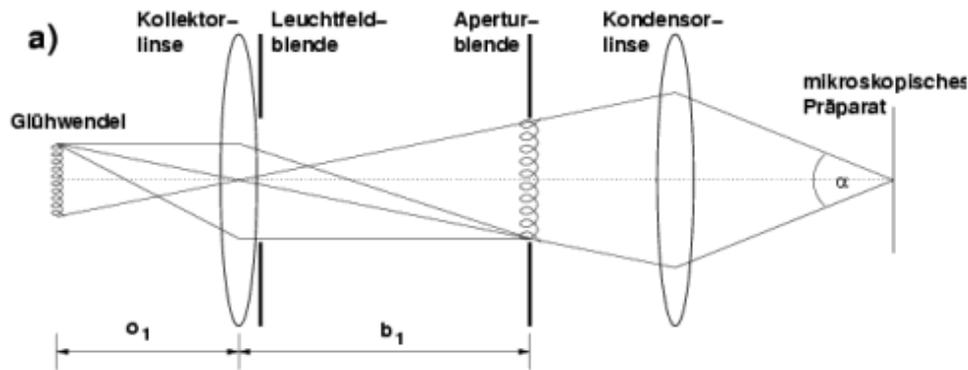
Durchlicht-Platten



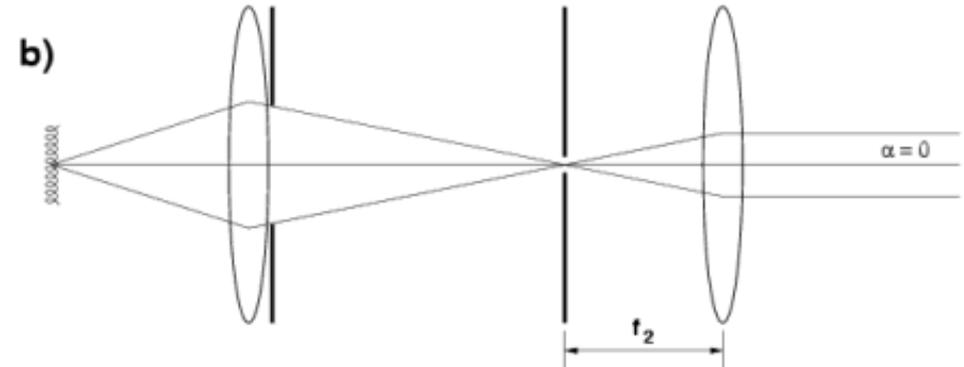
Kaltlichtbeleuchtungen, Lichtleitkabel



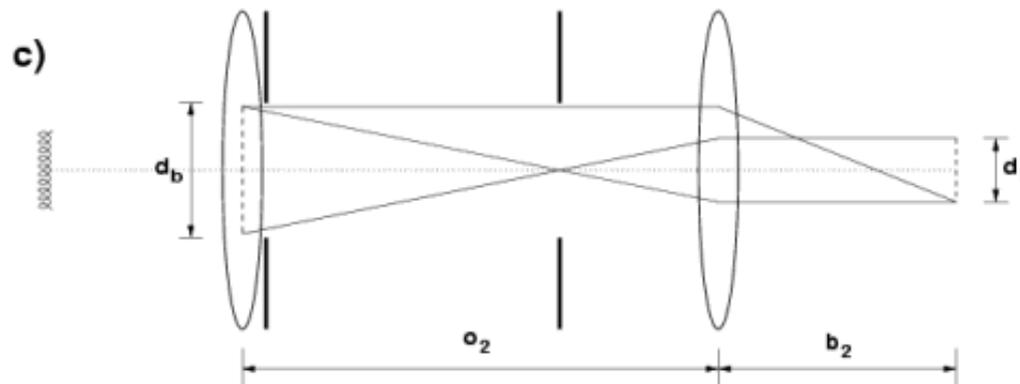
Auflichtbeleuchtung / Repro-Ständer



scharfe Abbildung der Glühwendel in die Ebene der Aperturblende durch die Kollektorlinse



Anordnung der Aperturblende in der Brennebene der Kondensorlinse



scharfe Abbildung der Leuchtfeldblende in der Objektebene durch die Kondensorlinse

## Merkmale

1. Unabhängige Einstellung von Apertur (Helligkeit) und Lichtfleckdurchmesser
2. Regelung der Kohärenz der Beleuchtung mit der Aperturblende
3. (nahezu) paralleles Licht

Anwendung: Mikroskopie  
(Dunkelfeldbeleuchtung / Auflicht)

## Köhlersche Beleuchtung / Grundprinzip

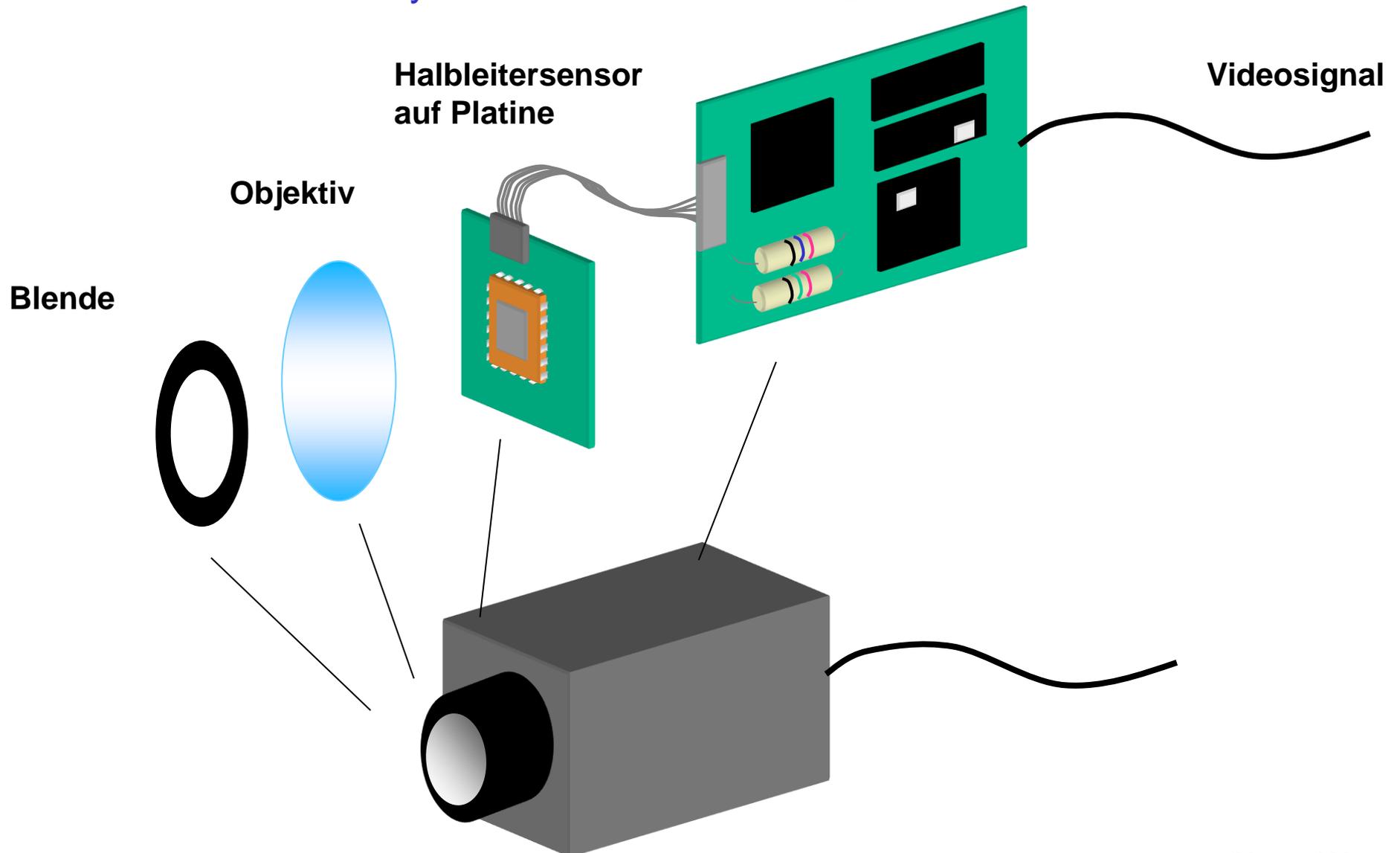
58 von 103

## Gliederung

1. Allgemeiner Überblick / Wiederholung
2. Beleuchtung
- 3. Die Kamera**
  - 3.1 Abbildungsoptik
  - 3.2 Sensorelement / Aufnahmesystem
  - 3.3 Verarbeitungselektronik
4. Rechnerschnittstelle / Frame Grabber
5. Software

## Die Kamera als Gesamtsystem

## Verarbeitungselektronik



## Kamera: Ausführungsformen



**Mono-Standard**



**Megapixel-Kamera**



**Kamera-Modul**



**3-CCD-Kamera**



**CMOS-Kamera**



**Micro-Head-Kamera**

### Übersicht Kameras:

[www.theimagingsource.com](http://www.theimagingsource.com)

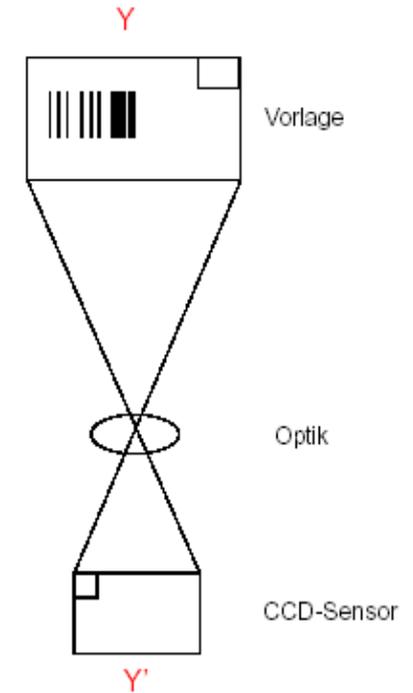
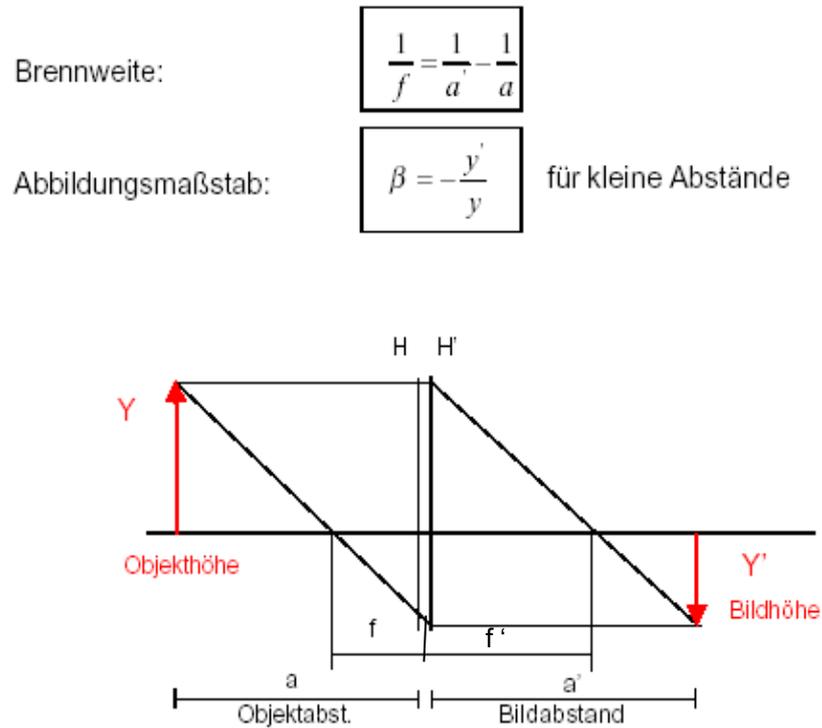
[www.imaging.de](http://www.imaging.de)

## Gliederung

1. Allgemeiner Überblick / Wiederholung
2. Beleuchtung
3. Die Kamera
  - 3.1 Abbildungsoptik**
  - 3.2 Sensorelement / Aufnahmesystem
  - 3.3 Verarbeitungselektronik
4. Rechnerschnittstelle / Frame Grabber
5. Software

## Funktion der Abbildungsoptik:

Objektiv, welches eine Szene in der Objektebene auf die Bildebene der Kamera (hier befindet sich der Halbleiterbildsensor bzw. die Aufnahmeröhre) abbildet



Abtasttheorem:

$$f_a \geq 2 \cdot f_g$$

$$d_a \leq \frac{1}{2} T$$

$f_a$  - Abtastfrequenz  
 $f_g$  - Grenzfrequenz  
 $T$  - Periodendauer  
 $d_a$  - Abtastabstand

s. a. Abschnitt „optische Abbildung“ in diesem Skript Präsentation und Vorlesung 2 „Abtastung und Digitalisierung“

### Ausführung der Abbildungsoptik:

- je nach Anwendung einfache Linse oder aufwändige Linsensystem(e), auch „Kittgruppen“
- Als Variiobjektiv oder festen, mit an die Applikation angepassten Brennweiten und Abbildungsmaßstäben
- Für anspruchsvolle Aufgaben: Verwendung von Hochleistungsobjektiven z.B. mit asphärischen, fehlerkorrigierten Linsen oder Linsensystemen, unter anderem für hochgenau messende Bildverarbeitung
- Häufige Verwendung von Objektivfassungen mit genormten Anschlüssen (z.B. C-Mount) und genormten Abständen Kamera – Objektiv

## Kamera / Abbildungsoptik / Objektive

### **Universalobjektive / Zoomobjektive**

- mit variablen Einstellungen von Blendenwerten / Vergrößerungen und Bildweiten
- vorrangig für wissenschaftliche und Laboranwendungen

### **Universalobjektive mit festen Brennweiten und Blendeneinstellungen**

- ohne besondere optische oder messtechnische Anforderungen
- (Anwendungen z.B. in der industriellen Bildverarbeitung: Mustereerkennung, Anwesenheitskontrolle usw.)

### **Präzisionsobjektive**

- Hochwertige Optiken
- Hohe optische Auflösung
- Zusätzliche Leistungsmerkmale wie Farbkorrekturen
- geeignet z.B. für messtechnische Anwendungen und Farbbildverarbeitung

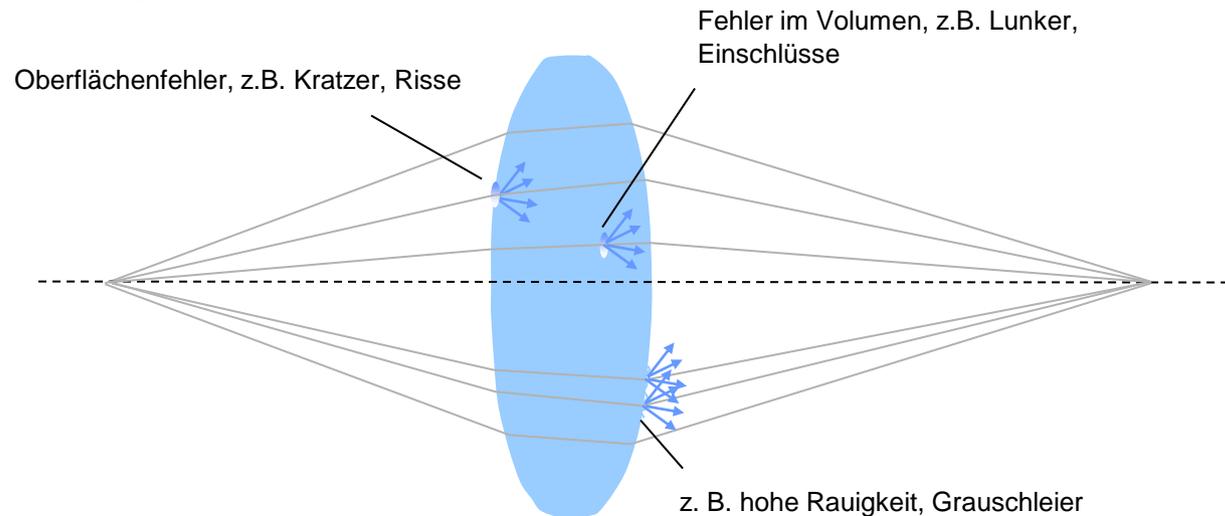
### **Telezentrische Messobjektive**

- Abbildungsmaßstab in weiten Bereichen unabhängig von der Objektweite
- Anwendungen in der Koordinatenmesstechnik

## Objektive / Eigenschaften und Qualität

Die Qualität der Abbildung ist von verschiedenen Eigenschaften, Ausführungsformen und Qualitätsmerkmalen der Objektive abhängig:

- Oberfläche: vergleichsweise raue Oberflächen und Oberflächenfehler (Kratzer, Risse, Grauschleier) usw. erzeugen Streulicht, welches die Abbildung verfälscht, häufig werden hierdurch scharfe Kanten verschliffen (Verringerung der Auflösung) bzw. die Abbildung unscharf; Regel: die Oberflächengüte sollte aus wirtschaftlichen Erwägungen an die Aufgabenstellung angepasst sein
- Fehler im Volumen des transparenten Materials (Einschlüsse, Lunker usw.): führen ebenfalls zu Streulicht und mindern die Qualität der optischen Abbildung
- Abbildungsfehler von Linsen bzw. Korrekturmaßnahmen: siehe Abschn. 1 dieser Vorlesung „Abbildungsfehler von Linsen“



## Kamera / Abbildungsoptik / Objektive

### **Wichtiges mechanisch-konstruktives Merkmal von Objektiven: Anschlussgewinde, z.B.**

- C-Mount (sehr häufige Verwendung)
- CS-Mount

Für die Verbindung von Kameras und Objektiven mit unterschiedlichen Anschlüssen gibt es eine Vielzahl handelsüblicher Adapter.

## Gliederung

1. Allgemeiner Überblick / Wiederholung
2. Beleuchtung
3. Die Kamera
  - 3.1 Abbildungsoptik
  - 3.2 Sensorelement / Aufnahmesystem**
  - 3.3 Farbkameras
  - 3.4 Verarbeitungselektronik
4. Rechnerschnittstelle / Frame Grabber
5. Software

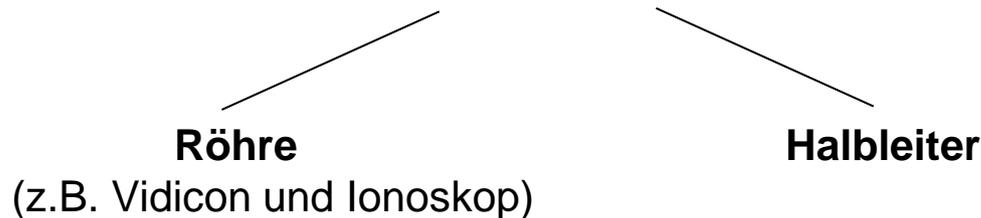
## Sensorelement / Aufnahmesystem

### Sensorelement / Kriterien für die Auswahl

- **Geometrische Auflösung (d.h. Wieviele Linienpaare sollen aufgelöst werden)**
- **Integrale Empfindlichkeit (Ansprechempfindlichkeit (in Lux), Sättigung)**
- **Spektrale Empfindlichkeit (Wellenlängenbereich, Unterschied Auge-CCD)**
- **Linearitäts- und Geometriefehler (bei CCD Geometriefehler vernachlässigbar)**
- **Dynamikbereich (GW-Dynamik)**
- **Amplitudenauflösung:**
  - Visuelle Anwendungen ca. 2 Dekaden erforderlich**
  - Messtechnik 8-12-16 Bit (256...4096...65K) erforderlich**
  - CCD 3-4 Dekaden**
  - CMOS > 6 Dekaden**
- **S/R-Verhältnis, Dunkelstrom, Shading**
- **dyn. Verhalten (mechanisch)**
- **Lebensdauer**
- **Magnetfeldeinfluß (Röhre, Gitterschwankungen)**

## Kamera / Bildsensor

### 2 grundsätzliche Möglichkeiten der Bildaufnahme:



### Halbleiterbildaufnehmer

z.B. CCD (charge coupled device), derzeit (noch) am gebräuchlichsten

Dimensionen: CCD-Einzelement, CCD-Zeile, CCD-Matrix

Bei einem CCD-Sensor wird das Bild über die Optik auf die Siliziumfläche projiziert.

Die Fläche besteht aus fotoempfindlichen Bildelementen (Picture Elements Pixel)  
Es entsteht ein Ladungsbild, welches anschließend in Spannungen umgesetzt wird.

## Grundsätzliche Wirkungsweise von Halbleiterbildsensoren

### Aufbau:

Arrays (Zeilen- bzw. Matrixanordnung) von lichtempfindlichen und gegeneinanderabgegrenzten Bereichen; meist in Form von MOS-Kondensatoren, welche Ladungen speichern können

### Optoelektronische Wandlung

Generation von Fotolektronen mittels innerem Fotoeffekt  
-entweder im MOS-Kondensator selber (CCD-Sensorprinzip) oder  
-mittels zusätzlicher Fotodiode in jedem Pixel

### Ladungstransport / Auslesung:

-mittels CCD-Prinzip (CCD-Schieberegister) oder  
-mittels direktem elektrischen Kontakt, Pixel einzeln adressierbar (CID-Sensoren, Photodiodenarrays, teilweise CMOS-Sensoren);

### Namensgebung:

richtet sich nicht notwendigerweise nach dem Prinzip der optoelektronischen Wandlung, sondern z.B. auch nach dem Ausleseprinzip (z.B. CCD) oder der verwendeten Technologie / Schaltungstechnik (z.B. CMOS)

## Grundsätzliche Wirkungsweise von Halbleiterbildsensoren

### Zusammenhang zwischen Bestrahlung und Ausgangssignal

Die Anzahl optisch generierter Ladungsträger ist proportional zur Bestrahlung  $H_e$ ; d. h. dem Produkt aus Bestrahlungsstärke  $E_e$  (in  $W/cm^2$ ) und der Integrationszeit  $T_i$ . Der Proportionalitätsfaktor ist die **Empfindlichkeit  $R$**  (Responsivity)

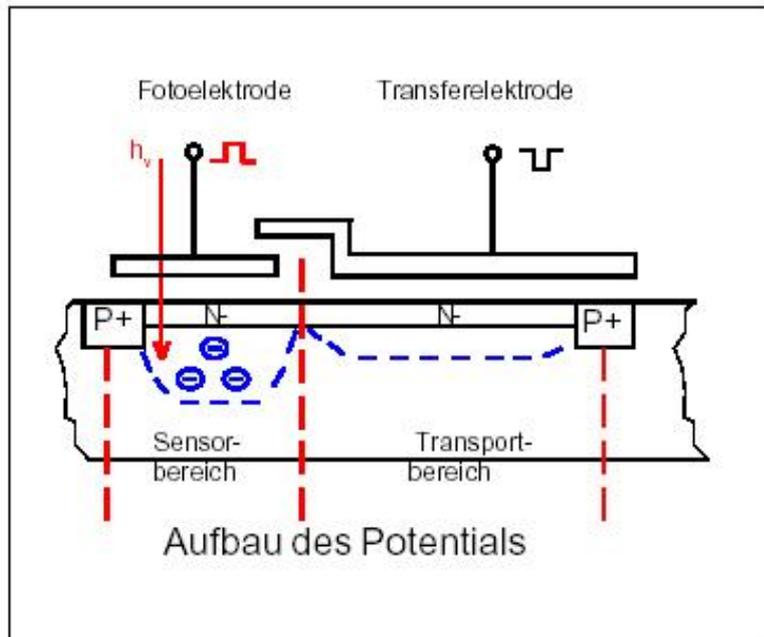
### Maximale Bestrahlung, Sättigung

Das Speichervermögen der Pixel (MOS-Kondensatoren) von Halbleiterbildsensoren ist begrenzt; es liegt je nach Pixelgröße und Technologie zwischen  $1 \cdot 10^5$  ..  $1 \cdot 10^7$

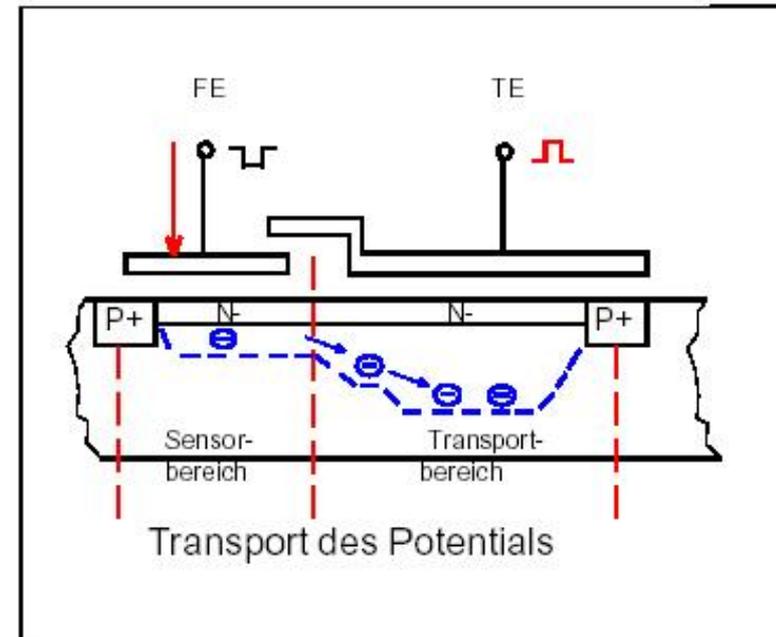
### Blooming / Anti-Blooming

Bei Überstrahlung wird die Sättigungselektronenzahl überschritten, es kommt zum Überlauf in andere Pixel ("Überstrahlung"). Dieser Effekt wird als Blooming bezeichnet. Sogenannte Antiblooming-Schaltungen leiten überschüssige Ladungen ab und verhindern so das Blooming (bis zu einem gewissen Grade).

## Halbleiter-Bildsensor (CCD, CID)



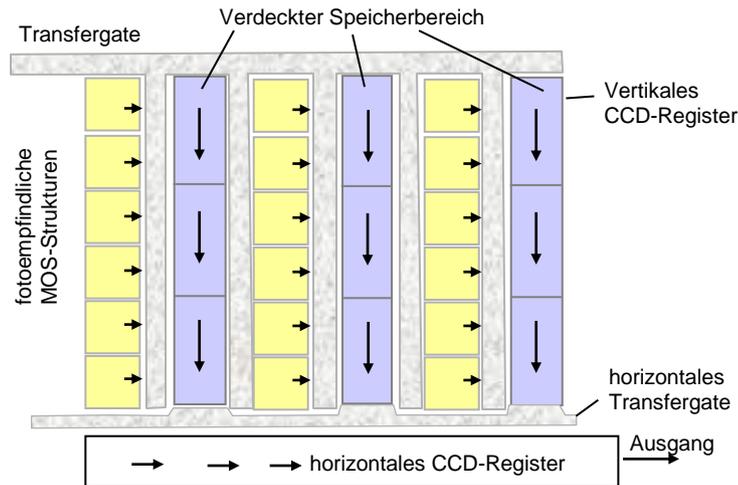
1. Integrationsphase



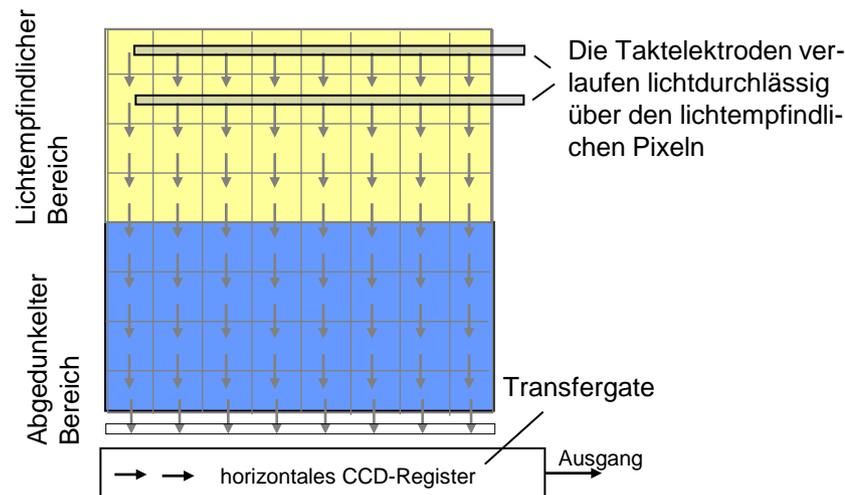
2. Transportphase

## Funktionprinzip CCD

## Arten von Halbleiterbildsensoren

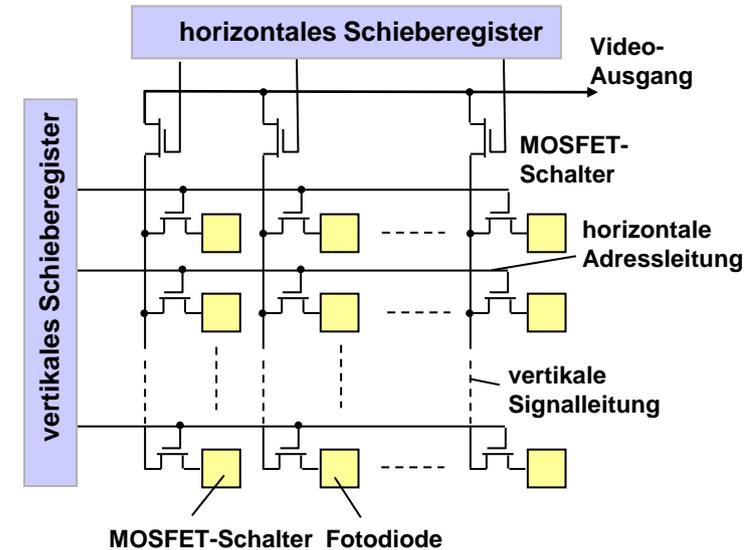


### CCD ILT Interline Transfer



### CCD FT Frame Transfer,

nicht zu verwechseln mit Full Frame (FF CCD's) mit zusätzlichem mechanischem Verschluss



### MOS XY-adressierbarer Sensor

### CMOS-Sensoren:

ähnlich CCD, aber in CMOS-Technologie, viele Funktionen (z.B. Verstärker) on Chip, Pixel bzw. Pixelbereiche einzeln adressierbar

## Wichtige Signalparameter von Halbleiterbildsensoren

### Empfindlichkeit $S$ , bzw. Responsivity $R$ in $V / (\mu J/cm^2)$

Es gilt:  $U_S = T_I \cdot E_e \cdot R$

$T_I$  – Integrationszeit;  $U_S$  - Signalspannung

### Typische Werte für $R$ bei CCD's: 1 .. 5 $V / \mu J/cm^2$

- Angabe allein nicht ausreichend ! Es sollte zusätzlich die spektrale Verteilung  $R(\lambda)$  angegeben werden (z.B. Normlicht A, ggf. in Verbindung mit weiteren Filtern), für welche dieser Wert gilt.
- Außerdem sollte auch die spektrale Empfindlichkeitsverteilung des Sensors angegeben werden (häufig materialtypisch, z.B. Silizium). Im Zweifelsfalle gilt: selber nachmessen (wenn erforderlich bzw. Aufwand gerechtfertigt)
- Häufige Angabe der Empfindlichkeit (vor allem bei Digitalkameras im Consumer-Bereich, aber auch in manchen Datenbättern von Empfängerchips) heutzutage in lx oder anderen fotometrischen Größen; teilweise kann die Umrechnung fotometrischer in strahlungsphysikalische Größen hier hilfreich sein.

### Aufgabe:

Das Pixel eines CCD-Sensors ( $10 \times 10 \mu m^2$ ) wird einer Bestrahlungsstärke von  $25 \text{ mW} / \text{cm}^2$  ausgesetzt. Die Sättigungsspannung beträgt 1V. Die Empfindlichkeit betrage für die verwendete Lichtart  $3V / \mu J/cm^2$ . Wie groß ist die Integrationszeit zu wählen, damit das Spannungssignal 75% des Sättigungspegels erreicht ?

75 von 103

## Wichtige Signalparameter von Halbleiterbildsensoren

**Signal-Rausch-Verhältnis (SNR – Signal to noise ratio), bezogen auf den Amplitudenwert eines Pixels**

$$SNR = \frac{N_{opt}}{N_R} \approx \sqrt{N_{opt}} \quad (\text{für große Werte von } N_{opt}) \quad \text{Angabe teilweise auch in dB}$$

$N_{opt}$ : Optisch generierte Ladungsträgeranzahl

$N_R$  – Rauschelektronenzahl (Standardabweichung)

Die maximale Ladungsträgeranzahl (Sättigungselektronenzahl) beträgt bei den meisten CCD's zwischen  $10^5$  und  $10^6$  (Spezialausführungen mehr). Man erhält somit Werte für

**SNR<sub>max</sub>** (je nach Ausführung):  $\approx 300 \dots 1000$ .

Bei CMOS-Sensoren ist das SNR höher.

Sowohl das Rauschen als auch das Signal-Rausch-Verhältnis nehmen bei Halbleiterbildsensoren mit steigender Aussteuerung zu.

## Wichtige Signalparameter von Halbleiterbildsensoren

### Dynamikumfang DR (Dynamic range)

**Verhältnis von maximalem Signal zum Rauschen bei “Null” signal (Dunkelsignalrauschen); nicht zu verwechseln mit dem SNR (Signal-Rausch-Verhältnis)**

$$D = \frac{A_{\max}}{A_{RD}} \quad A_{RD} - \text{Dunkelsignalrauschen (Effektivwert)}$$

Für CCD's gilt:

DR  $\approx 10^5 \dots 10^6$  (bei Raumtemperatur)

## Wichtige Signalparameter von Halbleiterbildsensoren

### An das SNR bzw. den DR angepasste A/D-Auflösung

„Sinnvolle“ bzw. optimale A/D-Auflösung ist gegeben, wenn der Quantisierungsfehler („Quantisierungsrauschen“) des A/D-Wandlers und der Rauscheffektivwert des Analogsignals in etwa gleich groß sind.

Wegen der Aussteuerabhängigkeit des Rauschens von Halbleiterbildsensoren wäre hierfür eine nichtlineare Quantisierung mit zunehmender Breite der Quantisierungsstufen zu höheren Aussteuerungen hin optimal.

Meist begnügt man sich mit einer Anpassung an das Rauschen bei einem mittleren Signalwert; bei CCD's sind dann Werte von 8..10 Bit für die Wandlungsbreite sinnvoll.

## Wichtige Signalparameter von Halbleiterbildsensoren

### Dunkelstrom $I_D$

Durch thermische Generation freier Ladungsträger kommt es bei Halbleiterbildsensoren auch ohne optische Bestrahlung zu einem Signal, welches temperaturabhängig ist. Dieses Signal ist wiederum rauschbehaftet (Dunkelstromrauschen).

Das ***Dunkelstromrauschen*** ist Bestandteil des Dunkelsignalrauschens, jedoch nicht mit diesem zu verwechseln. Neben dem Dunkelstromrauschen tragen weitere Rauschanteile (Transferrauschen, Verstärkerrauschen ...) zum Dunkelsignalrauschen und somit zur Begrenzung des Dynamikbereiches bei.

***Dunkelstrom*** und ***Dunkelstromrauschen*** sind insbesondere bei Spezialanwendungen mit langen Integrationszeiten (Belichtungszeiten) störend und müssen ggf. aus dem Bild “herausgerechnet” bzw. durch geeignete Kühlung vermieden werden

## Wichtige Signalparameter von Halbleiterbildsensoren

### Parameterunterschiede zwischen den Pixeln, z.B.

- **Empfindlichkeitsunterschiede,**
- **Dunkelstromunterschiede,**
- **Schwankungen des Sättigungssignals usw.**
- **Korrektur mittels geeigneter Algorithmen (Shading-Korrektur usw.)**

### Gegenseitige Beeinflussung von Pixelsignalen

- **Übersprechen von benachbarten Pixeln**
- **Smearing: Ladungsverluste beim Transport, Transportvorgänge innerhalb lichtempfindlicher Bereiche führen insbesondere zu “Verschmierungen” von Bildinhalten**

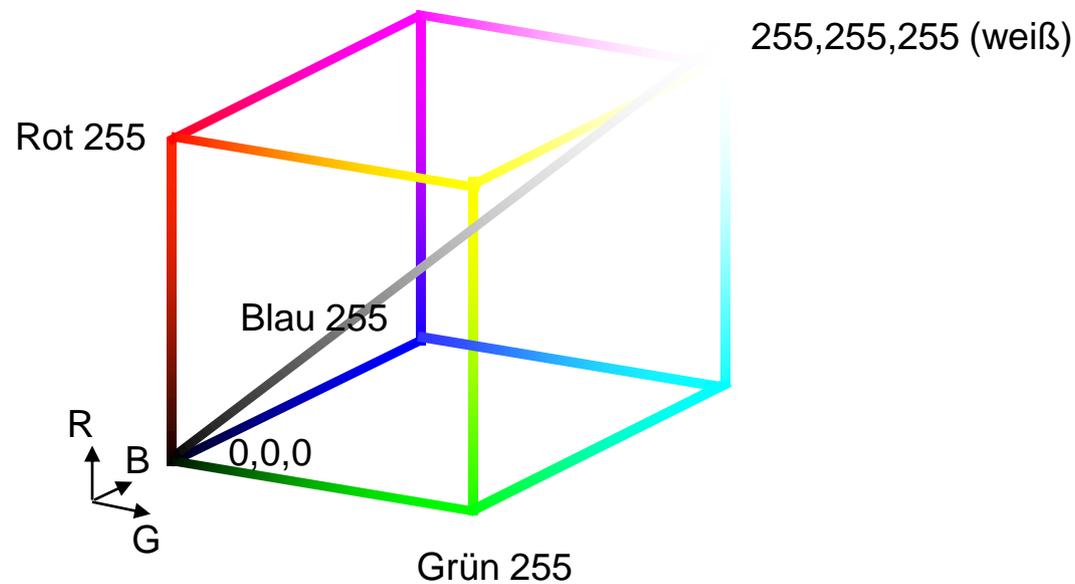
## Vorteile von CCD-Elementen gegenüber Bildaufnahmeröhren:

1. Robustheit gegenüber Vibration
2. geringes Gewicht
3. geringer Leistungsbedarf (50mW / 5 W Röhre)
4. keine Targetspannung (Betriebsspannung 3-15 V / 30-150 V Röhre)
5. keine Nachzieheffekte (Fernsehfigur „Cini“ nur mit Röhre möglich)
6. Höhere Lichtempfindlichkeit (0,5 Lux / 10 Lux)
7. Keine Geometrieverzerrungen

## Gliederung

1. Allgemeiner Überblick / Wiederholung
2. Beleuchtung
3. Die Kamera
  - 3.1 Abbildungsoptik
  - 3.2 Sensorelement / Aufnahmesystem
  - 3.3 Farbkameras**
  - 3.4 Verarbeitungselektronik
4. Rechnerschnittstelle / Frame Grabber
5. Software

# Kamera / Farbkameras: Farbsystem RGB



## Kamera / Farbkameras: Farbsystem YUV

Dieses System wurde im Rahmen des Farbfernsehensystems PAL entwickelt.

Umrechnung **RGB** in YUV:

$Y = 0,299 R + 0,587 G + 0,114 B$ : Luminanzsignal

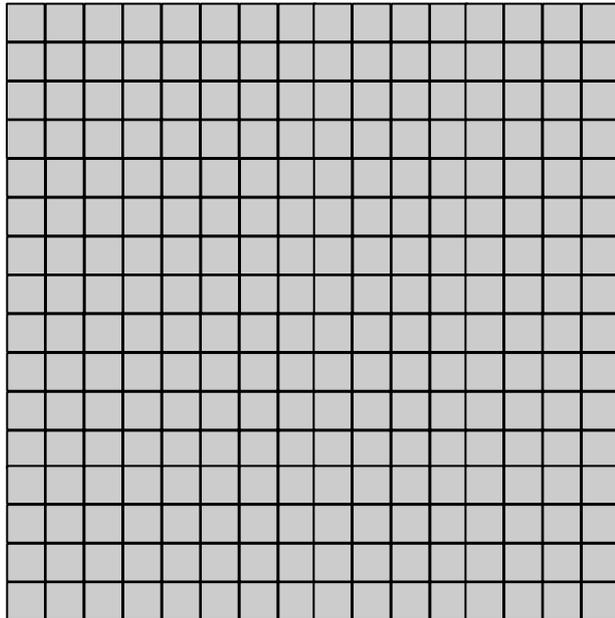
$U = (B - Y) 0,493$

U;V: Farbdifferenzsignale (Chrominanzsignale)

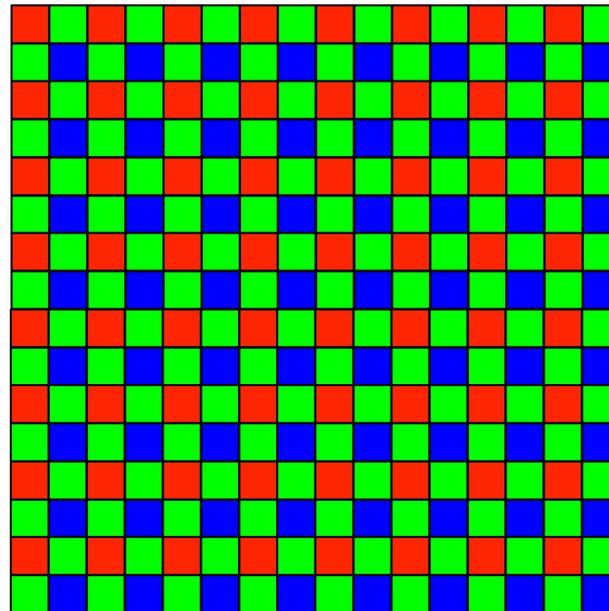
$V = (R - Y) 0,877$

**YUV-Signale sind in modulierter Form Bestandteile des Fernsehsignals FBAS der PAL- und NTSC-Fernsehnorm.**

# 1-Chip-Kameras

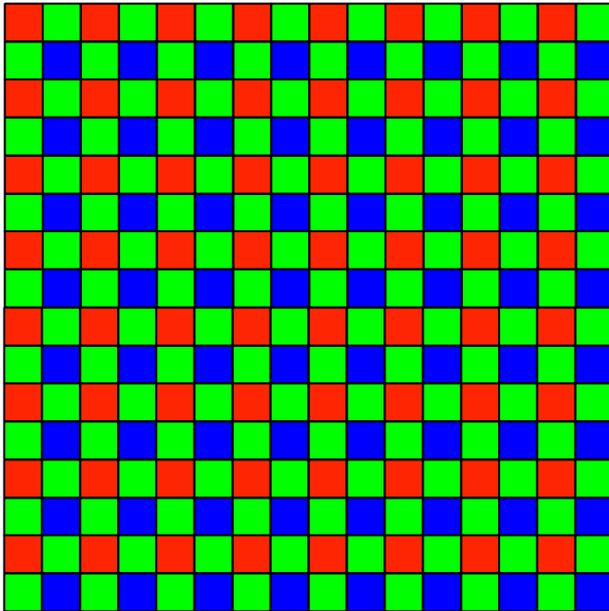


**SW-Kamera**



**1-Chip-Farbkamera (Bayer-Sensor)**

# 1-Chip-Kameras



## Vor- und Nachteile im Vergleich zu 3-Chip-Kameras:

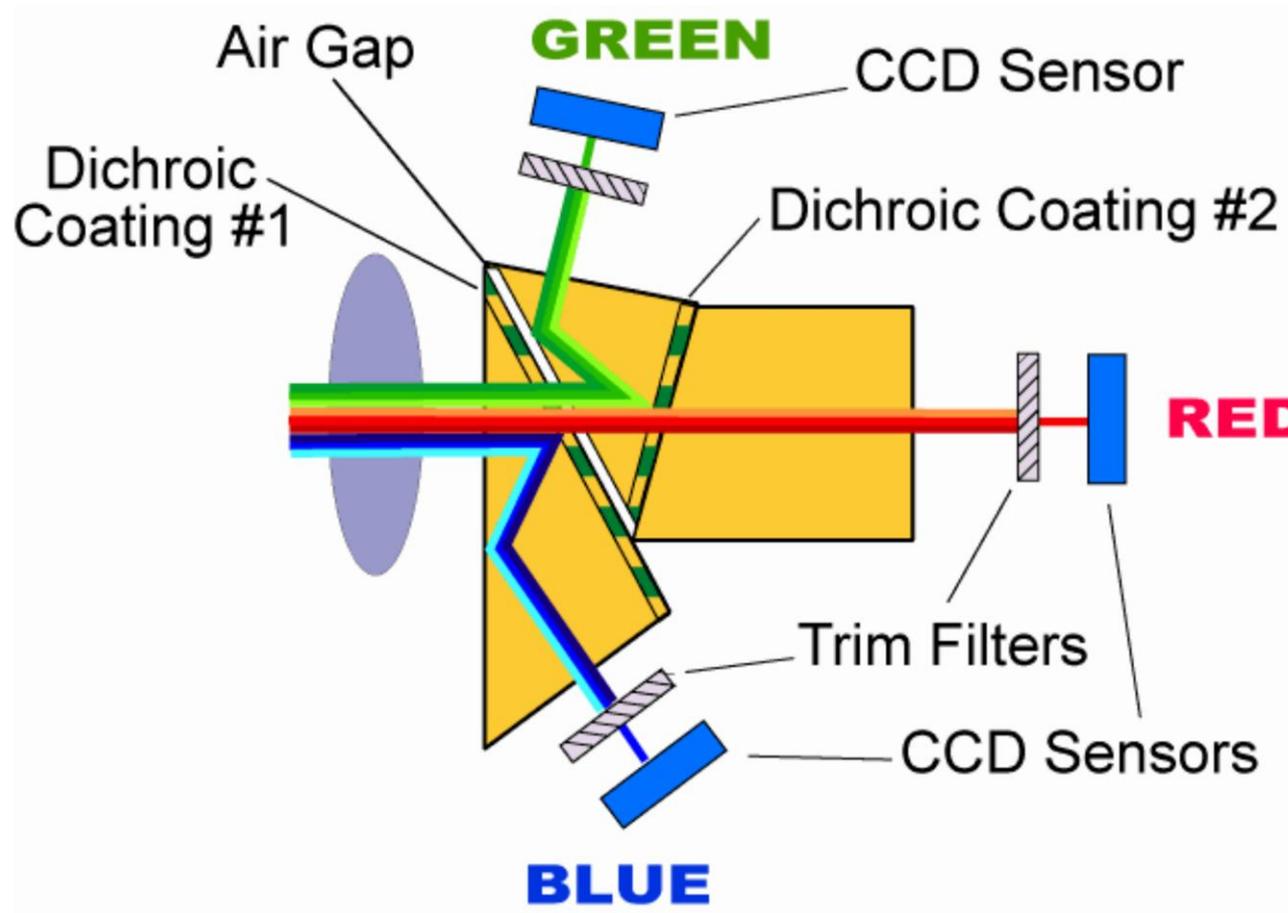
- geringerer Fertigungsaufwand
- geringere Auflösung
- Einsatz in Anwendungen mit vergleichsweise geringem Ansprüchen

Scheinbare Auflösungssteigerung bei 1-Chip-Bildensoren mittels Interpolation, hierbei handelt es sich in Wirklichkeit jedoch um die Rekonstruktion eines wahrscheinlichen Verlaufes (Gefahr von Aliasing!).

## 1-Chip-Farbkamera (Bayer-Sensor)

- Pixel mit Farbfiltern Rot, Grün, Blau (RGB)
- Auflösung gegenüber SW-Sensor gleicher Pixelanzahl:  
Grün: 50%; Rot/Blau: 25%

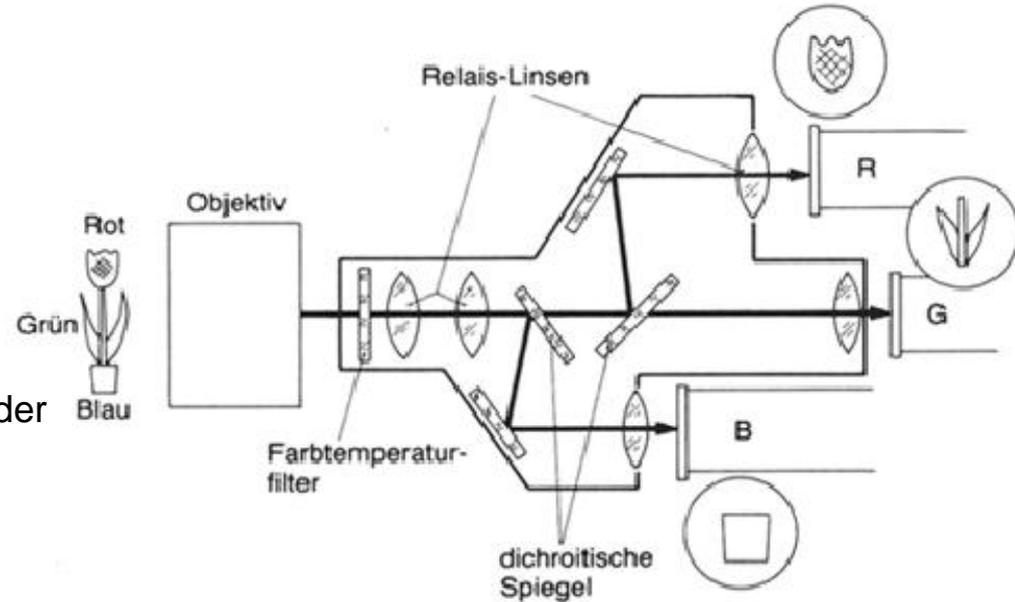
## 3-Chip-Kameras



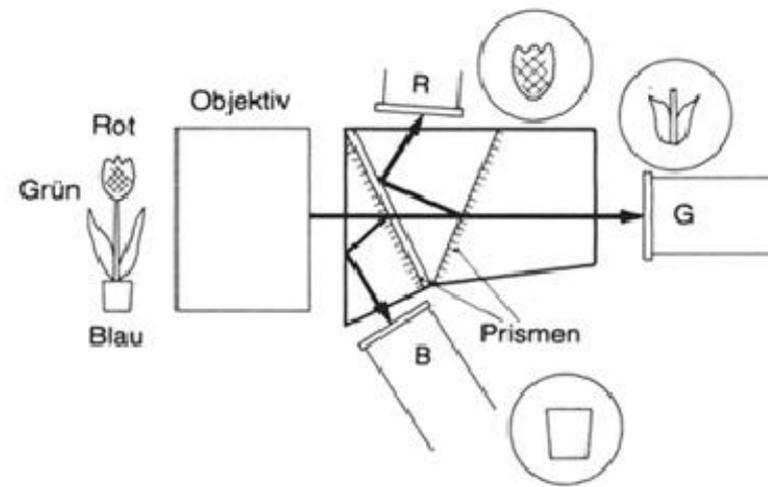
# 3-Chip-Kameras

## Vor- und Nachteile von 3-Chip-Kameras im Vergleich zu Einchip-Kameras

- höhere geometrische Auflösung
- höherer Justage- und Positionieraufwand in der Fertigung
- 3 Sensorchips erforderlich
- Einsatz für anspruchsvolle Anwendungen



System mit dichroitischen Spiegeln



Prismensystem

Die Farbaufteilung in einem Kamerakonzept mit drei Bildaufnehmern erfolgt entweder durch ein System aus dichroitischen Spiegeln oder eine Prismenanordnung

Dichroitische Spiegel:

reflektieren einen Teil des Lichtspektrums und lassen den Rest passieren (spezielle Ausführung von Interferenzfiltern), nicht zu verwechseln mit einfachen Farbfiltern!

## Gliederung

1. Allgemeiner Überblick / Wiederholung
2. Beleuchtung
3. Die Kamera
  - 3.1 Abbildungsoptik
  - 3.2 Sensorelement / Aufnahmesystem
  - 3.3 Farbkameras
  - 3.4 Verarbeitungselektronik**
4. Rechnerschnittstelle / Frame Grabber
5. Rechner / Software

## Verarbeitungselektronik von Bildverarbeitungskameras

### bei Analogkameras / Standardausführungen:

**Umwandlung und Aufbereitung des Datenstromes des Matrixsensors in ein genormtes Videosignal, meist nach**

- **NTSC-Norm (US-amerikanische Fernsehnorm) mit 60 Halbbildern je s (30 Hz Vollbild)**
- **PAL-Norm (europäische Norm) mit 50 Halbbildern je s (25Hz Vollbild)**

**Es werden immer zwei aufeinander folgende Halbbilder übertragen (Zeilensprungverfahren); in der weiteren Bildverarbeitung wird häufig nur ein Halbbild genutzt.**

# Verarbeitungselektronik von Bildverarbeitungskameras

## Besondere Ausführungen / innovative Entwicklungen

- **Progressive scan-Verfahren:** Übertragung des Vollbildes in der Reihenfolge aller Zeilen (kein Zeilensprungverfahren), z.B. mit FT-Halbleiterbildsensoren (Frame Transfer-Sensoren, siehe Abschn. Aufnahme / Sensorsystem in dieser Vorlesung), FT-Halbleiterbildsensoren lassen sich jedoch auch im Zeilensprungverfahren betreiben
- **Digitalkameras:** Die A/D-Wandlung erfolgt bereits in der Kamera; diese stellt dann einen digitalen Datenstrom zur Verfügung, mit welchem über eine digitale Schnittstelle, je nach Einstellung, Live-Bilder oder Standbilder übertragen werden.
- **Kameras mit höherer Auflösung:** stellen Bilder mit höherer als durch die bisherigen Videonormen festgelegten Auflösungen bereit (z.B. Megapixelkameras)
- **Smart Kameras / intelligente Kameras:** die gesamte Bildverarbeitung findet in der Kamera statt; diese verfügt hierfür über einen speziellen Prozessor (z.B. Micro-Controller oder Signalprozessor); alle Komponenten und Funktionen (bis auf die Beleuchtung, teilweise aber auch diese) sind in einem Gehäuse integriert)

# Verarbeitungselektronik von Bildverarbeitungskameras

**Ansteuerung von Kameras / Einbindung in Taktstraßen / Förderstrecken usw.**

**Realisierung mittels getriggelter Systeme**

- **bei Synchron-Kameras wird nach eingehendem Trigger-Signal das nächste (Halb oder Voll)-Bild ausgewertet, Nachteil: Versatz von maximal der Dauer einer Halbbild- oder Vollbildintegration zwischen Trigger und Bildaufnahme**
- **Bei Asynchron-Kameras wird nach eingehendem Trigger der aktuelle Belichtungszyklus unterbrochen, die Ladungspakete ausgelesen und sofort mit einem neuen Belichtungszyklus begonnen; der zeitlicher Versatz hierbei entspricht der Auslesezeit und ist somit deutlich kürzer als bei Synchron-Kameras**

**Bei getriggerten Kameras ist stets eine sorgfältige Synchronisation zwischen Kamera und Rechnerschnittstelle (Frame Grabber) erforderlich.**

**Terminologie: häufig herstellerspezifisch, z.B. Asynchron Reset oder Restart Reset für Asynchron-Kameras**

## Gliederung

1. Allgemeiner Überblick / Wiederholung
2. Beleuchtung
3. Die Kamera
  - 3.1 Abbildungsoptik
  - 3.2 Sensorelement / Aufnahmesystem
  - 3.3 Farbkameras
  - 3.4 Verarbeitungselektronik
- 4. Rechnerschnittstelle / Bilderfassung**
5. Rechner / Software

## Bilderfassung / Analoge Frame Grabber

Schnittstellenkarten zur Bilderfassung von Analogen Videoquellen

### Aufgaben

- Bilddigitalisierung (A/D-Wandlung),
- Abspeicherung des Bildes auf dem Rechnerspeicher oder auf eigenem Speicher (optional),
- Kommunikation mit der Grafikkarte z.B. zur Darstellung von Live- und Standbildern, teilweise auch kombinierte Frame Grabber-Grafikkarten,
- Erzeugen von Grafik-Overlays auf Live- und Standbildern,
- Sonderfunktionen ...

### Analoge Frame Grabber unterscheiden sich hinsichtlich

- Datenraten
- Videonormen / Auflösungen
- Anzahl der Kanäle
- ...

## Bilderfassung / Digitale Frame Grabber

Schnittstellenkarten zur Bilderfassung von digitalen Videoquellen

### Aufgaben

- Wie analoge Frame Grabber, aber ohne Digitalisierung
  
- Meist höhere Datenraten als Analoge Frame Grabber

## Gliederung

1. Allgemeiner Überblick / Wiederholung
2. Beleuchtung
3. Die Kamera
  - 3.1 Abbildungsoptik
  - 3.2 Sensorelement / Aufnahmesystem
  - 3.3 Farbkameras
  - 3.4 Verarbeitungselektronik
4. Rechnerschnittstelle / Bilderfassung
5. Rechner / Software

# Rechner

## Plattformen

- PC (Büro-PC für Labor- und wissenschaftliche Anwendungen)
- Industrie-PC für industrielle Standardanwendungen, teilweise auch für Labor- und wissenschaftliche Anwendungen
- Workstations für rechenintensive Anwendungen
- Microcontroller höherer Leistungsklassen für einfache Embedded-Anwendungen (Integrierte Lösungen mit Smart-Kameras, bzw. Bildverarbeitungskameras)
- Signalprozessoren für aufwändige Embedded-Lösungen

## Software

- Höhere Programmiersprachen (vorrangig C/C++), teilweise werden Softwarebibliotheken mit C/C++-Unterstützung (der Umfang reicht von einfachen Speicherzugriffen bis zu komplizierten Algorithmen) von Frame Grabber-Lieferanten mit angeboten
- Softwaresysteme von Systemhäusern bzw. BV-Unternehmen mit komfortabler Programmierung oder auch nur Parametrierung, häufig mit offenen Programmierschnittstellen (Einbinden von eigenen Routinen, welche z.B. mit C/C++ erstellt wurden oder von lauffähigem Code)

## Einige wichtige Befehle / Anweisungen in C zu Variablendefinitionen und Schleifen

### Struktur des Hauptprogramms

```
void main()
```

```
{  
Definitionen,  
Anweisungen  
}
```

### Variablendefinitionen mit und ohne Wertzuweisung

```
void main()
```

```
{  
int i; int j = 3;
```

```
real a; real b = 5,35;
```

```
.  
. .  
. .  
}
```

## Einige wichtige Befehle / Anweisungen in C zu Variablendefinitionen und Schleifen

### Felder; Arrays

```
void main()

{
int line[10];           // definiert ein Feld von Integer-Werten mit line[0] .. Line[9]

int image[720][540];  // Definition eines 2- dimensionalen Feldes des Typs integer

line[3] =5;           // Zugriff auf ein Feldelement
}
```

## Einige wichtige Befehle / Anweisungen in C zu Variablendefinitionen und Schleifen

### Schleifen

#### **for-Schleife**

```
for (Initialisierung; Ausdruck 1; Ausdruck 2)  
    {Anweisungen}
```

#### *Beispiel*

```
.  
.   
int a[10];  
  
for (int i = 0; i < 10; i++)  
    a[i] = 2*i; // umfasst der Schleifenkörper nur einen  
                Befehl, dann kann die geschweifte  
                Klammer weggelassen werden  
:  
:
```

#### **while-Schleife**

```
while Bedingung
```

```
{Anweisung(en);}
```

Der Schleifenkörper wird so oft durchlaufen, wie die Schleifenbedingung erfüllt ist

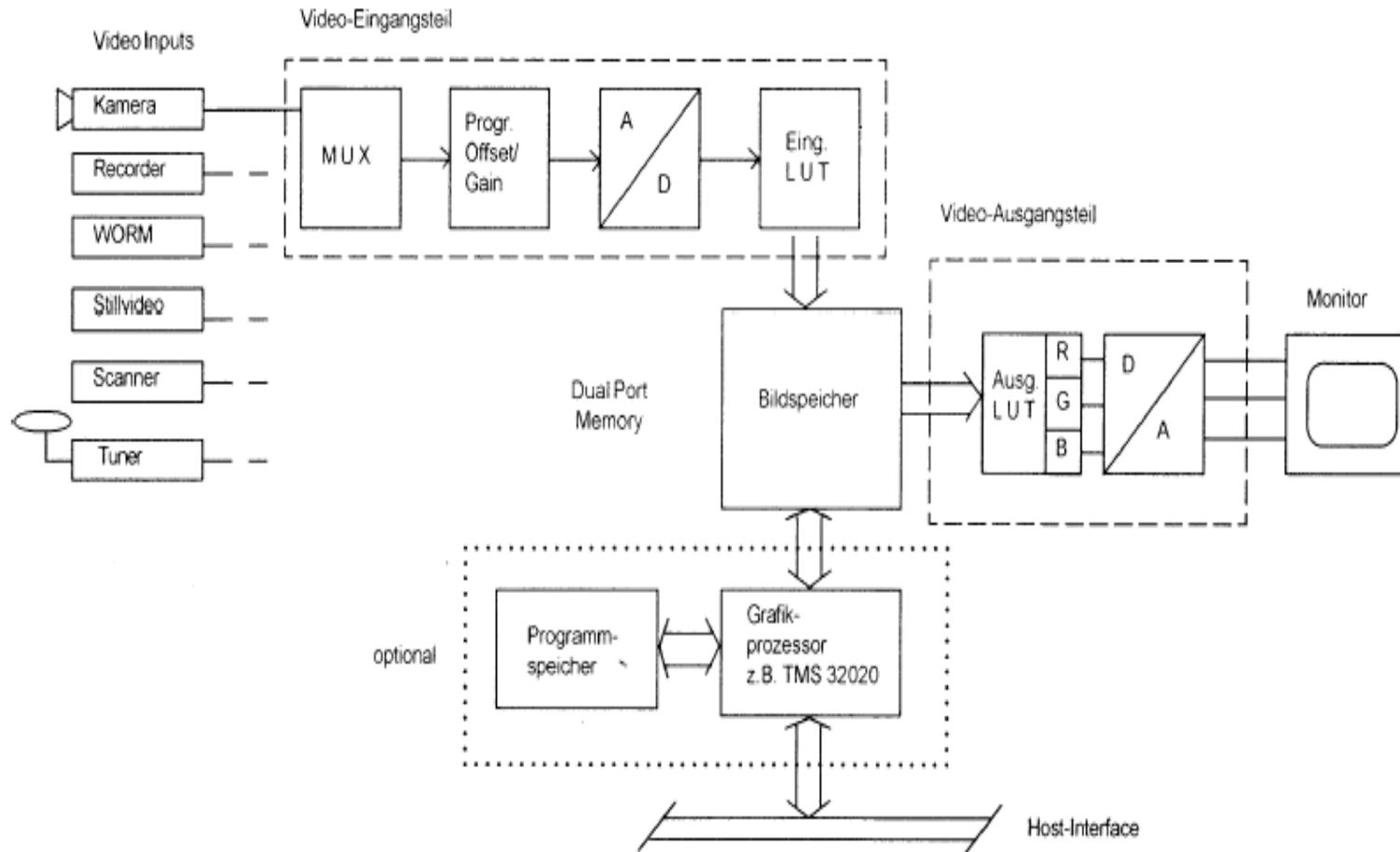
#### **do while-Schleife**

```
do
```

```
{Anweisung(en);}
```

```
while Bedingung;
```

Der Schleifenkörper wird mindestens einmal durchlaufen



## Aufbau von Bildbearbeitungs- und Bildverarbeitungssystemen

## 6. Literatur / Quellen

- /1/ Bässmann, H.; Kreys, J.: Bildverarbeitung Ad Oculos, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York 2004
- /2/ Helbig, E.: Grundlagen der Lichtmesstechnik, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig 1972
- /3/ Haferkorn, Heinz: Optik: Physikalisch-technische Grundlagen und Anwendungen; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; Auflage: 4. bearb. u. erw. Auflage (27. November 2002), auch ältere Ausgaben empfehlenswert
- /4/ [www.stemmer-imaging.de](http://www.stemmer-imaging.de) (Komponenten)
- /5/ [www.datatranslation.de](http://www.datatranslation.de) (Software, Frame Grabber)
- /6/ Schroeter, T.: Skripte zur Vorlesung Mikroprozessortechnik / C/C++ - Programmierung. internes Lehrmaterial der FH Jena, Jena 2004