

# Physikalische und technische Grundlagen der Fotografie

Vorlesungsskript

Dr. Roland Mühler  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
April 2000

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Vorbemerkungen</b>	4
<b>2. Geschichte der Fotografie</b>	
2.1. Frühe Verfahren	5
2.1.1. Camera obscura – Das flüchtige Bild	5
2.1.2. Daguerre - Erste dauerhafte Fotografien	5
2.1.3. Talbot – Der Negativ-Positiv-Prozess	6
2.2. Vom Experiment zur Technologie	6
2.2.1. Kollodiumplatten, Albuminpapiere, Trockenplatten	6
2.2.2. Georg Eastman – Von der Glasplatte zum Film	7
2.2.3. Anfänge der Farbfotografie	8
2.3. Frühe Kamerakonstruktionen	8
<b>3. Optische Abbildung</b>	
3.1. Grundbegriffe der Optik	9
3.1.1. Geometrische Optik – Reflexion, Brechung	9
3.1.2. Abbildung mit Linsen	10
3.1.3. Schärfe, Schärfentiefe	12
3.1.4. Wellenoptik – Beugung, Polarisation	13
3.2. Kennwerte fotografischer Objektive – Brennweite, Lichtstärke, Bildwinkel	14
3.3. Abbildungsfehler und Qualitätsmaße fotografischer Objektive	16
3.4. Objektivtypen	19
3.5. Makrofotografie	19
<b>4.ameratechnik</b>	
4.1. Systematik der Kamertypen	20
4.2. Kamerabaugruppen	21
4.2.1. Verschluss	21
4.2.2. Fokussierung	22
<b>5. Bildspeicherung in Silberhalogenid-Schichten</b>	
5.1. Der fotografische Elementarprozeß	24
5.2. Eigenschaften fotografischer Materialien	25
5.2.1. Grundbegriffe der Sensiometrie	25
5.2.2. Sensiometrische Kennzahlen	25
5.2.3. Empfindlichkeit	26
5.2.4. Belichtungsmessung	27
5.2.5. Farbempfindlichkeit fotografischer Schichten	28
5.2.6. Anomalie fotografischer Schichten	28
<b>6. Farbfotografie</b>	
6.1 Grundlagen	29
6.2 Farbumkehrtechnik	30
6.3 Farbnegativtechnik	31

## 1. Vorbemerkungen

Die Vorlesung „**Physikalische und technische Grundlagen der Fotografie**“ gibt einen Überblick über die Grundlagen und Methoden der „klassischen“ Fotografie, d.h. der Fotografie auf der Basis von Silberhalogenid-Schichten. Hauptziel ist dabei die Vermittlung der physikalischen Grundzusammenhänge der fotografischen Teilprozesse unabhängig von speziellen Kamerakonstruktionen und Filmtypen. Der Kurs erklärt dabei wichtige Grundbegriffe wie z.B. *Brennweite*, *Lichtstärke*, *Blendenzahl*, *Schärfentiefe*, *Belichtung*, *Filmempfindlichkeit*, *Gradation* und *Sensibilisierung*.

Zum Zwecke der Systematisierung und für ein besseres Verständnis der Vorlesung wurde der komplexe fotografische Prozeß in zwei Teilprozesse separiert:

1. Zunächst wird die Abbildung eines Gegenstandes oder einer komplexen Szene auf einer ebenen Fläche behandelt. Hier ist es nicht von Bedeutung, ob diese Fläche eine Mattscheibe, die lichtempfindliche Schicht eines Filmes oder eine CCD-Matrix ist. In diesem ersten Teil der Vorlesung werden die Grundlagen der optischen Abbildung und ihre Anwendung bei fotografischen Objektiven behandelt. Auch die technisch-konstruktiven Baugruppen, die letztendlich Objektiv und Film zu einer Kamera verbinden (Verschluß, Sucher, Filmhalterung,...) werden in diesem Teil besprochen. Da die Wandlung der Helligkeitsinformation in der Filmebene in ein dauerhaftes Bild ausgeklammert wird, haben alle hier behandelten Gesetze auch für Digitalkameras volle Gültigkeit.
2. Die chemischen und physikalischen Prozesse, die zu einer Umwandlung der Helligkeitsverteilung auf einer (Film-)Fläche in eine dauerhafte Dichteverteilung führen, sind Gegenstand des zweiten Teils der Vorlesung. Hier erfolgt eine Beschränkung auf den klassischen Silberhalogenid-Prozeß, wobei die dabei eingeführten Begriffe (*Dichte*, *Gradation*, *Kontrast*,...) auch für die Beschreibung alternativer Techniken (Digitaldruck) tauglich sind. Ein Überblick über die Grundlagen der Farbfotografie schließt diesen Teil des Kurses ab.

Die auf ein Semester angelegte Dauer des Kurses macht eine Beschränkung auf *wesentliche* Grundbegriffe erforderlich. Wenn der Student am Ende des Semesters in der Lage ist, die Flut technologischer Innovationen an der Grenzlinie zwischen „klassischer“ und „digitaler“ Fotografie kritisch zu werten, so hat die Vorlesung ihren Zweck erfüllt.

## 2. Geschichte der Fotografie

### 2.1. Frühe Verfahren

#### 2.1.1. Camera obscura, Niépce – Das flüchtige Bild

Die dauerhafte Speicherung, Vervielfältigung und Weitergabe von Sinnesinformationen zählt zu den „Ursehnsüchten“ der Menschheit. Während dieses Problem für Informationen in Schriftform durch die Erfindung des Buchdrucks (*Gutenberg*, 1455) weitgehend gelöst wurde, war eine Speicherung visueller und auditiver Informationen zu Beginn des 19. Jh. noch nicht möglich.

Für eine Speicherung visueller Informationen waren jedoch eine Reihe wichtiger Voraussetzungen gegeben:

1. Als Hilfsmittel zum möglichst genauen Zeichnen nach der Natur wurde eine **Camera obscura** benutzt, die zum Teil schon über Linsen und Spiegel zur Umlenkung des Strahlenganges verfügte.
2. Die Veränderung chemischer Substanzen unter Lichteinwirkung war seit langem bekannt. Insbesondere war die **Lichtempfindlichkeit der Silberhalogenide** eingehend erforscht (*Johann Heinrich Schulze*, 1727).

Folgerichtig bestückte *Niépce* um 1816 die Camera obscura mit einem Papier, das er mit einem Silbersalz lichtempfindlich imprägniert hatte. Zwar gelang es ihm, auf diese Weise Bilder zu erzeugen, er scheiterte jedoch an einem fundamentalen technologischen Problem: Seine Bilder waren nicht haltbar, jede weitere Lichteinwirkung schwärzte sie weiter! Experimente zur fotografischen Herstellung von Druckplatten bescherten ihm jedoch einen Teilerfolg: Das älteste heute noch erhalten Foto – eine Zinnplatte mit dem Abbild eines Hauses.

→ heute: Fotolithografie in der Drucktechnik und in der Halbleiterindustrie

#### 2.1.2. Daguerre - Erste dauerhafte Fotografien

Das erste praktikable fotografische Verfahren entwickelte *Daguerre* (in Zusammenarbeit mit *Niépce*) um 1830. Ihm gelang es, gleich zwei wesentliche technologische Probleme zu lösen: Die **Entwicklung** des latenten Bildes und die Haltbarmachung durch **Fixierung**.

Folgende Arbeitsschritte waren zur Herstellung einer **Daguerreotypie** nötig:

1. Herstellung einer polierten Silberplatte bzw. einer versilberten Kupferplatte,
2. Bedampfen dieser Silberplatte mit einer dünnen Jodsicht
3. Belichtung der Platte in einer Kamera (Belichtungszeit 3...30 Minuten!),
4. Entwickeln der Platte durch Quecksilberdämpfe
5. Fixieren in Kochsalzlösung

Die Bildwirkung der Daguerreotypien beruhte auf einer Änderung der Reflexionseigenschaften der glänzenden Silberschicht. Wesentlich für den weltweiten Durchbruch des Verfahrens war der außergewöhnliche, mit Kupferstich und Malerei nicht zu erzielende Detailreichtum der Abbildungen sowie die Einfachheit des Verfahrens.

→ 19. August 1839 – Öffentliche Bekanntmachung des Verfahrens vor der Pariser Akademie

### 2.1.3. Talbot – Der Negativ-Positiv-Prozess

Unabhängig von Daguerre entwickelte *Talbot* seit 1834 in England ein eigenes fotografisches Verfahren auf der Basis von mit Silbernitrat imprägniertem Papier (→Niépce), das er in einer Kochsalzlösung fixierte. Zunächst fertigte er Fotogramme (*photogenetic drawings*) von Blättern an. Später belichtete er das Papier in einer kleinen Camera obscura und kam so bereits 1835 zu ersten brauchbaren Abbildungen. Ab 1840 konnte Talbot die Empfindlichkeit seines Verfahrens durch **Sensibilisierung** und **Entwicklung** steigern.

Der wesentliche Verdienst Talbots besteht jedoch in der Einführung des **Negativ-Positiv-Verfahrens**, indem er das in der Camera obscura erzeugte Negativ mit Wachs transparent machte und damit mittels einer zweiten Belichtung ein Positiv erzeugte.

Die Möglichkeit, unbegrenzt viele **Kopien** von einem Negativ erzeugen zu können, zählt heute zu den Grundlagen der fotografischen Technik. Talbot stellte auch das erste Buch mit eingeklebten Originalfotos her: *The Pencil of Nature* (Auflage 150 Exemplare)

→ Kalotype, Salzkopie, Salzpapier

→ 1839 veröffentlicht *Hippolyte Bayard* ein Direkt-Positiv-Verfahren mit Clorsilberpapier

→ Reisefotografie: *Maxime Du Camp*, 1852: Egypte, Nubie, Palestine et Syrie (122 Fotos)

→ künstlerische Fotografie: *David Octavius Hill*, *Robert Adamson*

## 2.2. Vom Experiment zur Technologie

### 2.2.1. Kollodiumplatten, Albuminpapiere, Trockenplatten

Ein Nachteil von Talbots Papiernegativen bestand in der störenden Faserstruktur des Papiers. Diese Problem löste man 1850/51, als es gelang, eine jodhaltige Kollodiumschicht auf Glasplatten aufzubringen (*Bingham* und *Archer*). Diese Schicht wurde durch eine Silbernitrat-Lösung lichtempfindlich gemacht

Hauptnachteil des Verfahrens war die Tatsache, daß die Platten erst unmittelbar vor der Belichtung begossen und daß Belichtung sowie Weiterverarbeitung der Platte im nassen Zustand erfolgen mußten (→ **nasses Kollodiumverfahren**), was besonders die Landschafts- und Reisefotografie erheblich behinderte.

Alternativ zum Kollodium wurde mit Albumin als Schichtträger experimentiert (erstes Glasnegativ durch *Niépce de Saint Victor*, 1847). Als Schichtträger für Kopierpapiere konnte sich Albumin für längere Zeit durchsetzen.

→ **Kollodium**: Lösung von Nitrozellulose in einem Alkohol-Äther-Gemisch

→ **Albumin**: homogenisiertes Hühnereiweiß

Ein entscheidender Fortschritt wurde 1871 von dem englischen Arzt *Maddox* eingeleitet. Er veröffentlichte ein Verfahren, Bromsilber in einer Gelatineschicht dauerhaft einzulagern (→ **Gelatine-Trockenplatten**).

Er begründete damit das bis heute benutzte Prinzip der **fotografischen Emulsion**.

→ 1878: chemische Sensibilisierung durch Kennet, Reifung der Schicht

→ 1873/74: Einführung der **optischen Sensibilisierung** durch *Vogel*

Rasante Ausbreitung der Fotografie in der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts

- Porträtfotografie
- Reise-, Expeditionsfotografie (*Bisson* 1860: Mont Blanc-Massiv)
- Landschaftsfotografie
- Bildberichterstattung (*Brady, O'Sullivan & Gardner*: 7000 Negative aus den Sezessionskriegen, über 1000 Naßplatten-Negative digitalisiert auf der web-site der Library of Congress: <http://lcweb.loc.gov/rr/print/>)
- Architekturfotografie (*Meydenbauer* – Messbildfotografie)

### 2.2.2. Georg Eastman – Von der Glasplatte zum Film

Für eine weitere Verbreitung der Fotografie insbesondere in der Bevölkerung musste ein weiteres technisches Problem gelöst werden: Die Ablösung der Glasplatte durch einen **flexiblen Schichtträger**. Erste Vorschläge (*Archer*, 1851) zielten auf eine Ablösung der belichteten und entwickelten Gelatineschicht von der Papierunterlage (*stripping film*).

Das erste wirklich massenhaft verbreitete fotografische System entwickelte *George Eastman* 1888. Die Kodak-Kameras enthielten einen Papier-**Rollfilm** für 100 Aufnahmen mit 2,5“ Durchmesser („*You press the button, we do the rest.*“).

Mit der Erfindung des Zelluloids durch *Hyatt* (1869) stand ein transparenter und flexibler Schichtträger für die Fabrikation von Rollfilmen zur Verfügung. Dieser neue Träger hatte jedoch einen entscheidenden Nachteil – er war extrem brennbar, bei längerer Lagerung sogar explosiv!

→ **Zelluloid**: Kunststoff aus Nitrozellulose und Kampfer

→ Sicherheitsfilme

Entwicklung der Empfindlichkeit fotografischer Materialien (typische Belichtungszeiten):

1827	Heliografie auf Asphalt	6 Stunden
1839	Daguereotypie	30 Minuten
1841	Talbotypie	3 Minuten
1851	Nasses Kollodiumverfahren	10 Sekunden
1864	Silberbromid-Kollodium	15 Sekunden
1878	Silberbromid-Gelatine	1...1/200 Sekunde

### 2.2.3. Anfänge der Farbfotografie

Parallel zur rasanten Entwicklung der Schwarzweiß-Fotografie unternahm man bereits in der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts Versuche zur Farbfotografie. Physikalisch besonders interessant sind zwei Verfahren:

- 1868 wurde dem Franzosen *Hauron* ein Patent auf ein **Farbauszugs-Verfahren** erteilt. Dabei wurden (nacheinander) Schwarzweiß-Fotos durch schmalbandige Farbfilter angefertigt die später wiederum durch Farbfilter projiziert wurden. Hauptproblem war dabei die geringe Empfindlichkeit der Platten für rotes und grünes Licht (→ die Sensibilisierung wurde durch *Vogel* erst 1873 entdeckt!).
- *Lippman* beschrieb 1891 ein Verfahren, daß auf der Interferenz der Lichtwellen innerhalb der dünnen fotografischen Emulsion beruhte. → „Lippmann-Platten“
- 1904 erste Kornrasterplatten der Gebrüder *Lumière* → Autochrome-Platten

### 2.3. Frühe Kamerakonstruktionen

- 1840 - *Petzval* berechnet ein lichtstarkes Objektiv
- 1850 - Stereofotografie, „Stereoskope“
- 1853 - erster Kameraverschluß durch *Levy*
- 1858 - erste Luftaufnahmen aus einem Ballon durch *Nadar*
- 1880 - Balgenkameras
- 1872: Bewegungsstudien durch E. Muybrige (*Animal Locomotion* mit 781 Tafeln mit ca. 20.000 Phasenbildern) → Festhalten von Bewegungen → Vorstoß in Bereiche, die der menschlichen Sinneswahrnehmung verborgen sind

### Literatur:

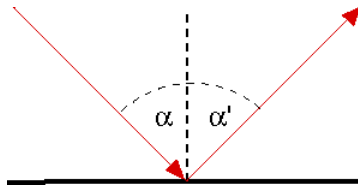
- W. Baatz, Geschichte der Fotografie, Köln 1997
- F. Freier, DuMont's Lexikon der Fotografie, Köln 1997
- K. Hans, Aus der Geschichte der Fototechnik, Leipzig 1980
- B. Newhall, Geschichte der Fotografie, München 1984
- H. Krone, Photographische Urmethoden, Leipzig 1985 (Reprint der Ausgabe von 1907)

### 3. Optische Abbildung

#### 3.1. Grundbegriffe der Optik

##### 3.1.1. Geometrische Optik – Reflexion, Brechung

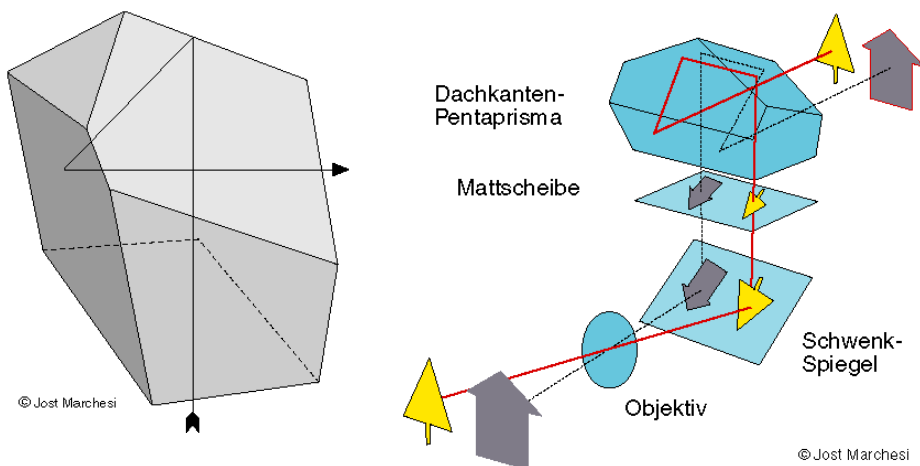
Die wesentlichen Effekte der fotografischen Abbildung lassen sich durch die Gesetze der **geometrischen Optik**, d.h. unter Annahme einer geradlinigen, strahlenförmigen Lichtausbreitung erklären.



**Reflexionsgesetz:**

Einfallswinkel = Ausfallswinkel

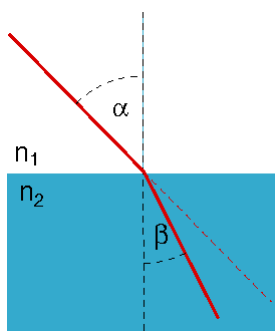
Das Reflexionsgesetz findet in Kameras und anderen optischen Geräten breite Anwendung. Ein besonders anschauliches Beispiel ist die mehrfache Umlenkung des Strahlenganges in modernen Spiegelreflexkameras:



*Dachkantenprisma*

*Das Dachkantenprisma im Strahlengang einer Spiegelreflexkamera*

Das für die fotografische Optik wichtigste physikalische Gesetz ist das **Brechungsgesetz**. Es erklärt die Ablenkung eines Lichtstrahles vom geradlinigen Verlauf beim Durchgang durch eine Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlicher optischer Dichte.



**Brechungsgesetz:**

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$

Beim Übergang von einem optisch dünnen in ein optisch dichtes Medium wird der Strahl zu Einfallslot hin gebrochen.

⇒ **Totalreflexion** beim Übergang vom dichten zum dünnen Medium

Der Grad der Ablenkung des Lichtstrahls beim Durchgang durch die Grenzfläche wird durch den **Brechungsindex  $n$**  (Brechzahl) bestimmt. Der Brechungsindex ist eine Materialkonstante und ist gleich dem Quotienten der Lichtgeschwindigkeiten im Vakuum und im betreffenden Medium.

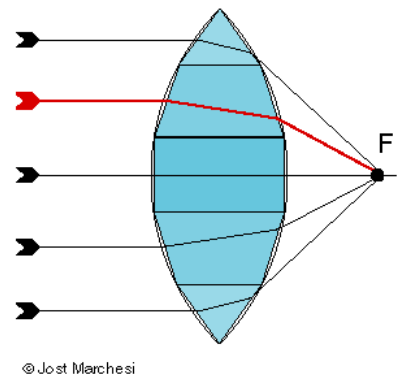
Typische Brechzahlen:	Luft	$\approx 1$
	Wasser	1,33299
	Kronglas	1,51002
	Flintglas	1,61279
	Diamant	2,4173

→ **Dispersion**: Abhängigkeit der Brechzahl von der Wellenlänge des Lichts

### 3.1.2. Abbildung mit Linsen

Mit der technischen Möglichkeit, optisch reine Gläser herzustellen, begann die Nutzung gewölbter Glasflächen zum Zwecke der Vergrößerung (erste Brillen bereits im 14. Jahrhundert, Mikroskop, Fernrohre von Galilei 1608 und Kepler 1618).

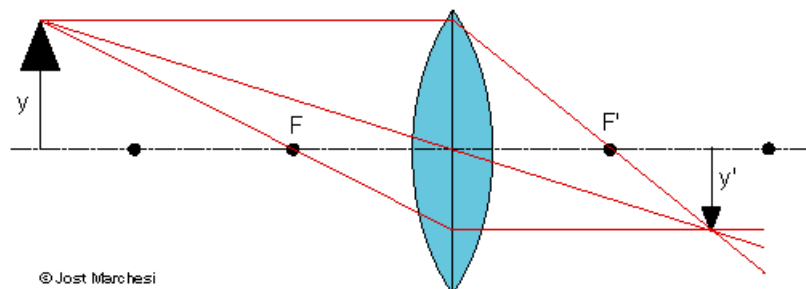
Grundprinzip von Sammellinsen: Bündelung paralleler Lichtstrahlen in einem Punkt, dem **Brennpunkt  $F$** . Der Abstand des Brennpunktes von der Linsenebene bezeichnet man als **Brennweite  $f$** . Die Brennweite ist die wichtigste Größe zur Charakterisierung abbildender optischer Systeme.



Wir betrachten zunächst die **Abbildungsgesetze an dünnen Linsen**. Mit dieser Vereinfachung können wir alle wesentlichen Zusammenhänge der fotografischen Optik erklären.

Grundprinzip der **Bildkonstruktion** an Linsen:

- achsenparallele Strahlen werden zu Brennpunktstrahlen
- Brennpunktstrahlen werden zu achsenparallelen Strahlen
- Strahlen durch den Linsenmittelpunkt werden nicht gebrochen



Den Abstand eines Gegenstandes von der Linsenebene bezeichnet man als **Gegenstandsweite  $g$** , den Abstand des Bildes von der Linsenebene bezeichnet man als **Bildweite  $b$** .

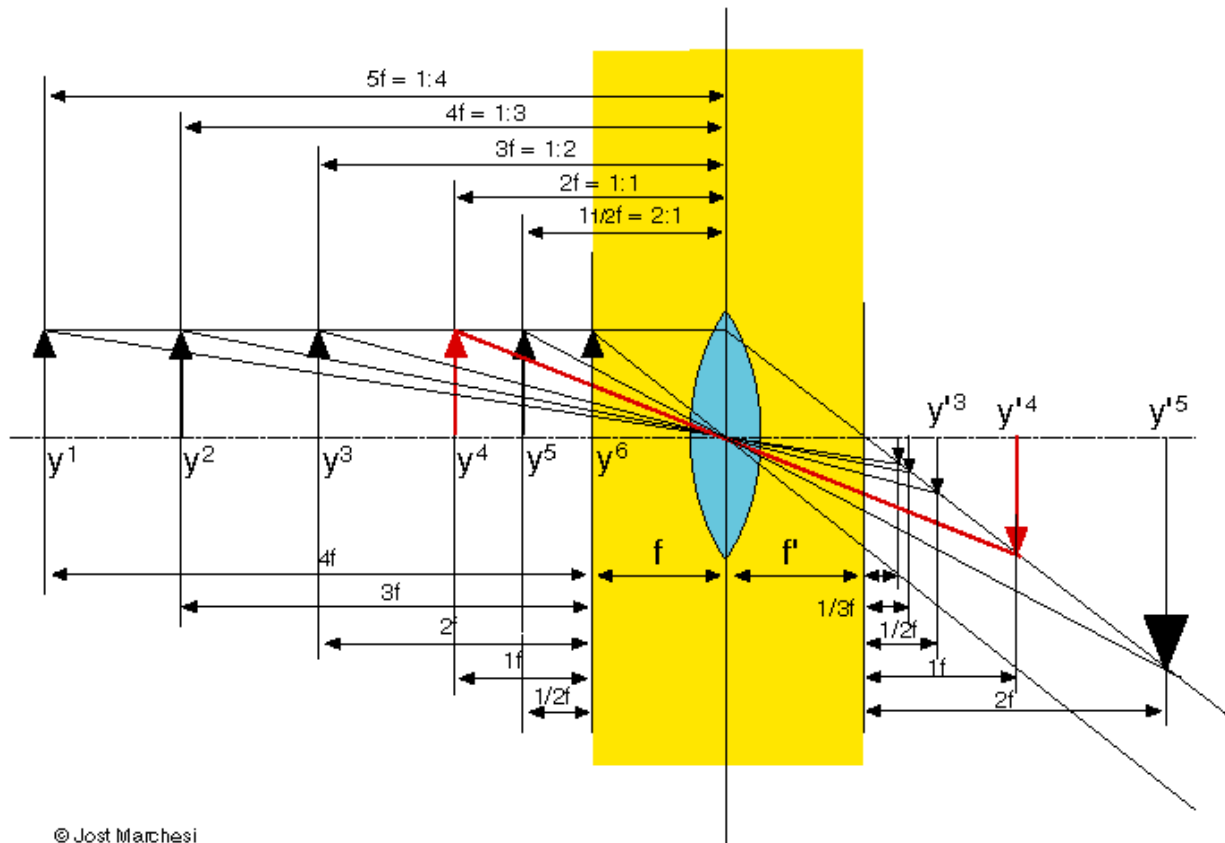
Die **Abbildungsgleichung** für dünne Linsen beschreibt den Zusammenhang zwischen Gegenstands-, Bild- und Brennweite:

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

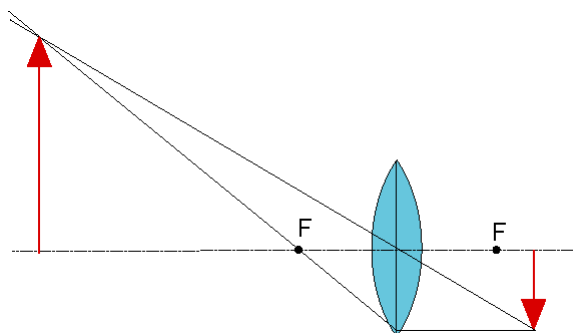
Als **Abbildungsmaßstab** bezeichnet man das Verhältnis von Bildgröße zu Gegenstandsgröße. Er wird bestimmt vom der auf die Brennweite bezogenen Gegenstandsweite.

$$\frac{y'}{y} = \frac{b}{g} = \frac{f}{a-f}$$

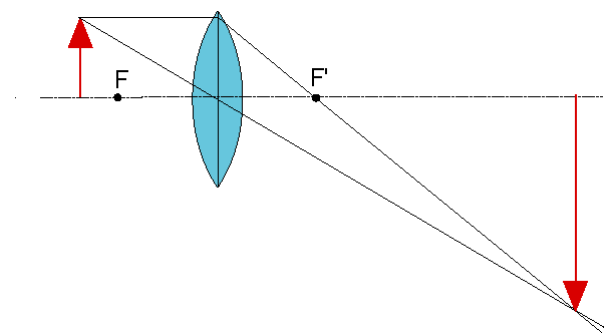
Ein Abbildungsmaßstab von 1:1 wird erzielt, wenn der Gegenstand 2 Brennweiten von der Linsenebene entfernt ist. Gegenstandsweiten zwischen doppelter und einfacher Brennweite erzeugen Abbildungsmaßstäbe >1 (→ Makrofotografie).



Die meisten fotografischen Verfahren arbeiten mit Gegenstandsweiten, die viel größer als die Brennweite der verwendeten Objektive sind. Dabei werden sehr kleine Abbildungsmaßstäbe erzielt.



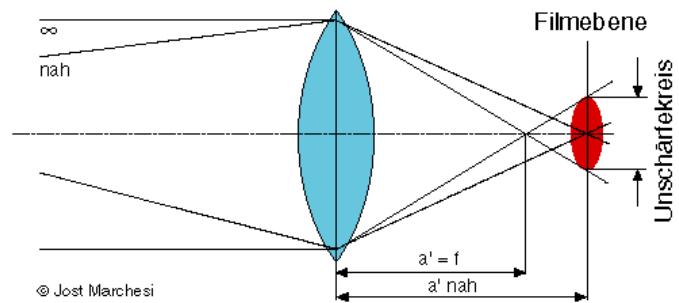
*Typische Lage von Gegenstand und Bild bei der fotografischen Kamera*



*Umkehrung der Abbildungsverhältnisse: Diaprojektor und Vergrößerungsgerät*

### 3.1.3. Schärfe, Schärfentiefe

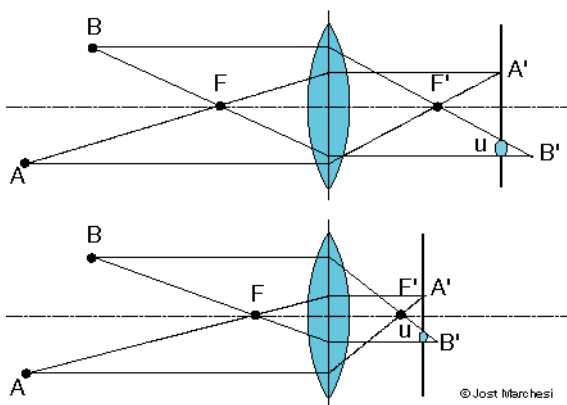
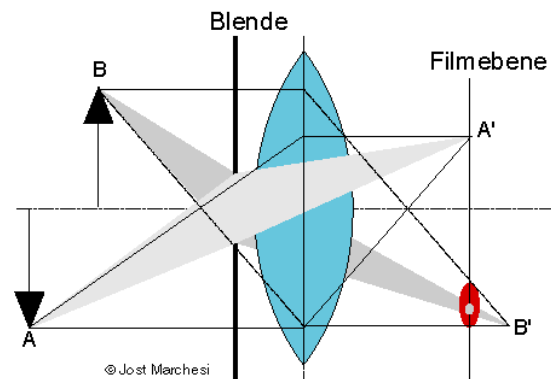
Für einen mittleren Betrachtungsabstand (30 cm) kann das menschliche Auge nur Strukturen bis zu einem Durchmesser von 1/10 mm auflösen. Das hat Konsequenzen für die Definition von Schärfezonen bei der fotografischen Abbildung: Alle Bildebenen mit **Unschärfekreisen** kleiner als ein bestimmter Grenzwert werden vom Auge als scharf wahrgenommen:



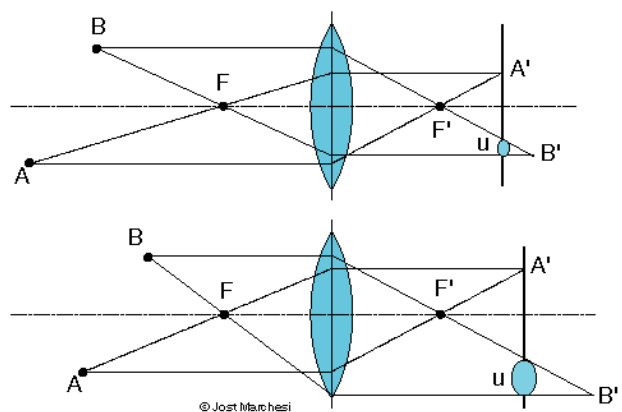
#### → Schärfentiefe

Es ist heute üblich, den Grenzwert des Unschärfekreises bezogen auf das Negativformat mit 1/2000 der Normalbrennweite anzugeben (24x36mm →  $u = 0,025\text{mm}$ ).

Wichtigstes Hilfsmittel zur Reduktion der Größe des Unschärfekreises ist eine **Blende**. Neben der Blendenöffnung beeinflussen Brennweite und Gegenstandsweite die Schärfentiefe:



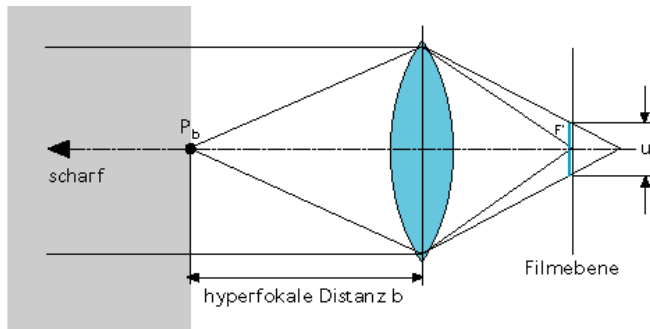
Abhängigkeit es Unschärfekreises von der Brennweite



Abhängigkeit es Unschärfekreises von der Gegenstandsweite

**Die Schärfentiefe wird größer mit**

- kleinerer relativer Öffnung,
- kleinerer Brennweite und
- größerer Aufnahmedistanz



**Hyperfokale Distanz:**

Bei Scharfstellung auf „unendlich“ wird in Abhängigkeit von der Blendenöffnung ein Bereich bis zu einem „Nahpunkt“ scharf abgebildet. Stellt man auf diesen Punkt scharf, so nutzt man den von Brennweite und Blendenöffnung vorgegebenen Schärfereich optimal aus.

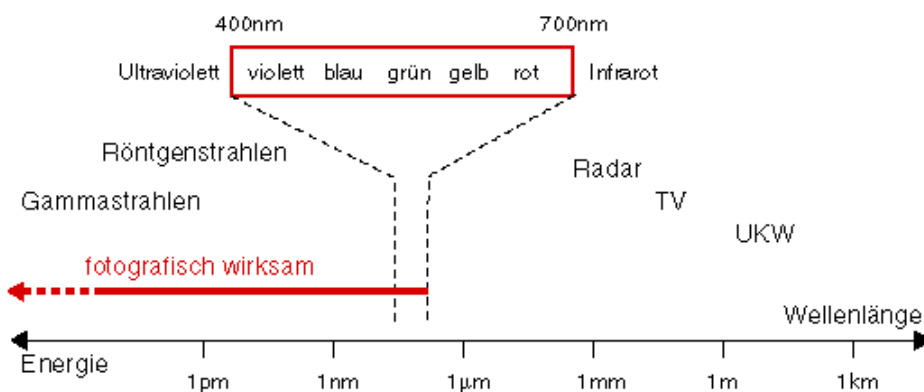
**3.1.4. Wellenoptik – Beugung, Polarisation**

Zahlreiche Phänomene der Optik können mit dem Modell der geradlinigen Ausbreitung von Lichtstrahlen nicht erklärt werden. Eine Erklärung wird möglich, wenn wir Licht als eine **elektromagnetische Welle** ansehen.

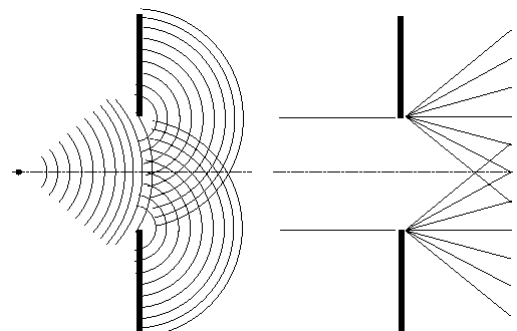
Kennwerte von Wellen:

- Frequenz  $f$ ,
- Wellenlänge  $\lambda$ ,
- Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  (Lichtgeschwindigkeit im Vakuum 300.000 km/s),
- Amplitude

Das **sichtbare Licht** stellt nur einen kleinen Ausschnitt aus dem **Spektrum der elektromagnetischen Strahlung** dar. Für fotografische Prozesse ist nicht nur der für das menschliche Auge sichtbare Teil dieses Spektrums interessant. Vielmehr wird in vielen Bereichen der wissenschaftlichen Fotografie die Tatsache ausgenutzt, dass alle Strahlungsarten mit Energien größer als die des infraroten Lichts Silberhalogenid-Schichten schwärzen können (Röntgentechnik, Nachweis kosmischer Strahlung usw.)



Das Huygens'sche Prinzip erklärt die Ausbreitung von Wellen auf der Grundlage von Elementarwellen. Es ermöglicht z.B. das Verständnis des Phänomens der **Beugung** an einer Blendenöffnung. Danach beobachtet man in optischen Abbildungssystemen an kleinen Blendenöffnungen neben dem oben erwähnten Unschärfekreis zusätzlich **Beugungsringe**. Werden diese genau so groß wie der Unschärfekreis, so spricht man von einer **kritischen Blende**.

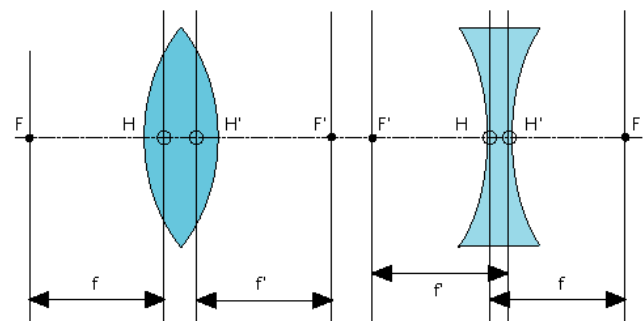


Als **Polarisation** bezeichnet man die Tatsache, dass man bei Transversalwellen, also auch bei Lichtwellen, eine bestimmte Schwingungsrichtung auswählen kann. Für die Fotografie interessante Polarisation tritt z.B. auf bei

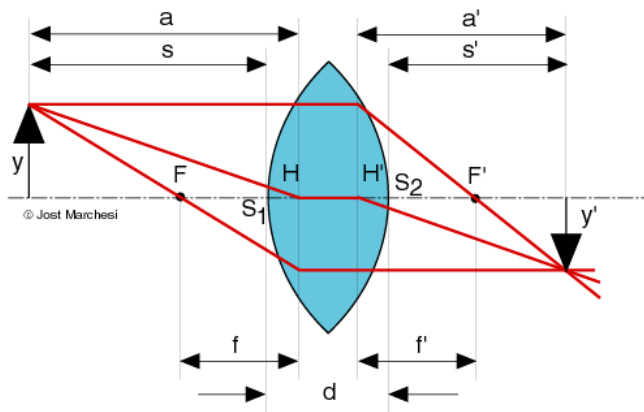
- der **Reflexion** an Glasflächen (Vermeidung von Reflexen durch Polarisationsfilter) und bei
- **Streuung** von Sonnenlicht (dunkle Wiedergabe des Himmels in der Farbfotografie mit Polarisationsfiltern).

### 3.2. Kennwerte fotografischer Objektiv – Brennweite, Lichtstärke, Bildwinkel

Bei dicken Linsen und bei Linsensystemen ist es nicht mehr möglich, die Brennweite zwischen Brennpunkt und Linsenmittelpunkt anzugeben. Um trotzdem die oben erklärten Prinzipien der Bildkonstruktion weiter benutzen zu können, greift man zu einer Hilfskonstruktion: den **Hauptebenen** und ihren Schnittpunkten mit der optischen Achse, den **Hauptpunkten** H und H'. In den Hauptebenen denke man sich die gesamte Brechkraft der Linse oder des Linsensystems vereinigt, so dass die Bildkonstruktion weiterhin mit Parallel- und Brennpunktstrahl erfolgen kann.

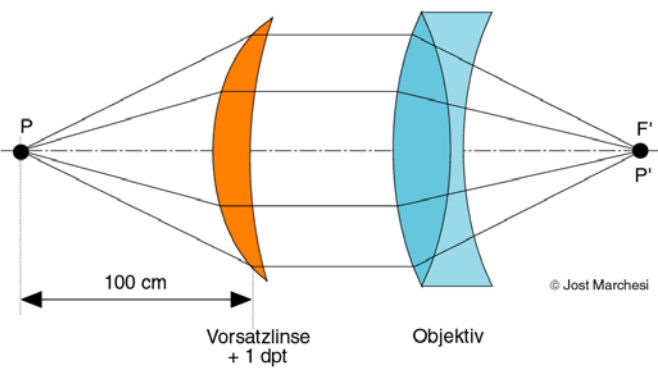


Für das Verständnis verschiedener Objektivkonstruktion ist eine weitere Größe von Interesse: die **Schnittweite** s als Abstand des letzten Linsenscheitels von der Bildebene.



In der Optik ist es vielfach üblich, die **Brechkraft** von Linsen anstelle der Brennweite anzugeben. Das vereinfacht die Berechnung von einfachen Linsensystemen wie z.B. beim Einsatz von Vorsatzlinsen anzutreffen sind. Die Maßeinheit der Brechkraft ist die Dioptrie (dpt).

$$\text{Brechkraft} = \frac{1}{\text{Brennweite (Meter)}}$$



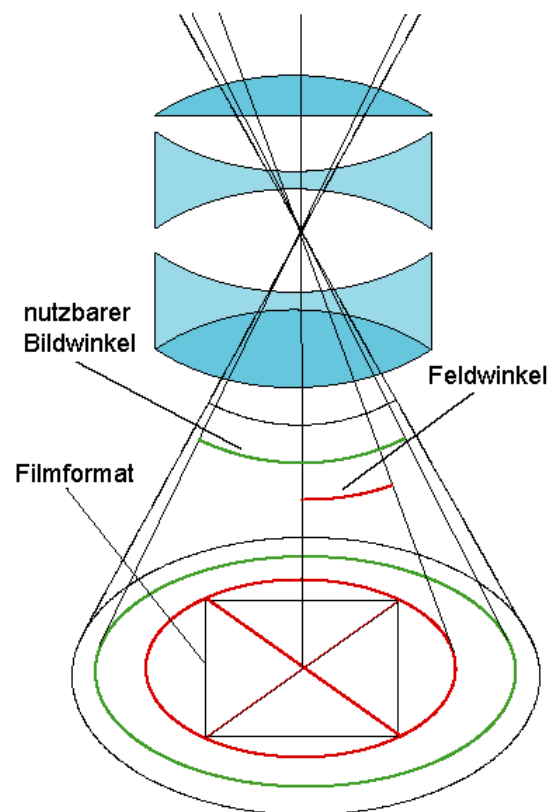
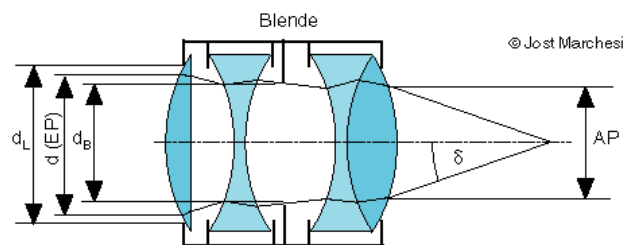
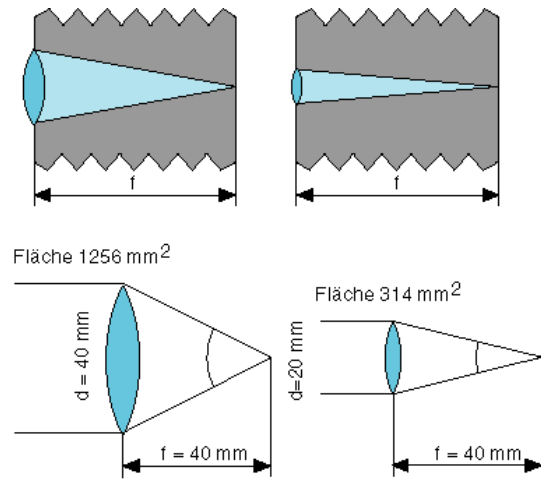
Neben der Brennweite ist die **Lichtstärke** der wichtigste Kennwert eines Objektivs. Die Definition der Lichtstärke trägt der Tatsache Rechnung, dass bei gleicher Brennweite Linsen mit größerem Durchmesser mehr Lichtenergie in einen Bildpunkt fokussieren. Da der Öffnungswinkel von Linsendurchmesser und Brennweite abhängt, haben Objektive mit gleichem Öffnungswinkel die gleiche Lichtstärke.

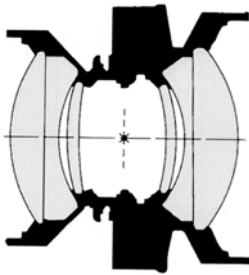
Bei Kameraobjektiven begrenzt eine Blende das effektiv wirksame Strahlenbündel. Es ist also erforderlich, die Lichtstärke über die wirksame Öffnung des Objektivs als Quotient aus dem Durchmesser der Eintrittspupille und der Brennweite zu definieren. Praktisch benutzt wir die **Blendenzahl**  $k$  als Kehrwert der relativen Öffnung:

$$k = \frac{f}{d}$$

Große Blendenzahlen bedeuten kleine relative Öffnungen!

Jedes Objektiv entwirft auf einem Schirm oder einer Mattscheibe ein **kreisrundes Bild**. Der von diesem Bildkreis umschriebene Winkel wird als **Bildwinkel** bezeichnet. Von diesem Bildkreis ist unter Einhaltung bestimmter Grenzwerte für Schärfe und Helligkeit und abhängig von der Abbildung nur ein Teil fotografisch nutzbar (**nutzbarer Bildwinkel**). Innerhalb dieses nutzbaren Bildkreises muß das benutzte Aufnahmeformat angeordnet werden. Der Winkel über der Diagonale des Aufnahmeformates wird als **doppelter Feldwinkel** bezeichnet. Da eine Korrektur aller Abbildungsfehler mit zunehmender Größe des Bildkreises immer schwieriger wird, paßt man Aufnahmeobjektive für starre Kleinbild- und Mittelformatkameras an das jeweilige Aufnahmeformat optimal an.





Im Gegensatz zu dem auf das Aufnahmeformat bezogenen Feldwinkel ist der **Bildwinkel unabhängig von der Brennweite** des Objektivs. Er wird einzig von der Objektivkonstruktion bestimmt. Damit variiert die Größe des Bildkreises mit der Brennweite und dem Abbildungsmaßstab. Diese Tatsache ist besonders bei Großformatkameras von Bedeutung. Hier werden wegen der notwendigen Verstellmöglichkeiten Bildkreise benutzt, die oft wesentlich größer sind als die Filmdiagonalen. (links: Schnitt durch ein typisches Großformatobjektiv mit großem Bildwinkel)

Unabhängig vom Aufnahmeformat teilt man nach dem doppelten Feldwinkel Aufnahmeobjektive für starre Kameras in folgende Kategorien ein:

Fernobjektive	<20°
langbrennweitige Objektive	20 .. 40°
Normalobjektive	40 .. 55°
Weitwinkelobjektive	>55°

Da der Feldwinkel über die Formatdiagonale definiert wurde, kann man die Objektivkategorien auch über die Seitenlänge des Aufnahmeformats definieren. Dabei wird die **Normalbrennweite** mit der Formatdiagonalen gleichgesetzt, ‚lange‘ Brennweiten sind größer als die doppelte längere Formatseite und Brennweiten kürzer als die längere Formatseite gelten als ‚kurz‘ (MARCHESI 1993).

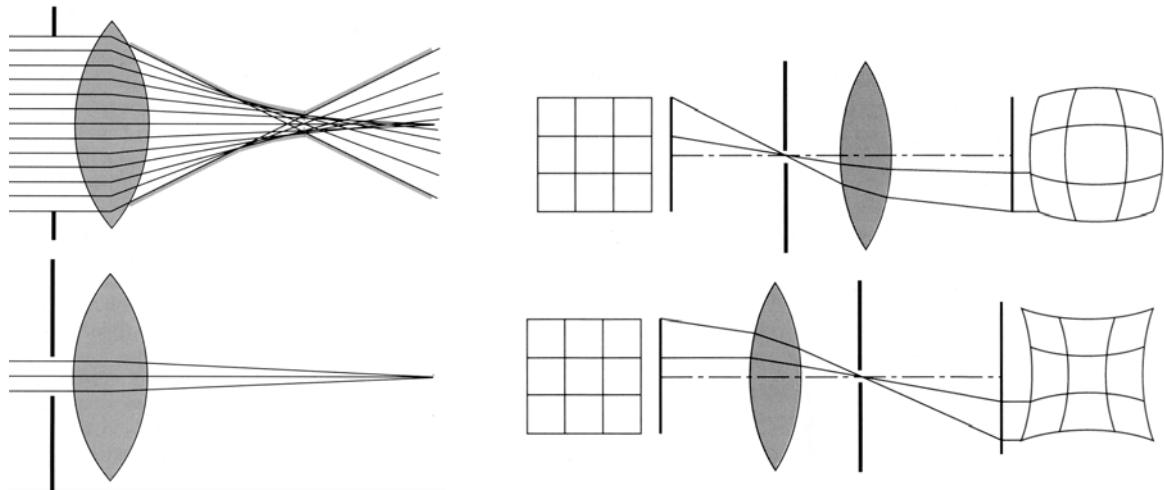
Eine interessante Abschätzung der Abhängigkeit des Abbildungsmaßstabes von der Brennweite erlaubt eine weiter oben eingeführte Beziehung. Für Gegenstandsweiten (Aufnahmeentfernungen)  $a$ , die sehr viel größer als die Brennweite  $f$  sind, vereinfacht sich die Beziehung zu:

$$\frac{y'}{y} = \frac{f}{a-f} \Rightarrow \frac{y'}{y} \approx \frac{f}{a}$$

Jetzt sieht man, dass doppelte Brennweiten mit doppelten Abbildungsmaßstäben einhergehen. So ist zum Beispiel ein Vergleich von Teleobjektiven und Ferngläsern möglich: Um die gleiche Vergrößerung wie mit einem 8fach vergrößerndem Fernglas zu erzielen, müsste man ein Objektiv mit 400 mm Brennweite (8 x 50 mm) benutzen.

### 3.3. Abbildungsfehler und Qualitätsmaße fotografischer Objektive

Bei allen bisherigen Betrachtungen sind wir von der idealisierten Vorstellung ausgegangen, dass jeder Objektpunkt genau in den durch die Abbildungsgleichung vorhergesagten Bildpunkt abgebildet wird. Exakt gilt das jedoch nur für achsennahe Strahlen einer Wellenlänge (Farbe). Auch bei exakter Kugelform der Linse haben Strahlen, die die Linse am Rand passieren, eine kürzere Brennweite. Die dadurch verursachte Unschärfe bezeichnet man als **sphärische Aberration** oder als **Öffnungsfehler**. Die einfachste Methode zur Minderung des Öffnungsfehlers ist die Einengung des Strahlenbündels durch Blenden. Das ist jedoch, wie oben gezeigt mit einem Abfall der Lichtleistung verbunden. Aufwändige Konstruktionen aus Sammell- und Zerstreuungslinsen ermöglichen die Korrektur dieses Abbildungsfehlers. Besonders bei lichtstarken Objektiven ist die Korrektur sehr schwierig, was sich im Preis solcher Objektive niederschlägt.



*Minderung der sphärischen Aberration durch Abblendung*      *Tonnenförmige und kissenförmige Verzeichnung*

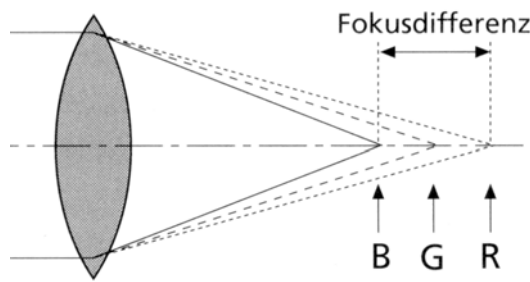
Bei einfachen optischen Systemen ist der Abbildungsmaßstab nicht über das gesamte Bildfeld konstant – es kommt zur **Verzeichnung**. Dieser Abbildungsfehler wird besonders dann erkennbar, wenn exakt rechtwinkelige Gittermuster reproduziert werden sollen. Je nachdem, ob sich die Blende **vor** oder **hinter** dem Objektiv befindet, kommt es zu einer **tonnenförmigen** oder **kissenförmigen** Verzeichnung. Ordnet man die Blende in der Mitte des Objektivs an (symmetrische Konstruktion), kompensieren sich beide Effekte teilweise. Eine besonders starke Verzeichnung weisen extreme Weitwinkelobjektive und Vario-Objektive auf.

Neben der sphärischen Aberration ist die **chromatische Aberration** der zweite bedeutende Abbildungsfehler. Ihre Ursache liegt in der Abhängigkeit des Brechungsindex  $n$  von der Wellenlänge, die als Dispersion bezeichnet wird. Mit zunehmender Wellenlänge (von blau nach rot) nimmt der Brechungsindex ab, so dass man üblicherweise die Brechzahl bei einer mittleren Wellenlänge angibt. Sowohl die mittlere Brechzahl als auch die Stärke der Dispersion variieren zwischen einzelnen Glassorten beträchtlich. Als Maß für die Stärke der Dispersion wurde die **Abbesche Zahl  $\nu$**  eingeführt. Zu ihrer Berechnung werden die Brechzahlen bei drei Wellenlängen ( $n_F$  für blaugrün,  $n_e$  für gelbgrün und  $n_C$  für rot) bestimmt und ein Quotient nach folgender Vorschrift bestimmt:

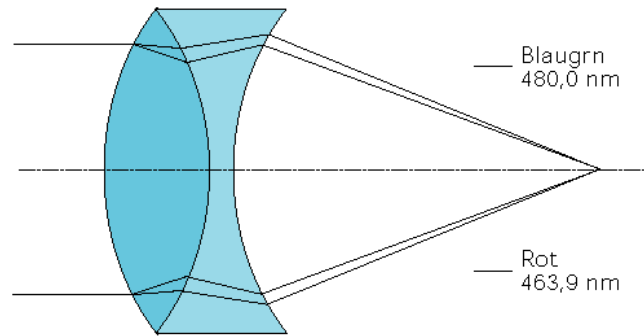
$$\nu = \frac{n_e - 1}{n_F - n_C}$$

Je höher die Abbesche Zahl ist, um so geringer ist die Dispersion der Glassorte.

Die wellenlängenabhängigen Brechzahlen führen auch zu unterschiedlichen Brennweiten für einzelne Farben. Die Differenz der Brennweiten für blaues und rotes Licht wird als **Farblängsfehler** bezeichnet. Da diese Brennweitendifferenz bis zu 5% der mittleren Brennweite betragen kann, führt sie zu einer beträchtlichen Unschärfe. Durch Kombination von Sammell- und Zerstreuungslinsen mit unterschiedlichen Dispersionskennzahlen ist für einen begrenzten Wellenlängenbereich eine Korrektur der chromatischen Aberration möglich. Solche Objektivkonstruktionen bezeichnet man als **Achromate**.

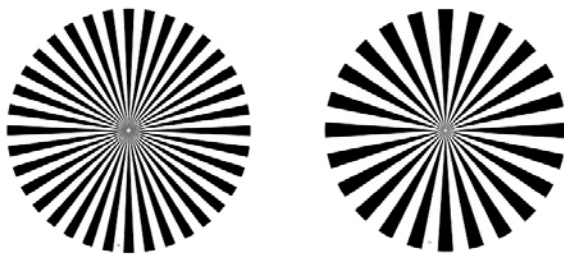


Farblängsfehler an einer Sammellinse

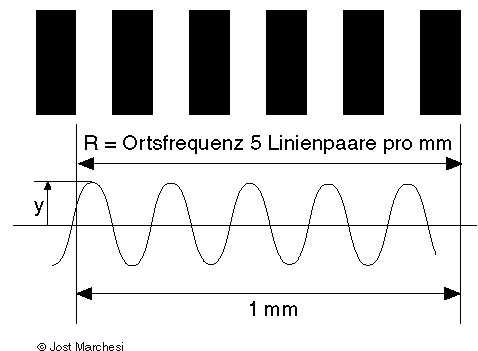


Prinzip der achromatischen Korrektur

Neben der Korrektur des Öffnungsfehlers und der Farbkorrektur ist die optimale Wiedergabe feiner Objektstrukturen ein Hauptkriterium für die Qualität eines fotografischen Objektivs. Dabei kann das **Auflösungsvermögen** relativ einfach mittels genormter Testmuster bestimmt werden. Ein solches Testmuster ist der sogenannte Siemensstern. Um zusätzlich zur reinen Linienauflösung den Kontrast der Abbildung objektiv messen zu können, wird heute allgemein die **Modulationsübertragungsfunktion (MTF)** von Objektiven bestimmt. Dazu wird die Helligkeitsverteilung eines Strichgitters vor und nach der Abbildung durch das Objektiv gemessen.

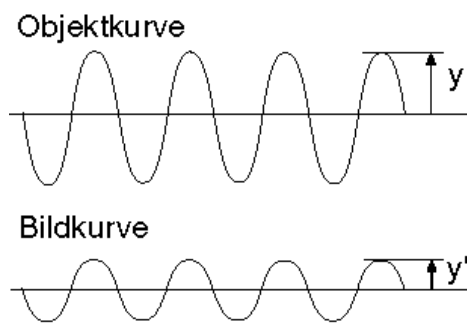


Siemensstern zur Messung des Auflösungsvermögens

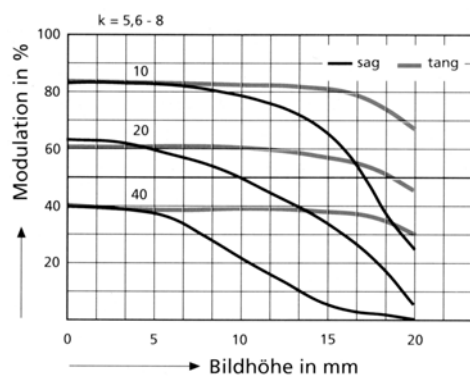


Definition der Ortsfrequenz

Der Quotient beider Werte, der im Idealfall 1 bzw. 100% werden kann, wird als MTF-Faktor bezeichnet. Stellt man diesen MTF-Faktor als Funktion der Liniendichte (Ortsfrequenz) und des Ortes auf dem Bildfeld dar, bekommt man einen guten Überblick über die Leistungsfähigkeit des Objektivs.

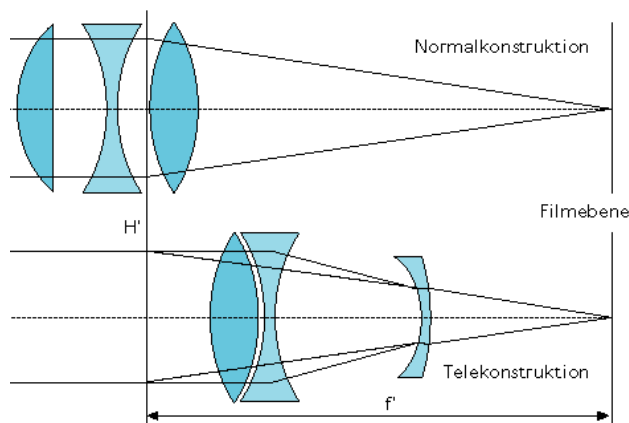
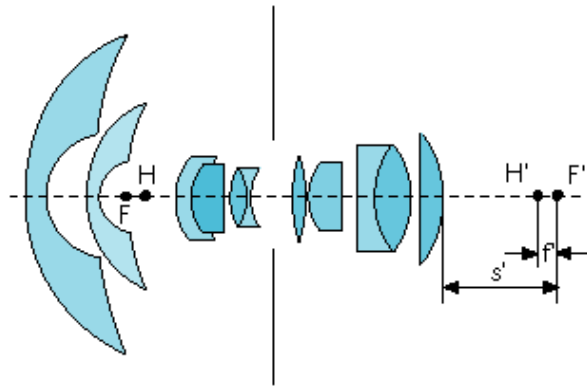


Helligkeitsverteilungen zur Bestimmung der MTF



Typische MTF-Kurven für ein Kleinbildobjektiv

### 3.4. Objektivtypen



Als Beispiele für die große Vielfalt moderner Objektivkonstruktionen sollen an dieser Stelle nur zwei interessante Beispiele erwähnt werden, die zugleich die Sinnfälligkeit der weiter oben eingeführten Hauptebenen verdeutlicht: Das retrofokale Weitwinkelobjektiv und das Teleobjektiv.

Für den Einsatz an Spiegelreflexkameras muß der Abstand zwischen den letzten Linsenscheitel und dem Brennpunkt so groß sein, dass der Spiegel ungehindert geschwenkt werden kann. Bei typischen Brennweiten von 20..30 mm ist diese Bedingung mit klassischen Konstruktionen nicht zu erfüllen. Erst die in der nebenstehenden Abbildung dargestellt sogenannte **Retrokonstruktion** schafft eine Schnittweite, die deutlich größer als die Brennweite ist!

Gerade umgekehrt sind die Verhältnisse bei Teleobjektiven. Hier ist man bestrebt, die Baulänge möglichst klein zu halten, was dazu führt, daß durch eine zusätzliche Zerstreuungslinse die bildseitige Hauptebene  $H'$  vor die Frontlinse verschoben wird. Für diesen Objektivtyp ist die Schnittweite deutlich kleiner als die Brennweite

### 3.5. Makrofotografie

In normalen Aufnahmesituationen ist die Gegenstandsweite groß gegen die Brennweite, was Abbildungsmaßstäbe sehr viel kleiner als 1:1 zur Folge hat. Möchte Gegenstände auf dem Film etwa in ihrer natürlichen Größe abbilden (Abbildungsmaßstab 1:1), so müssen Gegenstandsweite und Bildweite in der Größenordnung der doppelten Brennweite ( $2f$ ) liegen. Für solche Bildweiten sind die Schneckengänge normaler Objektive nicht konstruiert.

In solchen Fällen (Makrofotografie) benutzt man Auszugsverlängerungen, die die Bildweite um feste (Zwischenringe) oder flexible (Balgenauszug) Beträge vergrößern.

**Ein Abbildungsmaßstab von 1:1 wird mit einer Auszugsverlängerung in der Größe der Brennweite erreicht!**

Dabei treten zwei Probleme auf: Die Beleuchtungsstärke in der Filmebene verringert sich mit zunehmender Auszugsverlängerung und die Schärfentiefe verringert sich dramatisch.

## 4. Kameratechnik

### 4.1. Systematik der Kamerateypen

Die Typenvielfalt der heute und in der Vergangenheit hergestellten Kameras macht eine Systematisierung notwendig. Wir betrachten hier zwei einfach zu identifizierende Kriterien, das **Format des Aufnahmemediums** und das **Suchersystem**. Gemessen an der Kameravielfalt ist die Zahl der unterschiedlichen **Aufnahmeformate** relativ gering. Interessant ist dabei, dass alle heute verwendeten Formate sehr stark historisch determiniert sind:

- **Großformat** → Historisch entstanden aus den Kollodium- und Gelatineplatten des späten 19. Jahrhunderts (s. 2.2.1. Kollodiumplatten, ...). Heute sind die Glasplatten durch **Planfilm** ersetzt worden, wobei für Spezialaufgaben immer noch Glas als Schichtträger verwendet wird (z.B. wenn ein Schrumpfen des flexiblen Schichtträgers nicht akzeptiert werden kann).
- **Mittelformat** → Alle Mittelformatkameras verwenden heute den 70 mm breiten Rollfilm, der aus dem klassischen **Rollfilm** von George Eastman hervorgegangen ist. Die Aufnahmeformate des Mittelformats passen sich dieser Filmbreite an und bewegen sich zwischen 4,5x6, 6x6, 6x7 und 6x9 cm.
- **Kleinbild** → Die mit Abstand größte Verbreitung hat heute der **35-mm-Kleinbildfilm** gefunden. Historisch ist er aus dem 35 mm breiten Kinofilm entstanden. (Leica, Oscar Barnack)
- Neben dem Kleinbildfilm werden von der Kamera- und Filmindustrie in regelmäßigen Abständen mit großem Werbeaufwand **Miniaturformate** auf dem Markt platziert. Bisher konnte jedoch keines dieser Formate die großen Vorteile des Kleinbildfilms in marktentscheidenden Parametern (Preis, Handhabbarkeit) übertreffen.

Neben dem Filmformat ist das **Suchersystem** das zweite wichtige Systematisierungskriterium für fotografische Kameras. Das Suchersystem hat im wesentlichen zwei Funktionen: Die **Wahl des Bildausschnittes** und die **Fokussierung**.

- In Analogie zu Glasplatte und Planfilm ist die **Mattscheibe** das älteste ‚Suchersystem‘. An modernen Kameras treffen wir die Mattscheibe an zwei Stellen an: Als klassisches Medium zur Ausschnitt- und Schärfewahl an großformatigen Fachkameras und in Spiegelreflexkameras. Bei letzteren und besonders bei den Systemkameras der großen Hersteller ist die reine Mattscheibe inzwischen durch **auswechselbare Sucherscheiben** mit Gitterteilung oder mit Hilfsmitteln zur Fokussierung abgelöst worden.
- **Rahmensucher** werden bei kompakten Kleinbildkameras, aber auch bei Mittelformatkameras eingesetzt. Der Hauptnachteil dieses Sucherprinzips besteht in der nicht zwingenden Übereinstimmung von Sucherbild und Filmbild besonders im Nahbereich (**Parallaxe**). Ein wesentlicher Vorteil ist die kompakte Bauweise, die ohne den raumfordernden Spiegelkasten (↓) auskommt. An hochwertigen Sucherkameras wird zur Fokussierung ein **Messsucher** eingesetzt (Leica M6), der auch ohne Spiegelreflextechnik eine präzise Fokussierung ermöglicht.
- Die Forderung sowohl nach exakter Übereinstimmung von Sucher- und Filmbild als auch nach optimaler Kontrolle der Fokussierung wird durch das **Spiegelreflexprinzip** erfüllt. Hier wird durch einen Spiegel im Strahlengang nach dem Objektiv das Bild auf eine Mattscheibe umgelenkt. Erst unmittelbar vor der Verschlussöffnung wird der Spiegel weggeklappt und der Strahlengang zum Film freigegeben. Die Vorteile des Spiegelre-

flexprinzips zeigen sich besonders beim Einsatz von Wechselobjektiven und bei Auszugsverlängerungen (Makrofotografie). Nachteile des Prinzips liegen zum einen im Platzbedarf des Spiegels (kurzbrennweitige Objektive) und in der Trägheit der Spiegelmechanik (Begrenzung der max. Bildfrequenz, Erschütterungen der Kamera). Für spezielle Anwendungen mit hoher Bildfrequenz wurden Spiegelreflexkameras mit teildurchlässigen feststehenden Spiegeln entwickelt (Nikon F2H, 1978)

- Mit Einführung von Digitalkameras wurden **elektronische Suchersysteme** (LCD-Displays) eingeführt, die aber aufgrund ihrer Trägheit und geringen Auflösung nicht als „echte“ Suchersysteme, sondern eher zur groben Beurteilung des gespeicherten Bildes eingesetzt werden.

## 4.2. Kamerabaugruppen

### 4.2.1. Verschluss

Das Reziprozitätsgesetz für fotografische Schichten ( $\downarrow$ ) besagt, dass für eine bestimmte Schwärzung (Dichte) der fotografischen Schicht eine bestimmte **Belichtung** ( $\downarrow$ ) notwendig ist. Diese ist wiederum als Produkt aus Beleuchtungsstärke und Belichtungszeit definiert. Während sich die Beleuchtungsstärke in der Filmebene durch die Blendenöffnung relativ einfach beeinflussen lässt, erfordert die Einstellung einer definierten Belichtungszeit einen erheblichen mechanischen Aufwand. Heute werden, von „low-cost“-Verschlüssen abgesehen, zwei Verschlussprinzipien eingesetzt:

- Der **Zentralverschluss** besteht aus mehreren kurvenförmigen Stahllamellen, die um feste Drehpunkte aus dem Strahlengang geschwenkt werden. Zentralverschlüsse werden in der Regel am Ort des kleinsten Durchmessers des Lichtbündels im Objektiv angeordnet ( $\rightarrow$  Hauptebene). Die Bewegungsumkehr im Verschlussablauf begrenzt die kürzeste Belichtungszeit auf etwa 1/500 s. Große Verbreitung haben Zentralverschlüsse bei Großformatkameras erlangt.
- Der **Schlitzverschluss** befindet sich unmittelbar vor der Filmebene (*focal plane shutter*) und wird durch zwei horizontal oder vertikal ablaufende Rollos realisiert („erster und zweiter Verschlussvorhang“). Man unterscheidet zwei prinzipielle Betriebsarten: Bei längeren Verschlusszeiten bleibt der Verschluss eine bestimmte Zeit vollständig geöffnet. Diese Belichtungszeiten sind für die Synchronisation von Elektronenblitzgeräten wichtig. Kürzere Zeiten lassen sich nur realisieren, wenn der zweite Vorhang wenige Millisekunden nach dem ersten freigegeben wird. Die Belichtungszeit wird bei dieser Betriebsart durch die **Schlitzbreite** bestimmt!

Da sich die Zeitpunkte der Rollo-Auslösung über Elektromagnete und elektronische Schaltungen gut steuern lassen, können an modernen Kleinbild- und Mittelformatkameras extrem kurze Verschlusszeiten realisiert werden (heute bis 1/8000 s). Die kürzeste rein mechanisch realisierte Verschlusszeit beträgt 1/4000 s (Nikon FM2)! Mit extrem kurzen Belichtungszeiten müssen zwei elementare mechanische Probleme gelöst werden: (1) Soll die Schlitzbreite und damit die Belichtung über die gesamte Filmbreite konstant bleiben, müssen die Rollos sehr schnell auf ihre (dann konstante) Endgeschwindigkeit beschleunigt werden. (2) Erschütterungen beim Abbremsen der Rollos müssen durch spezielle Vorrichtungen gedämpft werden. Durch die „nacheinander“ erfolgende Belichtung der Filmabschnitte kommt es auch bei einem idealen Schlitzverschluss zu Fehlern bei der Abbildung von Objekten, die sich parallel zur Filmebene bewegen.

### 4.2.2. Fokussierung

Die Fokussierung, d.h. die Einstellung einer optimalen Abbildungsschärfe in der Filmebene erfolgt im Prinzip immer durch Veränderung des relativen Abstandes von Filmebene und Hauptebene des Objektivs ( $\leftarrow$ 3.1.2 Abbildung mit Linsen). Bei **Großformatkameras** erfolgt das in gut nachvollziehbarer Weise durch Verschiebung von Objektiv bzw. Filmhalterung auf einer optischen Bank. Die Kontrolle der Schärfe erfolgt direkt auf einer in der Filmebene liegenden **Mattscheibe**, die später durch eine Kassette mit dem Film ersetzt wird.

**Mittelformat- und Kleinbildkameras** fokussieren durch Verschiebung einer oder mehrerer Linsengruppen innerhalb des Objektivgehäuses, welches selbst starr mit dem Kameragehäuse verbunden ist. Bei manueller Fokussierung geschieht das durch einen Schneckentrieb, welcher die Drehbewegung in eine Verschiebung längs der optischen Achse umwandelt.

Eine einfache visuelle Kontrolle der Fokussierung erlaubt das **Spiegelreflexprinzip**. Hierbei wird der Strahlengang vor der Filmebene mittels Spiegel auf eine Mattscheibe umgelenkt. Ein Umkehrprisma wandelt das seitenverkehrte kopfstehende Mattscheibenbild in ein seitenrichtiges aufrechtes Bild. (Hauptnachteil: Raumforderung des Spiegels). Spezielle Modifikationen der Mattscheibe (Rasterteilungen, Schnittbild-Einstellhilfen) erlauben neben einer komfortablen Fokussierung eine optimale Beurteilung des Bildausschnitts.

Eine mechanische Kopplung der Verschiebung des Objektivs mit dem Suchersystem ermöglicht auch bei Sucherkameras eine exakte Scharfstellung. Der dabei notwendige hohe mechanische Aufwand führt allerdings dazu, daß diese Systeme ausschließlich an Sucherkameras der oberen Preisklasse eingesetzt werden.

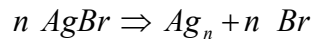
Zur Automatisierung der Fokussierung wurden in den letzten Jahren verstärkt **Autofokus**-Techniken eingesetzt. Dabei ist es wichtig zu bemerken, daß diese Techniken das physikalische Prinzip der Fokussierung, d.h. der Relativbewegung von Filmebene und Objektiv nicht ersetzen können. Üblich sind zwei verschiedene Wirkprinzipien:

- **Aktiver Autofocus:** Hier wird durch die Messung der Laufzeit einer Welle (Ultraschall oder infrarotes Licht) von der Kamera zum Objekt die **Gegenstandsweite** geschätzt und daraus die optimale **Bildweite** eingestellt. Dieses Prinzip ist nur für kleine Entfernungen wirksam und findet deshalb oft bei kleinen automatischen Sucherkameras Anwendung, bei denen die Bildschärfe für größere Gegenstandsweiten durch Ausnutzung der **hyperfokalen Distanz** ( $\uparrow$ ) realisiert wird.
- **Passiver Autofocus:** Hier wird der Fokussierungszustand des Bildes durch elektronische Kontrastmessung an regelmäßigen Strukturen in der Filmebene geschätzt. Abweichungen von der optimalen Schärfe führen in einem Regelkreis zu einer Verschiebung der Objektiveposition. Dieses Prinzip wurde in den letzten Jahren soweit verbessert, daß es heute zum Standardinventar jeder Spiegelreflexkamera gehört. Physikalische Grenzen werden dem Verfahren durch die begrenzte Lichtempfindlichkeit der optischen Sensoren und durch die Notwendigkeit eines Kantenkontrastes senkrecht zum Autofocus-Sensor gesetzt. Dem ersten Problem begegnet man zumindest bei mittleren Objektentfernungen mit dem Einsatz künstlicher Zusatzlichtquellen. Das zweite Problem wird durch den Einsatz mehrerer gegeneinander verdrehter Sensoren gemildert.

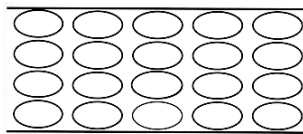
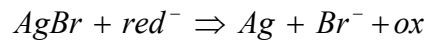
## 5. Bildspeicherung in Silberhalogenid-Schichten

### 5.1. Der fotografische Elementarprozeß

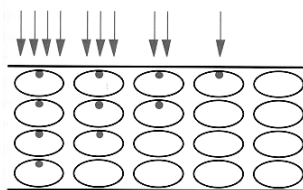
Als fotografischer Elementarprozeß wird der Vorgang bezeichnet, bei dem durch Einwirkung genügend energiereicher elektromagnetischer Strahlung auf einen Silberhalogenidkristall ein Latentbildkeim gebildet wird. Dieser Bildkeim besteht aus wenigen Silberatomen und muß genügend stabil für eine längere Lagerung sein.



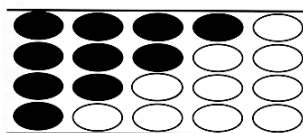
Bei der Entwicklung eines fotografischen Materials werden diejenigen Silberhalogenidkristalle, die einen Latentbildkeim tragen, durch ein Reduktionsmittel (Entwicklersubstanz) zu metallischem Silber reduziert. Die Latentbildkeime agieren dabei als Katalysator.



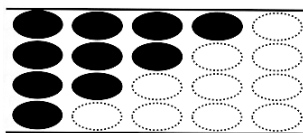
Die lichtempfindliche Schicht enthält 20..40 Kornlagen. Ein einzelner Kristall besteht aus  $10^7 \dots 10^9$   $\text{Ag}^+\text{Br}^-$ -Ionenpaaren



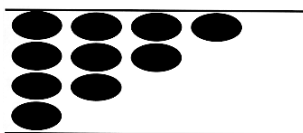
Bei der **Belichtung** entsteht ein latentes Bild, das aus Entwicklungskeimen aufgebaut ist



Durch die **Entwicklung** wird das belichtete Silberhalogenid zu metallischem Silber reduziert. Ein **Stoppbad** unterbricht die Entwicklung zu einem definierten Zeitpunkt



Beim **Fixieren** wandelt sich das unbelichtete Silberhalogenid in eine wasserlösliche Komplexverbindung um.



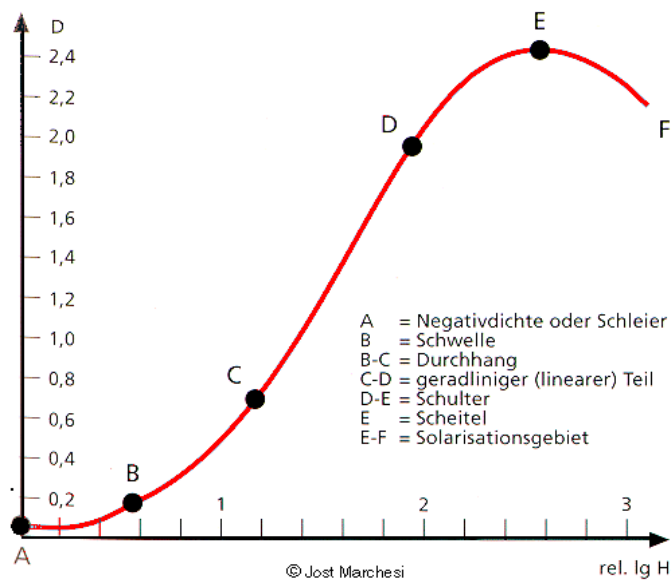
In der **Schlusswässerung** diffundiert das noch in der Schicht befindliche Komplexsalz und andere Rückstände aus der Schicht heraus. Zurück bleibt das negative Silberbild

## 5.2. Eigenschaften fotografischer Materialien

### 5.2.1. Grundbegriffe der Sensiometrie

Die **Schwärzungskurve** stellt den funktionellen Zusammenhang zwischen dem Logarithmus der **Belichtung**  $H$  und der daraus resultierenden **optischen Dichte**  $D$  für ein bestimmtes fotografisches Material bei einer spezifischen Verarbeitung dar. Als optische Dichte bezeichnet man den Logarithmus des Verhältnisses aus einfallendem und durchgelassenem Lichtstrom.

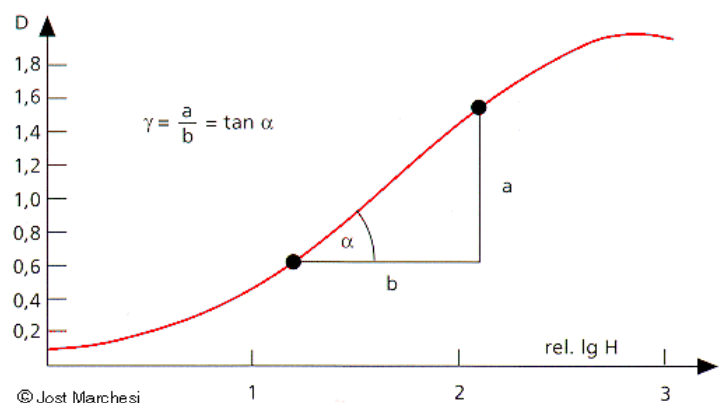
Neben dem fotografisch besonders interessanten linearen Teil weist die Schwärzungskurve für kleine und große Belichtungen stark gekrümmte Bereiche auf.



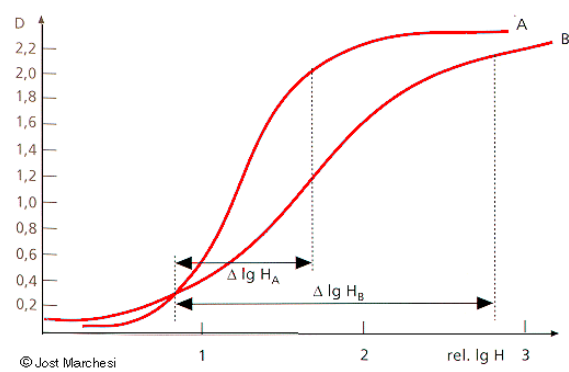
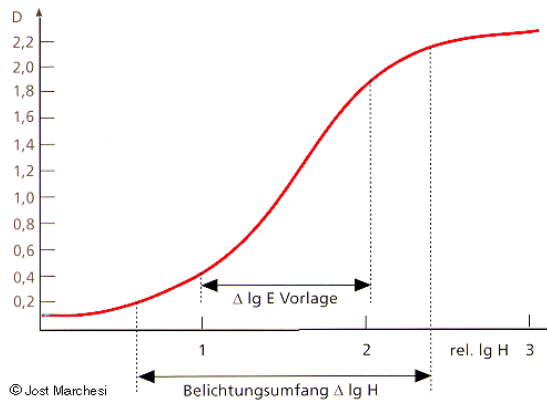
### 5.2.2. Sensiometrische Kennwerte

Die **Steilheit** der Schwärzungskurve macht eine Aussage über die Kontrastwiedergabe der Grauwertabstufungen des Originals. Da bei Aufnahmematerial für die bildmäßige Fotografie die Schwärzungskurve S-förmig verläuft, wird die Steilheit nur für den linearen Teil angegeben.

Der **Gammawert** ist das Verhältnis der Dichtedifferenz des Negatives zum Helligkeitsumfang des Originals. Der Gammawert eines Materials ist keine Konstante. Er läßt sich durch Entwicklungszeit, Temperatur, Entwicklungsmethode und Zusammensetzung des Entwicklers beeinflussen.

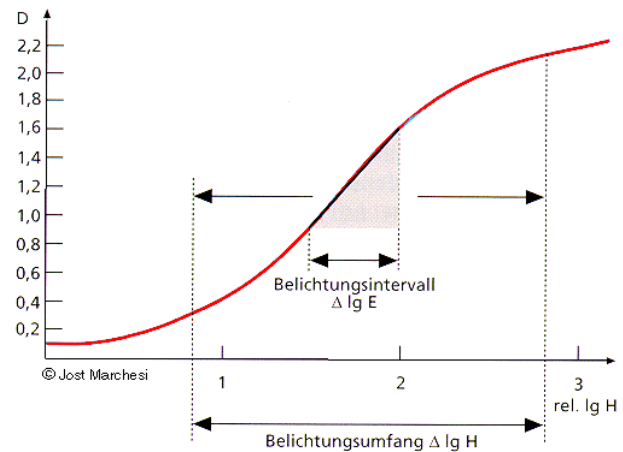


Der **Objektumfang** (Helligkeitsumfang, Motivkontrast) ist das Leuchtdichteverhältnis der abzubildenden Szene, d.h. das lineare Verhältnis zwischen der dunkelsten und hellsten Gegenstandsstelle. Der **Belichtungsumfang** ist der ausnutzbare Belichtungsbereich einer Schicht, d.h. die Differenz der Belichtungswerte im "brauchbaren" Bereich der Schwärzungskurve



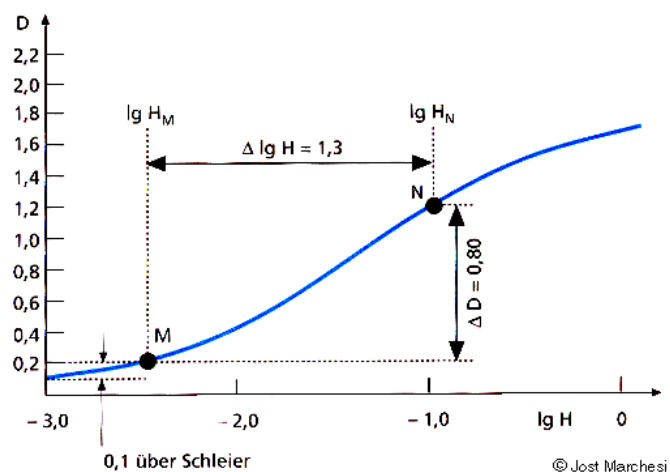
Abhängigkeit des Belichtungsumfangs von der Gradation

Der **Belichtungsspielraum** einer Schicht ist die Differenz aus Belichtungsumfang  $\Delta \lg H$  und Belichtungsintervall  $\Delta \lg E$ . Ist das Belichtungsintervall größer als der Belichtungsumfang, kann es nicht mehr auf den Belichtungsumfang der Schicht abgebildet werden. Je nach Belichtung werden Schatten, Lichter oder beides beschnitten. Abhilfe schafft entweder eine Reduzierung des Objektumfangs oder eine Erhöhung des Belichtungsumfangs der Schicht, was gleichbedeutend mit einer Verflachung der Gradation ist.



### 5.2.3 Empfindlichkeit

Bei der Messung der Nennempfindlichkeit einer fotografischen Schicht bestimmt man diejenige Belichtung, die unter genormten Bedingungen (mittlerer Objektumfang, Spektralszusammensetzung von mittlerem Tageslicht, Belichtungszeit 1/50 s) eine Dichte von 0.1 über dem Schleier erzeugt.



**ISO/ASA/DIN/ISO° ....**

- ISO und ASA sind lineare Skalen; eine **Verdopplung der Empfindlichkeit** entspricht einer **Verdopplung der ISO-Zahl**
- DIN und ISO° sind logarithmische Empfindlichkeitsskalen; eine Erhöhung um 3 ISO°/DIN entspricht einer Verdopplung der Empfindlichkeit

**5.2.4. Belichtungsmessung**

Die Belichtung H ist das Produkt der Beleuchtungsstärke E (in lx) und der Belichtungszeit t (in s)  $\Rightarrow H = E \cdot t$

Aufgabe der Belichtungsmessung ist es, einen Zusammenhang zwischen der Leuchtdichte des Aufnahmeobjekts und der in der Bildebene wirksame Beleuchtungsstärke anzugeben.

Von großer Bedeutung für die Kalibrierung von Belichtungs-Meßgeräten ist die Wahl eines Normalmotivs. So reflektiert eine durchschnittlich häufig fotografierte Szene („Person in 3..5m Abstand in landschaftlicher Umgebung mit blauem Himmel bei Frontalbeleuchtung bei 35..55° Sonnenstand“) 13 % des einfallenden Lichtstroms in Richtung der Kamera. Diese Situation wird durch eine sogenannte „Neutral-Graukarte“ nachgebildet.

Technische Lösungen für Belichtungsmesser kann man folgenden Gruppen zuordnen:

- **Handbelichtungsmesser** (für Spezialanwendungen und für den professionellen Einsatz, Licht- und Objektmessung, Blitzbelichtungsmesser)
- **TTL-Belichtungsmessung** (erfasst alle Formen der Lichtschwächung bis zur Filmebene [Filter, Auszugsverlängerungen], von der Objektivbrennweite unabhängig)
- „kameragebundene Handbelichtungsmesser“ an älteren Kameras (Problem: konstanter Bildwinkel)

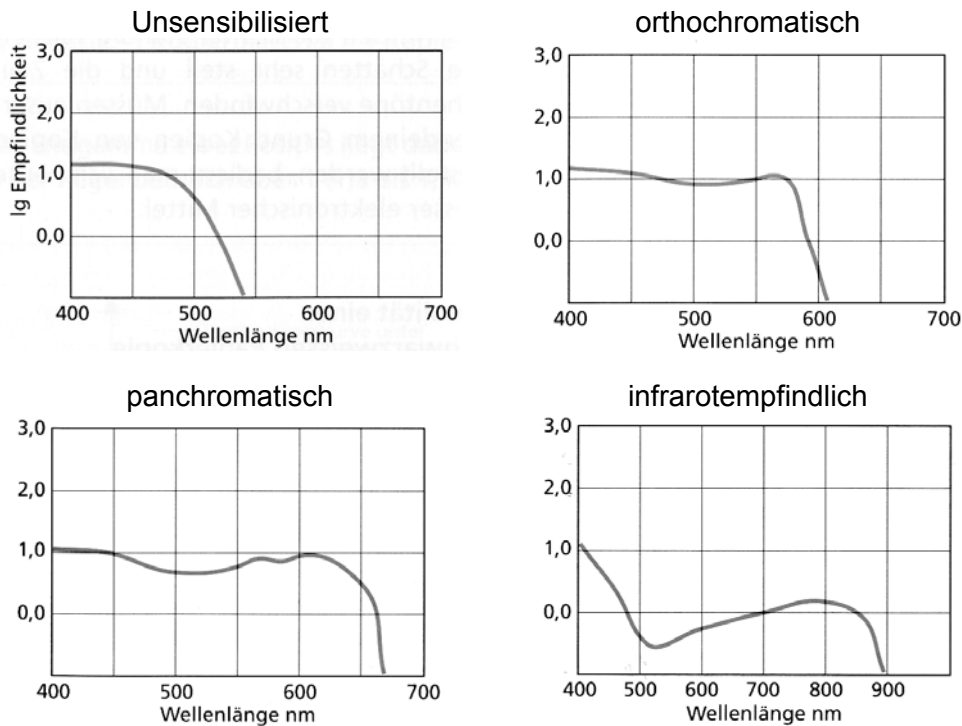
Ein quantitatives Maß für die *Empfindlichkeit* von Belichtungs Meßsystemen stellt der EV-Wert (*exposure value*) dar.

$$2^{EV} = \frac{N^2}{t} \quad \Rightarrow \quad EV = 3.32 \cdot \log\left(\frac{N^2}{t}\right) \quad \mathbf{N - Blendenzahl, t - Belichtungszeit}$$

(minimaler EV bei 100 ISO: -2...-8 , EV -2 entspricht Mondschein)

### 5.2.5. Farbempfindlichkeit fotografischer Schichten

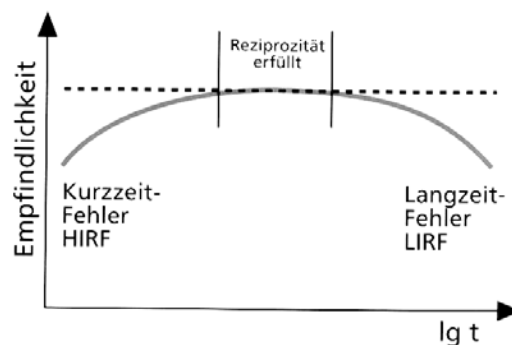
Silberhalogenide absorbieren Licht nur im ultravioletten und blauen Spektralbereich und sind somit nur für diese Farben empfindlich. Erst mit geeigneten organischen Farbstoffen können Silberhalogenide auch für langwelligeres (grünes und rotes) Licht empfindlich gemacht werden.



### 5.2.6. Anomalien fotografischer Schichten

1862 formulierten BUNSEN und ROSCOE das **Reziprozitätsgesetz** für fotografische Schichten: „Gleiche Belichtungen erzielen unabhängig von den Faktoren Beleuchtungsstärke und Zeit immer dieselben fotochemischen Reaktionen.“ 1874 entdeckte DE ABNEY, daß die Empfindlichkeit bei **extrem kurzen und langen Belichtungszeiten** abnimmt. 1899 formulierte Schwarzschild: „Je langzeitlicher man belichtet, um so unempfindlicher wird die Schicht.“

→ **Schwarzschild-Effekt**



# 6. Farbfotografie

## 6.1 Grundlagen

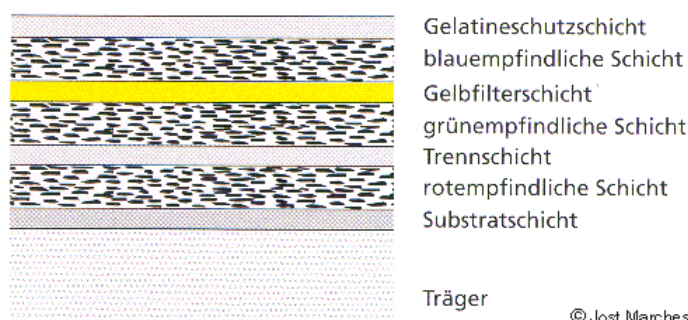
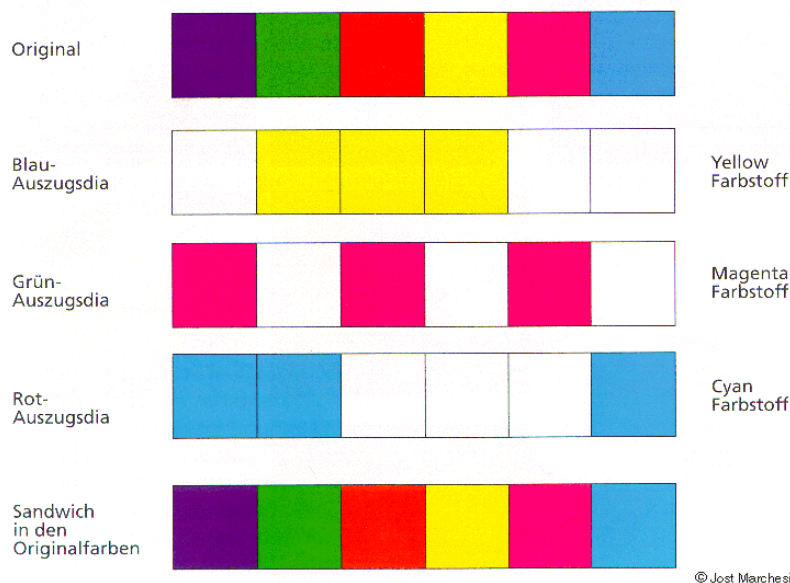
Alle Farbtöne können aus nur drei **Grundfarben** gemischt werden:

- additive Farbmischung: Blau, Grün, Rot
- subtraktive Farbmischung: Gelb, Purpur, Blaugrün

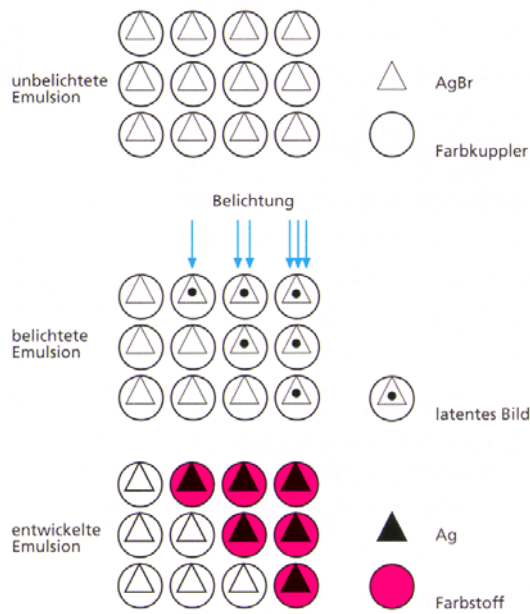
**Additive** fotografische Verfahren sind chemisch einfacher als subtraktive Verfahren, weil bei der Entwicklung keine Farbstoffchemie benötigt wird. Sie haben sich jedoch vor allem wegen der geringen Helligkeit nicht durchgesetzt (additive Filter lassen nur etwa ein Drittel der Lichtintensität durch, subtraktive dagegen zwei Drittel).

Heutige farbfotografische Verfahren benutzen eine Kombination eines additiven Dreifarben-auszugs mit einer **subtraktiven Farbproduktion** mit den jeweils komplementären Farben: *nichtblau*=Yellow, *nichtgrün*=Magenta, *nichtrot*=Cyan. Je nach Art der Bilderzeugung werden unterschieden:

- chromogene Verfahren (bildmäßiger Aufbau von Farbstoffen)
- chromolytische Verfahren (bildmäßiger Abbau vorhandener Farbstoffe)
- Farbstoff-Diffusion (bildmäßige Diffusion vorhandener Farbstoffe)



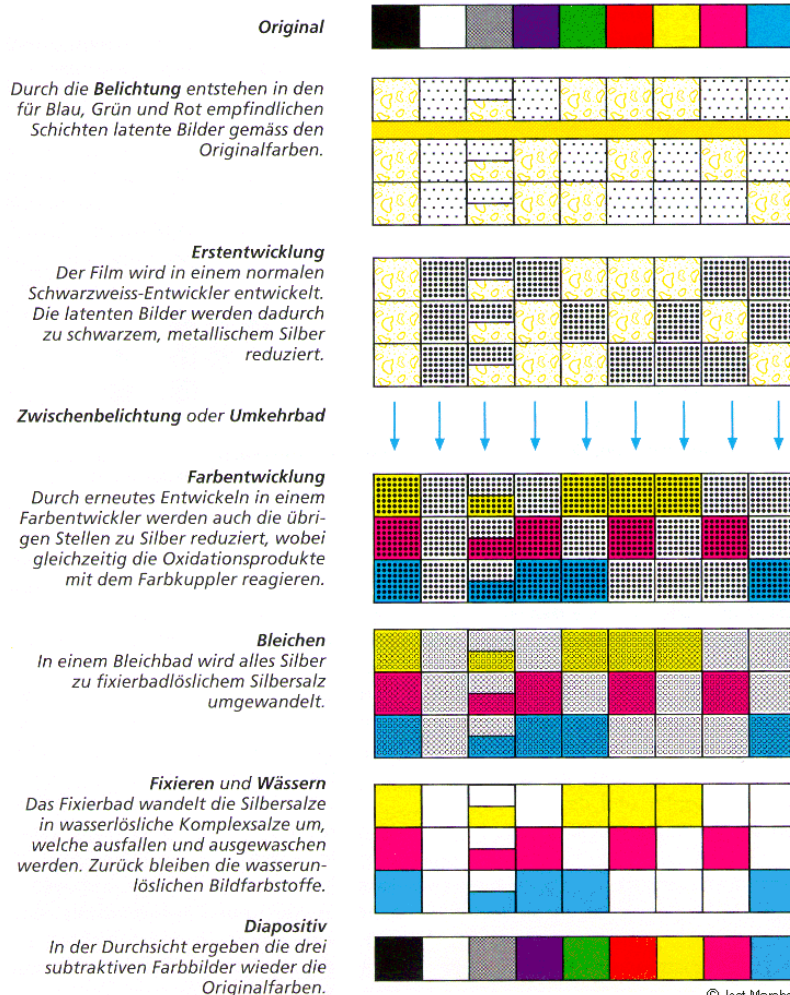
Schematischer Aufbau eines Farbfilms



**Prinzip der chromogenen Entwicklung:**

- **Synthese des in jeder Schicht benötigten subtraktiven Bildfarbstoffes** mit Hilfe des Oxidationsproduktes der Entwicklung
- **Farbkuppler:** farblose Substanzen, die zusammen mit den Oxidationsprodukten farbige Verbindungen entstehen lassen

**6.2 Farbumkehrtechnik**

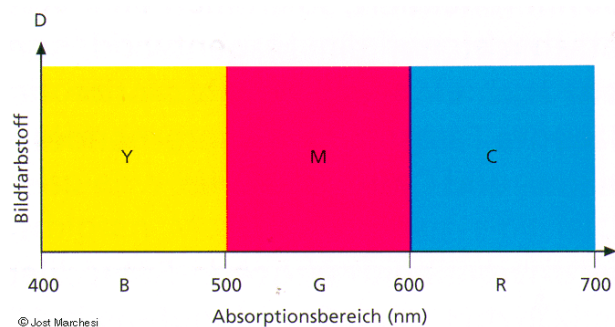
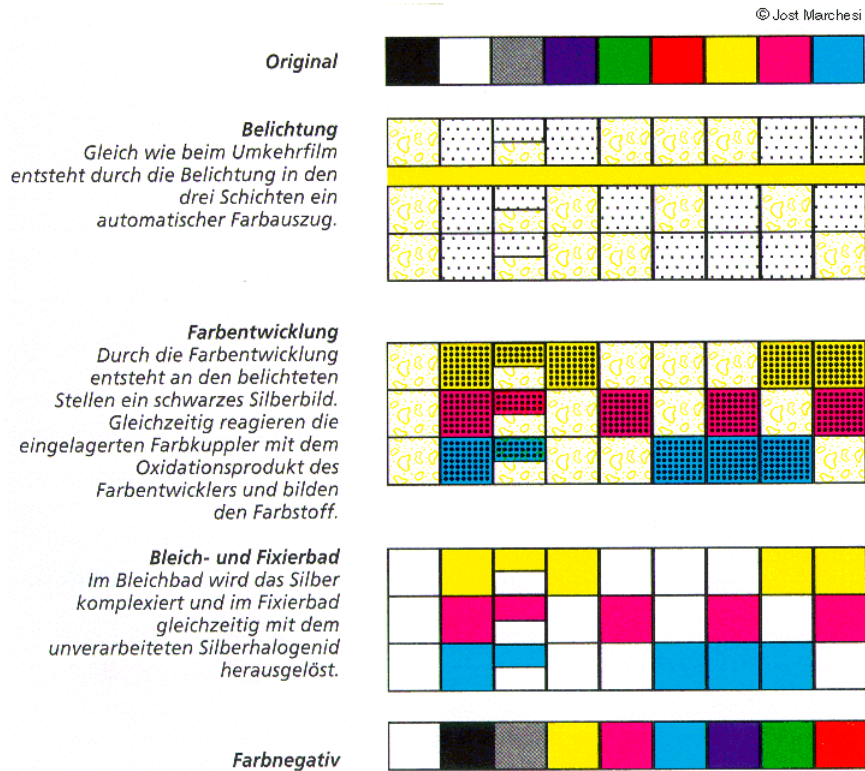


**Farbumkehrfilm:**

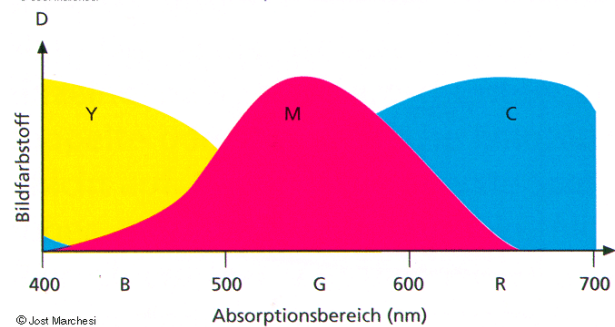
Bei der Belichtung entsteht in den drei Schichten ein Dreifarbenauszug. In einer ersten (Schwarzweiß)entwicklung entsteht ein den jeweiligen Schichten ein **schwarzweißes Negativ**. Eine Zwischenbelichtung mit weißem Licht (oder ein chemischer Prozess) bewirkt die **Umkehrung** der Helligkeitsinformation. Bei der anschließenden Farbentwicklung werden die subtraktiven Bildfarbstoffe gebildet.

### 6.3 Farbnegativtechnik

Heute sind 90% aller weltweit belichteten Aufnahmematerialien **Farbnegativfilme**. Aufgrund der weitgehenden Automatisierung in Großlabors sind die Kosten geringer als bei der Verarbeitung von Schwarzweißfilm. Für eine weltweite Prozess-Kompatibilität sorgt die Verarbeitung in einem unter der Bezeichnung C-41 (100°F – 38°C – 18..20 min) standardisierten Verfahren.



In einem idealen Farbfilm müßte jede Schicht exakt ein Drittel des Spektrums absorbieren.



Reale Farbkuppler erzeugen Farbstoffe mit einer mehr oder weniger stark ausgeprägten **Fehlabsorption**. Der daraus resultierende Farbstich wird durch eine automatische **Maskierung** korrigiert.