

# Folienserie des Fonds der Chemischen Industrie

## 26 Textheft

---

Fotografie

Im Rahmen der vorliegenden Folienserie wird die Fotografie mit der Fülle der sie ermöglichenden Technologien dargestellt; das sind vor allem die chemischen Silberhalogenidverfahren und die physikalisch-elektronischen Verfahren (Stichwort: Digitale Kamera).

Die technische Erklärung der modernen fotografischen Verfahren berührt die schulischen Wissensfächer Chemie, Physik, teilweise auch Mathematik (Informatik) und Biologie (Sehen und Farbempfindung). Darüber hinaus hat die Fotografie als künstlerisches Ausdrucksmittel auch eine Beziehung zum Kunstunterricht. Das Thema „Fotografie“ bietet also eine hervorragende Möglichkeit für einen fächerübergreifenden Unterricht.

Diese Informationsserie „Fotografie“ wird, wie die weiteren Informationsserien des Fonds der Chemischen Industrie, den deutschen Gymnasien sowie den Bildstellen kostenlos zur Verfügung gestellt. Auch für Hochschullehrer und Lehrer an Volkshochschulen ist diese Serie sicherlich an geeigneter Stelle einsetzbar. Das Begleitheft kann auch getrennt (ohne Folien) angefordert werden.

Der Fonds der Chemischen Industrie verfolgt mit seinen Informationsserien das Ziel, sachlich fundierte Informationen zu chemiespezifischen Fragestellungen zusammenzustellen. Dabei wird aufgezeigt, wie die Entdeckung chemischer Vorgänge letztendlich zu Produkten des täglichen Lebens führt. Häufig steht zu Beginn einer Erfindung der Zufall Pate, während im Laufe des industriellen Innovationsprozesses sich nach konsequenter Weiterentwicklung nur die Produkte auf dem Markt halten, die unseren heutigen Anforderungen genügen.

In unseren Gremien arbeiten sowohl Vertreter der chemischen Industrie als auch Hochschullehrer und Lehrer der Chemie mit. Wir hoffen, mit der vorliegenden Informationsserie neben der häufig vorhandenen Begeisterung für die Fotografie auch zusätzlich ein Interesse für deren chemische und physikalische Grundlagen wecken zu können.

Der Herausgeber  
(Mai 1999)

# Inhaltsverzeichnis

1. Geschichtliche Einleitung .....	1
2. Überblick über fotografische Verfahren .....	4
2.1 Analoge und digitale Fotografie .....	4
2.2 Chemische und physikalische Fotografie .....	7
3. Silberfotografie .....	11
3.1 Grundlagen der Silberfotografie .....	11
3.1.1 Fotografischer Elementarprozeß .....	11
3.1.2 Spektrale Sensibilisierung .....	13
3.1.3 Fotografische Entwicklung .....	15
3.1.4 Negativ/Positiv-Verarbeitung .....	18
3.1.5 Umkehrverarbeitung .....	20
3.1.6 Silbersalz-Diffusion .....	20
3.2 Farbfotografie .....	22
3.2.1 Additive Verfahren .....	23
3.2.2 Subtraktive Verfahren .....	24
– Chromogene Verfahren .....	25
– Silberbleich-Verfahren .....	30
– Farbstoff-Diffusion .....	30
3.3 Eigenschaften fotografischer Materialien .....	32
3.3.1 Empfindlichkeit .....	33
3.3.2 Kontrast .....	34
3.3.3 Körnigkeit .....	35
3.3.4 Schärfe .....	36
3.3.5 Farbwiedergabe .....	38
3.3.6 Stabilität .....	39
3.4 Herstellung fotografischer Materialien .....	39
3.4.1 Rohstoff Silber .....	39
3.4.2 Emulsionsherstellung .....	40
3.4.3 Beguß .....	43
3.5 Anwendungsgebiete .....	44
3.5.1 Bildfotografie .....	44
3.5.2 Reprografie .....	46
3.5.3 Röntgenfotografie .....	48
3.6 Versuche zur Silberfotografie .....	49
4. Digitale Fotografie .....	50
4.1 Digitale Bildaufnahme .....	50
4.1.1 Digitale Kamera .....	50
4.1.2 CCD-Bildsensor .....	51
4.1.3 Digitalisierung .....	52
4.1.4 Digitaler Scanner .....	54

4.2	Digitale Bildverarbeitung .....	55
4.3	Digitale Bildwiedergabe .....	57
4.4	Anwendungsgebiete .....	59
5.	Vergleich: Silberfotografie und Digitale Fotografie .....	61
5.1	Vergleich der Sensoren .....	61
5.2	Vergleich der Eigenschaften und Ausblick .....	63
<b>ANHANG</b>		
A.1	Weiterführende Literatur .....	65
A.2	Verzeichnis der Abbildungen .....	66
A.3	Definitionen (im Zusammenhang mit digitaler Fotografie) .....	68
A.4	Stichwortverzeichnis .....	69
	Impressum .....	IV
	Wer ist der Fonds der Chemischen Industrie? .....	71

## Impressum

Herausgeber: Fonds der Chemischen Industrie im Verband der Chemischen Industrie e.V., Karlstraße 21, 60329 Frankfurt/Main, Telefax 069/2556-1620

Erste Auflage 1999

Die vorliegende Folienserie „Fotografie“ enthält 42 Folien – plus drei Demonstrationsfolien – und 23 Kopiervorlagen. Sie stellt eine überarbeitete und erweiterte Version der 1989 herausgegebenen Folienserie „Silberfotografie“ dar. Die Folienserie ist auch auf CD-ROM abrufbar.

Autoren: Team der *Agfa-Gevaert AG*

Alle Rechte vorbehalten.

Graphische Gestaltung:

(Abbildungen Nr 2, 3, 4, 5, 6, 7, 17, 20, 39, 44, 46, 47, 49, 50, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64 und 65) CDS GmbH COMMUNICATION DESIGN STUDIOS • Reuschenberger Mühle • Alte Garten 60-62 • 51371 Leverkusen (Die Bildmotive der Abbildungen 39, 49, 53 und 61 wurden aus der Schriftenreihe „Die digitale Farbe“ der *Agfa-Gevaert N.V.* übernommen. Design: Image Building bvba, Antwerpen)

(Abbildungen Nr. 1, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 40, 41, 42, 43, 45, 48) sowie Textheftgestaltung, Satz, Reproduktion und Herstellung: *diGraph* • Atelier für didaktische Graphik (im „Medienhaus Lahr“) • Galgenbergweg 4 • 77933 Lahr

Druck: OehmsDruck GmbH • Ziegelhüttenweg 32 • 60598 Frankfurt/Main

Foliendruck und -manufaktur: AV-Verlag Kurt Herrlein • Bregenzer Straße 8 • 60386 Frankfurt/Main

ISSN 0174-366 X

Die erste, heute noch erhaltene fotografische Aufnahme wurde 1826/27 von dem Franzosen *J. N. Niépce* hergestellt, der eine durch Licht härtbare Asphaltsschicht ca. 8 Stunden in einer Kamera belichtete und anschließend die unbelichteten Stellen mit Terpentin weglöste.

Als Geburtsstunde der Fotografie gilt aber das Jahr 1839, in dem die Akademie der Wissenschaften

in Paris das Verfahren von *L. J. M. Daguerre* bekannt gab. Es war das erste fotografische Verfahren mit praktikabler Empfindlichkeit. Damit hatte sich ein Traum der Menschheit erfüllt: Das genaue Festhalten einer Szene in einem „mit Licht gemalten Bild“ (Fotografie).

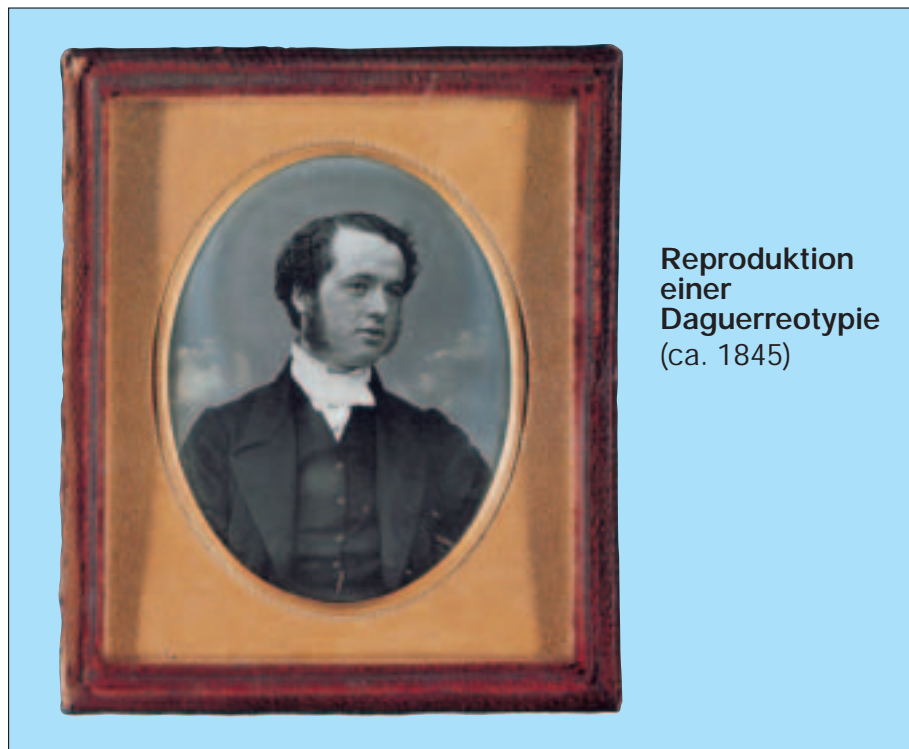


Abbildung 1  
(Folie 1)

Bei der sogenannten „Daguerreotypie“ wurde eine hochglanzpolierte, versilberte Platte mit Ioddämpfen behandelt, wobei sich oberflächlich Silberiodid bildete. Bei der Belichtung entstanden Silberkeime auf dem lichtempfindlichen Silberiodid. Mit Quecksilberdampf konnte das nach der Belichtung noch nicht erkennbare Bild sichtbar gemacht werden. Es bildeten sich feinste, lichtstreuende Silberamalgampartikel. In einem Fixierbad wurden mit einem Lösungsmittel für Silberiodid die nichtbelichteten Stellen der Schicht entfernt. Übrig blieb ein seitenverkehrtes, bei schräger Beleuchtung in den Helligkeitswerten positives Bild aus Silber (dunkle Stellen; versilberte Platte) und Silberamalgam (helle Stellen), das lichtstabil war.

Etwa gleichzeitig entwickelte der Engländer *W. H. F. Talbot* ein Negativ/Positiv-Verfahren. Mit Silber-

iodid getränktes Papier wurde nach der Belichtung mit Gallussäure (3,4,5-Trihydroxybenzoesäure)/Silbernitratlösung entwickelt und mit Natriumchlorid-, später Natriumthiosulfatlösung fixiert. Dieses mit Wachs transparent gemachte Negativ diente dann zur Herstellung positiver Kopien, wobei durch das Negativ auf mit Silberchlorid getränktes Papier belichtet wurde („Kalotypie“).

In den Jahren 1851 - 1880 fand das „Nasse Colloidiumverfahren“ des Engländers *F. S. Archer* in der fotografischen Praxis die weiteste Verbreitung. Auf einer Glasplatte wurde eine Schicht mit Silberiodid oder -bromid in Cellulosenitratlösung erzeugt, im noch nassen Zustand belichtet und mit Pyrogallol (1,2,3-Trihydroxybenzol) oder Eisensulfat entwickelt. Das aufwendige Verfahren erforderte allerdings das Mitführen eines fotografischen Labors in

einem Zelt, da die Platte erst unmittelbar vor Belichtung gegossen wurde. Dazu kam ab 1854 das einfacher zu handhabende „Trockene Collodiumverfahren“ des Franzosen *M. A. Gaudin*, das anfangs jedoch geringere Lichtempfindlichkeit aufwies.

Ein entscheidender Fortschritt wurde 1871 von dem englischen Arzt *R. L. Maddox* eingeleitet, der die Herstellung einer Gelatinetrockenplatte beschrieb. Das Prinzip der Dispersion von Silberhalogenidkristallen in Gelatine ist noch heute das übliche Verfahren der Silberhalogenidfotografie.

In Deutschland wurden seit 1879 Trockenplatten fabrikmäßig hergestellt. Eine bessere Handhabung als Platten erlaubten biegsame Träger: ab 1884 Papierrollfilm (*G. W. Eastman*), 1887 Cellulosenitrat (*H. Goodwin*), ab 1930 nicht brennbarer Celluloseacetatfilm, heute auch die dimensionsstabilere Polyesterunterlage.

Für die Weiterentwicklung der Fotografie war die Entdeckung der spektralen Sensibilisatoren durch den Deutschen *H. W. Vogel* im Jahre 1873 von entscheidender Bedeutung, da unsensibilisierte Silberhalogenide für grünes und rotes Licht nicht empfindlich sind. Erst diese Entdeckung ermöglichte die Erfassung aller Farben in der Schwarzweißfotografie und war Voraussetzung für die Farbfotografie.

Das erste erfolgreiche farbfotografische Verfahren war das additive Kornrasterverfahren (Autochrome Platte von *Lumière* 1907, *Agfa*-Farbrasterplatte 1916, *Agfacolor*-Farbrasterfilm 1932); dieses Verfahren fußte auf Ideen des englischen Physikers *J. C. Maxwell* (additives Verfahren 1855) und des Franzosen *D. du Hauron* (Farbraster 1862). Daneben wurden die ebenfalls additiven Linsenrasterverfahren ausgearbeitet (Linsenrasterfilme für Amateurkinematografie, *Kodak* 1928, *Agfa* 1931).

Fast alle modernen Farbverfahren arbeiten jedoch nach dem subtraktiven Prinzip (Aufbau des Bildes mit gelben, purpurfarbigen und blaugrünen Farbstoffen; *du Hauron* 1868; *C. Cros* 1869).

Farbige Kinofilme auf der Basis von angefärbten Auswaschreliefs wurden ab 1922 hergestellt (*Technicolor*). Die heutigen subtraktiven Farbfilme und -papiere beruhen überwiegend auf dem Prinzip der chromogenen Entwicklung, bei dem die Bildfarbstoffe durch Kupplung von oxidierten Farbentwicklern mit sogenannten Farbkupplern entstehen. 1935 kam der *Kodachrome*-Schmalfilm auf den Markt (Farbkuppler im Bad), 1936 der *Agfacolor*-Diafilm (diffusionsfeste Kuppler im Film), 1942 der *Kodacolor*-Negativfilm (Emulgierung der Kuppler in Öltröpfchen im Film).

Das nach dem Prinzip der bildmäßigen Farbstoffzerstörung arbeitende Silberfarbbleich-Verfahren kam ab 1938 zur praktischen Anwendung (Pantachromverfahren mit Tripofilm, *Agfa*; Gasparcolorverfahren 1942) und ist heute als Cibachrome-Verfahren (*Ciba-Geigy*, ab 1936) noch auf dem Markt.

Um 1940 wurde – unabhängig voneinander – von *A. Rott (Gevaert)* und *E. Weyde (Agfa)* das Silber-salzdifusionsverfahren entwickelt, bei dem während der Entwicklung in Gegenwart von  $Ag^+$ -Komplexbildnern das unbelichtete Silberhalogenid in eine Entwicklungskeime enthaltende Bildempfangsschicht diffundiert und dort ein positives Silberbild ergibt. Später brachte *Polaroid (E. H. Land)* ein darauf beruhendes Schwarzweiß-Sofortbild auf den Markt; *Agfa* und *Gevaert* entwickelten Bürokopiermaterialien und Offsetdruckfolien.

Das farbige Sofortbild basiert auf dem Verfahren der Farbstoffdiffusion. Hierbei werden die Diffusionseigenschaften eingelagerter Farbstoffe durch Belichtung und Entwicklung bildmäßig verändert (*Polacolor* 1963, *Polaroid*).

In der jüngeren Vergangenheit dieser jetzt immerhin 160jährigen Technologiegeschichte ist die Leistungsfähigkeit der chemischen Silberhalogenidverfahren in vielerlei Hinsicht enorm gesteigert worden: Ein tieferes Verständnis der im Silberhalogenid-Kristall bei der Belichtung ablaufenden Prozesse und des Kristallaufbaus hat eine starke Erhöhung der Empfindlichkeit ermöglicht; eine genaue Steuerung der chemischen Reaktionen bei der Entwicklung verbesserte die Bildqualität; maßgeschneiderte Farbstoffmoleküle brachten die hohe Bildstabilität; rationelle Produktionsverfahren haben die Herstellungskosten gesenkt.

Gleichzeitig sind physikalisch-elektronische Verfahren der Bildaufzeichnung erfunden und zur Marktreife entwickelt worden. Folgende technologische Meilensteine sollen diese stürmische Entwicklung charakterisieren:

Die Videoröhre, Aufnahmeelement der TV-Kameras und der älteren Camcorder, wurde 1951 erfunden.

Der in digitalen Kameras als Bildsensor verwendete CCD-Halbleiter-Chip (siehe Kapitel 4.1.2) wurde 1970 zunächst als Speicherchip entwickelt (*Bell Laboratories*); die Anwendung als Lichtdetektor kam erst später. Die erste Stehbildkamera mit einem CCD-Chip als Bildsensor war die analog-registrierende *Mavica* von *Sony* 1981.

Die Elektrofotografie geht auf ein Patent von *Ch. F. Carlson* aus dem Jahr 1939 zurück. Der erste Kopierer auf elektrofotografischer Basis (*Xerox*) kam 1949 auf den Markt.

Das „Inkjet“-Verfahren hat eine lange Geschichte, die bis zu *Lord Kelvin* 1867 zurückreicht. Die beiden Väter der modernen Verfahren sind *Sweet* („continuous inkjet“; 1964) und *Zoltan* („drop-on-demand“; 1972).

Gegenwärtig erleben wir einen technologischen Wettstreit der chemischen und physikalischen Verfahren in all den vielfältigen Anwendungsbereichen. Die fotografischen Verfahren dienen nicht nur zur raschen Verbreitung aktueller Informationen; in Forschung, Technik, Dokumentation und medizinischer Diagnostik ist die Fotografie unersetzliches Hilfsmittel.

Die Fotografie versetzt uns auch in die Lage, die Grenzen unserer Sinneswahrnehmung zu überschreiten, zum Beispiel bei sehr schnellen Vorgän-

gen (Zeitlupe) oder bei sehr langsamen Ereignissen (Zeitraffer). Ferner kann die fotografische Schicht das einfallende Licht summieren, so daß damit noch Helligkeiten registriert werden können, auf die das Auge nicht mehr anspricht – eine wichtige Eigenschaft zum Beispiel für die Anwendung in der Astronomie.

Die breiteste Anwendung hat die Fotografie im privaten Bereich gefunden. Aus der in den Anfängen nur Spezialisten zugänglichen Kunst ist ein für jeden verfügbares Mittel zur „Speicherung“ persönlicher Erinnerungen an Reisen oder bei besonderen Anlässen geworden.

Die Vielzahl der heute insgesamt existierenden Verfahren läßt sich unter dem Gesichtspunkt des Aufzeichnungsmodus einerseits (analog oder digital) und dem der stofflichen Veränderung bei der

Bildaufzeichnung andererseits (chemisch: mit stofflicher Veränderung; physikalisch: ohne stoffliche Veränderung) in das Schema der **Abbildung 2** einordnen.

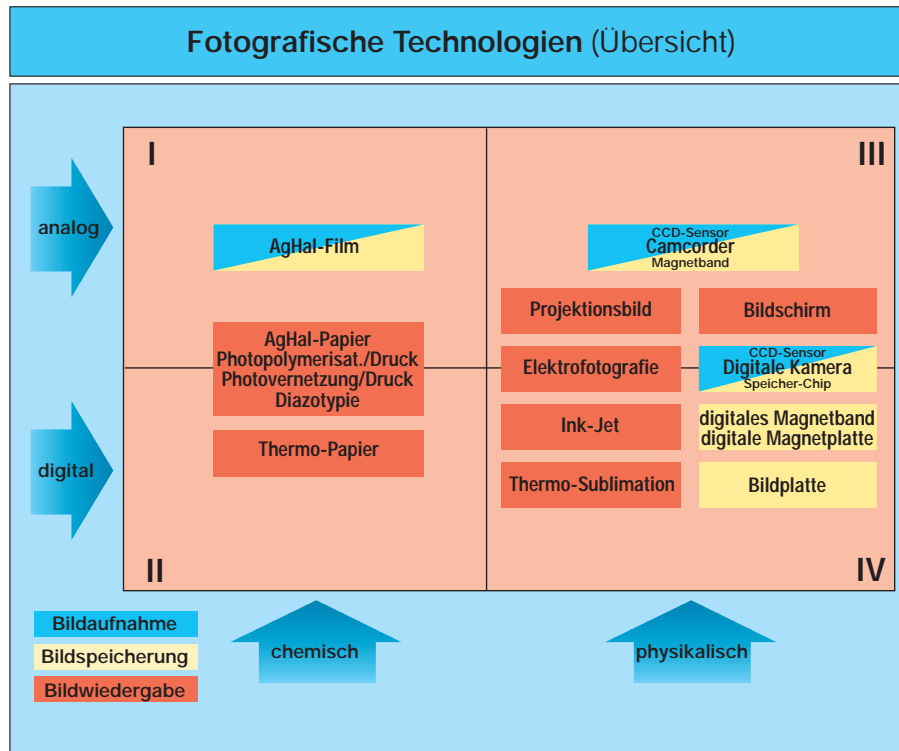


Abbildung 2  
(Folie 2)

Der klassische Silberhalogenidfilm ist in diesem Schema im Quadranten I, die digitale Kamera zwischen den Quadranten III (der Bildsensor arbeitet analog) und IV (die Bildspeicherung erfolgt digital) einzuordnen.

gien gegeben werden, die überhaupt im Bereich der Bildaufzeichnung und Bildwiedergabe eine größere Rolle spielen. In den nachfolgenden Kapiteln werden dann die Silberfotografie (Kapitel 3) und die digitale Fotografie (Kapitel 4) eingehender behandelt.

In diesem Kapitel sollen zunächst die Begriffe erläutert und ein kurzer Überblick über die Technolo-

## Analoge und digitale Fotografie

## 2.1

Die beiden Arten der Signalregistrierung – analog oder digital (siehe **Abbildung 3** auf nächster Seite) – sind uns von der Zeitmessung her wohl vertraut. Auf einer analogen Uhr wird die Zeit über die Position der Zeiger auf einer kontinuierlichen Skala angegeben; eine digitale Uhr zeigt die Zeit mit Zahlen in diskreten Werten an.

Dichten registriert; diese Aufzeichnung ist quasi-kontinuierlich hinsichtlich Ort und Dichte.<sup>1</sup>

Die digitale Aufzeichnung eines Bildes besteht aus einem Satz von Daten, die die Ortskoordinaten der

Bei der Bildaufzeichnung mit einem Silberhalogenidfilm werden die Bildsignale analog als optische

<sup>1</sup> Die Silberhalogenid-Kristalle im Film stellen letztlich auch diskrete Sensorelemente dar, die allerdings viel kleiner sind als die Sensorelemente des CCD-Chips in der digitalen Kamera. Vergleichsweise hat der Film also eine kontinuierliche Struktur.

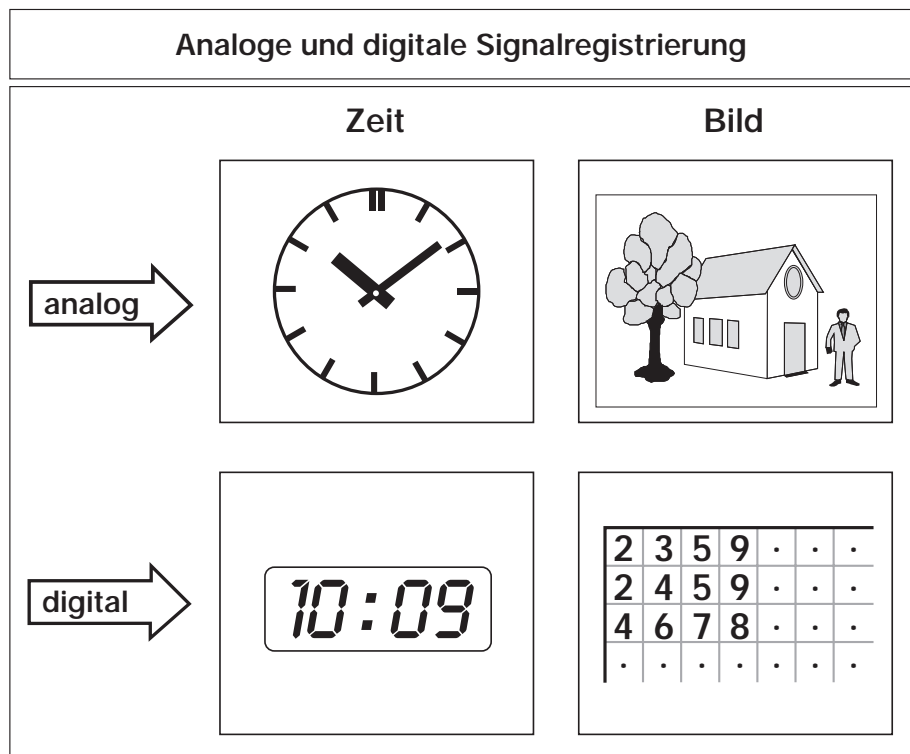


Abbildung 3  
(Kopiervorlage 1)

diskreten Bildpunkte (Pixel) und die zugehörigen diskreten Dichtestufen (Graustufen im Falle eines S/W-Bildes) kennzeichnen. Die Digitalisierung eines Bildes bezieht sich also sowohl auf die Ortsinformation als auch auf die Helligkeitsinformation. Diese digitale Aufzeichnung ist nicht visuell als Bild wahrnehmbar.

Die Bildaufzeichnung kann als eine Informationsübertragung vom Original über verschiedene Zwischenstufen zum Auge verstanden werden. Diese Bildaufzeichnungskette ist in **Abbildung 4** dargestellt mit den Verknüpfungen zwischen den analogen und digitalen Teilketten.

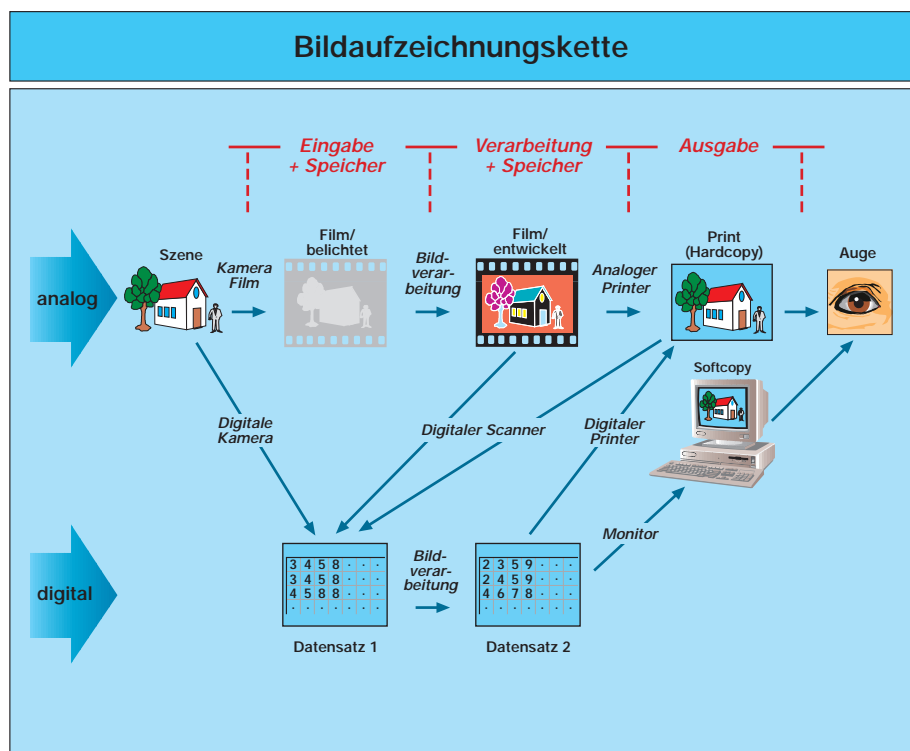


Abbildung 4  
(Folie 3)

Ausgangs- und Endpunkt der Bildaufzeichnungskette sind analoge Elemente: Die originale Szene einerseits und das visuelle System des Menschen andererseits.

In der analogen Bildaufzeichnungskette bestehen die Kettenglieder aus dem unentwickelten Film mit dem latenten Bild, dem entwickelten Film und dem Ausgabemedium Aufsichtsbild (Print) oder Projektionsbild. Die fotografische Entwicklung des Films macht das Bild nicht nur sichtbar, sondern gleichzeitig wird dabei auf chemischem Wege die Bildqualität verbessert (siehe z. B. Seite 29 zur Funktionsweise der sogenannten DIR-Kuppler), so daß mit diesem Schritt auch eine (chemische) Bildverarbeitung verbunden ist.

Mit einer digitalen Kamera oder mit einem digitalen Scanner kann eine Szene bzw. ein bereits vorliegendes Bild in digitaler Form aufgezeichnet wer-

den (siehe Kapitel 4). Diese Aufzeichnung kann noch einer digitalen Bildverarbeitung unterworfen werden; zur Visualisierung bedarf es einer Rücktransformation in den analogen Modus, sei es mit einem digitalen Printer zum Print oder mit einem Monitor zum Bildschirmbild.

Digitale Techniken zeichnen Bilder also Pixel für Pixel auf. Das digitale Bild – hier als Wiedergabe eines digitalen Bildregisters definiert – ist deshalb immer gerastert aufgebaut (umgekehrt sind nicht alle gerasterten, d. h. aus Punkten aufgebauten Bilder Ausdrücke digital gespeicherter Bildinformationen; dies sei belegt mit dem Hinweis auf die Verwendung der Rasterung beim analogen Druck, siehe Seite 47).

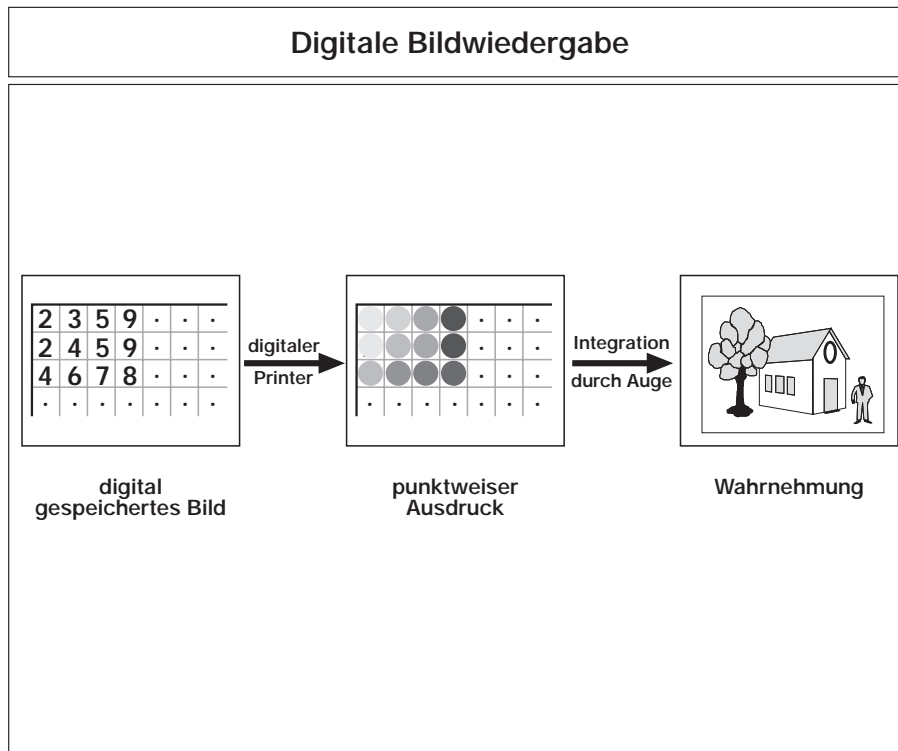


Abbildung 5  
(Kopiervorlage 2)

Belichtende Bildwiedergabesysteme wie silberfotografische Printer oder elektrofotografische Kopierer eignen sich sowohl für die Ausgabe analoger Bilder (integrale Belichtung) als auch für die von digitalen Bildern (punktweise Belichtung z. B. durch einen Laser, der von einem digitalen Bildspeicher gesteuert wird).

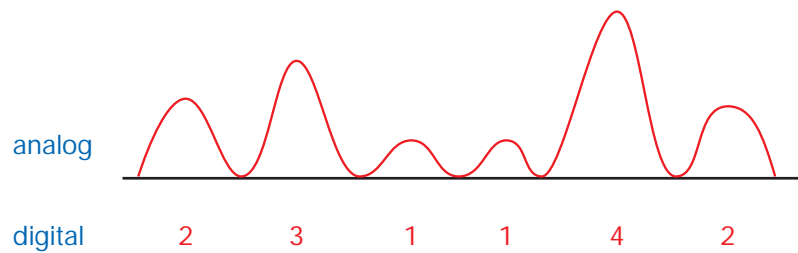
In Abbildung 2 sind diese Wiedergabeverfahren deshalb auf die Grenze zwischen analogen und digitalen Verfahren gesetzt.

Der besondere Vorteil der Digitalisierung eines Bildes (wie jeder anderen Information) liegt ganz allgemein darin, daß die digitalisierte Bildinformation der elektronischen Bildbearbeitung, der Übertragung und der Einbindung in die multimedialen Techniken zugänglich ist – und zwar dies alles praktisch ohne Qualitätsverlust.

Welche Vorteile die Digitalisierung bei der Übertragung von Signalen hat, kann anhand des nachfolgend dargestellten Versuchs aufgezeigt werden.

Den Vorteil einer Digitalisierung bei der Signalübertragung zeigt folgendes Experiment:

- (1) Es wird ein Signal auf analoge und digitale Weise dargestellt.



- (2) In einer Gruppe von 6 Personen wird die analoge Aufzeichnung 6 x aufeinanderfolgend (ohne Hilfsmittel) abgezeichnet (d. h. es entsteht eine Kopie der 6. Generation). Eine weitere Gruppe von 6 Personen kopiert in gleicher Weise 6 x aufeinanderfolgend die Zahlenfolge.
- (3) Das Ergebnis wird zeigen, daß bei der analogen Signalübertragung Ausgangs- und Endsignal deutlich verschieden sind, während die Übertragung der digitalen Daten ohne Informationsverlust verläuft.

Versuch 1

## Chemische und physikalische Fotografie

## 2.2

Bei **chemischen fotografischen Verfahren** ist mit der Bildaufzeichnung eine photochemische Reaktion verbunden; dies macht den Sensor gleichzeitig zum Speicher und verbraucht das Material.<sup>2</sup>

Das prominenteste Beispiel für die chemische Fotografie ist die Silberfotografie mit Silberhalogeniden als Sensor. Bei Lichteinwirkung auf Silberhalogenide werden Keime aus elementarem Silber an der Oberfläche der Silberhalogenidkristalle gebildet, die als Katalysator die nachfolgende fotografische Entwicklung steuern. Das Ergebnis ist ein enormer Verstärkungsfaktor in bezug auf die primäre Lichtreaktion. (Eine ausführliche Beschreibung der Silberfotografie enthält Kapitel 3).

**Abbildung 6** (siehe Seite 9) zeigt die unterschiedliche Empfindlichkeit bildaufzeichnender Systeme. Die hohe Empfindlichkeit der Silberfotografie wird von keinem anderen chemischen System erreicht. Für die Bildaufnahme werden deshalb ausschließ-

lich Filme auf Silberhalogenidbasis eingesetzt, während im Bereich der Bildwiedergabe und für grafisch/reprografische Spezialanwendungen (wie Druckplatten und Photoresiste) auch chemische Nichtsilber-Verfahren eine große Bedeutung erlangt haben (siehe Übersicht auf Seite 8).

Bei **physikalischen fotografischen Verfahren** ist keine chemische Reaktion mit der Bildaufzeichnung verbunden. Die digitalen, physikalischen Verfahren werden ausführlich in Kapitel 4 behandelt. Zu den analog arbeitenden, physikalischen Bildaufzeichnungsverfahren gehören die Videoaufnahme und die Elektrofotografie.

Die in TV-Kameras früher verwendeten *Videoaufnahmeröhren* (z. B. vom Typ *Vidicon*) bestehen aus einer Kathodenstrahlröhre, deren Frontglas mit einer transparenten Elektrodenschicht und zusätzlich mit einer lichtempfindlichen Schicht versehen ist. Bei der Belichtung werden in dieser Schicht (Photo-)Elektronen erzeugt und für kurze Zeit gespeichert; beim Auftreffen des in der Röhre scannenden Elektronenstrahls fließt infolge der Anwesenheit der Photoelektronen ein kurzer Strom in die Elektrodenschicht, dessen Größe der Belichtung proportional ist.

<sup>2</sup> Anmerkung zur Schreibweise: Es hat sich die Schreibweise „Fotografie“ (statt Photographie) durchgesetzt. Entsprechend werden hier alle von „Fotografie“ abgeleiteten Wörter geschrieben (also: Fotoapparat, Elektrofotografie usw.). Für andere technisch-wissenschaftliche Begriffe, die eine Wechselwirkung mit Licht kennzeichnen, gilt weiterhin die ursprüngliche Schreibweise „Photo“ (also: Photochemie, Photopolymere, Photoeffekt, Photohalbleiter usw.).

## Chemische fotografische Verfahren auf Nichtsilber-Basis

Verfahren	photochemische Reaktion	Entwicklung	Anwendung
(1) Photovernetzung	<p>Photochemische Dimerisierung langkettiger Moleküle, z. B. von Polyvinylcinnamaten (Derivate der Zimtsäure <math>\text{Ph}-\text{CH}=\text{CH}-\text{COOH}</math>)</p> <div style="text-align: center;"> </div>	Weglösen der unbelichteten Teile mit einer Mischung aus Butylacetat/Ethylacetat	Photoresiste (neg.) Druckplatten (neg.)

**Photoresiste** sind lichtempfindliche Polymere, mit denen auf fotografischem Wege Masken erzeugt werden. Diese auf Halbleiter aufgetragenen Masken steuern Ätz- oder Diffusionsprozesse bei der Herstellung von integrierten Schaltungen („Chips“). (Photopolymer-)Druckplatten enthalten in oberster Schicht lichtempfindliche Polymere; durch bild- bzw. textentsprechende Belichtung und Weglösen der unbelichteten Anteile wird die Druckform erhalten.

(2) Photoinitierte Polymerisation (Photopolymerisation)	<p>Photochemische Bildung eines Startermoleküls (z. B. angeregtes Phenylacridin), das eine vernetzende radikalische Polymerisation initiiert</p> <div style="text-align: center;"> </div>	Weglösen der unbelichteten Teile in wässriger Alkalilösung	Photoresiste (neg.) Druckplatten (neg.)
(3) Photolyse: Naphthochinondiazide	<p>Abspaltung von Stickstoff unter Lichteinwirkung (UV); Umlagerung des primären Ketens unter Addition von Wasser</p> <div style="text-align: center;"> </div>	Weglösen der belichteten Stellen mit wässrigem $\text{Na}_2\text{SiO}_3$	Photoresiste (pos.) Druckplatten (pos.)
(4) Photolyse: Niedermolekulare Diazoniumsalze (Diazotypie)	<p>Zersetzung eines Diazoniumsalzes unter Lichteinwirkung (UV) zu Aminophenol</p> <div style="text-align: center;"> </div>	Einwirkung von Ammoniak-Gas startet die Kupplungsreaktion: Das unzersetzte Diazoniumsalz reagiert mit eingelagerten Kupplern im alkalischen Milieu zu farbigen Azofarbstoffen	Technische Zeichnungen „Blaupausen“; (pos.)
(5) Photolyse: Langkettige Diazoniumsalze	<p>Photochemische Zersetzung eines Diazoniumsalzes; Reaktion der gebildeten Phenylkationen mit nucleophilen Gruppen des Bindemittels (z. B. OH-Gruppen aus Polyvinylalkohol-Copolymerisaten) zu einem Netzwerk</p> <div style="text-align: center;"> </div>	Weglösen der unbelichteten Stellen mit Alkali (oder Wasser)	Photoresiste (neg.) Druckplatten (neg.)
(6) Photolyse: Vesicularprozeß (Bläschen-Verfahren)	<p>Photochemische Erzeugung von kleinen Gasbläschen, die stark lichtstreuend wirken und deshalb in Durchsicht dunkel erscheinen; Verwendung von Diazoniumsalzen (s. o.) in geschlossener Matrix (z. B. Polyvinylidenchlorid), die das photolytisch gebildete <math>\text{N}_2</math> nicht entweichen läßt</p>	Erwärmung; dabei Ausscheidung von $\text{N}_2$ in Form mikroskopisch feiner Gasbläschen	Kopierfilm für Mikrofilme (neg.)

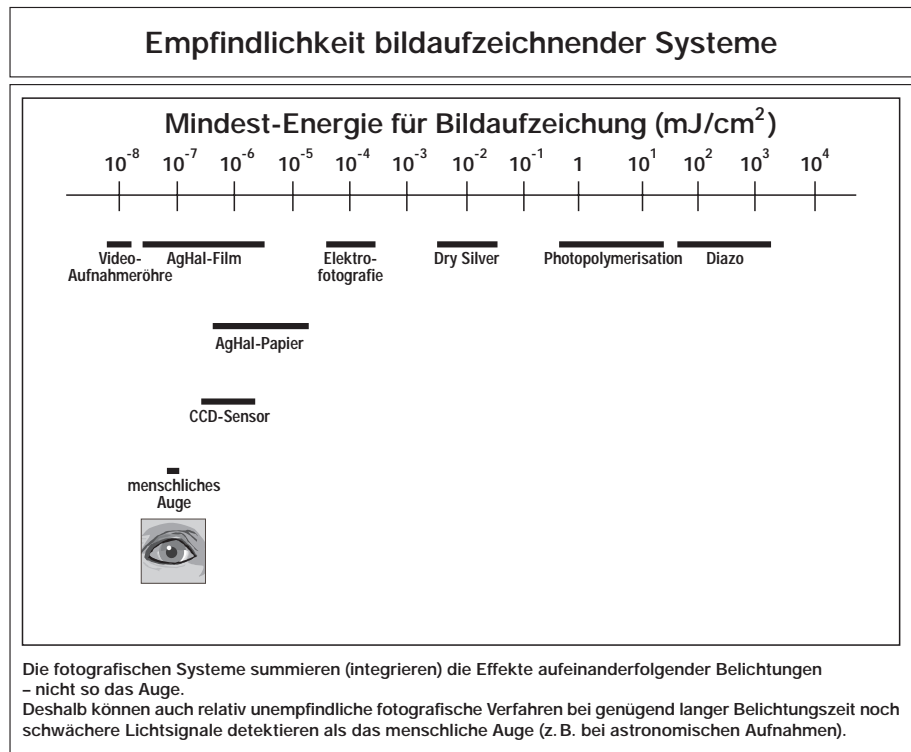


Abbildung 6  
(Kopiervorlage 3)

Die **Elektrofotografie** hat in den Bürokopierern eine breite Anwendung gefunden, deren Wirkungsweise im folgenden an einem Beispiel erklärt wird.

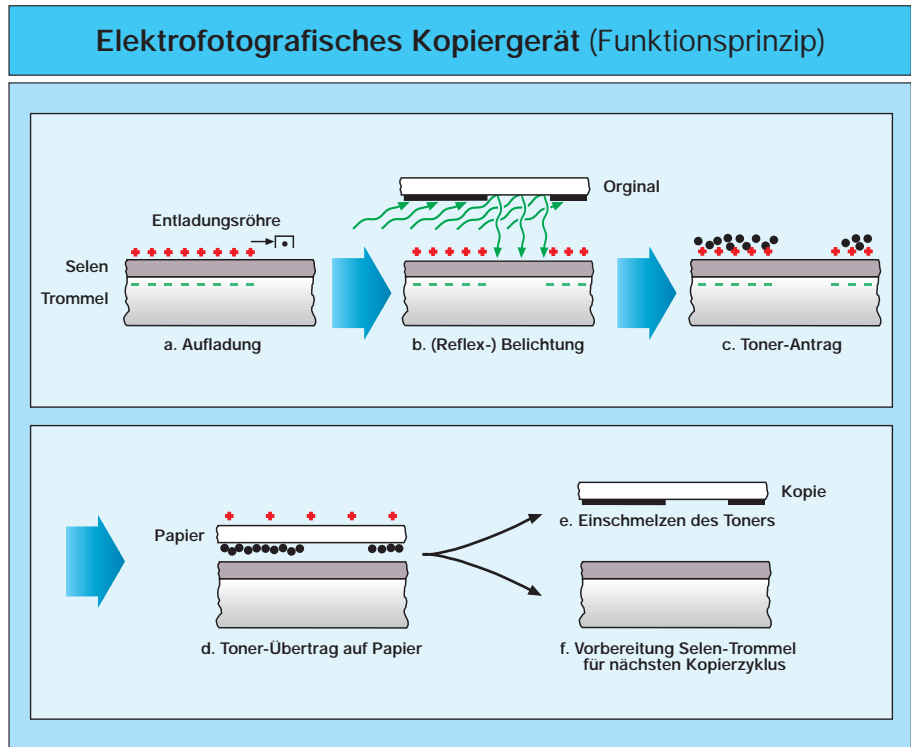


Abbildung 7  
(Folie 4)

(a) Als lichtempfindlicher Sensor fungiert ein Photohalbleiter; dies ist im allgemeinen eine dünne Selen-schicht, die auf eine Trommel aufgedampft ist.

Der Photohalbleiter wird elektrostatisch oberflächlich aufgeladen; auf der Unterseite werden Gegenladungen induziert.

(b) Bei Belichtung wird der Photohalbleiter elektrisch leitend, so daß an den belichteten Stellen die elektrostatische Ladung durch Rekombination der entgegengesetzt geladenen Ladungsträger verschwindet. In den typischen Bürokopierern erfolgt die Belichtung integral, d. h. gleichzeitig über die gesamte belichtete Fläche. (Bei punktweiser Belichtung, z. B. mit einem Laser, können auch digital gespeicherte Bilder oder Texte ausgedruckt werden; siehe Kapitel 4.3).

(c) Das Lichtmuster des Originals ist auf der Selen-Trommel in ein Ladungsmuster umgewandelt. Dieses „latente Bild“ wird sichtbar gemacht (entwickelt), indem geeignet geladene, gefärbte Teilchen (Toner) in Kontakt mit der Trommel gebracht werden, wobei die Tonerteilchen sich infolge der elektrostatischen Anziehung auf den noch geladenen Flächen absetzen.

(d) Dieses Tonerbild wird von der Trommel auf ein Papier übertragen und

(e) dort wischfest eingeschmolzen.

(f) Die Trommel steht nach Säuberung der Oberfläche für den nächsten Kopierzyklus wieder zur Verfügung.

Ein elektrofotografischer Farbkopierer funktioniert nach dem gleichen Prinzip. Hierbei werden die drei farbigen Teilbilder (gelb, purpur, blaugrün) nacheinander mit farbigen Tonerteilchen aufgebracht.

## Grundlagen der Silberfotografie

3.1

Als Lichtdetektoren fungieren winzige Silberhalogenid-Kristalle, die in Gelatine eingebettet sind. Bei Belichtung entstehen auf den lichtempfindlichen Kristallen für das Auge zunächst unsichtbare

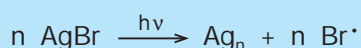
Keime von metallischem Silber. Dieses latente (verborgene) Bild wird bei der fotografischen Entwicklung verstärkt und auf diese Weise sichtbar.

### Fotografischer Elementarprozeß

3.1.1

Die Silberhalogenide kristallisieren im kubischen Steinsalzgitter. Die Bindung in den Silberhalogeniden hat aber geringeren Ionencharakter als im Steinsalz oder in anderen Alkalihalogeniden. Dies zeigt sich unter anderem darin, daß ein Teil der Silberionen seinen Gitterplatz verläßt und über Zwischengitterplätze durch den Kristall wandern kann (Zwischengitter-Silberionen  $\text{Ag}_i^+$ ); die Silberhalogenid-Kristalle sind silberionenleitend.

Als fotografischer Elementarprozeß wird der Vorgang bezeichnet, bei dem durch Lichteinwirkung auf einem Silberhalogenidkristall ein Latentbildkeim  $\text{Ag}_n$ , das heißt ein aus wenigen Silberatomen bestehender Cluster, gebildet wird. Die Bruttogleichung für diese Reaktion ist



Die Mindestgröße eines Silberclusters, der genügend stabil ist für eine längere Lagerzeit, und der genügend groß ist, um die Entwicklung zu katalysieren, wird aufgrund vieler experimenteller Ergebnisse mit  $\text{Ag}_4$  angegeben. Der erste Schritt zur Entstehung eines Latentbildkeimes ist die Absorption eines Photons mit der Energie  $h\nu$  durch den Silberhalogenidkristall; von einem  $\text{Br}^-$ -Ion des Kristallgitters wird dabei ein Elektron abgelöst, das sich frei im Kristall bewegen kann (Photoelektron).

Die nach Ablösung des Elektrons vom Bromidion verbleibende Elektronen-Leerstelle wird als Defektelektron  $d^+$  bezeichnet. Dies entspricht chemisch einem Bromradikal  $\text{Br}^\bullet$ .

Auch die Defektelektronen sind im Kristall beweglich (allerdings deutlich weniger als die Photoelektronen), indem ein gebundenes Elektron eines anderen  $\text{Br}^-$ -Ions in diese Leerstelle springt; dabei ist dann die Leerstelle, das Defektelektron, entgegengesetzt gewandert (siehe **Abbildung 8** auf nächster Seite).

Der Weg zum Latentbildkeim  $\text{Ag}_n$  ( $n \geq 4$ ) führt nicht über ein isoliertes Ag-Atom, das durch Assoziation von Photoelektron und Zwischengitter-Silberion entstehen kann, weil dieses sehr schnell in Umkehrung der Bildungsreaktion wieder zerfällt. Nur wenn diese Assoziation an existenten Reifkeimen, z. B.  $\text{Ag}_2$ -Teilchen stattfindet, können größere Cluster aufgebaut werden. (Reifkeime werden durch chemische Reifung erzeugt; die Teilchen sind stabil, aber nicht katalytisch wirksam; siehe „Oberflächenbehandlung“ auf Seite 42). Es entsteht zunächst ein  $\text{Ag}_3$ -Teilchen. Dieses Teilchen lagert sofort ein weiteres Silberion zum  $\text{Ag}_4^+$  an. Als geladene Spezies zieht das  $\text{Ag}_4^+$  dann ein weiteres Photoelektron an, wird so neutralisiert und kann sich durch die Adsorption eines weiteren  $\text{Ag}_i^+$  zu dem größeren Teilchen  $\text{Ag}_5^+$  entwickeln. Dieser Prozeß geht weiter, bis alle bei der Belichtung entstandenen Photoelektronen verbraucht sind.

Es treten allerdings auch eine Reihe von Verlustprozessen auf, die die fotografische Empfindlichkeit vermindern. So können in Umkehrung des Erzeugungsprozesses die Defektelektronen mit den Photoelektronen rekombinieren, oder die Defektelektronen können bereits gebildete Latentbildkeime angreifen und abbauen (Regression).

Eine wichtige Rolle zur Vermeidung der unerwünschten Reaktionen der Defektelektronen spielt die Gelatine, welche die Silberhalogenid-Kristalle umgibt. Die Gelatine kann mit einem an die Kristalloberfläche diffundierenden Defektelektron  $d^+$  ( $\text{Br}^\bullet$ ) reagieren und es auf diese Weise unschädlich machen (siehe **Abbildung 9** auf nächster Seite).

Die fotografische Empfindlichkeit ist auch abhängig von Lage und Größe der Latentbildkeime  $\text{Ag}_n$ . Wenn die Latentbildkeime im Inneren der Kristalle entstanden sind, können sie mit herkömmlichen Entwicklern nicht entwickelt werden.

Mehrere kleine Latentbildkeime auf einem Kristall (disperses Latentbild, z. B. durch Blitzbelichtung

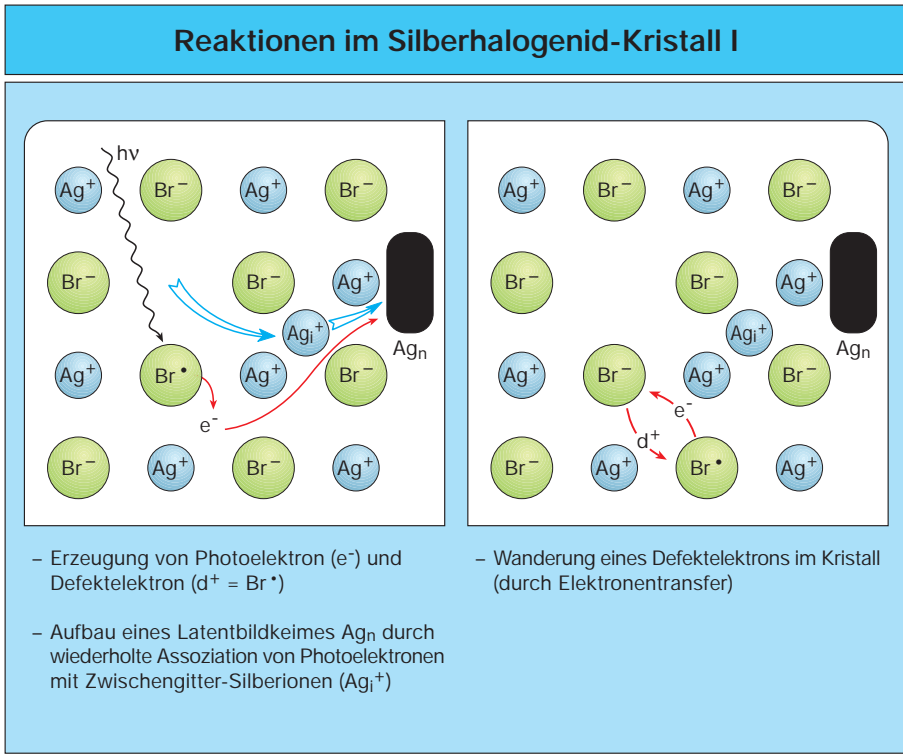


Abbildung 8  
(Folie 5)

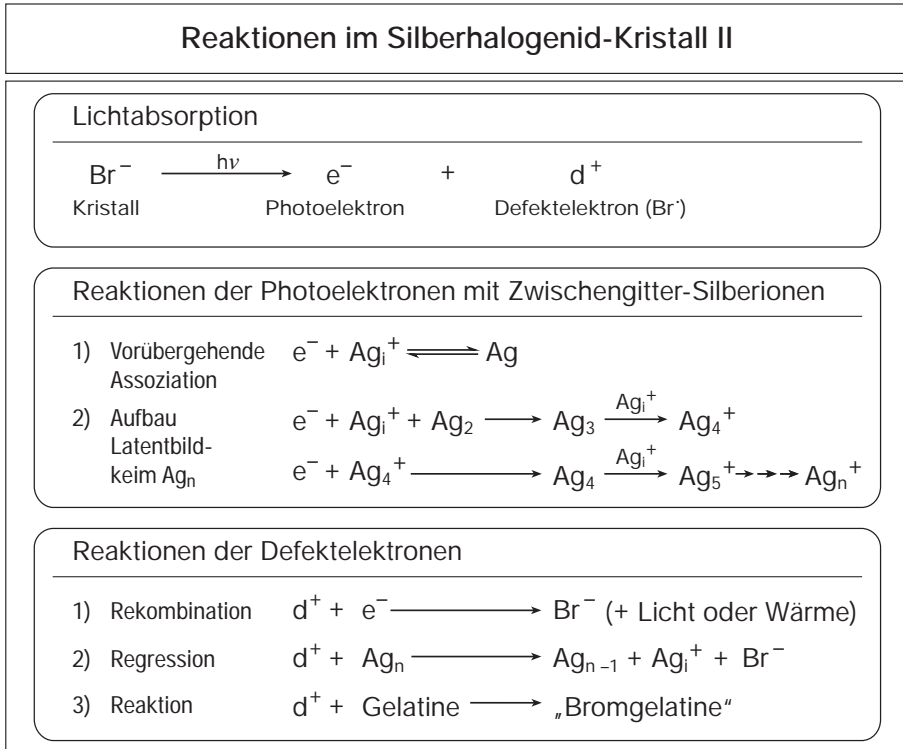


Abbildung 9  
(Kopiervorlage 4)

entstanden) sind schwerer entwickelbar als etwa ein großer Keim. Um diesen möglichen Nachteilen zu begegnen, wird die Kristalloberfläche chemisch in geeigneter Weise behandelt („chemisch gereift“, siehe Seite 42), so daß sich die infolge einer Belichtung bildenden Ag-Atome möglichst nur in

einem einzigen Keim an der Oberfläche konzentrieren.

Dennoch treten in extremen Belichtungssituationen die empfindlichkeitsmindernden Verlustprozesse deutlich in Erscheinung.

Die Belichtung  $H$  ist definiert als Produkt aus Beleuchtungsstärke  $E$  (lux) und Belichtungszeit  $t$  (s).

$$H = E \cdot t \quad (\text{lux} \cdot \text{s})$$

Wegen der genannten Verlustprozesse ist die fotografische Wirkung einer Belichtung nicht nur von der Stärke der Belichtung  $H$  abhängig, sondern bei extremen Belichtungszeiten auch davon, wie sich  $H$  aus den Einzelfaktoren  $E$  und  $t$  zusammensetzt.

Bei extremen Belichtungsbedingungen vermindert sich die fotografische Wirkung einer Belichtung  $H$ , d. h. es ist eine längere Belichtung nötig, um eine

bestimmte optische Dichte zu erzeugen, als unter optimalen Belichtungsbedingungen. Das ist gleichbedeutend mit einer Empfindlichkeitsabnahme des Materials (**Reziprozitätsfehler**; **Schwarzschild-effekt**).

Die Empfindlichkeitsabnahme bei langer Belichtungszeit mit niedriger Lichtintensität (Situation bei astronomischen Aufnahmen) ist bedingt durch vermehrte Rekombination der Photoelektronen mit Defektelektronen (Niedrigintensitäts-Reziprozitätsfehler); der Empfindlichkeitsrückgang bei kurzer Belichtungszeit mit hoher Lichtintensität (Blitz-Situation) ist dagegen auf das Entstehen eines dispersen Latentbildes zurückzuführen (Hochintensitäts-Reziprozitätsfehler).

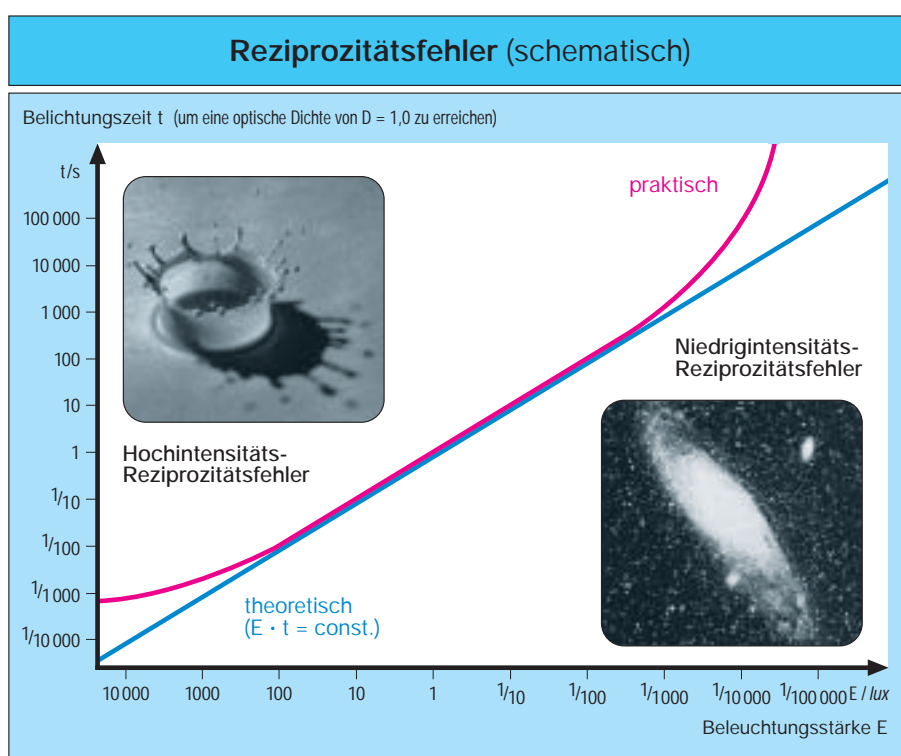


Abbildung 10  
(Folie 6)

## Spektrale Sensibilisierung

### 3.1.2

Silberhalogenide besitzen Halbleitereigenschaften. Daher können die energetischen Verhältnisse bei der Absorption von Licht durch den Silberhalogenidkristall im Bändermodell erläutert werden, das auch in der Halbleitertheorie zur Erklärung der Photoleitfähigkeit benutzt wird.

Als Band wird der breite Energiebereich für eine Gesamtheit von Elektronen bezeichnet, der durch Entartung aus den vielen gleichen atomaren Einzelniveaus in einem Kristall entsteht.

Der Abstand  $E_{\text{AgBr}}$  (das ist der Abstand zwischen dem vollständig mit Elektronen besetzten Valenzband und dem unbesetzten Leitungsband) beträgt bei AgBr  $240 \text{ kJ/mol} \triangleq 2,6 \text{ eV}$ . Der Kristall kann nur Licht mit einer Energie absorbieren, die größer ist als dieser Bandabstand (d. h. mit Wellenlängen  $< 480 \text{ nm}$ ), wobei dann Elektronen in das Leitungsband gehoben werden (Photoelektronen).

Im Leitungsband sind die Photoelektronen frei beweglich; sie können mit Defektelektronen  $d^+$  unter Energieabgabe rekombinieren oder an die Oberfläche diffundieren und mit  $Ag_2/Ag_i^+$  einen Latentbildkeim aufbauen (siehe **Abbildung 11**).

Die Silberhalogenide absorbieren also nur im ultravioletten bis blauen Spektralbereich (dies kommt auch in der Eigenfarbe zum Ausdruck: AgCl weiß,

AgBr blaßgelb, AgI gelb) und sind deshalb auch nur für dieses Licht empfindlich (siehe **Abbildung 12**). Erst mit geeigneten Farbstoffen – spektralen Sensibilisatoren – können die Silberhalogenide auch für (energieärmeres, da längerwelliges) grünes und rotes Licht empfindlich gemacht werden, eine Voraussetzung für die Schwarzweiß-Wiedergabe aller Farben (panchromatische Schwarzweiß-Filme) und natürlich für die Farbfotografie.

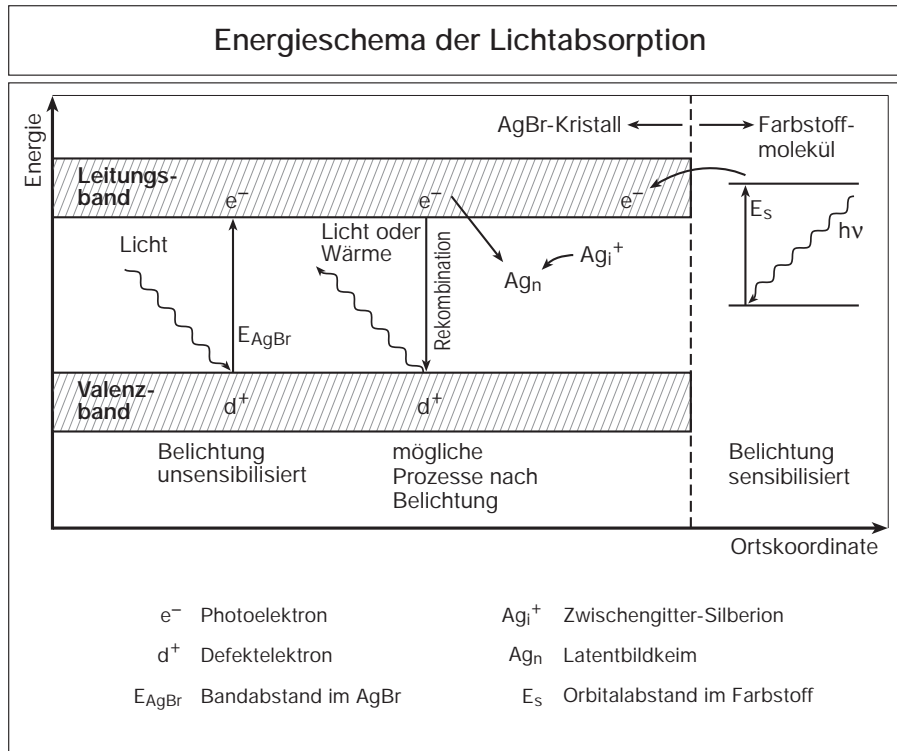


Abbildung 11  
(Kopiervorlage 5)

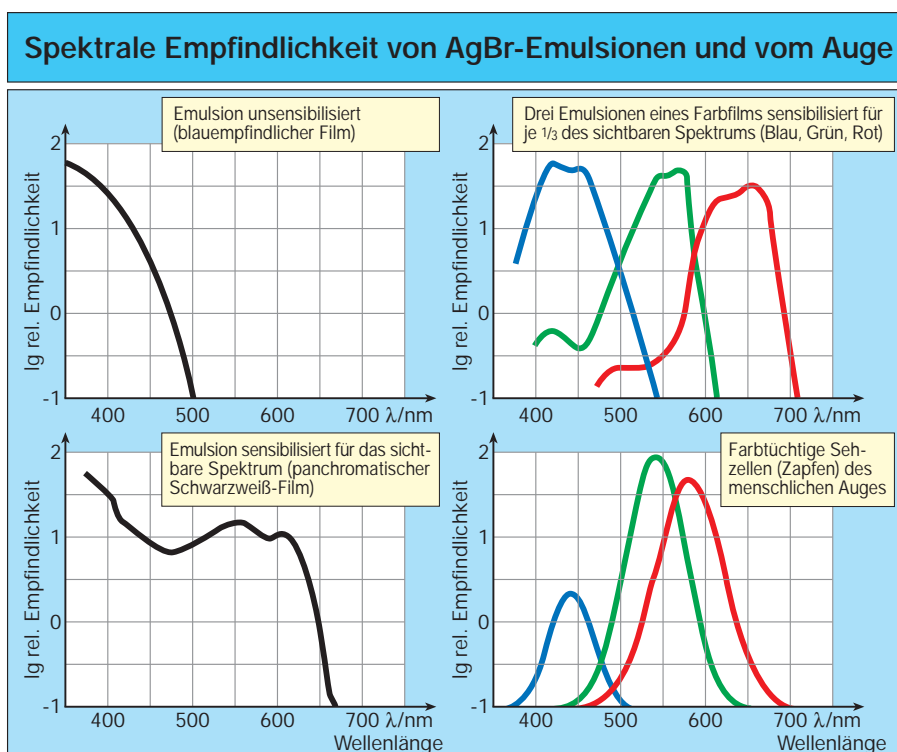


Abbildung 12  
(Folie 7)

Die Sensibilisatoren sind auf der Kristalloberfläche adsorbiert. Bevorzugt werden Farbstoffe eingesetzt, die absorptionsintensive Molekülaggregate bilden.

Die Wirkungsweise der Sensibilisatoren kann im Energieschema der Abbildung 11 erklärt werden. Die Energieniveaus der Elektronen im Farbstoffmolekül, die Orbitale, sind – im Gegensatz zu den breiten Bändern des Kristalls – energetisch scharf definiert. Bei Lichtabsorption wird das Sensibilisatormolekül angeregt, d. h. ein Elektron wird vom höchsten besetzten Orbital zum niedrigsten un-

besetzten Orbital angehoben. Wenn dieses Niveau über der Unterkante des Leitungsbandes des Kristalls liegt, kann ein Elektron vom Sensibilisator in das Leitungsband des Silberhalogenids übertreten und sich in diesem Leitungsband ebenso frei bewegen und einen Latentbildkeim aufbauen wie ein im Kristall erzeugtes Photoelektron. Die Tatsache, daß die Anregungsenergie für den Farbstoff ( $E_s$ ) kleiner ist als für das reine Silberhalogenid ( $E_{AgBr}$ ), bedeutet, daß auch Licht entsprechender geringerer Energie, also auch grünes und rotes Licht, fotografisch wirksam werden kann.

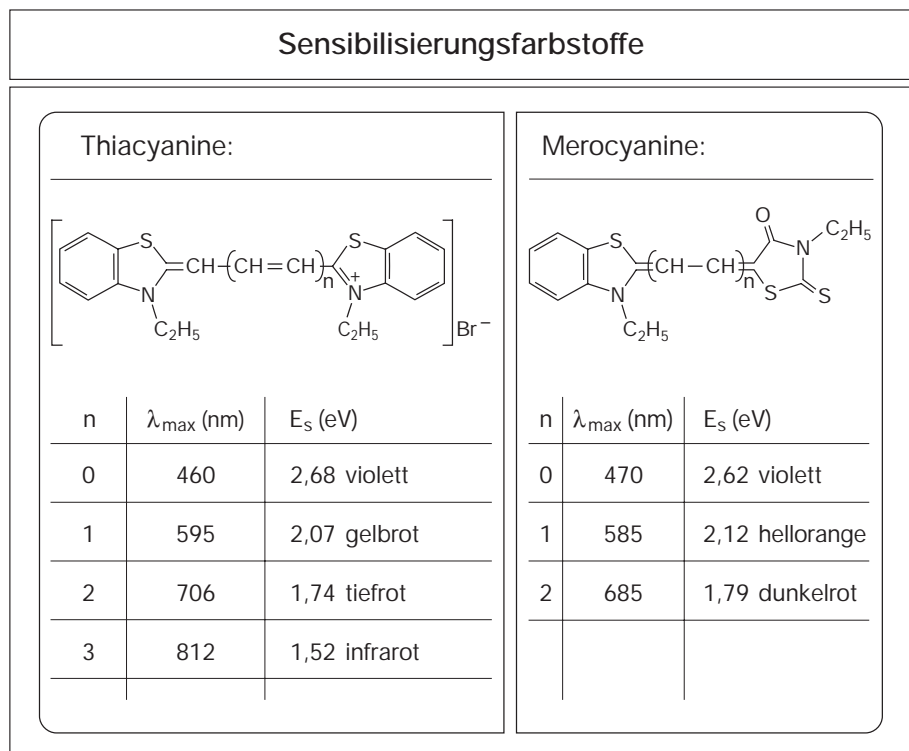


Abbildung 13  
(Kopiervorlage 6)

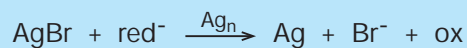
Die Sensibilisatoren sind maßgeschneiderte Farbstoffe, die zahlreichen Anforderungen genügen müssen (z. B. Absorptionslage, Adsorptionsvermögen, Quantenausbeute) und die nur in sehr kleiner Konzentration angewendet werden (nur ca. 30% der Silberhalogenidkristall-Oberfläche sind monomolekular vom Sensibilisator bedeckt).

Die bekanntesten Sensibilisierungsfarbstoffe gehören zur Klasse der Polymethinfarbstoffe, in denen ein chromophores System von konjugierten Doppelbindungen durch heterocyclische Ringsysteme begrenzt wird.

## Fotografische Entwicklung

3.1.3

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



$red^-$     Entwicklersubstanz (liegt in der alkalischen Entwicklerlösung als Anion vor)  
 $ox$      oxidierte Form der Entwicklersubstanz

Für die Entwickelbarkeit einer fotografischen Schicht gelten zwei grundlegende Kriterien:

- Kinetische Bedingung ist, daß die belichteten Kristalle schneller entwickeln als die unbelichteten, so daß eine Unterscheidung belichtet/unbelichtet möglich wird. Eben dies bewirken die Latentbildkeime. Unter dem katalytischen Einfluß der Latentbildkeime entwickeln die belichteten Kristalle um Größenordnungen schneller als die unbelichteten Kristalle ohne Latentbildkeime.
- Elektrochemische (d. h. thermodynamische) Voraussetzung für eine Entwicklung ist, daß das Potential des entwickelnden Redoxsystems ( $E_{\text{redox}}$ ) kleiner ist als das  $\text{Ag}^+/\text{Ag}$ -Potential ( $E_{\text{Ag}^+/\text{Ag}}$ )

$$\Delta E = (E_{\text{Ag}^+/\text{Ag}} - E_{\text{redox}}) > 0$$

d. h. es muß eine positive Potentialdifferenz  $\Delta E$  als Triebkraft für die Entwicklung vorliegen. Andererseits darf diese Potentialdifferenz nicht zu groß sein, weil sonst spontane Keimbildung eintritt und nicht mehr zwischen belichteten und unbelichteten Kristallen unterschieden wird.

Der Entwicklungsprozeß kann elektrochemisch als Elektrodenprozeß verstanden werden. Der Latentbildkeim fungiert gleichzeitig als Anode und als

Kathode. An der Phasengrenze des Silberkeimes bzw. des Silberfadens zur Entwicklerlösung überträgt der Entwickler Elektronen  $e^-$  auf den Silberkeim und wird dadurch selbst oxidiert (anodischer Teilprozeß:  $\text{red}^- \rightarrow \text{ox} + e^-$ ).

Dieses überschüssige Elektron im Silberfaden wird an der Phasengrenze Silberhalogenid/Silber von einem Zwischengitter-Silberion  $\text{Ag}_i^+$  neutralisiert, wobei sich ein neues Silberatom bildet (kathodischer Teilprozeß:  $\text{Ag}_i^+ + e^- \rightarrow \text{Ag}$ ).

Das entwickelte Silber schiebt sich als Silberfaden aus dem Silberhalogenid-Kristall heraus; für jedes entladene Silberion  $\text{Ag}_i^+$  verläßt ein Halogenidion (im Beispiel:  $\text{Br}^-$ ) den Kristall, wodurch dieser insgesamt abgebaut wird. Die Verhältnisse sind in **Abbildung 14**/links dargestellt („chemische“ Entwicklung).

In Anwesenheit von  $\text{Ag}^+$ -Komplexbildnern kann der Silberhalogenidkristall auch vor Beginn und während der Entwicklung aufgelöst werden, wobei der durch Belichtung entstandene Silberkeim in der Gelatine der Schicht zurückbleibt. Bei der Entwicklung werden dem Keim über die Lösungsphase von allen Seiten gleichmäßig sowohl Elektronen (von der Entwicklersubstanz) als auch Silberionen (vom  $\text{Ag}^+$ -Komplex) zugeführt; der Keim wächst kugelförmig an („physikalische“ Entwicklung, siehe **Abbildung 14**/rechts).

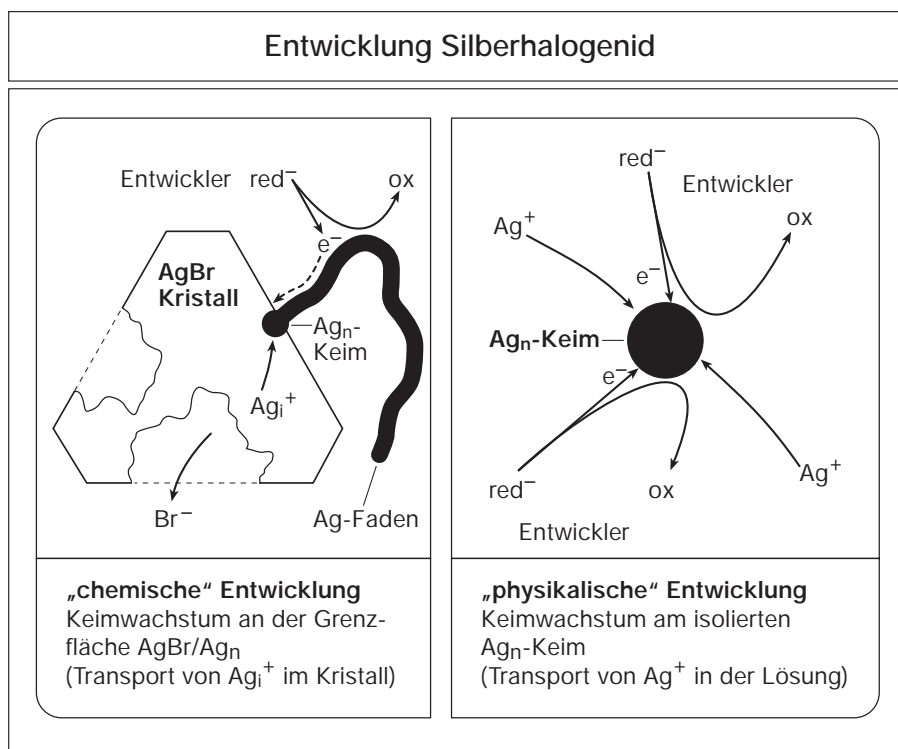


Abbildung 14  
(Kopiervorlage 7)

Eine elektronenmikroskopische Aufnahme von fadenförmig und kugelförmig entwickeltem Silber zeigt **Abbildung 15**. In der Praxis laufen meist unterschiedlich große Anteile von chemischer und physikalischer Entwicklung nebeneinander ab. Je nach Entwicklerrezept kann man daher zwischen

den dargestellten Grenzformen des entwickelten Silbers alle möglichen Übergangsformen erhalten.

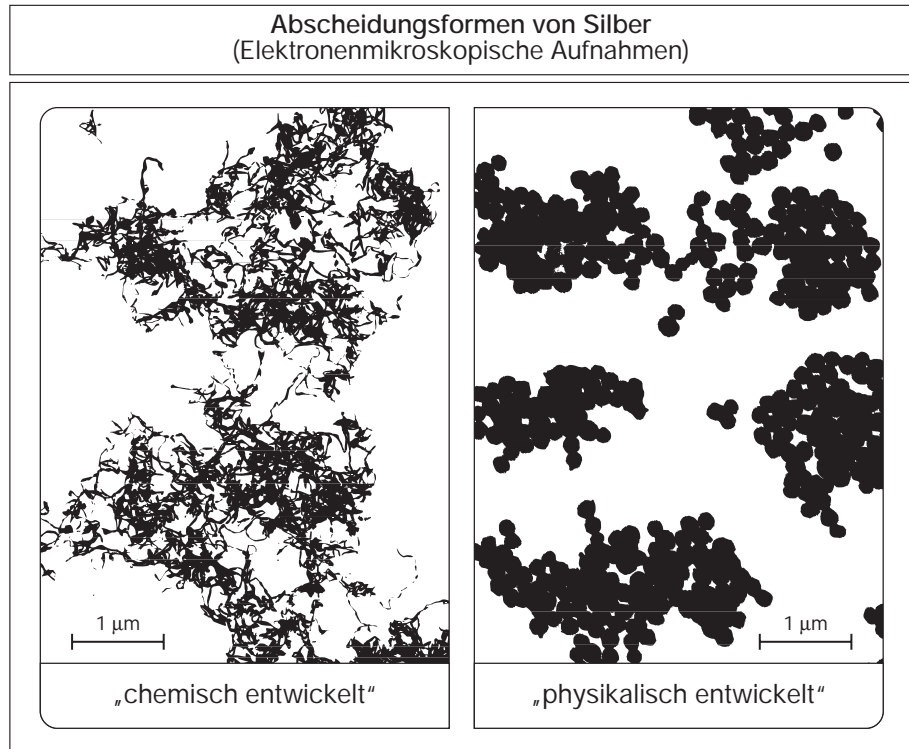


Abbildung 15  
(Kopiervorlage 8)

Als Entwicklersubstanzen sind prinzipiell alle diejenigen Reduktionsmittel geeignet, deren Redoxpotential die obengenannten Bedingungen erfüllt.

Zur Entwicklung von Schwarzweißfotografien werden Phenole (z. B. Hydrochinon), Phenolamine (z. B. Metol = N-methyl-1,4-amino-phenol), Pyrazolidone (z. B. Phenidon = 1-Phenyl-3-pyrazolidon) oder Iso-Ascorbinsäure eingesetzt.

In der Farbfotografie wird mit Phenylendiaminderivaten (z. B. CD2, CD3, CD4 [CD = Color Developer]) entwickelt, deren Oxidationsprodukte in einer Nachfolgereaktion mit eingelagerten Verbindungen, den sogenannten Kupplern, zu den Bildfarbstoffen reagieren (siehe Seite 25 ff).

Gebäuchliche Entwicklersubstanzen zeigt **Abbildung 16** (Seite 18). Neben der eigentlichen Entwicklersubstanz enthält ein Entwicklerrezept noch einige Hilfschemikalien:

- Halogenidionen zur Steuerung der Konzentration an gelöstem  $\text{Ag}^+$  (komplex gelöst; z. B.  $[\text{AgBr}_2]^-$ );

- Reaktand für das Oxidationsprodukt des Entwicklers, damit dieses aus dem Gleichgewicht entfernt wird, z. B. Sulfit (in Farbentwicklern übernehmen die eingelagerten Kuppler diese Funktion);
- Oxidationsschutzmittel (meist auch Sulfit);
- $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  als Base;
- pH-Puffer;
- Kalkschutzmittel (Bindung von  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen in hartem Wasser, in dem die als Konzentrat gelieferten Chemikalien gelöst werden);
- Netzmittel zur besseren Benetzung des Materials.









Negativ/Positiv - Verfahren		
	Negativ	Positiv
Schwarz-weiß		
Farbe		

Abbildung 18  
(Folie 8)

## Umkehrverarbeitung

3.1.5

Durch geeignete Verarbeitungsausführung können Schwarzweißfilme auch direkt zu positiven Bildern entwickelt werden.

Diese Schwarzweiß-Umkehrverarbeitung fand Anwendung bei den ersten additiven Farbverfahren (siehe Kapitel 3.2.1) und wird auch heute noch für Schwarzweiß-Diafilme (z. B. „Scala“ von Agfa-Gevaert) oder für Schwarzweiß-Kinofilme eingesetzt.

Die Schwarzweiß-Umkehrverarbeitung umfaßt folgende Prozeßschritte (siehe **Abbildung 22** auf Seite 24 und Versuchsbeschreibung auf Seite 49):

- Entwicklung (zum negativen Bild)
- Bleichen (entwickeltes Silber wird zu löslichem Silbersulfat oxidiert; dies geschieht mit Kalium-

dichromat/Schwefelsäure oder Kaliumpermanganat/Schwefelsäure)

- Flächige Zweitbelichtung und Zweitentwicklung (ergibt jetzt positives Bild)
- Fixieren, Wässern, Trocknen

## Silbersalz-Diffusion

3.1.6

Bei dem Verfahren der Silbersalz-Diffusion entsteht die Bildumkehr zum Positiv durch Diffusion des nichtbelichteten Silberhalogenids auf ein zweites Blatt, das Positivblatt.

Das Positivblatt wird auf das lichtempfindliche Negativblatt gepreßt, nachdem dieses belichtet und

mit Entwicklerflüssigkeit getränkt worden ist. Im Kontakt mit dem Positivblatt laufen bei der Entwicklung folgende Prozesse ab:

- Entwicklung der belichteten Kristalle im Negativblatt;

- Auflösung der unbelichteten Kristalle im Negativblatt;
- Diffusion der gelösten  $\text{Ag}^+$ -Komplexe in das Positivblatt;
- Physikalische Entwicklung der gelösten  $\text{Ag}^+$ -Komplexe im Positivblatt.

Der Ablauf des gesamten Prozesses ist in **Abbildung 19** schematisch dargestellt.

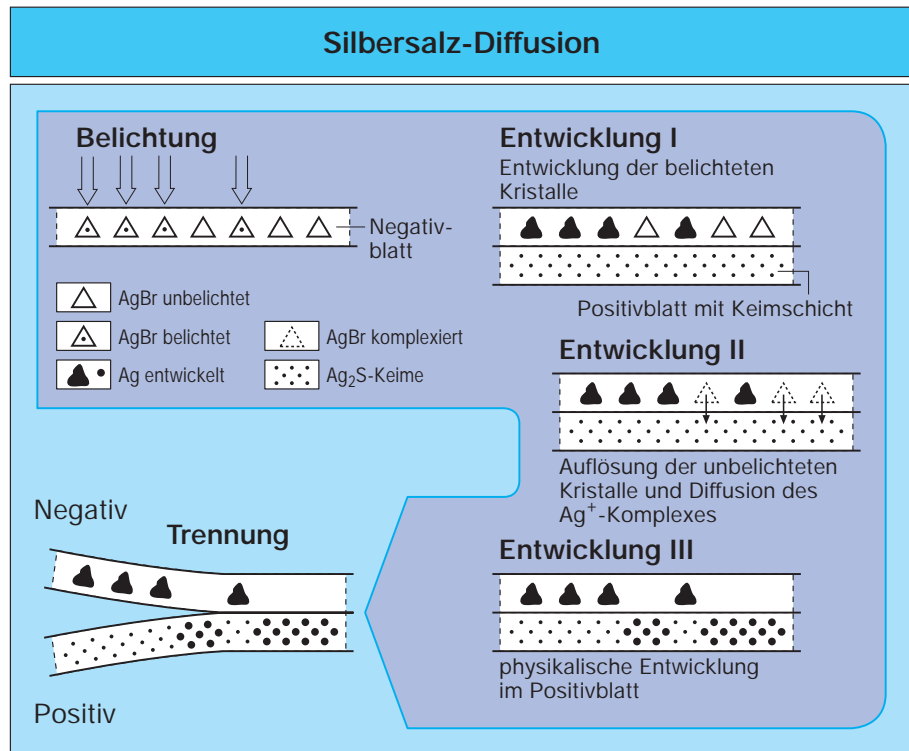


Abbildung 19  
(Folie 9)

Für den richtigen Ablauf muß die Entwicklung der belichteten Kristalle deutlich schneller als deren Auflösung durch Komplexbildner erfolgen. Das Positivblatt enthält Keime ( $\text{Ag}_2\text{S}$  oder  $\text{Ag}_2\text{Se}$ ), die in Gegenwart des Entwicklers die Reduktion der eindiffundierenden Silbersalze katalysieren.

Der Vorteil der Silbersalzdifusion liegt in der schnellen und einfachen Verarbeitung, die auch leicht automatisiert werden kann.

Das Verfahren hat Anwendung für die Schwarzweißkopie (z. B. *Copyrapid*, *Agfa-Gevaert*) und für das Schwarzweißsofortbild (*Polaroid*) gefunden. Die Silbersalz-Diffusion ist der gedankliche Vorläufer für die Farbstoff-Diffusion gewesen (siehe Seite 30).

Alle Farbtöne können aus nur drei Grundfarben gemischt werden; dies gilt sowohl für die Farbmischung nach dem additiven Prinzip (Grundfarben:

Blau, Grün, Rot) als auch nach dem subtraktiven Prinzip (Grundfarben: Gelb, Purpur, Blaugrün); siehe Abbildung 20 und Abbildung 21.

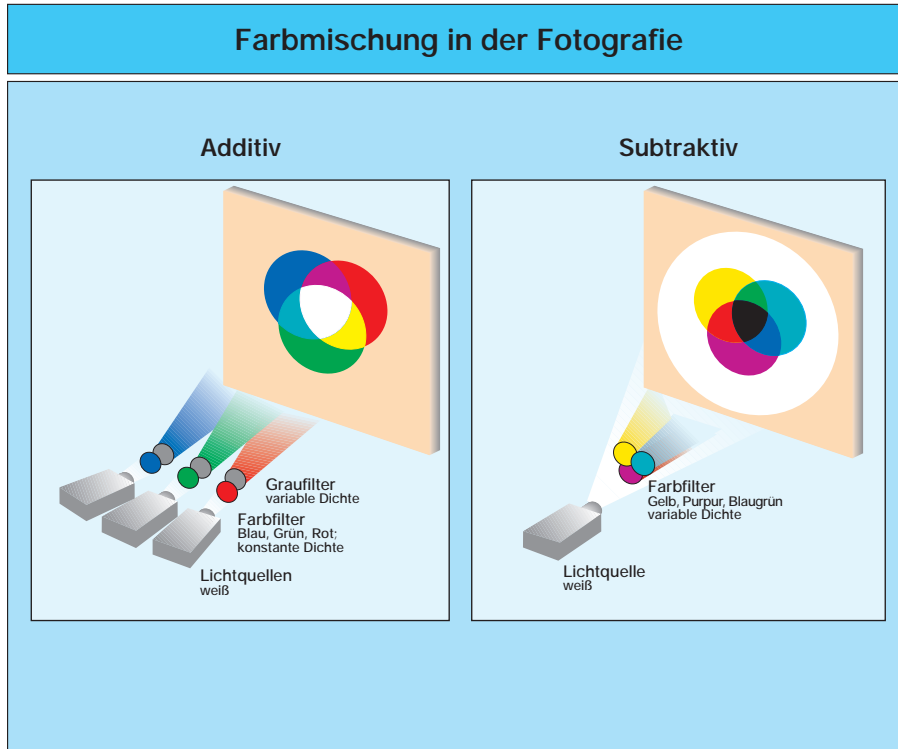


Abbildung 20 (Folie 10)

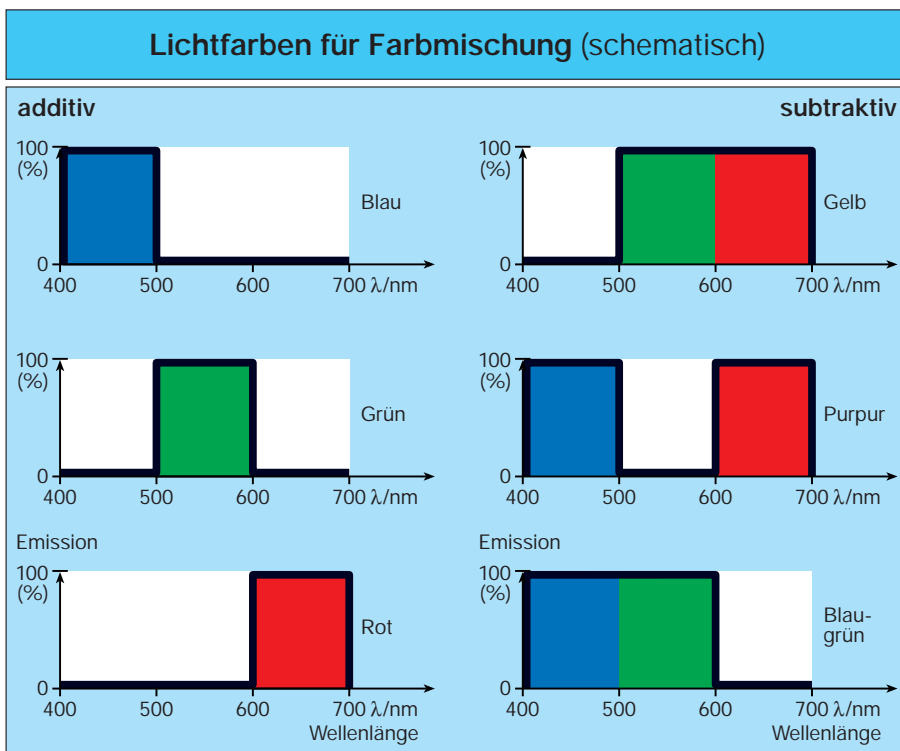


Abbildung 21 (Folie 11)

Bei der additiven Farbmischung wird blaues, grünes und rotes Licht (jeweils ein Drittel des sichtbaren Spektrums) aus nebeneinanderliegenden Lichtquellen im geeigneten Verhältnis gemischt (addiert). Die Summe der drei Lichtsorten ergibt Weiß. Die Mischung kann auf dem Projektionschirm erfolgen oder – bei genügend kleinen Strahlungselementen – auch im Auge des Betrachters.

Nach dem letztgenannten Prinzip funktioniert das Farbfernsehen. Auf dem Bildschirm sind drei Sorten von winzigen Leuchtstoffelementen aufgetragen; durch den Elektronenstrahl der Fernsehöhre werden die Leuchtstoffe zur Emission in den Farben Blau, Grün bzw. Rot angeregt.

In den additiven fotografischen Verfahren müssen die Ausgangsfarben Blau, Grün, Rot zunächst mit Farbfiltern aus weißem Licht erzeugt werden. Hierdurch gehen zwei Drittel der Lichtintensität – und außerdem der Auflösung – verloren. Diese Ausgangsfarben werden dann durch Vorschalten von Graufiltern variabler Dichte in ihrer Helligkeit moduliert. Bei Abwesenheit der Graufilter entsteht Weiß (bei additiver Farbmischung werden drei Lichtquellen benötigt, um eine relative Intensität von 100 % für Weiß zu erreichen; vgl. subtraktive Farbmischung); bei Anwesenheit der Graufilter entstehen je nach Dichte der drei Filter beliebige Grau- oder Farbtöne.

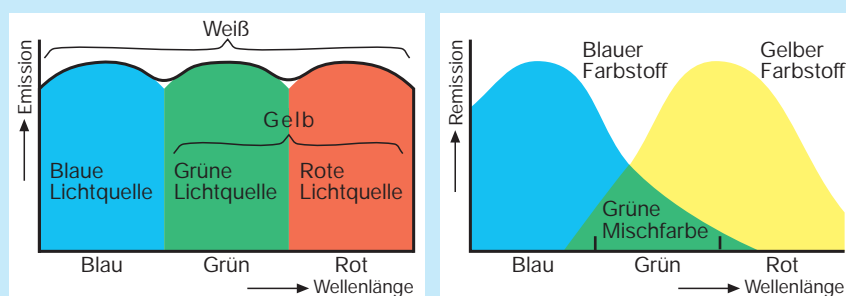
**Versuch:** Additive Farbmischung auf der Projektionsleinwand mit drei Diaprojektoren (oder mit drei Overheadprojektoren) und entsprechenden Farb- und Graufiltern.

Die Mischung der Lichtfarben Grün und Rot ergibt beispielsweise die Farbe Gelb; des weiteren sind Gelb (= Rot + Grün) und Blau Komplementärfarben, d. h. sie ergeben zusammen Weiß (= Blau + Rot + Grün).

Diese Mischungsergebnisse scheinen der bei der Mischung von Tuschfarben gewonnenen Erfahrung zu widersprechen, führt doch die Mischung von blauen und gelben Tuschfarben zu Grün.

Die Erklärung ist mit nachfolgenden Diagrammen gegeben: Die Mischung der strahlenden Lichtfarben ist **additiv**; die Summe umfaßt einen breiteren Wellenbereich als die beiden Einzelfarben.

Die Mischung von Farbstoffen wie Tuschfarben dagegen ist **subtraktiv** (siehe Kap. 3.2.2). Farbstoffe absorbieren von weißem Licht bestimmte Wellenlängenbereiche; die nicht-absorbierten Wellenlängenbereiche werden remittiert (und als „Farbe“ wahrgenommen). Eine Mischung von zwei Farbstoffen remittiert nur den schmalen Wellenlängenbereich, der von beiden Einzelfarbstoffen remittiert wird.



Versuch 2

Die additiven fotografischen Verfahren sind chemisch einfacher als die subtraktiven Verfahren, weil bei der Entwicklung keine Farbstoffchemie abläuft; sie haben sich wegen ihrer geringeren Helligkeit und der verminderten Auflösung aber nicht gegenüber den subtraktiven Verfahren durchsetzen können. Drei additive Verfahren haben zeitweise Bedeutung erlangt:

- Kornraster
- Linienraster
- Linsenraster

Bei den Kornraster- und Linienrasterverfahren liegen Punkt- bzw. Linienfilter der Farben Blau, Grün, Rot im Film über der lichtempfindlichen, schwarzweiß-entwickelnden Schicht. Belichtung und Betrachtung (bzw. Projektion) erfolgen durch diese aufgebrauchten Filter. Die Dichte des entwickelten Silbers steuert die Helligkeit. Es entstehen bei einfacher Schwarzweiß-Entwicklung negative, komplementärfarbige Bilder und bei Schwarzweiß-Umkehrentwicklung (siehe Seite 20 und Abbildung 22 auf folgender Seite) positive, farbrichtige Bilder.

## Additives Linienraster-Verfahren (mit Umkehr-Entwicklung)

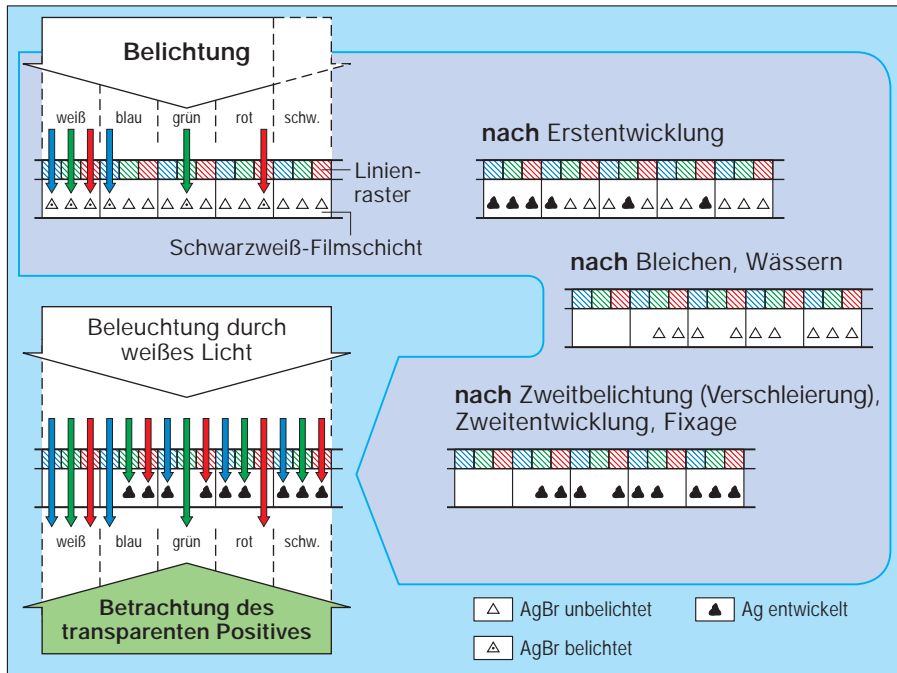


Abbildung 22  
(Folie 12)

Im additiven Polavisions-Verfahren mit Linienraster (Sofortschmalfilm von *Polaroid*) erfolgt die Bildumkehr zu positiven Bildern durch Silber-salz-Diffusion (siehe Seite 20). Das belichtete Silberhalogenid entwickelt sehr kompakt zu niedriger, nicht bildwirksamer Dichte; das nicht belichtete Silberhalogenid dagegen diffundiert auf eine Empfangsschicht und entwickelt zu hoher Dichte.

Im historischen Linsenraster-Verfahren sind die Farbfilter in die Kamera verlegt. Durch Prägung der Filmrückseite in kleine Zylinderlinsen werden die Farbfilter auf die lichtempfindliche Schicht abgebildet. Die Projektion erfolgt in einem reziproken Strahlengang.

## Subtraktive Verfahren

3.2.2

Bei der subtraktiven Farbmischung werden aus weißem Licht durch übereinanderliegende, dichtevariable Filter der Farben Gelb, Purpur und Blaugrün bestimmte Lichtanteile herausgefiltert (subtrahiert) und dadurch Farbe und Helligkeit verändert. Die Transmission dieser subtraktiven Filter umfaßt jeweils zwei Drittel, die Absorption ein Drittel des sichtbaren Spektrums. Bei Abwesenheit aller drei Filter entsteht Weiß (bei subtraktiver Farbmischung wird nur 1 Lichtquelle benötigt, um eine relative Intensität 100% für Weiß zu erreichen; vgl. additive Farbmischung), bei Anwesenheit der Filter entstehen je nach deren Dichten beliebige Grau- oder Farbtöne.

In den subtraktiven fotografischen Verfahren werden infolge Belichtung und Entwicklung gelbe, purpurfarbige und blaugüne Farbstoffe im Fotomaterial auf- oder abgebaut. Helligkeit und Farbnuance werden durch die Dichten dieser drei

Farbstoffe gesteuert. Je nach der Art der Bilderzeugung werden unterschieden:

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

**Versuch 3:** Die subtraktive Farbmischung kann mit den beigelegten gelb-, purpur- und blaugrünfarbigen Folien (Folien 10a bis 10c) auf dem Overheadprojektor demonstriert werden.

## Chromogene Verfahren

Diese Verfahren haben in Form der Colornegativ- und Colorumkehrfilme sowie der entsprechenden Papiere die größte Verbreitung gefunden. Das Prinzip der chromogenen Entwicklung ist, daß an die Reaktion des Entwicklers mit dem belichteten

Silberhalogenid eine farbstoff erzeugende Reaktion angeschlossen wird. Der oxidierte Entwickler reagiert mit eingelagerten Verbindungen, den sogenannten Kupplern, über die Stufe des Leukofarbstoffes zum Farbstoff (siehe **Abbildung 23**).

Abbildung 23  
(Kopiervorlage 11)

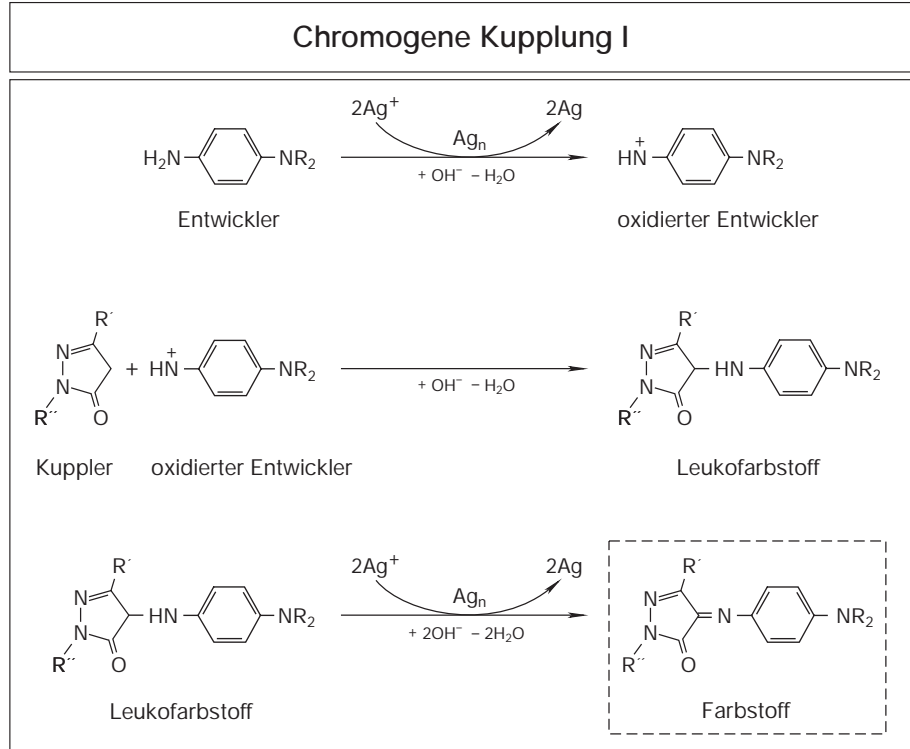
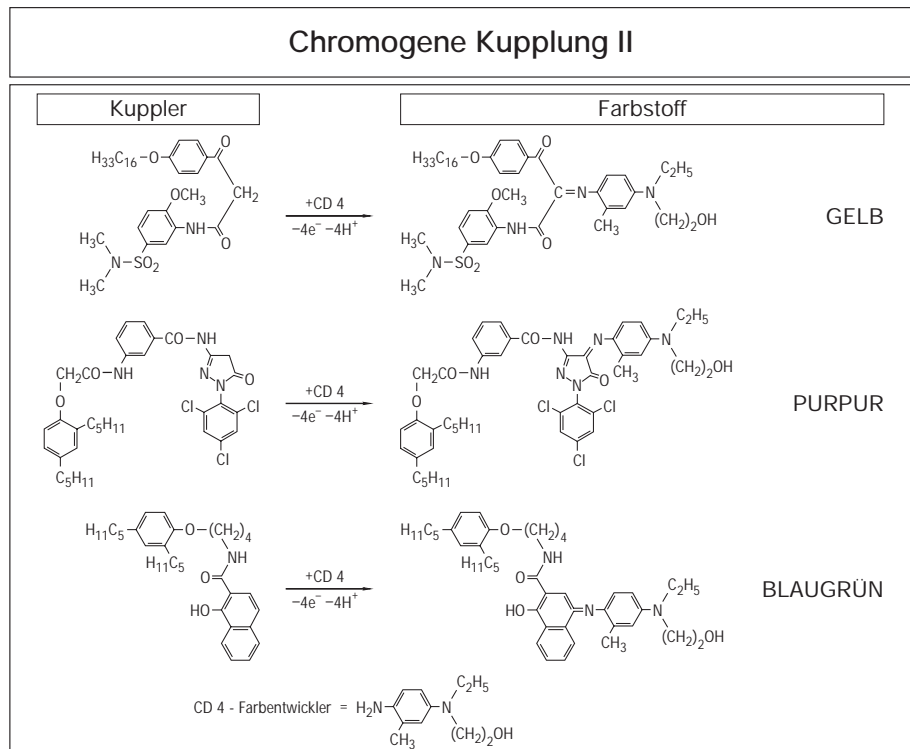


Abbildung 24  
(Kopiervorlage 12)



Als Entwicklersubstanzen werden Derivate des 1,4-Phenylendiamins (vgl. Abbildung 16 auf Seite 18) verwendet.

Typische Kupplerstrukturen sind in **Abbildung 24** (Seite 25) angegeben – zusammen mit den Farbstoffen, die sich bei Kupplung mit dem Farbwentwickler CD 4 (N-ethyl-N-[2-hydroxyethyl]-3-methyl-1,4-phenylendiamin) ergeben.

Ohne eine besondere Verankerung würden sowohl die Kuppler als auch die gebildeten Farbstoffe unkontrolliert im Schichtverband diffundieren. Um die Kuppler diffusionsfest zu machen, sind die Moleküle mit langkettigen Gruppen versehen. Die Kuppler werden in hochsiedenden, hydrophoben organischen Lösungsmitteln (z. B. Dibutylphthalat) gelöst und in dispergierter Form der Silberhalogenid-Emulsion zugesetzt.

Ein Colornegativfilm besteht in der einfachsten Form aus drei übereinanderliegenden lichtempfindlichen Schichten, die verschiedenen sensibilisierte Silberhalogenid-Emulsionen und verschiedene Kuppler enthalten (siehe **Abbildung 25**):

- blauempfindliche unsensibilisierte Schicht (B), die gelb entwickelt
- Gelbfilter, schützt die tieferliegenden Schichten vor blauem Licht
- grünsensibilisierte Schicht (G), die purpurrot entwickelt

- rotsensibilisierte Schicht (R), die blaugrün entwickelt

Ein vollständiger Colornegativ-Verarbeitungsgang besteht aus den Schritten:

- (1) Entwickeln → (2) Bleichen → (3) Fixieren → (4) Wässern → (5) Trocknen

Nach dem Entwickeln liegt entwickeltes Silber neben gekuppeltem Farbstoff vor. Im Bleichschritt wird das Silber zu Silberhalogenid oxidiert:



Als Bleichmittel (ox) fungieren z. B. Fe(III)-Salze wie  $\text{Fe}_4[\text{EDTA}]_3$  oder Persulfat.<sup>3</sup>

Im Fixierschritt (siehe Kapitel 3.1.4) werden die Silbersalze entfernt, das Farbbild bleibt zurück. (Silber kann vollständig zurückgewonnen werden!)

Als Ergebnis entsteht ein nach Helligkeit und Farben negatives bzw. komplementäres Bild.

<sup>3</sup> EDTA = Ethylendiamintetraacetat

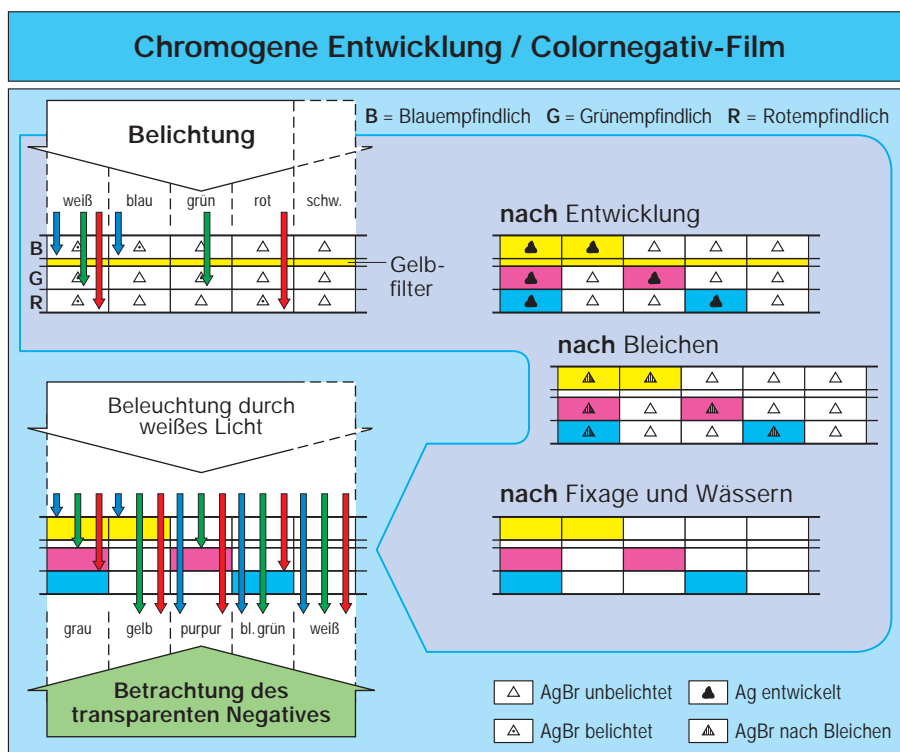


Abbildung 25  
(Folie 13)



## Farbmaskierung

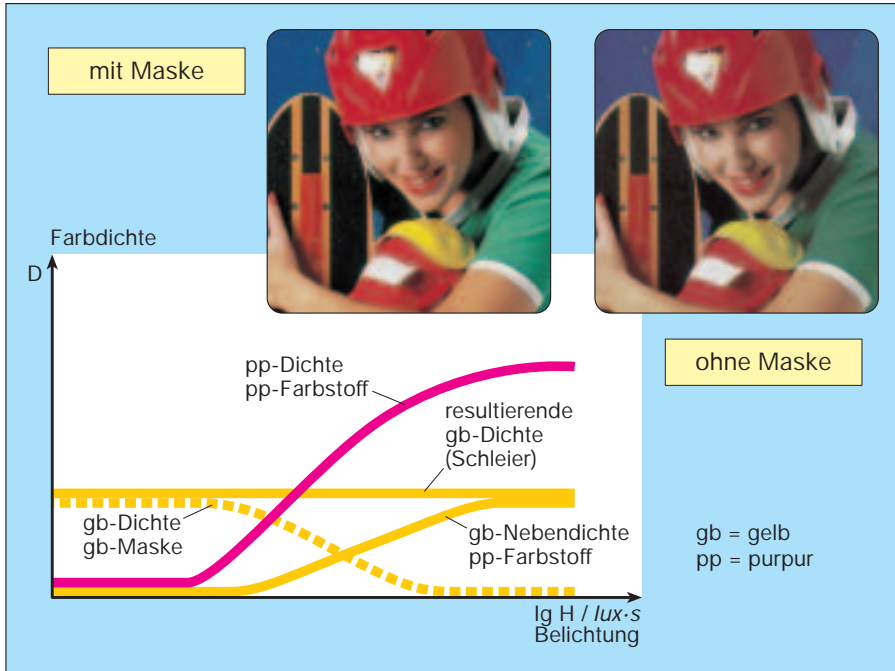


Abbildung 27  
(Folie 15)

## Chromogene Kupplung III

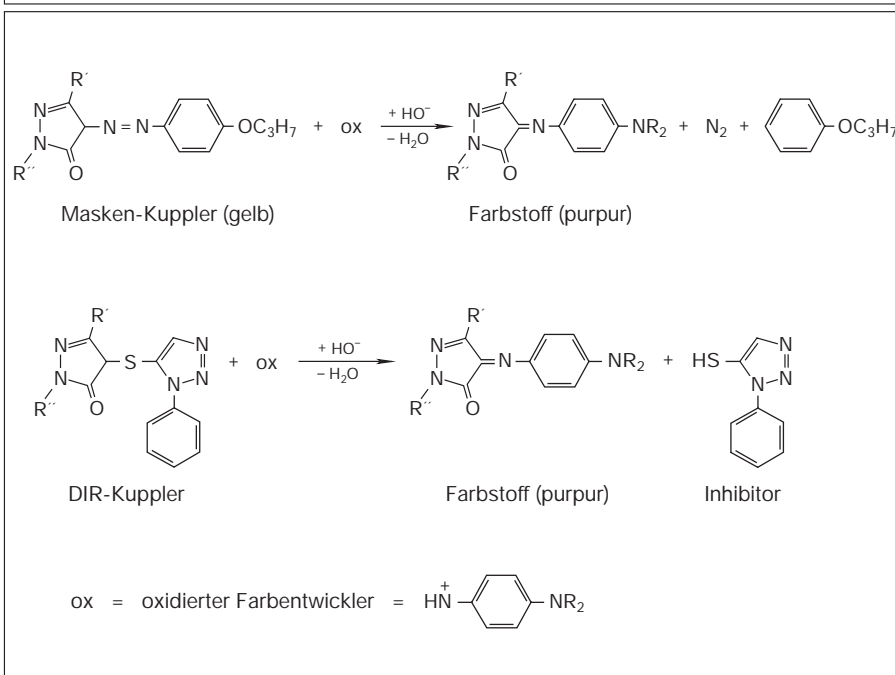


Abbildung 28  
(Kopiervorlage 13)

Diese als Maskierung bezeichnete Technik wird realisiert durch zusätzliche Einlagerung farbiger Kuppler, der Maskenkuppler; ihre Farbe entspricht der zu korrigierenden Nebendichte (dem Purpurkuppler wird also ein gelber Maskenkuppler zugesetzt). Die Maskenkuppler reagieren mit dem oxidierten Entwickler unter Abbau ihrer ursprünglichen

Farbe. (Der gelbe Maskenkuppler reagiert zu einem purpurfarbigen Farbstoff.)

Die modernen Colornegativfilme sind stets maskiert (gelb-rote Einfärbung aus gelben und roten Maskenkupplern), was deutlich die Farbbrillanz erhöht. Colorumkehrfilme können nicht maskiert

werden, weil ohne Kopierschritt der Maskenschleier bildwirksam bleibt.

### c) DIR-Kuppler

Der größte Fortschritt in den letzten Jahren ist verbunden mit dem Einsatz der sogenannten DIR-Kuppler (DIR = Development-Inhibitor-Releasing).

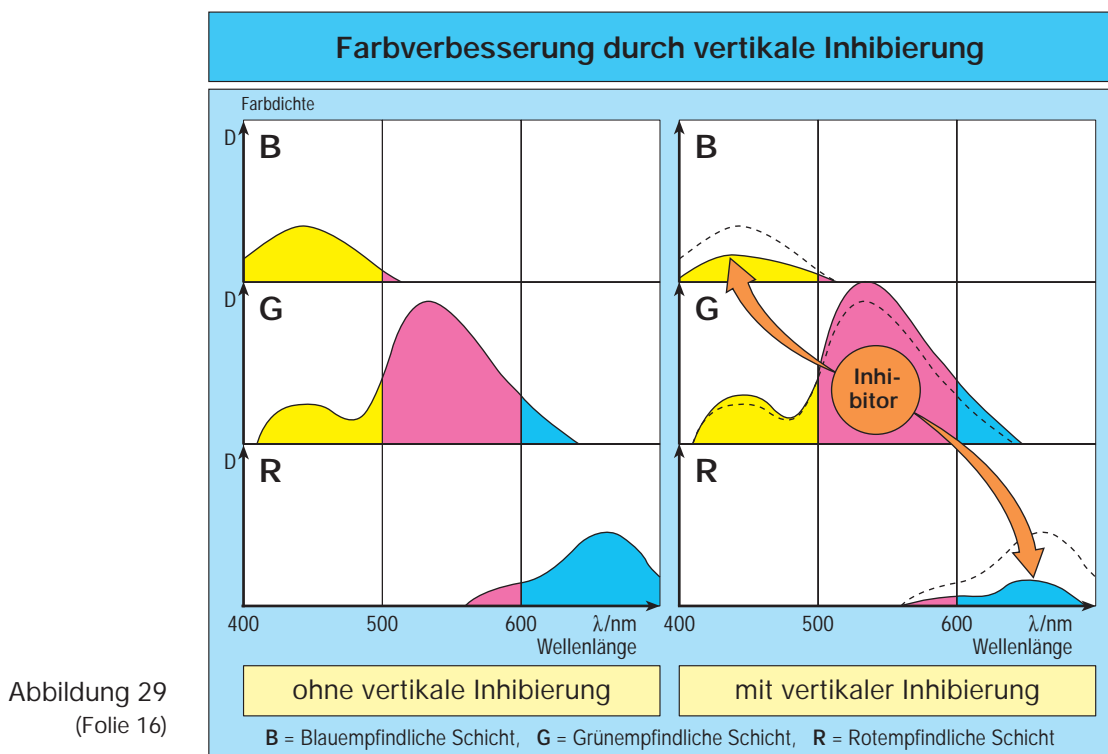
Diese Kuppler setzen bei Reaktion mit oxidiertem Entwickler eine Verbindung frei, die als Entwicklungshemmer, als Inhibitor, wirkt. Der Inhibitor diffundiert im Schichtverband in alle Richtungen, wird an entwickelnden Silberhalogenid-Kristallen adsorbiert und hemmt hier die weitere Entwicklung durch Vergiftung der katalytischen Silberkeime.

Drei Bildeigenschaften, nämlich **Körnigkeit**, **Schärfe** und **Farbbrillanz**, werden durch diesen Regelprozeß entscheidend verbessert.

**Körnigkeit:** Der Inhibitor diffundiert zu benachbarten Körnern und verhindert deren Durchentwicklung. Dadurch entstehen kleinere Farbwolken, was zu einer geringeren Körnigkeit führt (siehe Kapitel 3.3.3).

**Schärfe:** Der Inhibitor diffundiert an einer Kante innerhalb einer Schicht (horizontale Inhibierung) von Stellen hoher Dichte – hier wird die Entwicklungshemmung verringert – zu Stellen niedriger Dichte – hier wird die Entwicklungshemmung verstärkt. Die Folge ist eine Überzeichnung der Kante. Dieser Kanteneffekt verbessert die Schärfe (siehe Kapitel 3.3.4).

**Farbsättigung:** Der Inhibitor diffundiert von einer Schicht hoher Dichte in eine benachbarte Schicht niedriger Dichte (vertikale Inhibierung; auch als Inter-Image-Effekt bezeichnet). Dadurch wird die Farbdichte der dominierenden Farbschicht noch erhöht, in der benachbarten Schicht geringer Dichte wird dagegen die Farbdichte unterdrückt. Im Beispiel der **Abbildung 29** werden durch die vertikale Diffusion des Inhibitors aus der grünempfindlichen Schicht (Purpurfarbstoff) die blau- und rotempfindlichen Schichten in ihrer Entwicklung gehemmt, d. h. es wird weniger Gelb- und Blaugrünfarbstoff gebildet. Auf diese Weise werden die unerwünschten Gelb- und Blaugrün-Nebendichten des Purpurfarbstoffes kompensiert und eine durch die Nebendichten bedingte Vergrauung des Bildes aufgehoben; es resultiert eine höhere Farbsättigung (äquivalent der Wirkung von Farbmasken).



Aus den Colornegativen werden durch Kopieren positive Bilder hergestellt. Dabei wird der entwickelte Colornegativfilm auf ein dem Film ähnliches Material, auf Colornegativpapier, abgebildet.

Das Colornegativpapier wird auch auf ähnliche Weise wie ein Film verarbeitet; es weist eine steilere Gradation auf als der Film (siehe Seite 34) und besitzt eine weiße, reflektierende Unterlage.

Im Kopierschritt entstehen negative Negative, d. h. Positive, die sowohl hinsichtlich der Farben als auch der Tonwerte dem Original entsprechen.

Die Colorumkehrfilme werden direkt zum positiven Farbbild (Diapositiv) verarbeitet. Das belichtete Material wird zunächst in einem Schwarzweiß-Ent-

wickler entwickelt. Nach einer Zwischenwässerung wird zum zweiten Mal, diesmal gleichmäßig, belichtet und anschließend mit einem Farbwentwickler entwickelt. Dadurch bilden sich an den bei der Erstbelichtung nicht belichteten Stellen Farbstoffe. Nach Bleichen und Fixieren verbleibt ein positives und farbrichtiges Farbbild (siehe **Abbildung 30**).

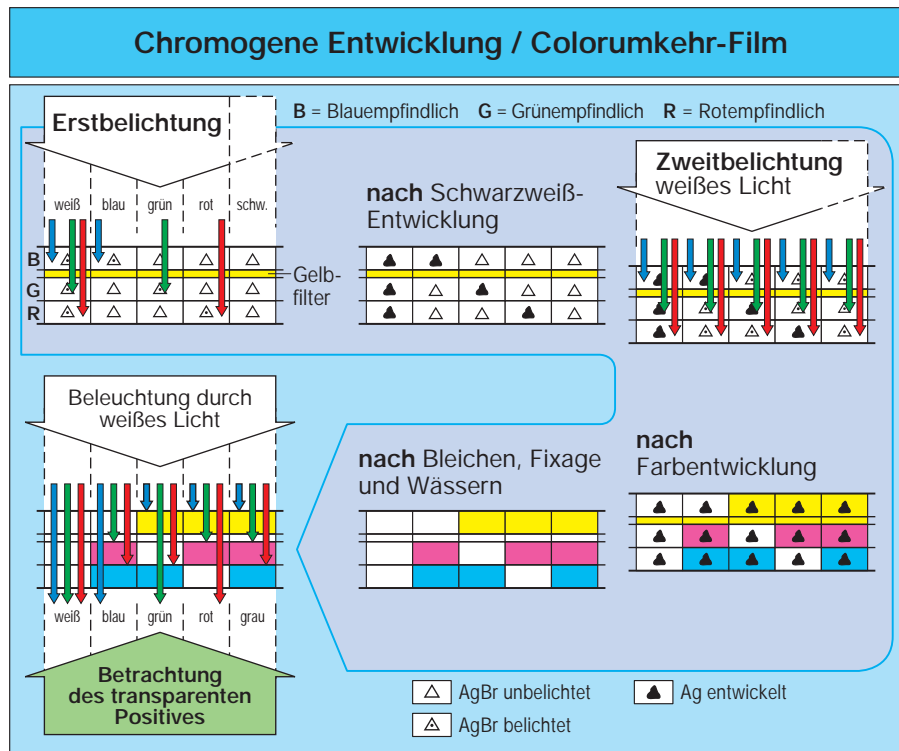


Abbildung 30  
(Folie 17)

## Silberfarbbleich-Verfahren

Ein Silberfarbbleich-Material enthält im unverarbeiteten Zustand die drei subtraktiven Farbstoffe in drei übereinanderliegenden Schichten eingelagert, die im Verarbeitungsgang bildmäßig gebleicht, d. h. zerstört werden (siehe **Abbildung 31**).

Im ersten Verarbeitungsschritt wird schwarzweiß entwickelt. Jetzt liegt an den belichteten Stellen entwickeltes Silber neben den eingelagerten Azofarbstoffen vor.

Im Bleichbad reduziert das Silber im sauren Milieu die Azofarbstoffe, wobei auswässerbare Amine entstehen. Da sowohl das Silber als auch die eingelagerten Farbstoffe in der Schicht immobil sind, bedarf es für die Bleichreaktion eines Katalysators als Reaktionsvermittler. Hierfür werden Phenazine oder Chinoxaline (in **Abbildung 31**: 2, 3-Dimethylchinoxalin) eingesetzt. Nach Bleichen, Fixieren und Wässern wird ein positives, farbrichtiges Bild erhalten.

Die eingelagerten Farbstoffe wirken als Lichtfilter bei der Belichtung, so daß die Silberfarbbleich-Materialien zwar über eine hohe Schärfe, aber nur über eine geringe Empfindlichkeit verfügen; die Materialien werden deshalb ausschließlich für die Farbproduktion eingesetzt (*Cibacopy* und *Cibachrome* von *Ilford*). Die Bilder sind wegen ihres Aufbaus aus Azofarbstoffen außerordentlich lichtstabil.

## Farbstoff-Diffusion

Bei den Farbstoff-Diffusionsverfahren wird die Diffusionsfähigkeit eingelagerter Farbstoffe bildmäßig verändert. Dies ermöglicht eine einfache und schnelle Verarbeitung, die auch in der Kamera ablaufen kann (Colorsoftbild).

Das Aufbauschema eines Colorsoftbildes ist in **Abbildung 32** wiedergegeben; es entspricht dem

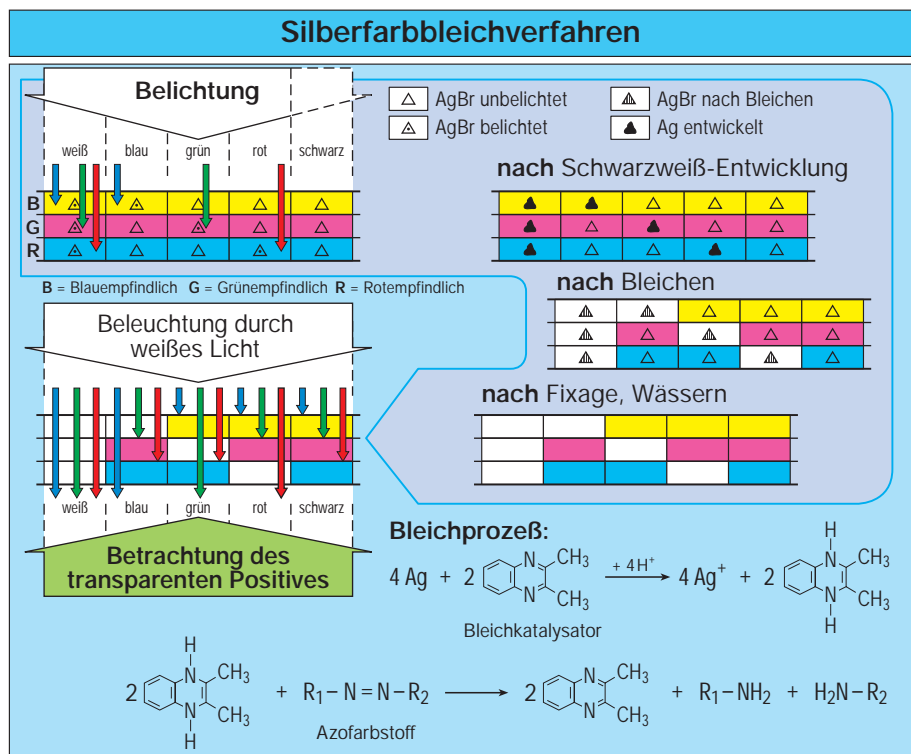


Abbildung 31  
(Folie 18)

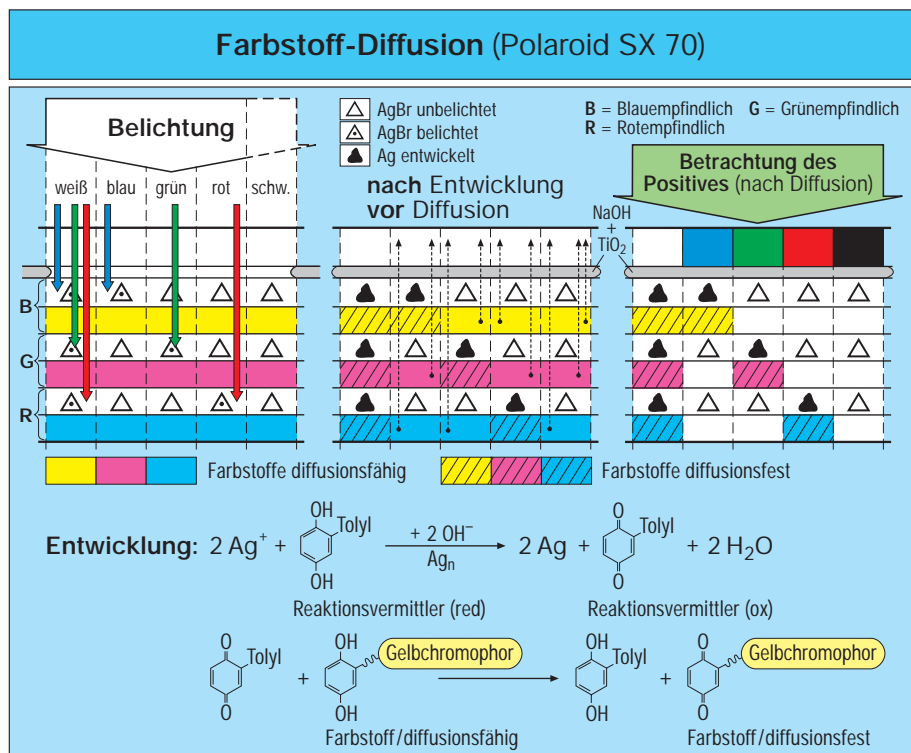


Abbildung 32  
(Folie 19)

SX-70-Material von *Polaroid*. Der lichtempfindliche Teil besteht aus drei Farbeinheiten mit jeweils Silberhalogenidschicht und Farbstoffschicht (eingelagert sind Farbstoffe, die im alkalischen Milieu diffundieren können).

Nach Belichtung wird die Entwicklung dadurch eingeleitet, daß durch Quetschbruch kleiner einge-

bauter Vorratsbehälter dem Set eine Paste zugeführt wird, die Natriumhydroxid und Titandioxid enthält.

Bei der Entwicklung verlieren die Farbstoffe ihre Fähigkeit zu diffundieren, weil ihre löslichmachende Dihydroxyfunktion zur Chinonfunktion oxidiert wird. Als Reaktionsvermittler fungieren dabei

reversible Redoxverbindungen, z. B. Tolyhydrochinon. Der noch diffusionsfähige Anteil der Farbstoffe wandert zur Bildempfangsschicht und wird dort auf einer Beize festgelegt.

Die Betrachtung erfolgt gegen das weiße, hochreflektierende Titandioxid als Bildhintergrund, das den lichtempfindlichen Teil abdeckt.

Der schnellen Verfügbarkeit der Bilder steht bei den Diffusionsmaterialien die Formatgebundenheit (d. h. große Kamera) und die – diffusionsbedingt – etwas geringere Schärfe einschränkend gegenüber. Hauptanwendung ist die Sofortbildfotografie.

## Eigenschaften fotografischer Materialien

3.3

Die wesentlichen Eigenschaften eines fotografischen Materials oder Systems sind neben der Empfindlichkeit die Bildqualitäts-Aspekte Kontrast, Körnigkeit, Schärfe und Farbwiedergabe sowie die Stabilität.

Die wichtigste Kennlinie eines fotografischen Materials ist die Dichtekurve (auch als charakteristische Kurve oder – bei Schwarzweißentwicklung – als Schwärzungskurve bezeichnet).

Die Dichtekurve  $D = f(\lg H)$  beschreibt die nach Entwicklung gegebene optische Dichte  $D$  des Materials als Funktion der Belichtung  $H$  (zur Definition von  $H$  siehe Seite 13).

Die optische Dichte ist ein Maß für das Lichtabsorptionsvermögen einer entwickelten fotografischen Schicht.

Die optische Dichte ist definiert als:

$$D = \lg \frac{\varnothing_0}{\varnothing_a}$$

$\varnothing_0$  einfallender Lichtstrom  
 $\varnothing_a$  austretender Lichtstrom

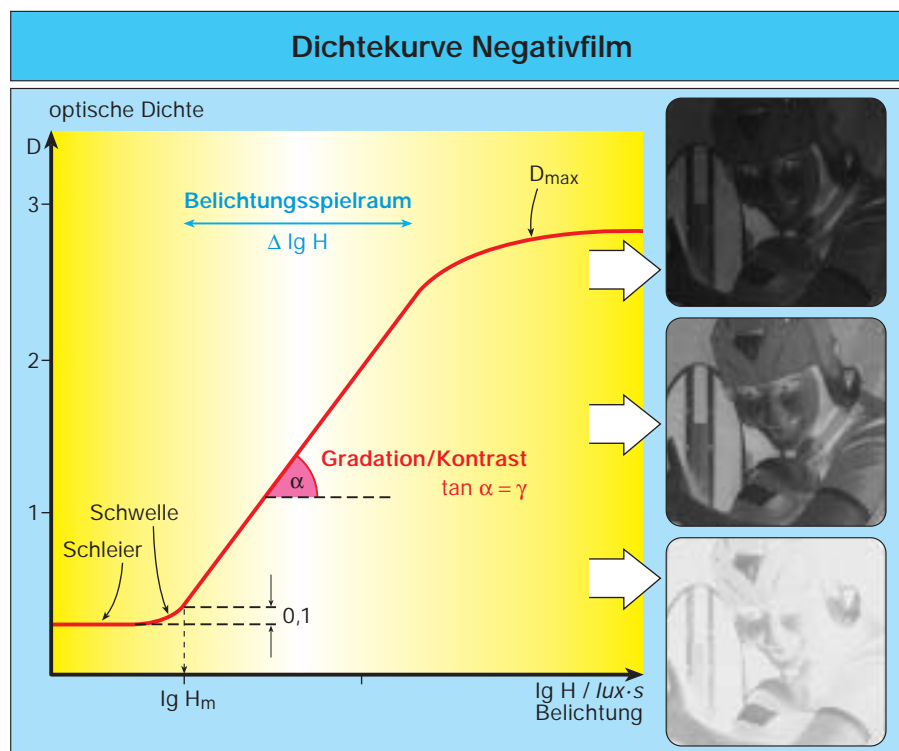


Abbildung 33  
(Folie 20)

Nach dieser Definition haben Schichten, die z. B. nur 50 %, 10 % oder 1 % des einfallenden Lichtes transmittieren, eine optische Dichte von 0,3, 1,0 bzw. 2,0.

Abbildung 33 zeigt den typischen Verlauf einer Dichtekurve.

Beim Negativfilm beginnt die Dichtekurve im Bereich kleiner, noch nicht wirksamer Belichtung mit dem Schleier (Dichte aus spontan, d. h. ohne Belichtung entwickelbaren Kristallen), dann folgt die Schwelle, deren Lage die fotografische Empfindlichkeit des Materials charakterisiert.

An die Schwelle der Dichtekurve schließt sich der annähernd geradlinige Teil an, in dem die bildwirksame Belichtung liegen sollte, damit der gewünschte lineare Zusammenhang zwischen Objekt- und Bildhelligkeiten erzielt wird. Bei hohen Belichtungen flacht die Dichtekurve zu einem Maximalwert hin ab.

## Empfindlichkeit

### 3.3.1

Das Maß für die Empfindlichkeit wird abgeleitet aus der Belichtung  $H_m$ , die nötig ist, um eine festgelegte optische Dichte (nach Entwicklung) zu erzeugen.

Je kleiner diese Belichtung, desto höher ist die Empfindlichkeit des Materials; deshalb ist die Empfindlichkeitskennzahl  $S$  umgekehrt proportional zur Belichtung  $H_m$ .

Allgemein ist die Empfindlichkeit definiert als

$$S = f \left( \frac{\text{const.}}{H_m} \right)$$

Speziell für die Empfindlichkeitsangabe von Schwarzweißfilmen (in ASA-Werten) gilt

$$S = \frac{0,8}{H_m}$$

wobei  $H_m$  diejenige Belichtung ist, die eine optische Dichte von „0,1 über Schleier“ erzeugt.

Die fotografische Empfindlichkeit wird auf den Filmen nach der ISO-Norm<sup>4</sup> in zwei Maßsystemen angegeben: Im linearen ASA-System und im logarithmischen DIN-System (Beispiel: ISO 100/21°).

Eine Verdoppelung der Empfindlichkeit wird auf der ASA-Skala durch eine Verdoppelung des Wertes angezeigt auf der DIN-Skala durch eine Erhöhung um drei Einheiten:

ASA-Wert	25	50	100	200	400	800	1600
DIN-Zahl	15	18	21	24	27	30	33

<sup>4</sup> Die ISO (International Standardization Organization) legt auf internationaler Ebene Normzahlen, Toleranzen und sonstige technische Normvorschriften fest.

Die Steigung des geradlinigen Teils der Dichtekurve wird als Gradation  $\gamma$  bezeichnet ( $\gamma = \tan \alpha$ ); sie kennzeichnet die Kontrastwiedergabe des Materials. Ein Material mit flacher Gradation („weich“)

setzt hohe Helligkeitskontraste des Motivs in geringe Bildkontraste um; entsprechend überträgt ein Material mit steiler Gradation („hart“) schon geringe Motivkontraste in hohe Bildkontraste.

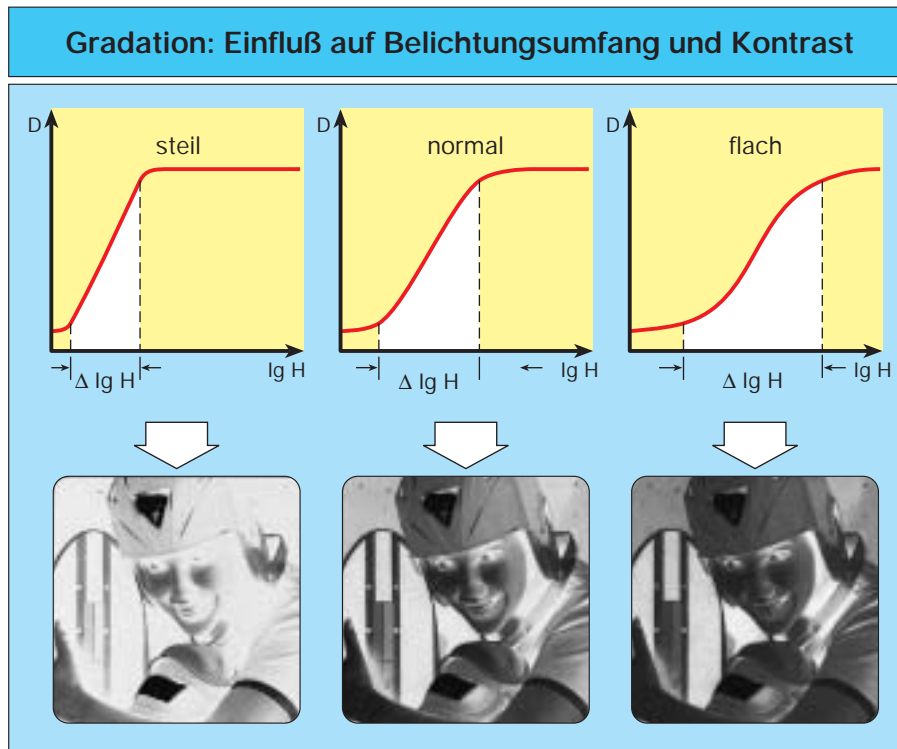


Abbildung 34  
(Folie 21)

Die Gradation steht – bei gegebener Maximaldichte – auch im Zusammenhang mit dem für eine Bildaufzeichnung zur Verfügung stehenden Belichtungsspielraum  $\Delta \lg H$  (vgl. **Abbildung 34**).

Eine flache Gradation ermöglicht einen großen Belichtungsspielraum, eine steile Gradation bedingt einen relativ kleinen Belichtungsspielraum. Der Belichtungsspielraum des Materials sollte mindestens den Helligkeitsumfang des Motivs abdecken und darüber hinaus noch Sicherheit gegen Über- oder Unterbelichtung bieten; deshalb ist ein möglichst großer Belichtungsspielraum erwünscht, insbesondere für ein Aufnahmемaterial.

In der folgenden Tabelle sind typische Gradationswerte einiger Fotomaterialien zusammengestellt:

Schwarzweißfilm .....	0,7
Colornegativfilm .....	0,7
Colorumkehrfilm .....	1,4
Schwarzweißpapier .....	1,3 – 3,8
Colornegativpapier .....	2,0
Colorumkehrpapier .....	1,0

Die Negativfilme (Schwarzweiß und Color) haben mit  $\gamma = 0,7$  eine relativ flache Gradation und damit einen großen Belichtungsspielraum. Das Negativpapier benötigt eine deutlich steilere Gradation als der Film und hat damit einen entsprechend kleineren Belichtungsspielraum, so daß bei Motiven mit großem Helligkeitsumfang zwar der Film alle Informationen aufzeichnet, das Papier aber nur einen Teil wiedergeben kann (siehe Kontrastausgleich durch digitale Maskierung, Seite 63).

Die Gradation einer Kopie ergibt sich als Produkt aus Film- und Papiergradation (Goldberg-Regel):

$$\gamma_{\text{Film}} \cdot \gamma_{\text{Papier}} = \gamma_{\text{Kopie}}$$

Für den Fall des Color-Negativ/Positiv-Systems gilt also für die Bildgradation (CN = Colornegativ):

$$\gamma_{\text{CN-Film}} \cdot \gamma_{\text{CN-Papier}} = 0,7 \cdot 2,0 = 1,4$$

Der Colorumkehrfilm (Diafilm) weist direkt die erforderliche Bildgradation von  $\gamma = 1,4$  auf. Diese höhere Gradation bedingt, daß der Colorumkehr-

film (für Diapositive) einen kleineren Belichtungsspielraum besitzt als der Colornegativfilm (für Papierabzüge).

## Körnigkeit

3.3.3

Bei zunehmender Vergrößerung eines Bildes tritt seine Mikrostruktur immer mehr zutage (hierzu siehe **Abbildung 35**). Diese Fluktuation der Dichte im Mikrobereich wird als Körnigkeit bezeichnet. Die Körnigkeit des optischen Bildsignals (optische

Dichte) ist vollkommen äquivalent dem Rauschen eines elektronischen Signals. Beides sind statistische Störgrößen, die mit zunehmender Verstärkung ansteigen.

### Versuch 4 zur Demonstration der Körnigkeit

Ein Schwarzweiß-Negativ (Kleinbild 24 x 36 mm; Motiv mit unstrukturierten Flächen) wird – oder Teile davon werden – bei verschiedenen Vergrößerungsmaßstäben (x 5, x 10, x 20) auf Fotopapier kopiert (resultierende Bildgrößen: 12 x 18 cm, 24 x 36 cm, 48 x 72 cm).

Die Mikrostruktur des bildaufbauenden Silbers wird mit zunehmender Vergrößerung deutlicher.

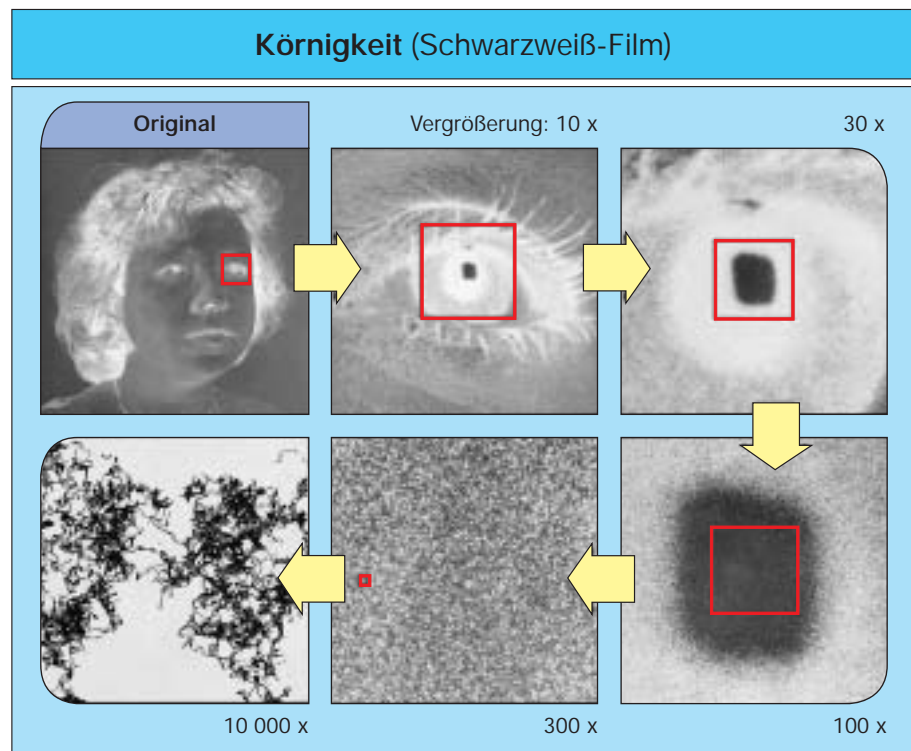


Abbildung 35  
(Folie 22)

Die Körnigkeit ist zwar abhängig von der Größe der entwickelten Silberhalogenid-Kristalle, die sichtbare Körnigkeitsstruktur ist aber wesentlich gröber, als es dem entwickelten Einzelkristall entspricht (bzw. der einzelnen Farbwolke, die im Farbfilm in der Nachbarschaft eines Kristalls entsteht).

Die Körnigkeit ist bedingt durch die lokalen statistischen Schwankungen von Kristallzahl, Kristallgröße und Kristallempfindlichkeit.

Eine objektive Meßmethode für die Körnigkeit beruht auf der mikroskopischen Dichtemessung mit sehr kleiner Meßblende ( $\varnothing$  48  $\mu\text{m}$ ). Aus den registrierten Dichteschwankungen wird als Maß für die Körnigkeit die Standardabweichung  $\sigma_D$  berechnet, d. h. die mittlere Abweichung vom Mittelwert (in den Datenblättern vielfach als rms-Körnigkeit bezeichnet [rms = root-mean-square]; siehe **Abbildung 36**). Um eine gute (d. h. geringe) Körnig-

keit zu erreichen, werden möglichst kleine Silberhalogenid-Kristalle verwendet (begrenzt durch die mit kleinerer Kristallgröße abnehmende Empfindlichkeit), oder es wird mit geeigneten Maßnahmen die Durchentwicklung der einzelnen Kristalle verhindert (siehe DIR-Kuppler auf Seite 29).

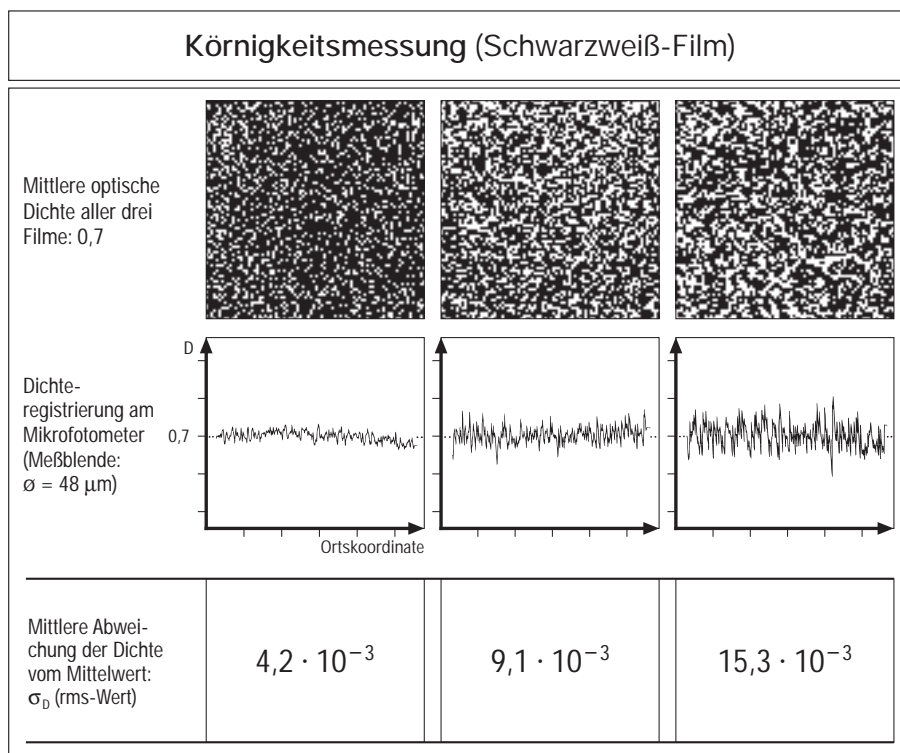


Abbildung 36  
(Kopiervorlage 14)

## Schärfe

### 3.3.4

Die Schärfe begrenzt ebenso wie die Körnigkeit die Detailerkennbarkeit in einer fotografischen Aufnahme; die Schärfe stellt aber eine von der Körnigkeit unabhängige Eigenschaft dar, die auch anderen Einflußfaktoren unterliegt.

Die Wiedergabe einer aufbelichteten Kante charakterisiert die Schärfeleistung eines Materials. Infolge von Streuung des einfallenden Lichts an den Silberhalogenid-Kristallen gelangt Licht auch in den Schattenbereich der Kante, was die Kante abrundet und eine Schärfeminderung bedeutet (siehe **Abbildung 37**/links).

Als Kennlinie für die Schärfeeigenschaften eines Materials ist heute die Modulationsübertragungsfunktion (MÜF) gebräuchlich und wird in den Datenblättern angegeben. Für die Messung der MÜF werden Raster einer bestimmten Modulation  $m$

(Amplitude) mit unterschiedlichen Ortsfrequenzen  $\nu$  (Linien pro Millimeter) aufbelichtet. Die von der fotografischen Schicht tatsächlich aufgezeichnete Modulation  $m'$  ist abhängig von der Ortsfrequenz und im allgemeinen kleiner als  $m$ . Aus dem Verhältnis der aufgezeichneten Modulation zur aufbelichteten Modulation ergibt sich der Modulationsübertragungsfaktor  $M$  für eine bestimmte Ortsfrequenz:

$$\frac{m'}{m} = M = f(\nu)$$

Dieser Modulationsübertragungsfaktor wird in der MÜF als Funktion der Ortsfrequenz dargestellt (siehe **Abbildung 38**).

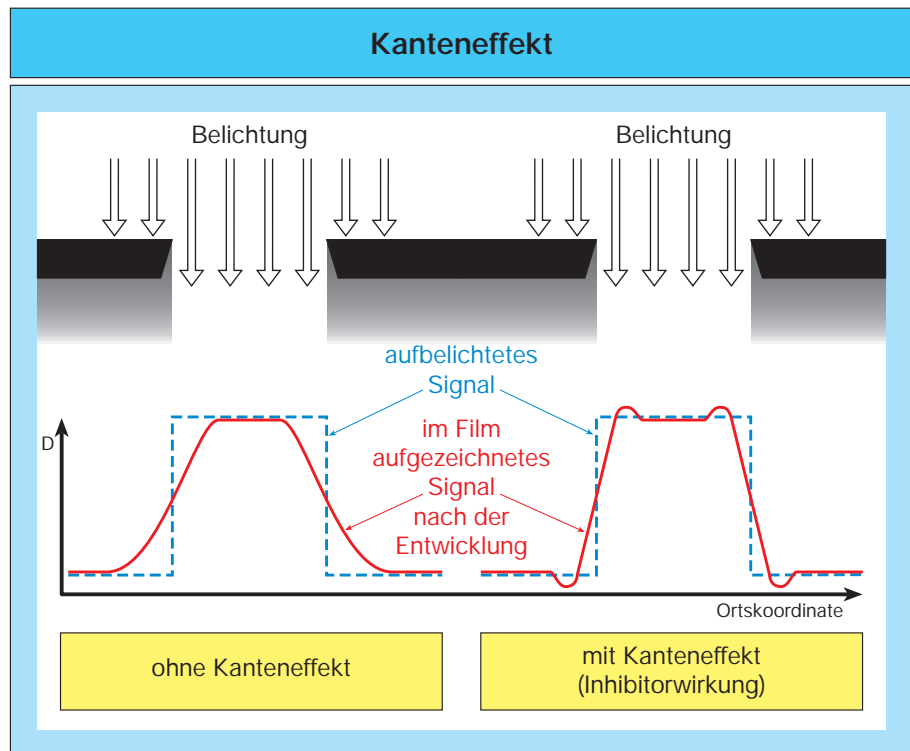


Abbildung 37  
(Folie 23)

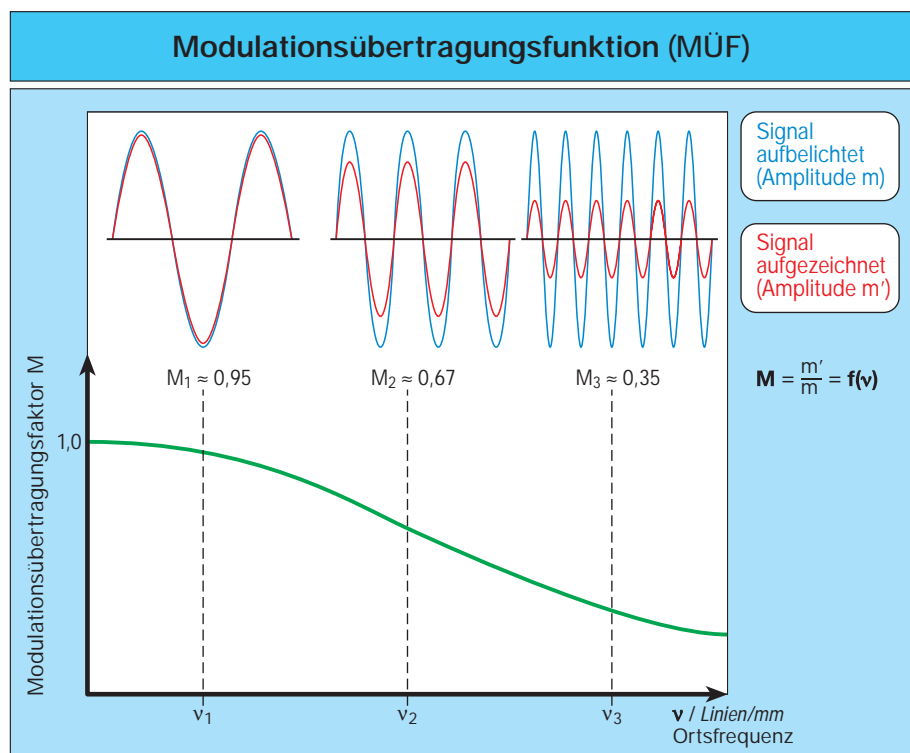


Abbildung 38  
(Folie 24)

Ein anderes Maß für die Schärfe ist die „Auflösung“ (auch „Auflösungsvermögen“), mit der die Fähigkeit eines optischen Gerätes, z. B. eines Fernglases, bezeichnet wird, zwei nahe beieinander liegende Gegenstandspunkte noch als unterscheidbare Bildpunkte abzubilden. (Definition der Auflösung: Kehrwert des Abstandes, den zwei Ge-

genstandspunkte mindestens haben müssen, um als getrennte Bildpunkte erkannt zu werden; Zusammenhang mit der MÜF: die Auflösung korreliert mit der Ortsfrequenz, bei der  $M = 0,5$  ist.)

Um eine hohe Schärfe im Material zu erreichen, muß zum einen die Lichtstreuung an den Silberha-

logenid-Kristallen bei der Belichtung minimiert werden (u. a. dünne Schichten, geringer Silberauftrag), zum anderen können sogenannte Kanteneffekte bei der Entwicklung ausgenutzt werden. An Kanten treten bei der Entwicklung Konzentrationsunterschiede und damit Diffusionseffekte auf. Wenn bei der Entwicklung entwicklungs-hemmende Verbindungen, sogenannte Inhibitoren, frei werden, so diffundieren diese bevorzugt aus den Bereichen hoher Dichte (viel Entwicklungshemmer!) in die Bereiche niedriger Dichte (wenig Ent-

wicklungshemmer!). Dadurch ergibt sich an einer Kante eine lokale Dichteerhöhung im stärker belichteten Teil und eine Dichteer-niedrigung im weniger belichteten Teil, wie Abbildung 37/rechts zeigt. Dieser Kanteneffekt verbessert den Schärf-eindruck (und die Modulationsübertragungsfunktion). Ohne die bewußte Ausnutzung solcher chemischer Inhibierungseffekte wären die modernen Farbfilme, die hohe Empfindlichkeit und ausgezeichnete Bildqualität vereinen, nicht denkbar (siehe auch DIR-Kuppler auf Seite 29).

## Farbwiedergabe

### 3.3.5

Farben lassen sich eindeutig durch die Angabe von drei Größen beschreiben. Im technischen Bereich werden Farben durch die Angabe der RGB-Werte charakterisiert, das sind die Helligkeiten hinter definierten Rot-, Grün- und Blaufiltern.

finiert. Meistens werden statt der Polarkoordinaten  $\alpha$  und  $S$  die kartesischen Koordinaten  $a$  (Farbwert auf Rot-Grün-Achse) und  $b$  (Farbwert auf Gelb-Blau-Achse) angegeben.

Im Bereich der Bildfotografie – und in dem der Farbempfindung allgemein – werden Farben bevorzugt im CIE-Lab-System beschrieben (CIE: Commission Internationale de l'Eclairage). Die Definition des Lab-Systems berücksichtigt die visuelle Wahrnehmbarkeit von Farben, d. h. gleiche Abstände im Lab-Raum sollen zu etwa gleichen empfindungsmäßigen Farbunterschieden führen.

Die Farbkoordinaten  $L$ ,  $a$ ,  $b$  können mit geeigneten Meßgeräten direkt bestimmt werden. Ein Vergleich der Koordinaten der reproduzierten Farben mit den Koordinaten der Originalfarben charakterisiert die Farbwiedergabe eines fotografischen Verfahrens (siehe Abbildung 39).

In diesem Farbraum ist ein Farbpunkt anschaulich durch Helligkeit ( $L$ ), Farbton (Winkel  $\alpha$ ) und Farbsättigung (Abstand  $S$  von Helligkeitsachse) de-

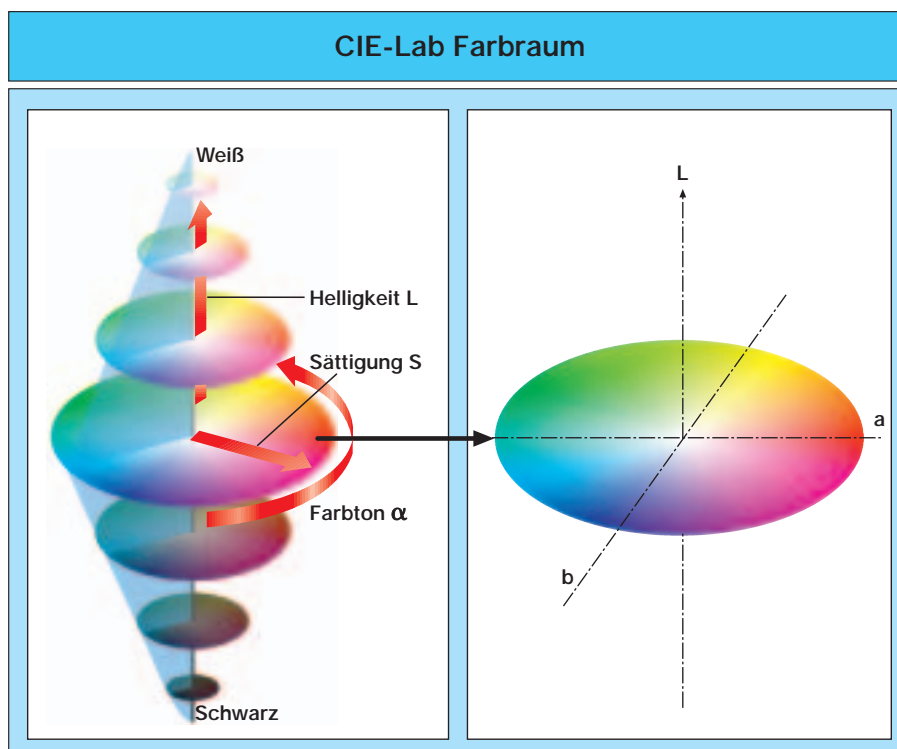


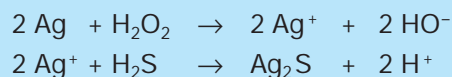
Abbildung 39  
(Folie 25)

Die Forderung nach Stabilität ist für so komplexe chemische Produkte wie Colorfilm und Colorpapier eine besondere Herausforderung. Teilaspekte sind die Lagerstabilität im unbelichteten und im belichteten Zustand, die Toleranz gegen kleine Abweichungen in den Verarbeitungsprozessen, die mechanische Stabilität und schließlich die Bildstabilität – und dies jeweils für Film und Papier. Auf die Bildstabilität soll näher eingegangen werden.

#### Bildstabilität von Schwarzweißfotos

Das Bild ist in Form von fein verteiltem, metallischem Silber niedergelegt (vgl. Abbildung 15 auf Seite 17). Umwelteinflüsse können die Bildsilberstabilität beeinträchtigen.

Von Ausstellungsbildern an verkehrsreichen Straßen, aber auch in archivierten Sammlungen sind Stabilitätsprobleme bekannt (Lochfraß; punktförmige oder spiegelnde Silberabscheidungen; Verbräunung des Bildtons). Ursache dafür sind in der Regel oxidierende Substanzen (z. B.  $H_2O_2$ ) aus Abgasen bzw. aus Folien, Lacken, Preßspanplatten oder Sprays, die das Bildsilber oxidieren und diffusionsfähig machen. In Gegenwart von Schwefelwasserstoff wird das oxidierte Bildsilber nach einer gewissen Diffusionsstrecke als Silbersulfid wieder diffusionsfest ausgefällt:



Hilfe bringt eine Beseitigung der oxidierenden Gase, Einbau von Antioxidantien in das Fotomaterial seitens der Hersteller oder eine Behandlung der Fotografien mit speziellen Bildsilber-Stabilisatoren.

#### Bildstabilität von Farbfotos

In chromogen entwickelten Farbfotografien formen organische Farbstoffe das Bild. Die Dunkelstabilität der Farbstoffe hängt in hohem Maße von den Details der chemischen Struktur ab. Ein besonderer Schutz ist durch die Einbettung der Kuppler und damit auch der Farbstoffe in winzige Ölbildnertropfen gegeben. Die Dunkelstabilität von Farbfotos ist zwar geringer als die von Schwarzweißfotos, jedoch ist die Hundert-Jahre-Marke in der Lagerstabilität erreicht worden – ein ganz beträchtlicher Fortschritt.

In Anwesenheit von Licht wird die Bildstabilität entscheidend durch die Lichteinwirkung bestimmt. Dabei übt Sauerstoff einen starken Einfluß aus. Auch die Lichtbeständigkeit der Colorpapiere konnte beträchtlich gesteigert werden.

## Herstellung fotografischer Materialien

### 3.4

Nicht nur Chemie und Leistung der fotografischen Materialien haben in den letzten Jahrzehnten beträchtliche Fortschritte gemacht, sondern auch die Fertigungstechnologie.

Die wichtigsten Schritte bei der Fabrikation von fotografischen Filmen und Papieren sind die Emulsionsherstellung, der Beguß (Beschichtung) und

die Aufarbeitung. Alle diese Schritte müssen bei Rotlicht oder in völliger Dunkelheit durchgeführt werden.

Die wichtigsten Einsatzstoffe sind Polyester, Celluloseacetat oder Papier für die Unterlage – Silber, Gelatine und spezielle organische Chemikalien für die Emulsionen.

## Rohstoff Silber

### 3.4.1

Die fotografische Industrie ist neben der elektronischen Industrie und der Schmuckwarenindustrie der größte Verbraucher von Silber.

Wegen des relativ hohen Preises dieses Edelmetalls ist die fotografische Industrie seit langem bemüht, möglichst wenig Silber einzusetzen und das eingesetzte Silber nach Möglichkeit zurückzugewinnen (siehe Abbildung 40 auf nächster Seite).

Zudem sind in den letzten Jahren aus ökologischen Gründen strenge gesetzliche Bestimmungen eingeführt worden, die das Einleiten silberhaltiger Abwässer in Fließgewässer untersagen. Diese Situation hat Verarbeitungsverfahren hervorgebracht, bei denen die Bäder im Kreislauf geführt werden und Abfälle entweder einer geregelten Entsorgung oder – im Falle des Silbers – der Wiederverwertung zugeführt werden.

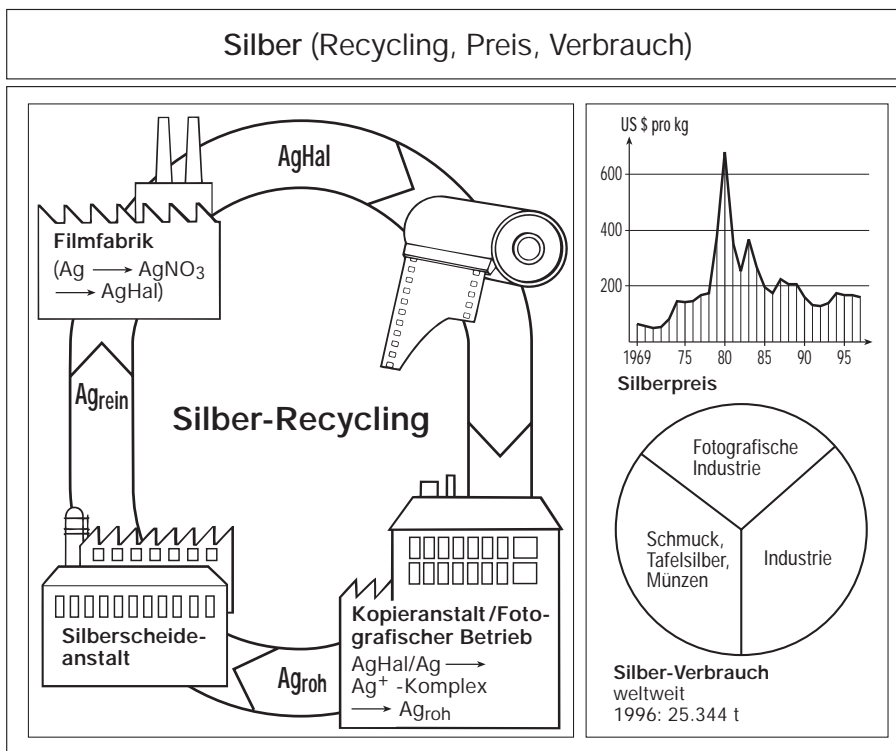


Abbildung 40  
(Kopiervorlage 15)

Die großen Kopieranstalten führen die Entsilberung der Bäder selbst durch, während die kleinen Betriebe diese Aufgabe Entsorgungsunternehmen übertragen. Das gewonnene Rohsilber wird dann an eine Silberscheideanstalt verkauft, die daraus wieder hochreines, fotografisch einsetzbares Silber herstellt.

Aus den farbfotografischen Materialien werden praktisch 100 Prozent des eingesetzten Silbers zurückgewonnen (Ausnahme: Sofortbild). In der

Schwarzweißfotografie wird das Bild aus feinsten Partikeln metallischen Silbers aufgebaut, es kann also nur der für den Bildaufbau ungenutzte Teil zurückgewonnen werden. Da bei den Schwarzweiß-Materialien der überwiegende Teil des eingesetzten Silbers für Röntgenfilme verwendet wird und diese nach einer gesetzlich vorgeschriebenen Zeit der Rückgewinnung zugeführt werden, durchläuft also auch bei der Schwarzweißfotografie der weitaus größte Teil des eingesetzten Silbers, wenn auch verzögert, einen Rohstoffkreislauf.

## Emulsionsherstellung

3.4.2

Unter „fotografischer Emulsion“ wird das System aus lichtempfindlichen Silberhalogenid-Mikrokristallen und Gelatine als Bindemittel verstanden. Gelatine wird aus tierischem Kollagen (Gerüstsubstanz in Knochen und Häuten) hergestellt. Seiner chemischen Natur nach ist Gelatine ein Polypeptid, das heißt ein aus Aminosäuren aufgebautes Makromolekül mit einer Molmasse von  $10^5$  bis  $10^6$  g/mol.

Die Silberhalogenid-Mikrokristalle können in großer Vielfalt bezüglich Größe, Form und Zusammensetzung hergestellt werden. Dennoch sind fast allen Emulsionstypen drei Verfahrensschritte gemeinsam:

- Kristallerzeugung
- Entfernen der löslichen Salze
- Oberflächenbehandlung der Kristalle

### Kristallerzeugung

Durch das Zusammenführen von wässrigen Silbernitrat- und Alkalihalogenid-Lösungen unter intensivem Rühren kommt es infolge der geringen Löslichkeit der Silberhalogenide zur Übersättigung und zur spontanen Bildung von Mikrokristallen:



Die Fällung erfolgt in wässriger Gelatinelösung, um die Koagulation der gebildeten Silberhalogenidkristalle zu vermeiden. Je nach den gewählten Bedingungen können sehr unterschiedliche Kristallformen erhalten werden. Emulsionskristalle besonders einheitlicher Form und Größe lassen

sich herstellen, wenn die Silbernitrat- und die Halogenid-Lösungen gleichzeitig und nahezu äquimolar zudosiert werden und die Fällung unter Konstanzhaltung des  $pAg$ -Wertes<sup>5</sup> abläuft.

Die anfänglich entstandenen Kristalle sind jedoch nicht alle stabil, sondern bei weiterem Rühren lösen sich vor allem die kleineren Kristalle wieder

auf, um auf den größeren neu aufzuwachsen. Dieser Vorgang beruht auf der höheren Löslichkeit kleiner Teilchen im Vergleich zur Löslichkeit großer Teilchen. Insgesamt nehmen während dieser Rührphase (der sogenannten „physikalischen Reifung“) die mittlere Kristallgröße und die Verteilungsbreite der Kristallgröße zu, die Anzahl der Kristalle nimmt ab (siehe **Abbildung 41** und **Abbildung 42**).

<sup>5</sup>  $pAg$ -Wert: Die Definition entspricht der des  $pH$ -Werts. (Der  $pAg$ -Wert charakterisiert die  $Ag^+$ -Ionenkonzentration und ist über eine ionenselektive Elektrode meß- und damit steuerbar.)

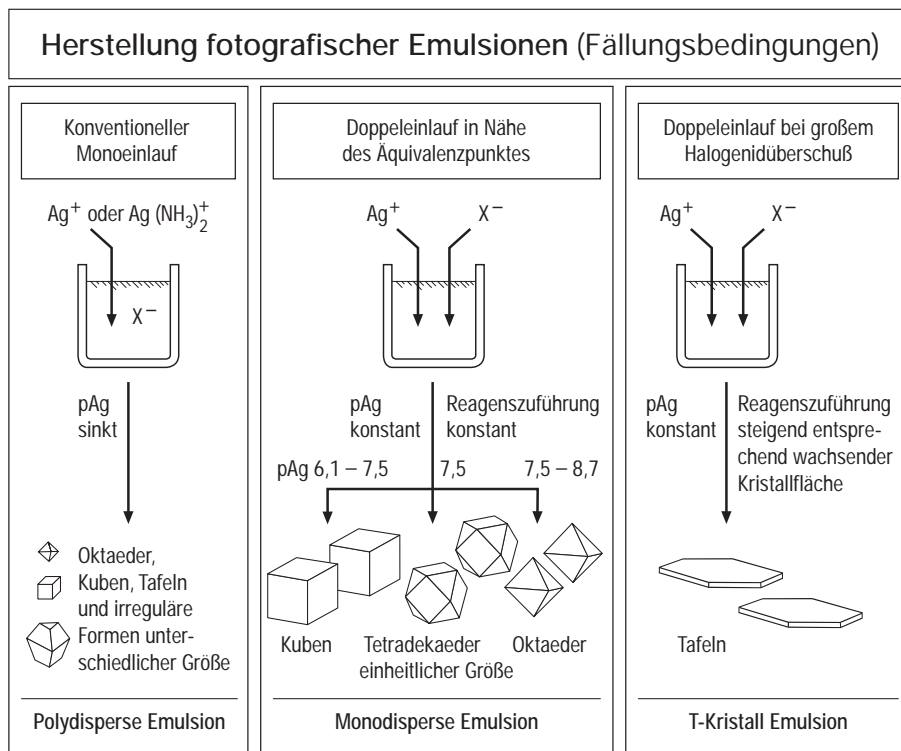


Abbildung 41  
(Kopiervorlage 16)

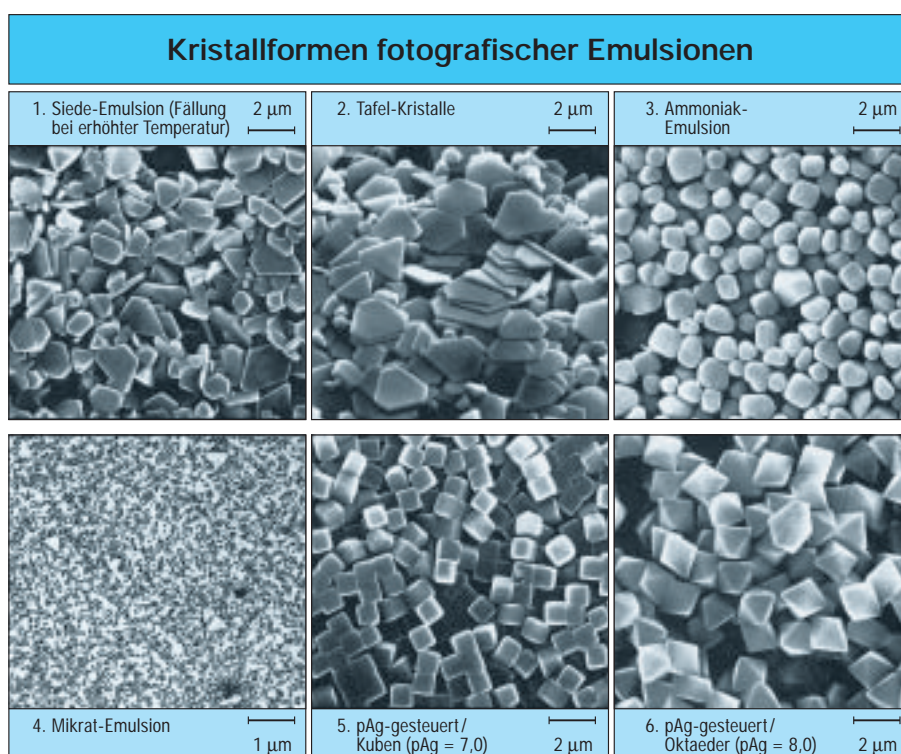


Abbildung 42  
(Folie 26)

Großtechnisch werden fotografische Emulsionen in Kesseln von einigen tausend Litern Inhalt hergestellt. Exakte Temperierung, intensives Rühren, Dosierregelungen für die Reaktionslösungen sowie pH- und pAg-Elektroden sind notwendige Ausrüstungen der Fällungsanlagen, um die unterschiedlichen Emulsionsrezepte fahren zu können.

### Entfernung der löslichen Salze

Die nach der Fällung in der Emulsion in hoher Konzentration vorhandenen löslichen Salze, wie zum Beispiel  $\text{KNO}_3$ , müssen vor der weiteren Verarbeitung entfernt werden, da sie nach Beguß und Trocknung auskristallisieren und sowohl fotografisch stören als auch die Brüchigkeit erhöhen würden.

Zur Entsalzung wird die Gelatine durch Reaktion oder durch Zusatz geeigneter organischer Verbindungen so verändert, daß sie im Säuren schwer löslich wird, ausflockt und dabei die in ihr dispergierten Silberhalogenid-Mikrokristalle mitreißt. Nach mehrmaligem Waschen und Dekantieren wird der flockige Niederschlag durch pH-Erhöhung wieder in kolloidale Lösung gebracht.

Eine andere Möglichkeit zur Entsalzung der Emulsionen bietet die Ultrafiltration. Vorteilhaft ist bei diesem Verfahren die Möglichkeit, nur in der flüssigen Phase arbeiten und schon während der Fällung entsalzen zu können.

### Oberflächenbehandlung

Die fotografischen Emulsionen zeigen nach der Fällung und Entsalzung nur geringe Empfindlichkeit. Der Grund dafür ist, daß bei Belichtung das latente Bild sich noch überall im Kristall, vorzugsweise an den stets vorhandenen Gitterdefekten im Inneren bildet. Um das latente Bild an der Kristalloberfläche entstehen und damit entwickelbar machen zu lassen, muß diese chemisch behandelt werden. Diese Oberflächenbehandlung wird als chemische Reifung oder chemische Sensibilisierung bezeichnet.

Als wirkungsvolle Substanz hat sich hierfür die Kombination von Thiosulfat mit Gold(I)-thiocyanat-Komplexen bewährt. Diese „Gold-Schwefel-Reifung“ führt zu Reifkeimen der Form  $\text{Ag}_2$ ,  $\text{Ag}_2\text{S}$ ,  $\text{AgAuS}$  und  $\text{Au}_2\text{S}$ , die selbst nicht entwickelbar sind, an denen aber das latente Bild bevorzugt entsteht.

Die Wirksamkeit der chemischen Reifung hängt außer von den Reifmittelmengen und der Dauer auch von der Temperatur, dem pH-Wert und dem

pAg-Wert ab. Die Empfindlichkeit wird im Verlauf der chemischen Reifung um etwa das Zehn- bis 50fache gesteigert. Begrenzender Faktor ist der bei ausgedehnter Reifung auftretende und fotografisch störende Schleier. Sein Auftreten läßt darauf schließen, daß an einigen Kristallen bereits zu große, schon ohne Belichtung entwickelbare Keime entstanden sind.

### Steuerung der Emulsionseigenschaften

Die unterschiedlichen fotografischen Produkte erfordern eine Vielzahl von Emulsionen mit den unterschiedlichsten Eigenschaften.

Die Empfindlichkeit einer Emulsion ist in erster Linie eine Funktion der Kristallgröße. Dies ist leicht verständlich, da größere Kristalle aufgrund ihres größeren Einfangquerschnittes für Photonen zur Ausbildung eines Latentbildkeimes eine vergleichsweise geringere Belichtung benötigen als kleinere Kristalle. Außerdem kann pro Latentbildkeim mehr Silber entwickelt werden, d. h. es ist eine höhere Verstärkung möglich.

Eine Einteilung der Emulsionen nach Empfindlichkeiten ist daher weitgehend eine Einstufung nach Kristallgrößen. Mit der Kristallgröße nimmt aber nicht nur die Empfindlichkeit, sondern leider auch die im Bild störende Körnigkeit des entwickelten Silbers zu. Es besteht daher fast immer die Forderung, die gewünschte Empfindlichkeit mit kleinstmöglichen Kristallen zu erreichen.

Mikrat-Emulsionen (auch Lippmann-Emulsionen genannt) enthalten sehr kleine Kristalle ( $\leq 0.01 \mu\text{m}$ ); solche Emulsionen finden z. B. Verwendung für extrem feinkörnige und scharfe mikrografische Fotoplatten. Für spektral-sensibilisierte Emulsionen (hierzu siehe Kapitel 3.1.2) bieten die in den Abbildungen 41 und 42 gezeigten Tafelkristalle (T-Kristalle) einen Vorteil.

Die durch Adsorption von Farbstoffen bewirkte spektral-sensibilisierte Empfindlichkeit (für grünes oder rotes Licht) hängt in anderer Weise von der Kristallgröße ab als die Eigenempfindlichkeit der Silberhalogenid-Kristalle (für blaues Licht). Während die Eigenempfindlichkeit in erster Näherung proportional zum Kristallvolumen ansteigt, nimmt die spektrale Empfindlichkeit nur proportional zur Oberfläche zu, auf der die sensibilisierenden Farbstoffe adsorbiert sind. Daher ist die Form der flachen T-Kristalle mit großer Oberfläche bei geringem Volumen zur Erzielung hoher spektraler Empfindlichkeit (bei geringer Körnigkeit) optimal.

Auch die Halogenid-Zusammensetzung spielt für eine gute Empfindlichkeits/Körnigkeits-Relation

eine wichtige Rolle. Beste Ergebnisse werden mit AgBr/AgI-Mischkristallen erzielt, wobei es sehr darauf ankommt, wie das Iodid – in der Regel weniger als 15 Prozent – in die Kristalle eingebaut wird, zum Beispiel gleichförmig über den Kristall verteilt oder als Zone in einem schalenförmigen Aufbau.

Die Halogenid-Zusammensetzung beeinflusst auch die Entwicklungskinetik der Emulsionen. Ein AgI-Anteil verlangsamt die Entwicklung, ein AgCl-An-

teil beschleunigt die Entwicklungsgeschwindigkeit von AgBr-Emulsionen.

Die Gradation der Dichtekurve wird weitgehend durch die Korngrößenverteilung bestimmt. Eine breite Verteilung führt zu einer flachen Gradation und vice versa.

## Beguß

## 3.4.3

Früher wurde jede Schicht im Tauchverfahren auf die Trägerfolie aufgebracht. Die Herstellung moderner Filme mit zwölf und mehr Schichten wäre nach diesem Verfahren sehr aufwendig.

Ein enormer Fortschritt ist mit dem Kaskadengießer erreicht worden, bei dem gleichzeitig mehrere Schichten vergossen werden können. Das Schema für einen Dreischichtenguß zeigt **Abbildung 43**.

Die Begußlösungen werden durch Schlitze auf eine schräge Ablaufebene gepumpt, auf der sie infolge der Schwerkraft frei fließend nach unten laufen. Jede nachfolgende Lösung legt sich laminar über

die vorausfließende Lösung, ohne daß sich die Lösungen vermischen. Am unteren Ende der Kaskadenablauffläche bewegt sich die zu begießende Trägerfolie mit hoher Geschwindigkeit in geringem Abstand an der Gießerkante vorbei. Durch Unterdruck wird die Lösung etwas in den Zwischenraum hineingezogen, dadurch fest an die schnelllaufende Trägerfolie gepreßt und von ihr mitgenommen. Durch die viel höhere Geschwindigkeit der Trägerfolie gegenüber der Ablaufgeschwindigkeit der Lösung werden die viskosen Lösungen verstreckt (bis zu 50fach). Damit ist es möglich, ein Paket dünner Schichten (Trockendicke der Einzelschicht bis zu  $0,5 \mu\text{m}$ ) bei hohen Gießgeschwindigkeiten zu gießen.

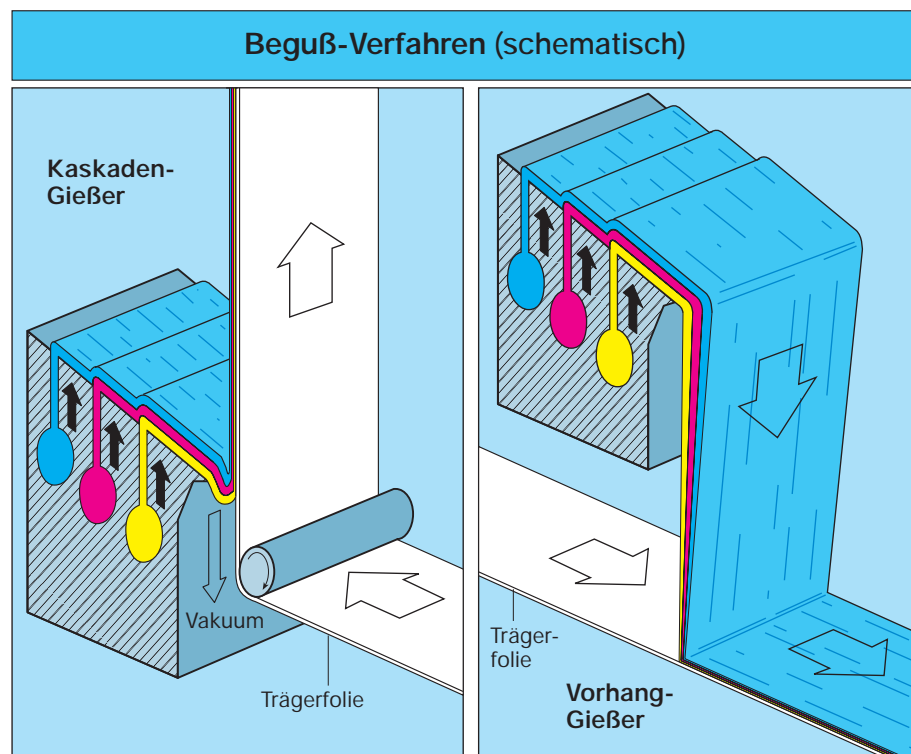


Abbildung 43  
(Folie 27)

Eine Weiterentwicklung des Kaskadengießers ist der Vorhanggießer, mit dem noch höhere Begußgeschwindigkeiten erreicht werden.

Die beiden letztgenannten Verfahren sind Dosierverfahren, bei denen die pro Zeiteinheit zugeführte Gußmenge über Dosierpumpen genau regelbar ist. Unmittelbar nach dem Gießer schließt sich eine Kühlstrecke an, die die viskosen Lösungen zum Erstarren bringt. Nach dieser Verfestigung beginnt das Eindicken durch Trocknung. Relativ trockene

warme Luft nimmt das in der Schicht befindliche Wasser auf. Dieser Vorgang muß schonend, d. h. bei nicht zu hohen Temperaturen erfolgen, da die mechanischen Eigenschaften des Bindemittels Gelatine von den gewählten Trocknungsbedingungen abhängig sind.

---

## Anwendungsgebiete

3.5

In den vorhergehenden Kapiteln sind unter dem Blickwinkel der Bildfotografie bereits die wichtigsten Typen der fotografischen Materialien beschrieben worden (siehe Stichwörter „Film“ und „Papier“).

In den folgenden Abschnitten werden die technischen Besonderheiten einiger weiterer, spezieller Materialien herausgestellt.

Die vielfältige Palette der fotografischen Produkte demonstriert in ihrer Gesamtheit das große Potential der Silberhalogenid-Technologie und zugleich den Erfindungsreichtum der Menschen, die diese Verfahren entwickelt haben.

---

## Bildfotografie

3.5.1

Hier sollen noch das in 1996 eingeführte Filmsystem APS und spezielle Verfahren der Schwarzweißfotografie vorgestellt werden.

### Advanced Photo System (APS)

Die wesentlichen technischen Merkmale dieses fotografischen Systems sind:

- ein (gegenüber Kleinbild 24 x 36 mm) kleineres Filmformat von 17 x 30 mm,
- eine magnetische Rückschicht und
- eine neue Spule bzw. Kassette.

Das kleinere Filmformat trägt dem Umstand Rechnung, daß die hohe Qualität der modernen Filme auch bei stärkerer Vergrößerung noch eine ausreichende Printqualität (Körnigkeit, Schärfe) gewährleistet.

Die dünne, transparente magnetische Rückschicht soll eine Kommunikation aller an der Bildentstehung beteiligten Systemkomponenten ermöglichen: Filmhersteller, Kamera, Benutzer, Printer. Beispielsweise kann der Filmhersteller die Filmempfindlichkeit aufzeichnen, die von der Kamera gelesen wird; die Kamera kann Blitzverwendung bei einem bestimmten Negativ registrieren, was wiederum zur Steuerung des Printers benutzt wird; der Benutzer kann – pro Aufnahme – den Bildaus-

schnitt und die Vergrößerung sowie einen kurzen Text für die Printrückseite vorgeben.

Die APS-Kassette ohne heraushängende Filmzunge erlaubt ein leichtes Einlegen in die Kamera, oder – gefüllt mit dem entwickelten Film – in einen Filmscanner. Die APS-Kassette stellt somit einen Brückenkopf dar für eine Verbindung in die digitale Welt (siehe **Abbildung 44**).

### Chromogener Schwarzweißfilm

Die „Farbe“ Schwarz beziehungsweise Grau wird in diesem Film durch eine Mischung von Farbstoffen gebildet, die nach dem chromogenen Verfahren wie in einem Colornegativfilm erzeugt werden. Der Film enthält nur eine Schicht, die panchromatisch sensibilisiert ist und in Abmischung die drei chromogenen Kuppler (Gelb-, Purpur-, Blaugrünkuppler) enthält.

Bei richtigem Mischungsverhältnis bilden die nach Colorverarbeitung entstehenden Farbstoffe ein graues Bild. Bei einem chromogenen Schwarzweißfilm können die Vorteile der DIR-Kuppler (siehe Seite 29) für Körnigkeit und Schärfe auch für einen Schwarzweißfilm genutzt werden.

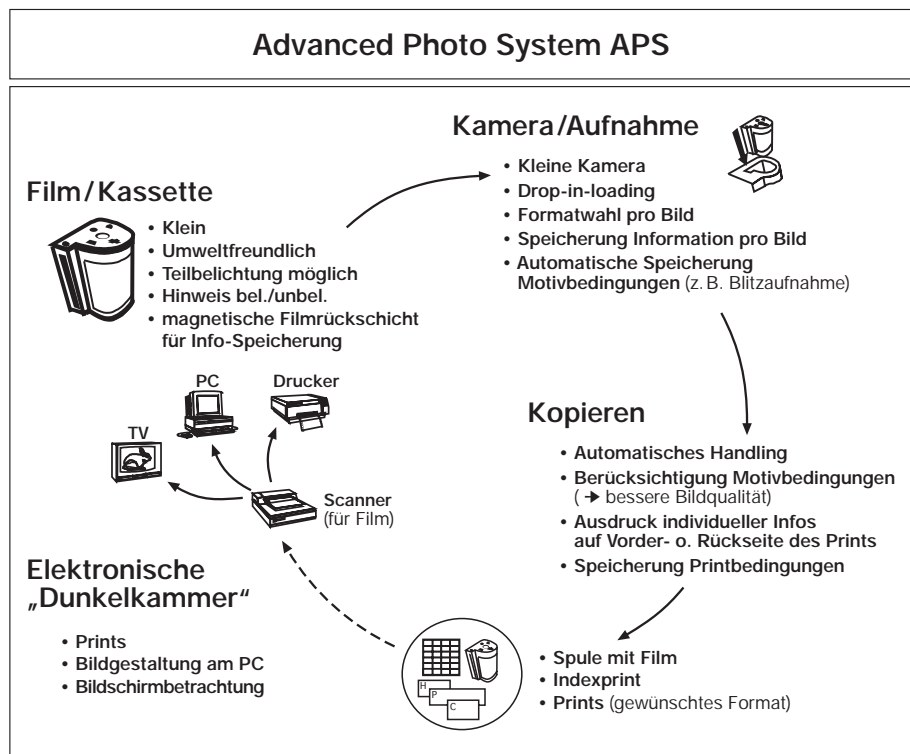


Abbildung 44  
(Kopiervorlage 17)

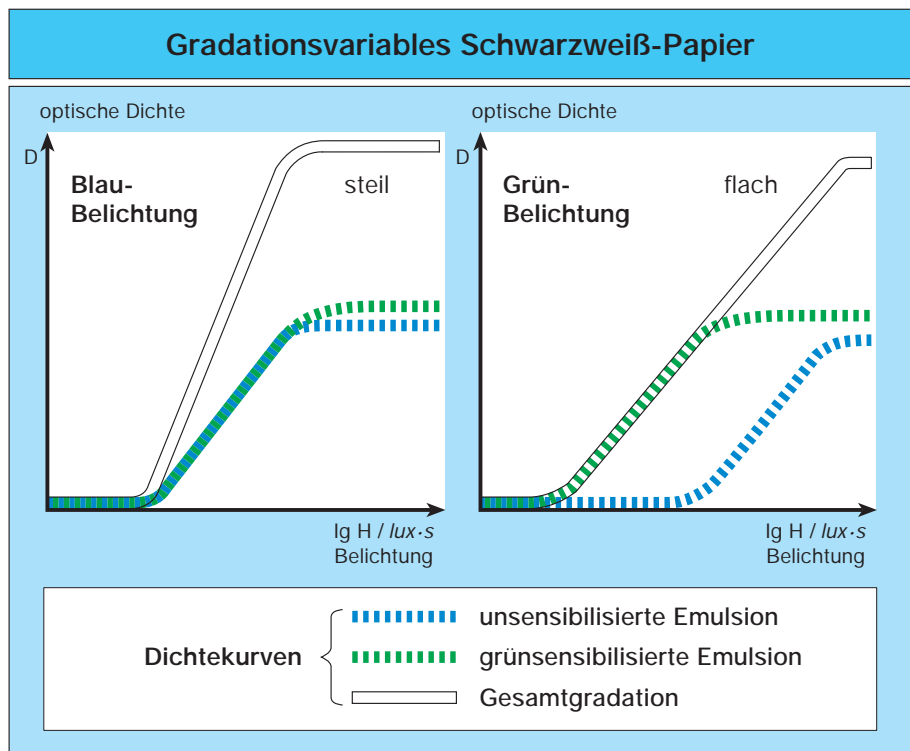


Abbildung 45  
(Folie 28)

Weitere Vorteile liegen darin, daß für die Verarbeitung der existente Verarbeitungsprozeß für Colornegativfilm genutzt werden kann, es also im Kopierbetrieb keines separaten Schwarzweißfilm-Prozesses bedarf, und daß kein Silber im Film bleibt (Beispiel: 400 ASA Filme *XP1* von *Ilford* und *Sepia* von *Konica*).

#### Gradationsvariables Schwarzweiß-Papier

Die Schwarzweiß-Papiere werden in mehreren Gradationen von „extrem weich“ ( $\gamma = 1,3$ ) bis „extrem hart“ ( $\gamma = 3,8$ ) angeboten. Beim gradationsvariablen Papier kann die Gradation über die Farbe des Kopierlichtes im Bereich von  $\gamma = 1,4$  bis  $\gamma = 3,6$

gesteuert werden, so daß ein einziges Papier für den gesamten Gradationsbereich verwendet werden kann. Ein solches Papier enthält in Abmischung eine unsensibilisierte Emulsion (blauempfindlich; sehr wenig grünempfindlich) und eine grünsensibilisierte Emulsion (blau- und grünemp-

findlich). Je nach dem Verhältnis von blauem und grünem Licht beim Kopieren werden die beiden Emulsionsteile unterschiedlich angesprochen, wodurch sich insgesamt Dichtekurven mit unterschiedlichen Gradationen ergeben (siehe **Abbildung 45** auf vorhergehender Seite).

## Reprografie \*

3.5.2

Mit dem Begriff „Reprografie“ wird die technische Herstellung von Reproduktionen im weitesten Sinn bezeichnet. Dazu gehören

- der **Druck**,
- das **Kopieren** und
- die **Photolithografie**.

Silberfotografische und andere chemische Materialien (siehe Kapitel 2.2) haben in diesen Bereichen weite Anwendungsfelder, werden aber in zunehmendem Maße durch physikalische Verfahren ersetzt (siehe **Abbildung 46**).

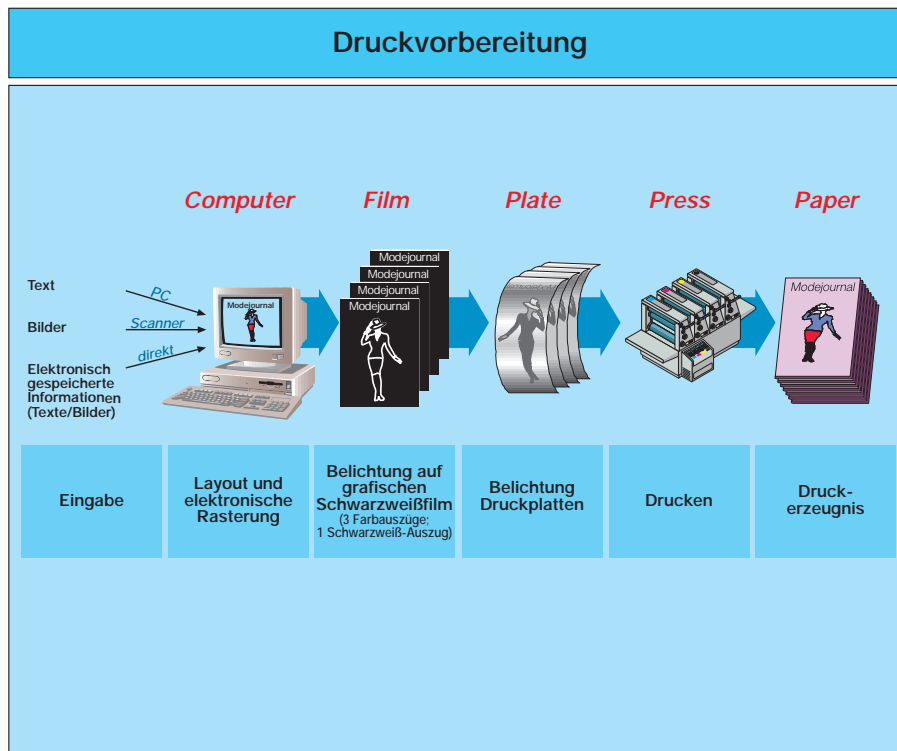


Abbildung 46  
(Folie 29)

Die Herstellung von **Druckplatten** umfaßt typischerweise folgende Arbeitsschritte:

Die Druckseite wird auf dem Bildschirm arrangiert (**Layout**); diese Seite wird rechnerisch in äquivalente Rasterpunkte umgesetzt, und diesem Rastermuster entsprechend wird ein grafischer Film z. B. mit einem Laser belichtet (Fotosatz). Der Film bildet das **Negativ**, das als Vorlage für die Belichtung der **Druckplatte** dient (zur Chemie der Druckplatten siehe Tabelle auf Seite 8). Im Falle eines Farbdruckes gilt dies entsprechend für jeden der üblichen vier Farbteildrucke (Blaugrün, Gelb, Purpur und Schwarz).

Die **Rasterung** (siehe **Abbildung 47**) ist der technische Trick, der auch beim Druck Halbtöne ermöglicht, denn eine Variation der optischen Dichte über die Menge der Drucktinte pro bedruckter Fläche ist nicht möglich. Also wird beim Druck – bei konstanter optischer Dichte der einzelnen Rasterpunkte – die Fläche der Rasterpunkte verändert (vergleiche damit auch das bei digitalen Printern angewandte „Dithering“; Seite 57).

\* Dazu siehe auch Folienserie Nr. 21 des Fonds der Chemischen Industrie: „Reprografie – Kommunikation durch Chemie“.

Die Rasterung sollte möglichst so fein sein, daß das Auge diese Strukturierung gar nicht erkennt (die Auflösungsgrenze des Auges liegt bei etwa 7 Linien/mm bei einem Bildabstand von 25 cm). Aber selbst wenn diese Rasterung grob erkennbar ist, hat das Auge dennoch eine enorme Fähigkeit,

über die Details zu integrieren, also ungeachtet der Rasterung ein kohärentes Bild wahrzunehmen und nicht etwa nur unzusammenhängende Punkte. Ein Beispiel dafür liefern Zeitungsbilder.

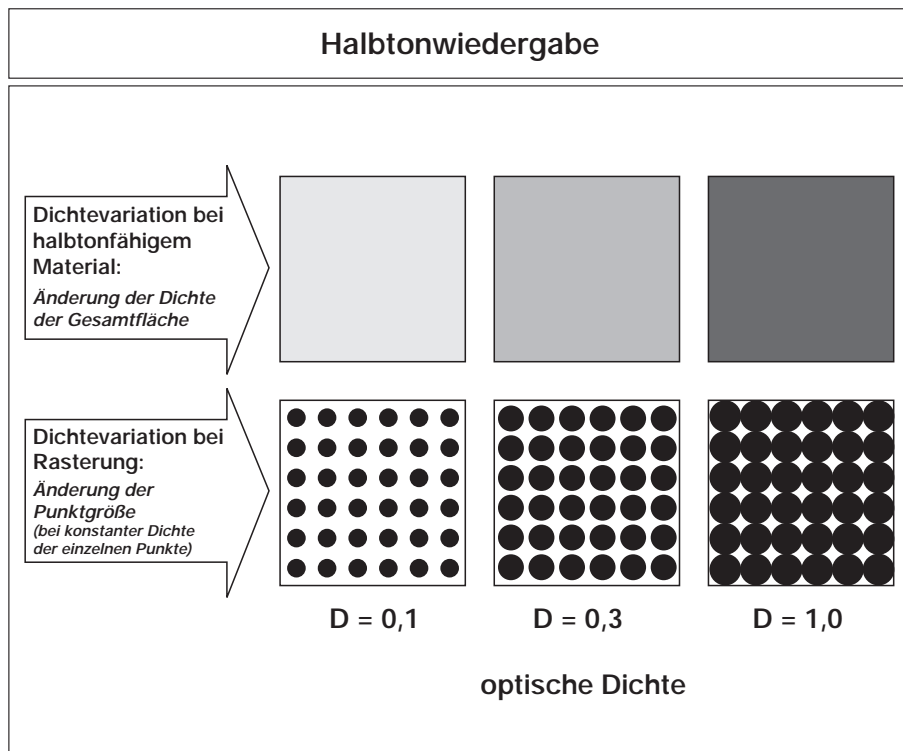


Abbildung 47  
(Kopiervorlage 18)

Jeder Rasterpunkt soll scharf und mit Maximaldichte auf dem grafischen Film abgebildet werden. Es werden also besonders kontrastreiche Filme benötigt (Lith-Filme; mit einer Gradation  $\gamma \geq 6$ ). Die steile Gradation wird durch das Zusammenspiel spezieller Emulsionen mit einem besonderen Verarbeitungsprozeß erreicht.

Die Druckindustrie ist derzeit – nach dem Übergang vom mechanischen Satz zum hier beschriebenen Fotosatz – in einem zweiten technologischen Umbruch zu vollelektronischen Verfahren (siehe Seite 54).

Das Feld der Kopie ist eine Domäne der Nichtsilberverfahren (siehe Kapitel 2.2). Die Bürokopien werden heute auf elektrofotografischem Wege hergestellt, technische Kopien zum Teil noch nach dem Verfahren der Diazotypie (Blaupausen). Für Ausdrücke von Monitoren, z. B. bei Ultraschallaufnahmen, kommen meistens digitale Drucker auf Basis physikalischer Verfahren (z. B. Thermo- oder Inkjet-Printer, siehe Abbildung 59) zur Anwendung; für Schwarzweiß-Ausdrücke existiert aber auch ein photothermografisches Verfahren auf Silbersalz-

basis (z. B. *Dry Silver* von 3M). Im Material liegt eine Mischung von Silberhalogenid- und Silberbehenat-Kristallen vor (Salze der organischen Behensäure  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{20}\text{COOH}$ ). Bei Belichtung entstehen auf den Silberhalogenid-Kristallen Abscheidungen von metallischem Silber (latentes Bild), die bei Wärmeeinwirkung die Reaktion von Silberbehenat mit einem eingelagerten Reduktionsmittel zu Silber katalysieren. Es entsteht ein schwarzes Silberbild, das keiner weiteren Fixierung bedarf.

Als **Photolithografie** wird die fotomechanische Herstellung insbesondere von integrierten elektronischen Schaltungen („Chips“) bezeichnet, wobei die Arbeitsschritte „Ätzen“ und „Aufdampfen“ von Masken gesteuert werden. Das Maskenmuster wird unter Verwendung extrem feinkörniger, mikroskopischer Fotoplatten aufbelichtet (siehe Seite 42). Die Masken selbst bestehen aus lichtunempfindlichen Polymeren, sogenannten Photoresisten oder Photolacken, die durch Belichtung in ihrer Löslichkeit verändert werden (siehe Tabelle auf Seite 8).

Röntgenstrahlen werden von Atomen mit hoher Ordnungszahl absorbiert und eignen sich gut für eine Analyse des menschlichen Skeletts, aber auch von technischen Materialien.

Bei den meisten medizinischen Röntgenaufnahmen wird zur Aufzeichnung ein „Sandwich“ aus einem beidseitig beschichteten Schwarzweißfilm (Silberauftrag  $\approx 6 \text{ g/m}^2$ ) zwischen zwei Verstärkerfolien (zum Beispiel aus Calciumwolframat) benutzt.

Die Verstärkerfolien emittieren nach Absorption von Röntgenstrahlen je nach Art der Folie blaues bis blaugrünes Licht.

Der Röntgenfilm ist in seiner spektralen Empfindlichkeit auf diese Emission abgestimmt.

Nur wenn es auf höchste Schärfe ankommt, wird auf Verstärkerfolien verzichtet. In diesem Fall werden die Röntgenstrahlen direkt vom Silberhalogenid absorbiert; nötig sind ein höherer Silberauftrag ( $12 \text{ g/m}^2$ ) sowie eine sehr viel stärkere Strahlungsdosis.

Besonders silberreich sind Röntgenfilme, die für die Werkstoffprüfung (zum Beispiel Überprüfung von Schweißnähten) eingesetzt werden; hier ist der Silberauftrag  $20 - 25 \text{ g/m}^2$ .

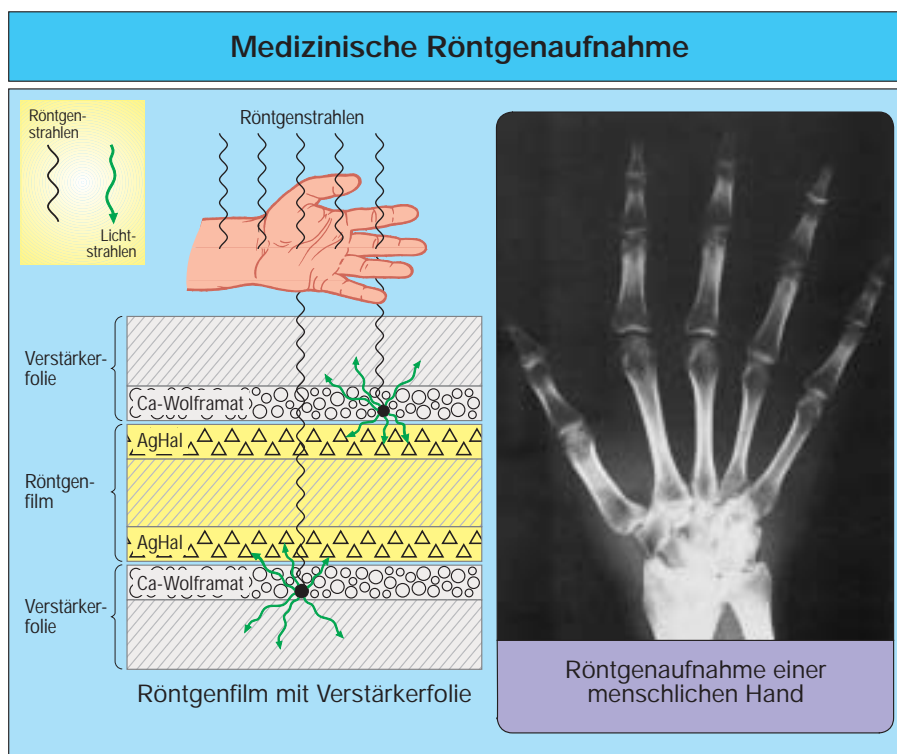


Abbildung 48  
(Folie 30)

- (1) **Vorteil digitaler Signalaufzeichnung** siehe Seite 7
- (2) **Additive Farbmischung** siehe Seite 23
- (3) **Subtraktive Farbmischung** siehe Seite 24
- (4) **Körnigkeit** siehe Seite 35
- (5) **Silberhalogenid-Film als Photonen-Sammler** (siehe Abbildung 6 auf Seite 9)  
Nachtaufnahme des Sternenhimmels auf einem Schwarzweiß-Film mit Ausrichtung der Kamera auf den Polarstern (Belichtung 2, 4, 6 Stunden); es zeigen sich konzentrische Teilringe um den Himmelsnordpol; auf dem Negativ bzw. auf dem Foto sind viel mehr Sterne erkennbar als visuell beobachtet werden.
- (6) **Umkehrentwicklung eines Schwarzweiß-Films** (siehe Seite 20)
  - a) Ein Stück käuflichen Schwarzweiß-Fotopapiers wird nach Abdeckung mit einem Scherenschnitt belichtet (Einschalten des Lichts für 1 s).
  - b) Im Dunkeln wird das belichtete Papier 60 s entwickelt (1 Liter aus 1 TI [Volumen-Teil] NEUTOL plus / LOR + 4 TI Wasser; NEUTOL ist ein käuflich erhältlicher Entwickler) abgestreift und kurz gewässert.
  - c) Das entwickelte Papier wird 90 - 120 s mit einer 0,1%igen Kaliumpermanganatlösung behandelt (1 Liter aus 1000 ml Wasser + 1 g Kaliumpermanganat + 1 ml konzentrierte Schwefelsäure) und abgestreift. Es sollte für gute Konvektion gesorgt werden (in hoher Schale arbeiten und Papier kräftig bewegen). Die Permanganatlösung ist sehr schnell verbraucht (ca. 4 - 5 Papiere). Danach wird das Papier 15 - 20 s in 1 Liter einer 2%igen Kaliumdisulfatlösung behandelt und kurz gewässert.
  - d) Im Hellen wird das Papier wie unter b) entwickelt.
  - e) Das entwickelte Papier wird zum Stoppen 15 - 20 s in 1 Liter einer 2%igen Essigsäure behandelt.
  - f) Zum Fixieren wird das Papier 60 s in Fixierlösung behandelt (1 Liter aus 1 TI FX-Universal + 4 TI Wasser; FX-Universal ist ein käuflich erhältlicher Fixierer).
  - g) Zum Schluß wird das Papier 120 s gewässert und getrocknet. Es ergibt sich ein positives Bild des Originals.
- (7) **Silbersalz-Diffusion** (siehe Seite 20)
  - a) Ein spezieller Entwickler wird nach folgendem Rezept angesetzt:

300 ml	Wasser vorlegen
12,5 g	Natriumsulfit
13,0 g	Natriumhydroxid
5,0 g	Kaliumhydroxid
30,0 g	Isoascorbinsäure
25,0 g	Kaliumthiosulfat

mit Wasser auf 500 ml auffüllen
  - b) Ein Stück Schwarzweiß-Papier (Donorpaper) wird nach Abdeckung mit einem Scherenschnitt belichtet (Einschalten des Lichts für 1 s).
  - c) Ein weiteres Blatt Schwarzweiß-Papier (Akzeptorpaper) wird in dem oben beschriebenen Entwickler 10 - 15 s getränkt.
  - d) Donor- und Akzeptorpaper werden Schichtseite an Schichtseite für ca. 4 min aneinandergepreßt (z. B. mit einer Walze).
  - e) Nach Trennung wird das entwickelte Akzeptorpaper zum Stoppen 15 - 20 s in 1 Liter einer 2%igen Essigsäure behandelt.
  - f) Zum Fixieren wird das Papier 60 s in Fixierlösung behandelt (1 Liter aus 1 TI FX-Universal + 4 TI Wasser; FX-Universal ist ein käuflich erhältlicher Fixierer).
  - g) Zum Schluß wird das Papier 120 s gewässert und getrocknet. Es ergibt sich ein positives Bild des Originals.

Die „digitale Aufzeichnungskette“ ist in der Abbildung 4 (Seite 5) dargestellt; entsprechend ihrer Reihenfolge ist dieses Kapitel über digitale Fotografie strukturiert.

Die „digitale Aufzeichnungskette“ besteht aus den Gliedern:

- **Aufnahme:** Digitale Kamera oder Scanner
- **Verarbeitung:** Digitale Bildverarbeitung
- **Wiedergabe:** Digitaler Printer oder Monitor

Digitale Bildaufnahme

4.1

Der lichtempfindliche Sensor bei einer digitalen Bildaufnahme ist ein Halbleiter-Chip, der zusammen mit weiteren elektronischen Bauelementen die auftreffenden Lichtsignale in analoge Span-

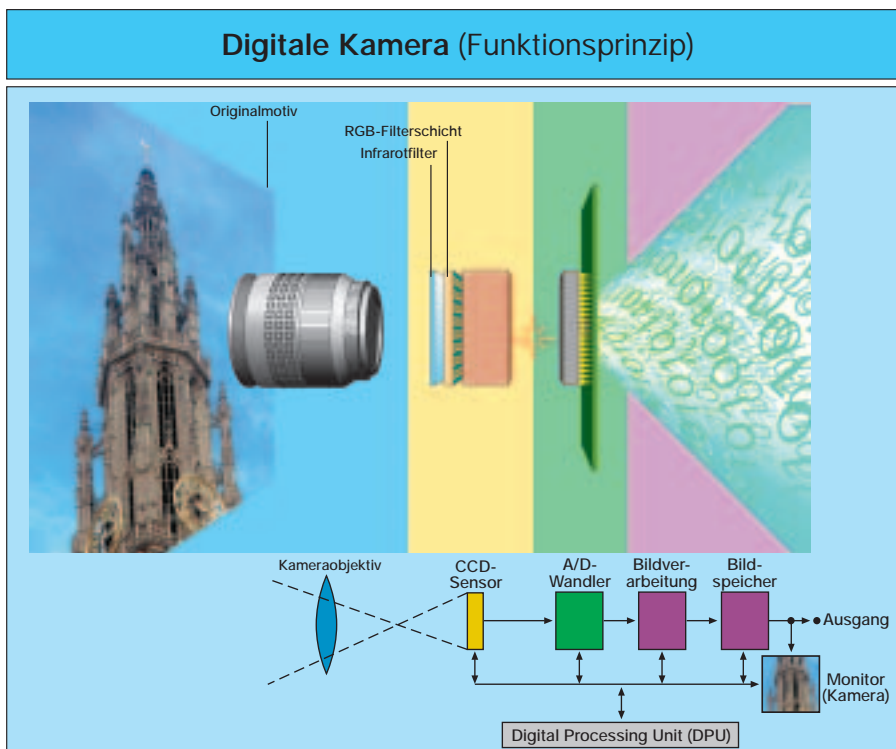
nungswerte umsetzt, die anschließend von einem Analog/Digital-Wandler digitalisiert und als Zahlenwerte gespeichert werden.

Digitale Kamera

4.1.1

Eine typische digitale Stehbild-Kamera unterscheidet sich äußerlich nicht von einer herkömmlichen Kamera. Die digitale Kamera enthält also ebenso die Bauelemente Objektiv, Verschuß und Sucher. Der Verschuß kann entfallen, wenn die Belichtungszeit des Sensors elektronisch steuerbar ist (Aktivierung des Sensors nur für die Zeit der Belichtung). Der optische Sucher kann durch einen Kleinst-Monitor ersetzt sein. Der wesentliche Un-

terschied zur herkömmlichen Kamera besteht darin, daß sich in der Abbildungsebene des Objektivs anstatt des fotografischen Films der CCD-Bildsensor<sup>6</sup> befindet. Da der CCD-Sensor nicht – wie ein Film – in der Lage ist, ein Bild oder gar mehrere Bilder über einen längeren Zeitraum zu speichern, ist ein zusätzlicher Bildspeicher eingebaut. In **Abbildung 49** ist die Funktionsweise einer digitalen Kamera schematisch dargestellt.



<sup>6</sup> CCD = Charge-Coupled-Device

Abbildung 49 (Folie 31)

Eine zentrale Steuereinheit (CPU<sup>7</sup>) lenkt die elektronischen Abläufe in der Kamera: die Bildaufnahme durch den CCD-Sensor, das Auslesen des Sensors, die Analog/Digital-Wandlung der Signale<sup>8</sup>, eine erste Bildverarbeitung, die Speicherung der Bilddaten, evtl. die Bildwiedergabe auf dem Kameramonitor. Die Informationsmenge (zur Berechnung siehe Seite 54) eines Bildes, aufgenommen mit einem CCD-Sensor mit 0,5 Mio Pixel und 8 Bit Pixel-Tiefe, beträgt bei voller Ausnutzung der Auflösung 4 Mio Bits, das sind 0,5 Mio Bytes, was ungefähr 0,5 Mega-Bytes (MB) entspricht.<sup>9</sup>

Digitale Kameras verfügen über einen fest eingebauten Speicher (Speicher-Chip oder magnetische Festplatte) mit einer Kapazität von etwa 2 MB (bei Standardkameras), so daß gerade vier Bilder der obengenannten Datenmenge gespeichert werden können. Nahezu alle Kameras wenden aber einen Kompressionsalgorithmus an, mit dem die Datenmenge bei nur geringem Verlust an Bildqualität auf etwa ein Fünftel reduziert werden kann; mit Datenkompression können 20 Bilder gespeichert werden. Außerdem kann in vielen Kameras die

Speicherkapazität durch zusätzliche Wechselspeicher erweitert werden; solche Speicherkarten (z. B. PCMCIA-Karten) verfügen über eine Kapazität von 8 MB bis 150 MB. Die gespeicherten Bilddaten können nach der Aufnahme auf einem Bildschirm betrachtet oder auf einen externen Speicher geladen werden. Ein Print kann auf dem häuslichen Printer oder – nach Datenübertragung – auch von einem Fotolabor hergestellt werden. Die Speicherkarte kann aber auch – wie ein Film – zur Printherstellung im Fotolabor abgegeben werden. Nach Löschung der Daten steht der Bildspeicher wieder für neue Aufnahmen zur Verfügung.

<sup>7</sup> CPU = engl. Central Processing Unit

<sup>8</sup> In den Beispielen werden stets dekadische Zahlen verwendet (Ziffern 0 bis 9); tatsächlich rechnen digitale Systeme aber mit computer-kompatiblen binären Zahlen (Ziffern 0 und 1).

<sup>9</sup> Die Umrechnung von Bits nach Bytes ist einfach:

**8 Bits = 1 Byte.**

Bei der Dimensionsänderung von „Mio“ nach „Mega“ ist zu beachten, daß die Vorsilbe „Mega“ sich auf die Zahl  $2^{20} = 1\,048\,576$  bezieht, d. h. es gilt:

$1,048576 \text{ Mio Bytes} = 1 \text{ Mega-Byte} (= 1 \text{ MB}).$

## CCD-Bildsensor

## 4.1.2

CCD-Bildsensoren bestehen aus sehr vielen quadratischen, lichtempfindlichen Sensorzellen mit einer Kantenlänge von etwa 10 µm, die regelmäßig in Spalten und Zeilen angeordnet sind. In den preisgünstigeren digitalen Kameras werden typischer-

weise Sensoren mit etwa 0,5 Mio Zellen, in teureren Kameras Sensoren mit 1 - 2 Mio Zellen eingesetzt.

Auffallendes Licht generiert in einer Sensorzelle bewegliche Photoelektronen. Jeder Sensorzelle ist ein

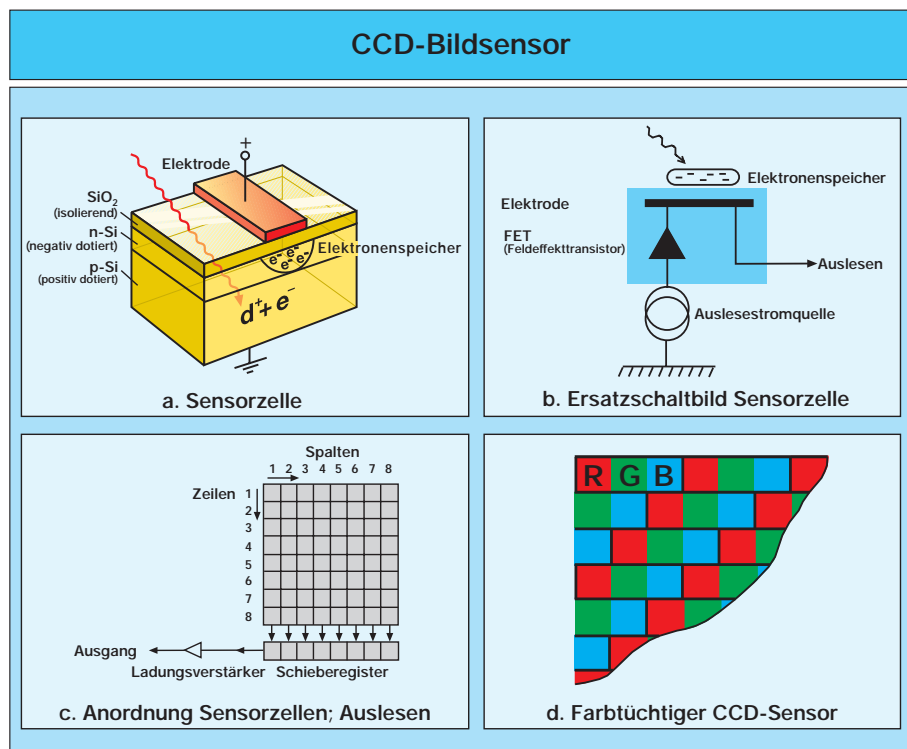


Abbildung 50  
(Folie 32)

Kondensator zugeordnet (im Chip integriert), in dem diese Elektronen als elektrische Ladung gesammelt und kurzzeitig gespeichert werden. Die Ladungsmenge ist proportional der Belichtung.

Die Ladungen werden nach der Belichtung Zeile für Zeile in ein Schieberegister geschoben. Aus diesem werden sie dann Zelle für Zelle ausgetak- tet. Die englische Bezeichnung CCD = Charge Coupled Device bringt dieses „Weiterreichen“ der Ladungen (wie in einer Löscheimer-Kette) zum Ausdruck. Die Ladungen der einzelnen Zellen ge- langen an einen nachgeschalteten Ladungsver- stärker und werden als Spannungswerte zur Wei- terverarbeitung an den CCD-Ausgang gegeben. Am CCD-Ausgang erscheinen also in zeitlicher Folge die analogen, belichtungsproportionalen Signalwerte – Zelle für Zelle und Zeile für Zeile.

CCD-Bildsensoren werden nicht nur für die digitale Kamera, sondern auch für Videokameras (Camcor- der) eingesetzt. Die Bildsignale werden bei der Vi- deokamera aber nicht digitalisiert, sondern pro Zelle analog auf Magnetband gespeichert. Die Zu- kunft gehört jedoch der digitalen Videokamera.

### Farbtüchtiger CCD-Bildsensor

Bei einer Farbaufnahme muß die Bildinformation separat in den drei Spektralbereichen Rot (R), Grün (G) und Blau (B) registriert werden. Beim Film erfolgt dies mit entsprechend sensibilisierten, übereinanderliegenden Schichten (vgl. Abbildung 26 auf Seite 27), beim CCD-Sensor mit nebenein- anderliegenden, farbtüchtigen Sensorzellen.

Die Farbtüchtigkeit wird erreicht, indem ein CCD- Chip mit einem Mosaikfilter (siehe **Abbildung 50**

auf vorhergehender Seite) versehen wird, so daß eine bestimmte Zelle nur für einen bestimmten Spektralbereich empfindlich ist. Jede Zelle hat so- zusagen eine „Farbbrille“ erhalten. Im Farb-CCD sind Sensorzelle und Pixel nicht mehr identisch.<sup>10</sup>

Um die volle Information eines farbigen Bildele- mentes zu registrieren, bedarf es eines Zellen-Tri- pels (R-, G- und B-Filter), d. h. im farbtüchtigen CCD-Sensor sind jedem Pixel drei Zellen zugeord- net. Entsprechend sinkt die Auflösung des Sen- sors. Da die visuell wahrgenommene Auflösung durch die Auflösung im grünen Spektralbereich dominiert wird, werden vielfach Filteranordnungen eingesetzt, bei denen die Anzahl der „grünen“ Zel- len zu Lasten der „roten“ und „blauen“ erhöht ist. Mit einem solchen dreikanaligen (R, G, B)-Farb- CCD können alle Farben aufgenommen werden. Die Relation der Spannungswerte der drei Zellen in einem Pixel bestimmt die Farbart. Der Verlust an Auflösung wird in manchen Profi-Kameras durch Verwendung von drei CCD-Modulen kompensiert, wobei dichromatisch-beschichtete Spiegel das Bild in die drei Grundfarben aufteilen und den ent- sprechenden CCDs zukommen lassen.

Der CCD-Sensor weist eine hohe Empfindlichkeit für infrarotes Licht auf. Um Farbverfälschungen zu vermeiden, wird dieses Licht mittels eines Infrarot- filters herausgefiltert.

<sup>10</sup> Es wird hier zwischen den Begriffen Sensorzelle (kleinstes Sen- sorelement) und Pixel (engl. „picture element“; kleinstes Bild- element) unterschieden.

Im Falle von Schwarzweißaufnahmen zeichnet eine Sensorzelle (bei höchster Auflösung) ein Bildelement auf, d. h. Sensorzelle und Pixel sind identisch. Bei Farbaufnahmen oder bei elektroni- scher Bündelung mehrerer Sensorzellen zu einem Aufnahmeele- ment zum Zwecke der Empfindlichkeitssteigerung sind dagegen Sensorzelle und Pixel nicht mehr identisch.

---

## Digitalisierung

## 4.1.3

Die Digitalisierung (**Diskretisierung, Quantisie- rung**) eines Bildes hat zwei Dimensionen: Zum einen bezieht sich die Digitalisierung auf die Orts- information (Rasterung), zum anderen auf die Hel- ligkeits- bzw. Dichteinformation.

### Rasterung (Pixel-Anzahl)

Die Aufteilung eines kontinuierlichen Bildes in dis- krete Bildpunkte, die Rasterung, ist mit der Ver- wendung eines CCD-Sensors, der mosaikartig aus vielen einzelnen lichtempfindlichen Zellen besteht, inhärent verbunden. Je mehr Zellen ein CCD-Sen- sor enthält, desto mehr Detailinformation wird auf- gezeichnet, umso höher ist also seine Auflösung.

Die Zellen-Anzahl wird allerdings durch die Her- stellungskosten begrenzt (diese wachsen expo- nentiell mit der Anzahl der Zellen pro CCD-Chip).

Die Zellenzahl des Sensors bestimmt zusammen mit dem Format des wiedergegebenen Bildes die maximal erreichbare Bildauflösung. Beispielsweise ermöglicht ein Sensor mit 600 x 800 Zellen für ein Schwarzweiß-Print im Format 9 x 13 cm eine Bild- auflösung von  $800 \text{ Pixel} / 13 \text{ cm} = 61,5 \text{ Pixel} / \text{cm}$ . Bei einem Betrachtungsabstand von 25 cm ergibt diese Auflösung noch einen akzeptablen Schärf- einindruck. Die Auswirkung unterschiedlicher Auflö- sungen auf den Bildeindruck ist in **Abbildung 51/** links dargestellt. Deutlich ist die Zunahme der Bild- qualität mit zunehmender Auflösung erkennbar.

## Einfluß der Diskretisierung auf die Bildqualität

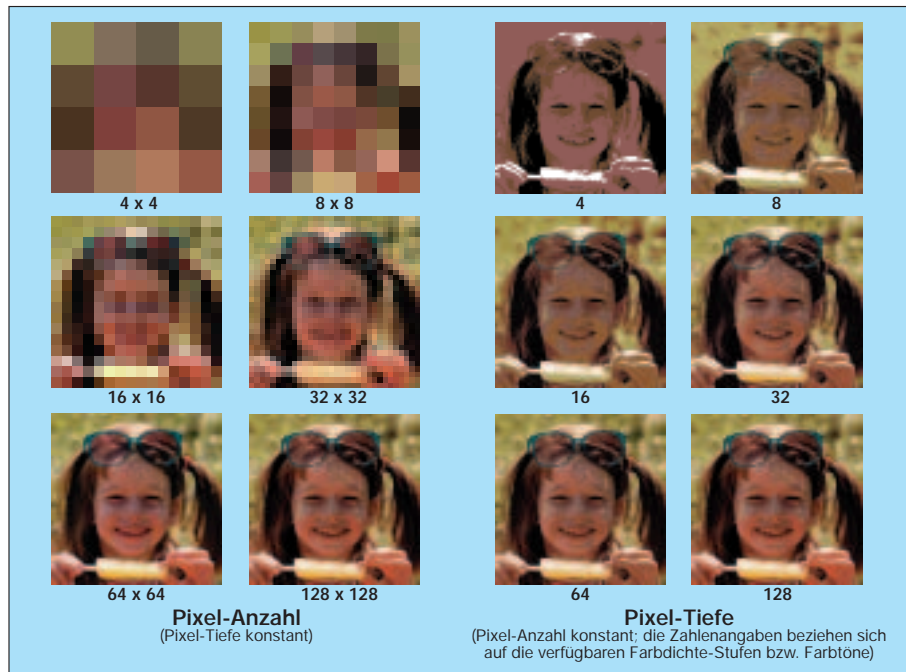


Abbildung 51  
(Folie 33)

### Dichte-Quantisierung (Pixel-Tiefe)

Der CCD-Sensor liefert für jeden Bildpunkt einen belichtungsproportionalen Spannungswert. Die zunächst noch analogen Bildsignale sind überlagert von einem Rauschen (Störsignale), das seine

Ursache in Dunkelströmen, Leckströmen oder in unterschiedlichen Empfindlichkeiten der einzelnen Dioden hat. Das Rauschen manifestiert sich – wie in der Silberfotografie – als Körnigkeit im Bild.

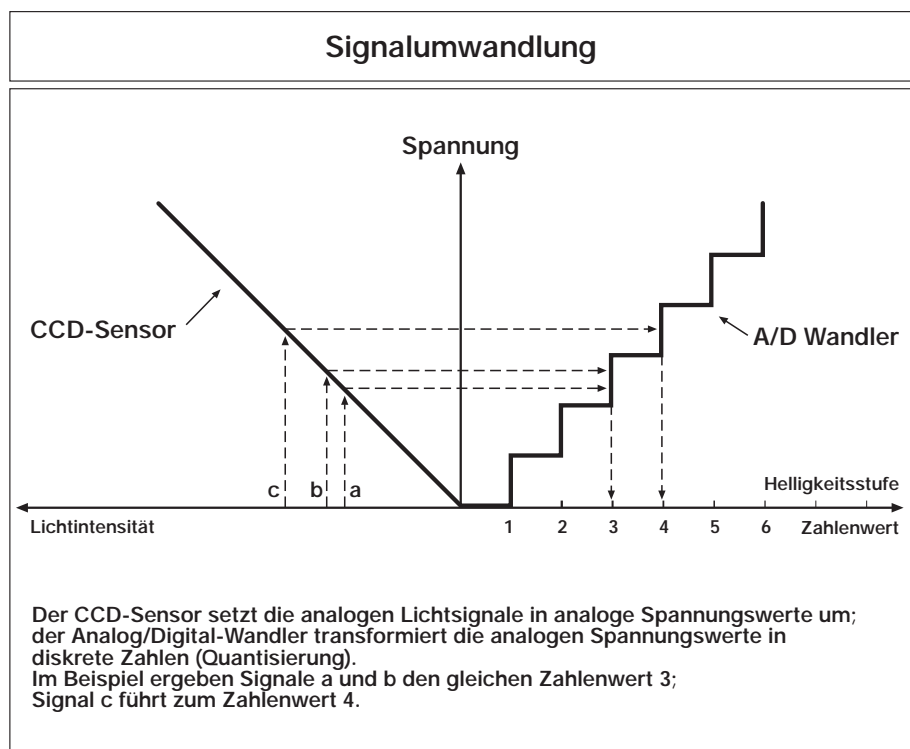


Abbildung 52  
(Kopiervorlage 19)

Die analogen Bildsignale werden im Analog/Digital-Wandler in diskrete Zahlenwerte umgesetzt, d. h. digitalisiert oder quantisiert; weitere Signalverarbeitungen sind jetzt weitgehend rauschfrei.

**Abbildung 52** (auf vorhergehender Seite) zeigt das Prinzip der Dichte-Quantisierung an einem Beispiel. Die Zahl der verfügbaren Dichtestufen (Graustufen oder Farbdichtestufen) wird als Pixel-Tiefe bezeichnet und charakterisiert die Halbtonwiedergabe eines Bildes; je mehr Stufen zur Verfügung stehen, desto feinere Grau- bzw. Farbtonunterschiede können wiedergegeben werden. In der Praxis hat sich eine Pixel-Tiefe von 256 Dichtestufen als ausreichend für eine gute Halbtonwiedergabe des gesamten Belichtungsumfangs eines Bildes von voller Dunkelheit bis zur maximalen Helligkeit erwiesen.

Die Anzahl der Dichtestufen, die Pixel-Tiefe, wird üblicherweise in Bits angegeben. Das **Bit** (engl. „Binary digit“) ist eine Maßeinheit für den Informationsgehalt. (Mit der Information eines Bit kann eine ja/nein-Frage beantwortet werden). Die Angabe der Pixel-Tiefe in Bit errechnet sich als Logarithmus (zur Basis 2) der Anzahl unterscheidbarer Dichtestufen:

$$T = k \cdot \log_2 d$$

- T: Pixel-Tiefe (Bit/Pixel)
- k: Anzahl Farbkanäle pro Pixel  
(Schwarzweiß: k = 1; Farbe: k = 3)
- d: Anzahl Dichtestufen pro Sensorzelle

Beim nur zur schwarzweißen Bildaufzeichnung fähigen CCD (k = 1) entsprechen also  $256 = 2^8$  Dichtestufen pro Sensorzelle einer Pixel-Tiefe von 8 Bit.

Beim farbtüchtigen CCD (k = 3) ist das Pixel als Sensorzellen-Tripel definiert; hier ergeben  $256 = 2^8$  Dichtestufen pro Sensorzelle eine Pixel-Tiefe (auch als Farb-Tiefe bezeichnet) von  $3 \times 8 = 24$  Bit.

Den Einfluß der Pixel-Tiefe (Farb-Tiefe) auf die Wiedergabe eines Testbildes zeigt **Abbildung 51/ rechts**. Das gleiche Motiv wird mit verschiedenen fein abgestuften Farbdichteskalen wiedergegeben – anders ausgedrückt: Die Palette der verfügbaren Farbtöne ist bei den einzelnen Bildern verschieden groß.

Pixel-Anzahl und Pixel-Tiefe bedingen zusammen die Informationsmenge eines Bildes.

$$I = n \cdot T$$

- I: Informationsmenge (Bit/Bild)
- n: Pixel-Anzahl pro Bild
- T: Pixel-Tiefe (Bit/Pixel)

Die Informationsmenge steht im Zusammenhang mit den fotografischen Eigenschaften eines Bildes. Die Pixel-Anzahl bestimmt dessen maximal mögliche Schärfe (Auflösung), die Pixel-Tiefe korreliert mit der Qualität der Halbtonwiedergabe, d. h. mit dem Nuancenreichtum an Grau- bzw. Farbtönen.

## Digitaler Scanner

### 4.1.4

Die Funktionsweise eines digitalen Scanners zeigt **Abbildung 53**. Sie entspricht im wesentlichen der einer digitalen Kamera. Jedoch wird beim Scanner anstelle eines zweidimensionalen CCD-Sensors meistens eine CCD-Zeile verwendet.

Eine Vorlage wird beleuchtet und zeilenweise abgetastet; das reflektierte Licht wird über eine Optik auf einen hochauflösenden CCD-Zeilensensor abgebildet. Die kompakte optische Anordnung wird entlang des Bildes bewegt und so die Helligkeitsverteilung Bildzeile für Bildzeile registriert. Es bedarf also keines Flächensensors, der in der erforderlichen, hochauflösenden Qualität extrem teuer wäre. Eine typische Sensorzeile ist etwa 6 cm lang und enthält z. B. 4 096 Sensorzellen.

Die mit einem derartigen Scanner erreichbare Auflösung (im Beispiel der **Abbildung 53**:  $4\,096 \text{ Pixel}/6 \text{ cm} = 683 \text{ Pixel/cm}$ ) liegt erheblich über der

in üblichen digitalen Kameras realisierten Auflösung (siehe Seite 52).

Ein farbtüchtiger Scanner enthält in der Regel eine CCD-3fach-Zeile (je 1 Zeile für Rot, Grün und Blau), so daß die Bildinformation in allen drei Farbkanälen in nur einem Scan-Durchgang registriert werden kann.

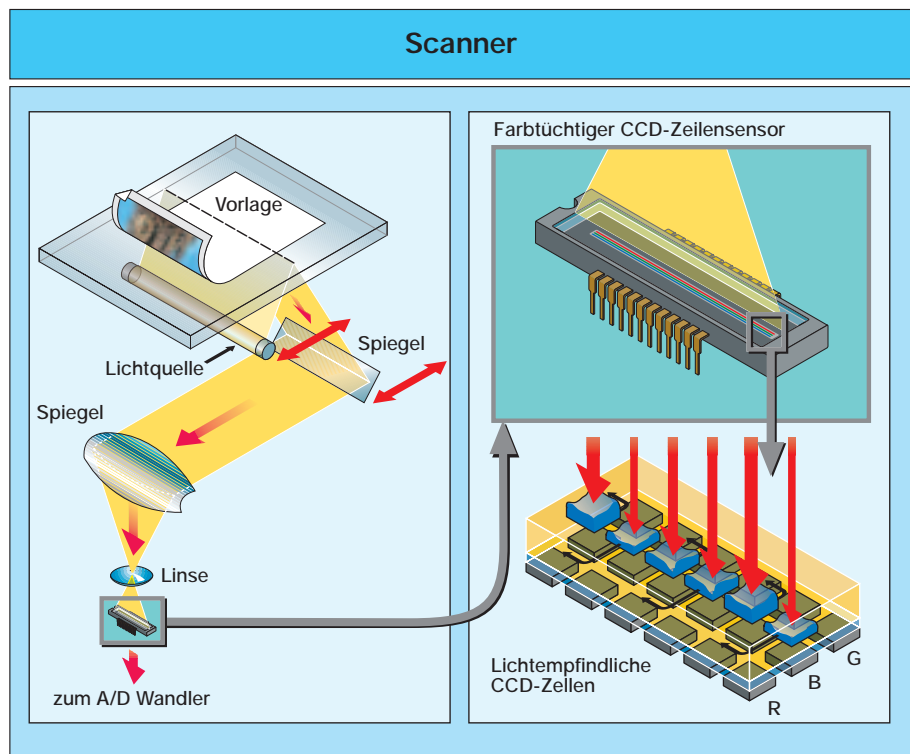


Abbildung 53  
(Folie 34)

## Digitale Bildverarbeitung

4.2

Durch eine Digitalisierung der Bildinformation wird das enorme Potential der elektronischen Datenverarbeitung zur Verbesserung der Bildqualität erschlossen. Zugleich wird damit auch die Übertragung und das Kopieren der Bildinformation auf elektronischem Wege möglich.

Einfache Operationen können schon in der Kamera ausgeführt werden; z. B. läßt sich die Pixel-Anzahl rechnerisch erhöhen durch Interpolation der Meßdaten von benachbarten Bildpunkten. Auch eine solche rechnerische Erhöhung der Pixel-Anzahl wird – bis zu einem gewissen Grad – als Verbesserung der Auflösung (siehe Seite 52) wahrgenommen.

Durch Bildverarbeitung können viele Bildeigenschaften beeinflußt werden, z. B.:

- Kontrast
- Farbsättigung
- Schärfe
- Dichte / Dichteumfang
- Körnigkeit
- Farbton

Die Bilder können auch mit Textinformationen verknüpft oder inhaltlich verändert werden, z. B. durch elektronische Retusche oder Übernahme von Teilen aus anderen Bildern. (Die Möglichkeit der elektronischen Manipulation nimmt digital gespeicherten Bildern ihren dokumentarischen Charakter; dies ist durchaus ein Problem im Bereich der professionellen Fotografie.)

Die meisten Methoden zur Beeinflussung der Bildqualität wenden einfache mathematische Operationen an, bei denen jeder Pixelwert eines Bildes nach einer vorgegebenen Funktion verändert wird. Solche Operationen lassen sich über sogenannte LUT's (für engl. „Look Up Tables“) ausführen, das sind Speicher, in denen die verändernden Funktionen als Kennlinien programmierbar sind. Zu jedem Eingangswert ergibt sich ein definierter Ausgangswert.

In **Abbildung 54** (nächste Seite) ist beispielhaft gezeigt, wie der Eingangswert „120“ in Abhängigkeit von der Übertragungskennlinie im LUT zu jeweils verschiedenen Ausgangswerten führt.

In **Abbildung 55** (nächste Seite) wird demonstriert, daß eine Parallelverschiebung der Kennlinie im LUT mit einer Änderung der Bildichte verbunden ist und daß über die Steigung der Kennlinie der Kontrast gesteuert werden kann.

Daten-Transformation mit Hilfe eines LUT-Bausteines (Look-Up-Table)

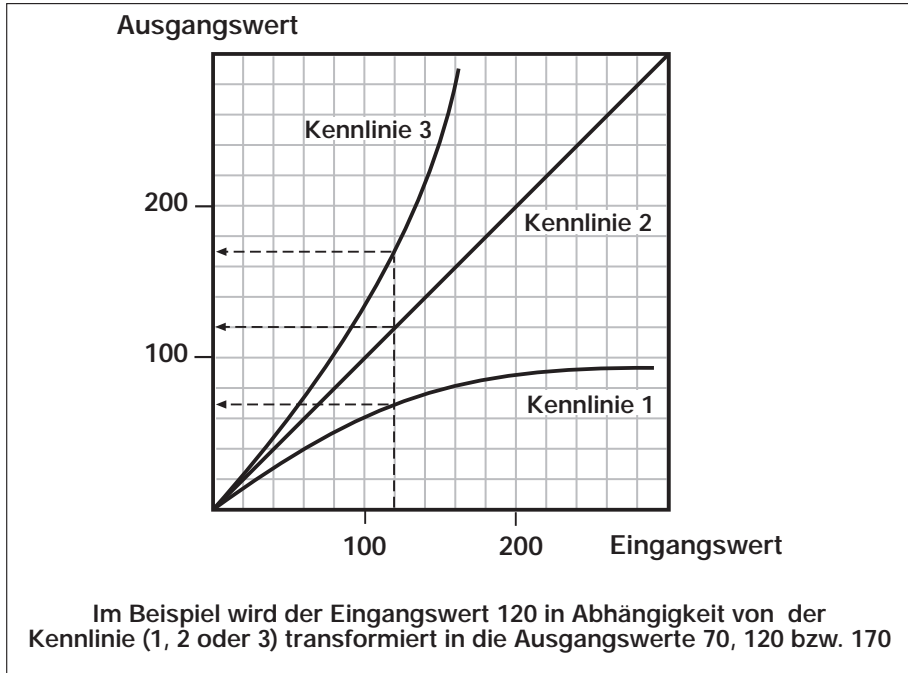


Abbildung 54  
(Kopiervorlage 20)

Änderung von Bildichte oder Kontrast  
(jeweils mit zugehörigem LUT-Diagramm)

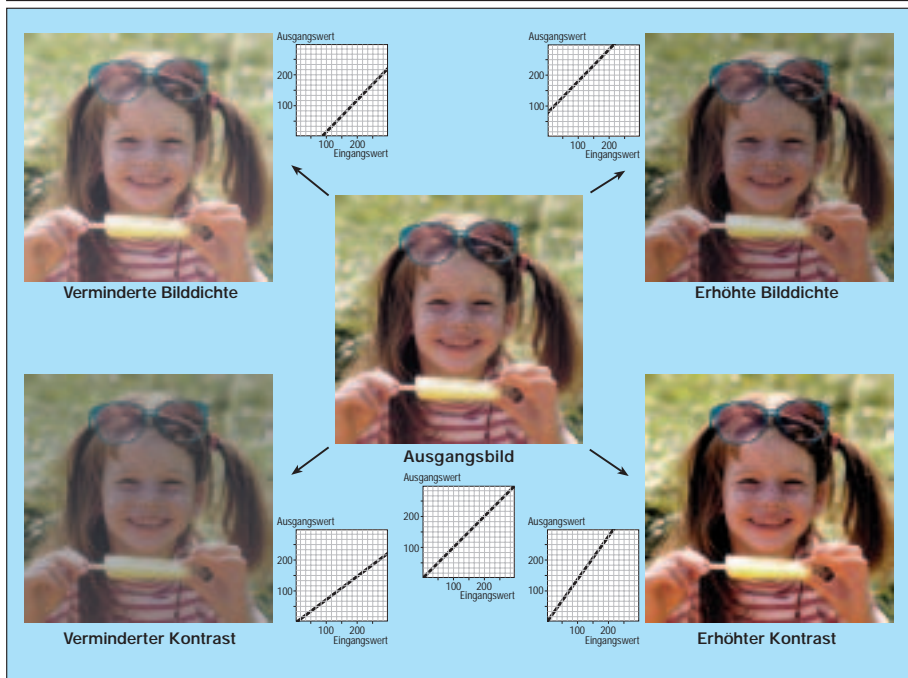


Abbildung 55  
(Folie 35)

Operationen zur Veränderung der Schärfe oder der Farbwiedergabe gestalten sich besonders einfach, wenn die zunächst vorliegenden RGB-Farbwerte der Pixel (Helligkeiten in den Farbkanälen Rot, Grün bzw. Blau) entsprechend den folgenden Transformationsgleichungen in YUV-Koordinaten umgerechnet werden:

$$\begin{aligned}
 Y &= 0,3 R + 0,6 G + 0,1 B && \text{Luminanzwert} \\
 U &= B - Y && \text{Chrominanzwert} \\
 V &= R - Y && \text{Chrominanzwert}
 \end{aligned}$$

Die Definition des Luminanzsignals berücksichtigt die größere physiologische Wirksamkeit der grünen Farbe im Sehapparat (vgl. auch Abbildung 12 auf Seite 14).

Durch eine rechnerische Überbetonung der für die Detailwiedergabe wichtigen höheren Ortsfrequenzen im Luminanzsignal kann der **Schärfeeindruck** verbessert werden.

Eine gleichartige Erhöhung (oder Verminderung) beider Chrominanzwerte erhöht (bzw. vermindert) die **Farbsättigung**; eine ungleiche Veränderung der Chrominanzwerte verschiebt den **Farbton**. Die neu berechneten YUV-Koordinaten sind wieder in RGB-Koordinaten zurück zu transformieren und können als solche – zum veränderten Farbbild – ausgedruckt werden.

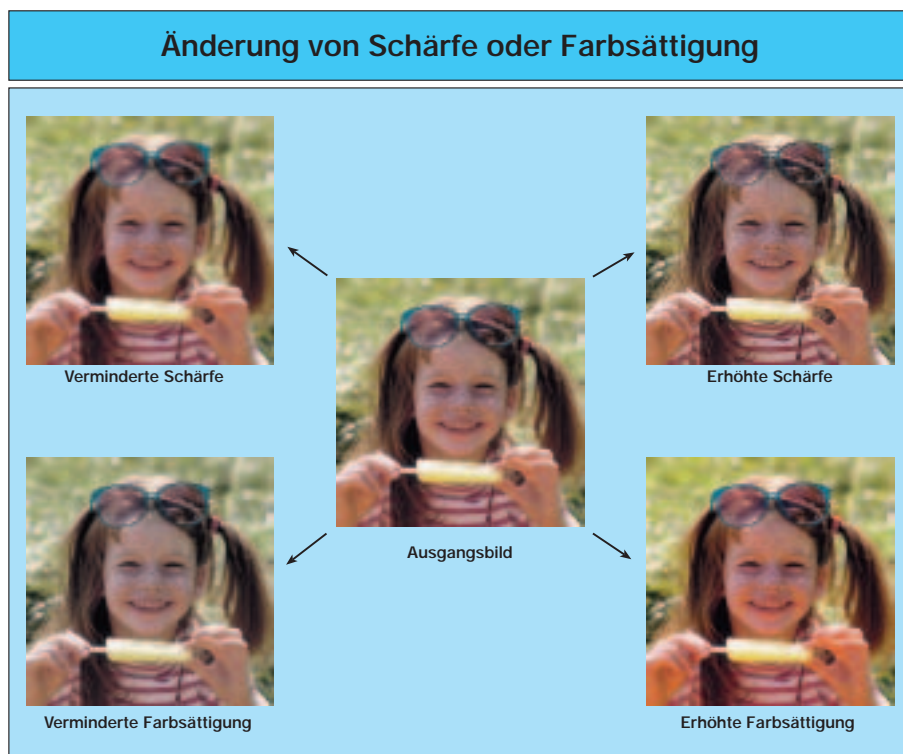


Abbildung 56  
(Folie 36)

## Digitale Bildwiedergabe

## 4.3

Die digitalisierte Bildinformation besteht aus einem elektronisch gespeicherten Datensatz; zu ihrer Visualisierung bedarf es eines Monitors oder eines Printers (vgl. Abbildung 5 auf Seite 6).

Digitale Printer drucken die Bildinformation Pixel für Pixel mit der zugehörigen optischen Dichte aus (Schwarzweißbilder: ein Grauwert; Farbbilder: drei Farbwerte, ggf. zuzüglich ein Grauwert).

Die Auflösung des Printverfahrens wird in Printpunkten pro cm (dots/cm) angegeben.<sup>11</sup> Die erreichbare Bildauflösung gemessen in Pixel/cm ist im besten Fall gleich dieser inhärenten Auflösung des Printverfahrens, wenn nämlich ein Pixel durch einen Printpunkt abgebildet wird. Dies ist möglich, wenn die Dichte der einzelnen Printpunkte (dots) genügend fein moduliert werden kann, so daß die volle angestrebte Pixel-Tiefe von beispielsweise 8 Bit (256 Dichtestufen) wiedergegeben werden

kann. (Beispiel: Laserprinter, der auf Silberhalogenidpapier belichtet.)

Bei solchen Printverfahren, bei denen keine ausreichende Dichte-Differenzierung in den einzelnen Printpunkten (dots) möglich ist, kann die Halbtonwiedergabe dadurch verbessert werden, daß mehrere Printpunkte für die Wiedergabe nur eines Pixels eingesetzt werden (siehe **Abbildung 57** auf folgender Seite).

Diese als „Dithering“ bezeichnete Methode vermindert natürlich die maximal erreichbare Bildauflösung, gemessen in Pixel/Bild. (Beispiel: elektrofotografischer Laserkopierer; das elektrofotografische Verfahren kann den einzelnen Printpunkt nur weiß oder schwarz bzw. farbig drucken.)

<sup>11</sup> Die Auflösung der Printer wird meistens statt in dots/cm in dots per inch, abgekürzt dpi, angegeben; 1 dot/cm = 2,5 dpi.

## Verbesserung der Halbtonwiedergabe durch Dithering

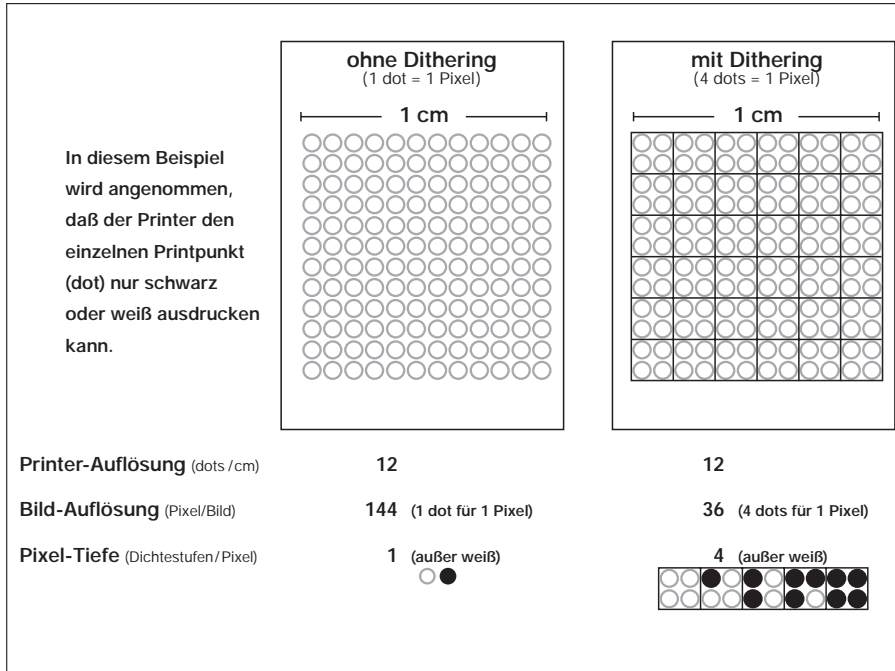


Abbildung 57  
(Kopiervorlage 21)

In den verschiedenen digitalen Printern werden die Bildsignale dem Printmaterial in unterschiedlicher Form zugeführt:

- als Licht (belichtende Printer),
- als Wärme (Thermo-Printer) oder
- als Tinte (Inkjet-Printer).

Das Printaggregat moduliert die Signalintensität (Licht, Wärme bzw. Tintenmenge) pro Printpunkt und steuert die horizontale Ablenkung. Der Papier-schub sorgt für die vertikale Ablenkung (siehe Abbildungen 58 und 59).

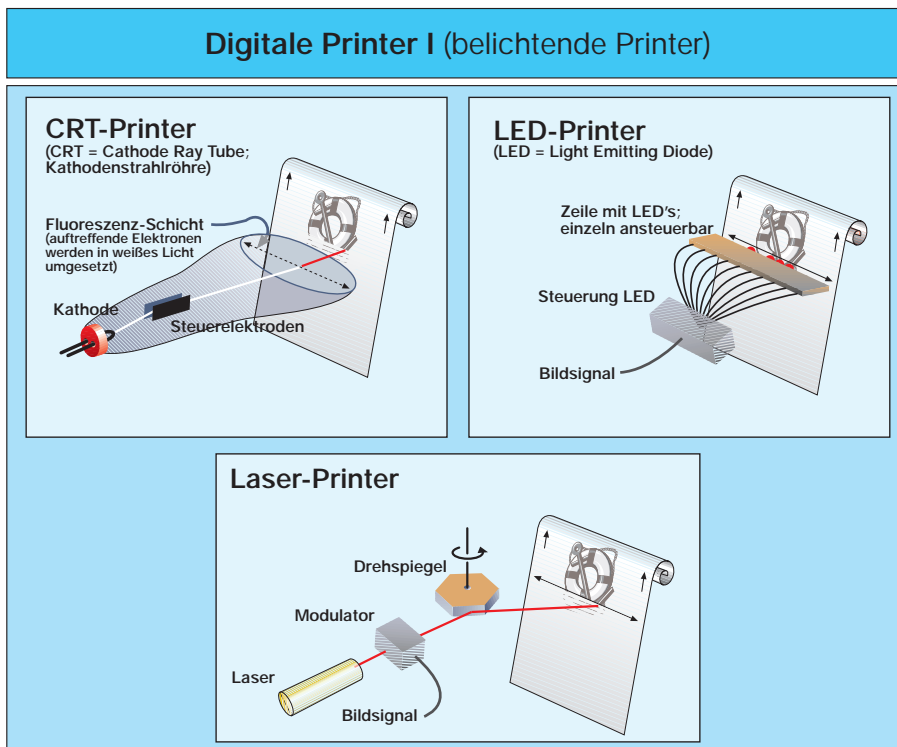


Abbildung 58  
(Folie 37)

## Digitale Printer II

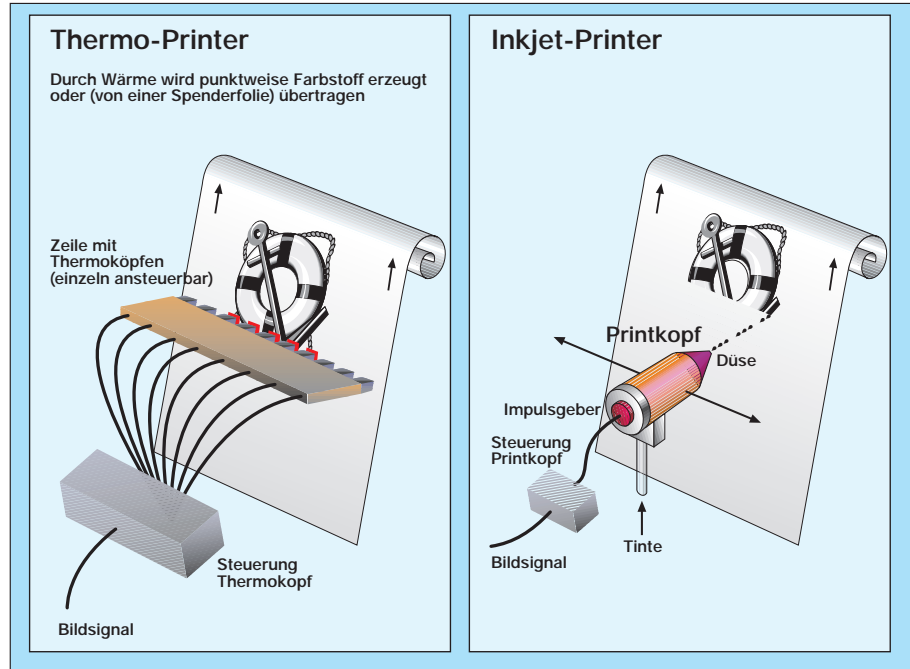


Abbildung 59  
(Folie 38)

Bei den belichtenden, digitalen Printern werden als Belichtungsmodule z. B. eingesetzt: Kathodenstrahlröhre, Laser mit Drehspiegel oder eine LED-Zeile (LED: Light-Emitting-Diode). Als lichtempfindliches Material kommen Silberhalogenid-Papier oder ein elektrofotografisches Material in Frage (Elektrofotografie, vgl. Seite 9). Zur Erzeugung von Farbbildern werden die roten, grünen und blauen Teilbilder entweder simultan (z. B. auf AgHal-Papier) oder nacheinander (z. B. bei elektrofotografischen Printern) eingeschrieben.

**Thermo-Printer** verfügen über eine Leiste mit einzeln ansteuerbaren Thermoköpfen, die sich sehr schnell elektrisch aufheizen lassen. Mit der pro Thermokopf erzeugten Wärme wird lokal entweder eine chemische, farbgebende Reaktion in einem thermoempfindlichen Papier initiiert, oder präformierte Farbstoffe werden von einer Spenderfolie\* auf eine Empfängerfolie übertragen.

Beim **Inkjet-Printer** wird der Farbstoff direkt auf das Papier gespritzt. Der Tintenkopf bewegt sich dabei in horizontaler Richtung, der Papiervorschub in vertikaler Richtung. Bei der hier beschriebenen „drop-on-demand“-Version stößt ein Impulsgeber die Tinte in Form feinsten Tröpfchen aus der Düse des Tintenkopfes. Auf einen Bildpunkt treffen viele dieser Kleinst-Tröpfchen, wodurch eine gute Dichte-Variation (Pixel-Tiefe) pro Printpunkt möglich ist. Beim Inkjet-Farbdrucker werden simultan von nebeneinanderliegenden Düsen die drei subtraktiven Farbstoffe Gelb, Purpur und Blaugrün, und – wie beim grafischen Druck – auch noch Schwarz, ausgespritzt (zur Erweiterung der Farbtönen-Skala eventuell zusätzlich noch ein helles Purpur und ein helles Blaugrün).

\* in Abbildung 59 nicht eingezeichnet

## Anwendungsgebiete

## 4.4

Die digitale Bildkette im Bildfotobereich (Digitale Kamera oder Scanner; Bildverarbeitung; Digitaler Printer) ist ausführlich beschrieben worden. Auch in der industriellen Fotografie finden digitale Methoden zunehmend Anwendung.

**Grafisch-Reprografischer Bereich:** Im Standardarbeitsablauf der Druckvorbereitung (vgl. Abbil-

dung 46) wird das Layout einer Druckseite per Computer am Bildschirm arrangiert. Diese Bildinformation wird nach elektronischer Rasterung auf einen grafischen Film belichtet: „*computer-to-film*“. Die weiteren Arbeitsschritte sind die Druckplattenherstellung und der eigentliche Druck.

Der Trend der technologischen Veränderung geht dahin, die chemischen Zwischenschritte „Filmaus-

zug“ und „Druckplatte“ nach Möglichkeit auszuschalten; die entsprechenden Verfahren werden mit den Stichwörtern „*computer-to-plate*“ bzw. „*computer-to-press*“ gekennzeichnet.

Ein Beispiel für ein Verfahren der letztgenannten Kategorie ist der „Chromapress“-Printer, eine leistungsstarke elektrofotografische Druckmaschine mit drei LED-Zeilen als Belichtungseinheit, die direkt vom Computer mit der Druckinformation (Bild und Text) versorgt wird.

Im **medizinischen Bereich** sind zahlreiche neue diagnostische Verfahren entwickelt worden, deren Meßdaten im Computer anfallen (z. B. Ultraschall; Computer-Tomografie, Kernspin-Tomografie), und die auf dem Bildschirm oder als digitaler Print visualisiert werden.

Auch in der klassischen Röntgenfotografie (vgl. Kapitel 3.5.3) gibt es inzwischen digitale Detektionsverfahren.

Bei der sogenannten *Digitalen Radiografie* wird zur Detektion eine Speicherfolie eingesetzt. Röntgenstrahlen versetzen die Verbindungen dieser Folie (Oxide von Seltenerd-Metallen) in einen angeregten Zustand, der für mehrere Stunden stabil ist. Durch punktweises Abtasten dieser Speicherfolie mit einem Laserstrahl relaxieren die angeregten Zustände unter Emission von Fluoreszenz-Strahlung, die registriert wird und deren Meßwerte digitalisiert werden. Die digitale Röntgenbildinformation kann der Bildverarbeitung unterworfen und über Monitor oder Print sichtbar gemacht werden.

Auch die sogenannte *Direkte Radiografie* ist ein digitales Verfahren. Der Sensor besteht aus einer CCD-ähnlichen Matrix, die bedeckt ist von einer Fluoreszenz-Schicht, die auftreffende Röntgenstrahlung direkt in sichtbares Licht umwandelt, welches detektierbar für die einzelnen Sensorzellen ist. Die Signale werden Zelle für Zelle ausgelesen und digitalisiert (siehe **Abbildung 60**).

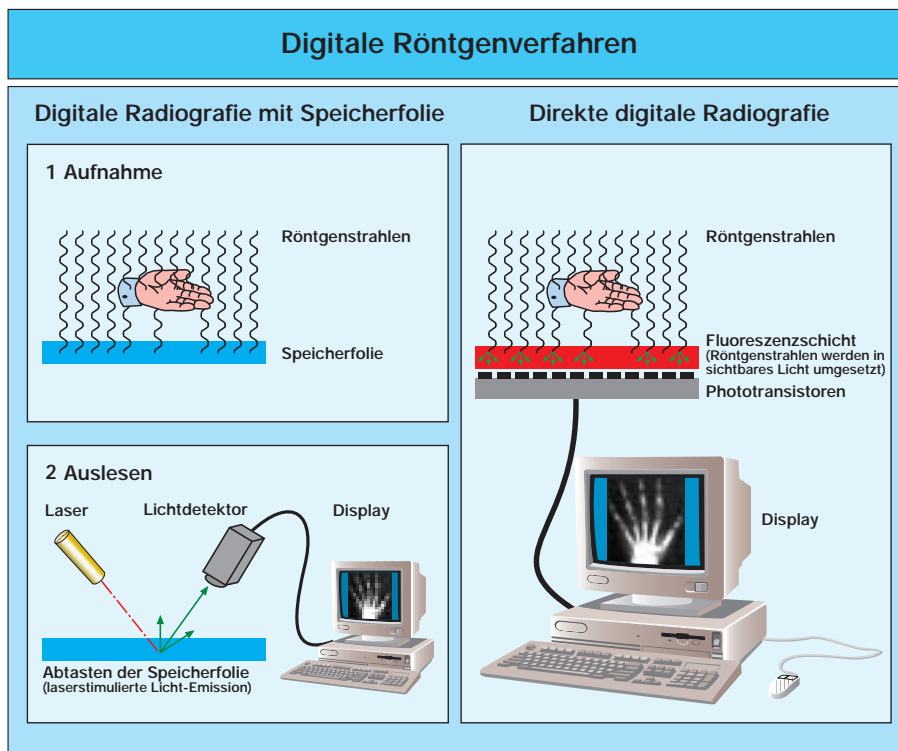


Abbildung 60  
(Folie 39)

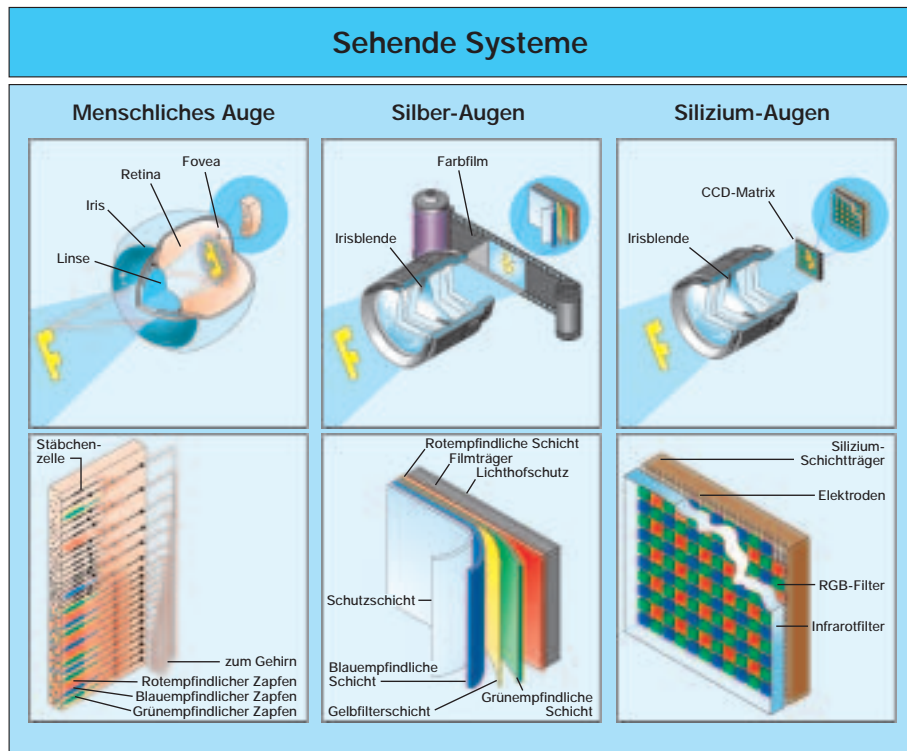


Abbildung 61  
(Folie 40)

In **Abbildung 61** werden die lichtempfindlichen Sensoren Film und CCD-Chip verglichen; in den Vergleich ist zusätzlich das biologische Auge mit aufgenommen.

Die Sensoren des menschlichen Auges sind die lichtempfindlichen Sehzellen der Retina, das sind die hochempfindlichen, nur auf Helligkeit ansprechenden Stäbchenzellen und die drei Arten von farbtüchtigen Zapfenzellen (je eine Art für den roten, grünen und blauen Farbbereich).

Im chemischen Film sind die verschieden sensibilisierten Schichten übereinander angeordnet. Winzige Silberhalogenidkristalle fungieren als lichtempfindliche Detektoren. Diese Kristalle haben weitgehend binären Charakter, d.h. sie werden durch Belichtung entweder entwickelbar oder nicht. Erst ein Ensemble von einigen hundert Kristallen ist zur fein abgestuften Dichteaufzeichnung fähig, d.h. ist einem vielstufigen Pixel äquivalent.

Um die Auflösung bzw. Speicherkapazität von Film und digitalen Systemen quantitativ vergleichen zu können, werden die von der digitalen Fotografie

herrührenden Begriffe „Pixel“ und „Pixel-Tiefe“ für einen Film hier wie folgt definiert:

- **Pixel-Größe:** Ableitung vom Schärfekriterium, d. h. von der Modulationsübertragungsfunktion (vgl. Seite 36f)

$$l = 0,6 / v_{0,5}$$

- **Pixel-Tiefe:** Die Zahl der pro Pixel unterscheidbaren Dichtestufen ist abhängig vom Dichteumfang und wird begrenzt durch die statistischen Dichteschwankungen, die Körnigkeit  $\sigma_D$  (vgl. Seite 35f).

$$d = \Delta D / 2\sigma_D$$

- l: Seitenlänge eines quadratischen Pixels [in mm];
- $v_{0,5}$ : Ortsfrequenz [in Linien/mm] für einen Modulationsübertragungsfaktor  $M = 0,5$ ;
- d: Anzahl unterscheidbarer Dichtestufen;
- $\Delta D$ : Dichteumfang  $D_{max} - D_{min}$ ;
- $\sigma_D$ : Körnigkeit

(Quelle: Handbook of Photogr. Science and Engineering, p. 667)

Der CCD-Chip besteht aus einer regulären Anordnung von lichtempfindlichen Sensorzellen mit jeweils zugeordneten Kondensatoren. Im farbtüchtigen CCD-Chip sind die Sensorzellen mit Farbfilttern versehen (Rot, Grün, Blau); ein R, G, B-Tripel fungiert als vielstufiges Pixel.

Im weiteren beschränkt sich der Vergleich auf Film und CCD-Chip (siehe **Abbildung 62**).

Vergleich: Film und CCD-Chip (ISO 100; typische Werte)		
Sensor	Film (Kleinbild)	CCD-Chip (600 x 800 Sensorzellen)
Sensor-Element (Dichtestufen; Anordnung)	AgBr-Kristall (binär; statistisch)	Si-Halbleiterzelle (vielstufig; regulär)
Element-Größe	0.7 x 0.7 $\mu\text{m}^2$ (einzelner Kristall)	} 10 x 10 $\mu\text{m}^2$
Zellen-Größe	11 x 11 $\mu\text{m}^2$ (Ensemble von Kristallen)	
Sensor-Fläche	24 x 36 = 864 $\text{mm}^2$	6 x 8 = 48 $\text{mm}^2$
Pixel-Anzahl / Sensor (farbtüchtige Pixel, d. h. Farb-Tripel)	8 x 10 <sup>6</sup> pro Sensor	0.16 x 10 <sup>6</sup> pro Sensor
Pixel-Tiefe (bezogen auf farbtüchtige Pixel)	3 x 8 = 24 bit/Pixel	3 x 8 = 24 bit/Pixel
Informationsmenge / Bild (Pixel-Anzahl x Pixel-Tiefe)	192 Mbit/Bild	4 Mbit/Bild

Abbildung 62  
(Kopiervorlage 22)

Bei Lichteinwirkung werden in diesen beiden Sensoren primär durch einen Photoeffekt freie bewegliche Elektronen (Photoelektronen) erzeugt. Das Ergebnis der Lichteinwirkung sind beim Film katalytisch (im späteren Entwicklungsprozeß) wirksame Abscheidungen von metallischem Silber an den belichteten Kristallen; beim CCD sammeln sich pro Sensorzelle elektrische Ladungen, die als Spannungsimpulse außerhalb des CCD digitalisiert und als Zahlenwert gespeichert werden.

Kleinbild; 6 x 8 mm beim CCD-Chip) und durch den dreifachen Schichtaufbau des Farbfilms (beim CCD-Chip ist die Anzahl der farbtüchtigen Pixel nur ein Drittel der Anzahl der Sensorzellen!)

Die höhere Pixel-Anzahl ist die Ursache für die höhere Auflösung bzw. den höheren Informationsgehalt der Silberhalogenidbilder.

Im Gegensatz zum Film ist der CCD-Chip selbst nicht in der Lage, die Photoelektronen für einen längeren Zeitraum zu speichern, es bedarf deshalb eines zusätzlichen Speichers (vgl. Seite 50).

Die Zellengröße ist in beiden Sensoren ähnlich: Sie liegt bei etwa 10  $\mu\text{m}$  (Kristallensemble im Film; einzelne Sensorzelle im CCD-Chip). Die Anzahl der farbtüchtigen Pixel ist beim Kleinbildfilm aber viel höher als bei dem hier zugrunde gelegten CCD-Chip mit 0,5 Mio Sensorzellen. Die höhere Pixel-Anzahl beim Film ist bedingt durch die größere Gesamtfläche des Filmsensors (24 x 36 mm bei

In **Abbildung 63** sind die Eigenschaften einer digitalen Kamera mit einer herkömmlichen Film-Kamera verglichen. Das Preis-/Leistungsverhältnis des konventionellen Systems ist überlegen, dagegen

bietet die elektronische Kamera Vorteile hinsichtlich Zugriffszeit aufs Bild, elektronischer Übertragung und Bildverarbeitung.

Eigenschaftsprofil einer digitalen Kamera			
Eigenschaft	Eine digitale Kamera hat im Vergleich zum Film		Kommentar
	Nachteile ⊖	Vorteile ⊕	
Kosten Kamera	●		Konventionelle Kompaktkamera ca. 150,- DM; Digitale Kamera (0,5 Mio. Sensorzellen) ca. 600,- DM
Kosten Verbrauchsmaterialien		●	Die Speicherkarten der digitalen Kamera sind nach Ausdruck oder Übertragung der Bildinformationen auf andere Speicher wiederverwendbar.
Empfindlichkeit	●		Die Empfindlichkeit der digitalen Kamera liegt etwa bei ISO 100/21°; durch Zusammenschalten mehrerer CCD-Zellen kann die Empfindlichkeit gesteigert werden – unter Verlust von Auflösung
Belichtungsumfang (Dynamik)	●		Belichtungsumfang digitale Kamera : 6 - 10 Blenden Belichtungsumfang Film : 10 Blenden
Schärfe/Auflösung	●		Pixel-Anzahl ist beim Film (24 x 36 mm) höher; bei regelmäßigen Mustern können in digitaler Aufnahme Farbstreifen auftreten
Farbwiedergabe		●	
Stabilität (vor Gebrauch)		●	Bei digitaler Kamera gibt es keine Alterungseffekte; der Sensor wird für die Belichtung aktiviert
Stabilität (Klimaeinfluß bei Belichtung)	●		Eigenschaften des CCD-Sensors sind relativ stark abhängig von der Temperatur
Convenience	▬		Für den PC-Hobbyisten eher vorteilhaft: keine Naßverarbeitung, schnelle Zugriffszeit zum Bild; Möglichkeit zur digitalen Bildverarbeitung, zur Bildübertragung oder zum Printauftrag via Internet. Für andere Personen ist die Visualisierung über den Bildschirm und das zeitaufwendige, eigene Ausdrucken der Prints vergleichsweise nachteilig. Bei Weggabe des Bildspeichers zum Printen ist die Convenience gleich der des Films
Bildspeicherung	●		Zur Archivierung ist Übertragung der Bildinformation von (teurer) Speicherkarte auf preiswertes, externes Speichermedium nötig; zum Auslesen bedarf es eines speziellen Gerätes, dessen zukünftige Verfügbarkeit (nach z. B. 20 oder 30 Jahren) durchaus unsicher ist

Abbildung 63  
(Kopiervorlage 23)

Die Systeme haben also deutlich verschiedene Eigenschaftsprofile. Je nach Wichtung der Eigenschaften in den verschiedenen Anwendungsbereichen wird das eine oder andere System bevorzugt werden. In vielen Fällen wird gerade erst durch das Zusammenwirken beider Technologien („Silver and Silicon“) ein technischer Fortschritt ermöglicht.

Im Bereich der hier vorrangig betrachteten Bildfotografie wird eine Koexistenz der Systeme erwartet. Computer-Hobbyisten und viele professionelle Anwender (z. B. Zeitungsfotografen) werden die digitale Kamera bevorzugen; die große Zahl der ereignisorientierten Fotografen (Urlaub, Feste, etc.) sowie der qualitätsbewußten Hobby- und Fachfotografen wird dem Silberhalogenidfilm treu bleiben. Auch der Silberhalogenidfotografie steht über das Scannen der Filme (oder Prints) das Potential der digitalen Bildverarbeitung zur Verfügung.

Ein Beispiel für eine solche Kombination von Filmaufnahme und Bildverbesserung durch digitale Techniken stellt der *Dimax-Printer* von *Agfa* dar.

In diesem Printer für konventionelle Filme wird auf digitalem Weg eine Belichtungskorrektur (digitale Maske) erzeugt, die zusammen mit der analogen Basisbelichtung einen Kontrastausgleich innerhalb eines Bildes ermöglicht (siehe **Abbildungen 64** und **65** auf folgender Seite).

Diese digitale Belichtungsmaske entspricht dem „Abwedeln“ (der manuellen Lichtschwächung im Lichtkegel des Vergrößerers) von überbelichteten Bildbereichen in der klassischen Dunkelkammertechnik. Dabei werden überbelichtete Bildbereiche abgedunkelt, unterbelichtete Bildbereiche aufgehellt (der hohe Belichtungsumfang des Negativfilms wird auf den kleineren Belichtungsumfang des Colorpapiers abgestimmt; vgl. Seite 34).

Langfristig werden sich voll-digitale Printer durchsetzen, die den Film scannen, eine digitale Bildverbesserung durchführen und die Bildinformation digital ausdrucken, z. B. mit einem Laser auf Silberhalogenidpapier.

In der Computerperipherie haben nasse, chemische Verfahren zur Bildwiedergabe keine Chance, aber für die Kopieranstanlagen wird auch langfristig

das Silberhalogenidpapier wegen seines günstigen Preis-/Qualitätsverhältnisses das Wiedergabemedium der Wahl bleiben.

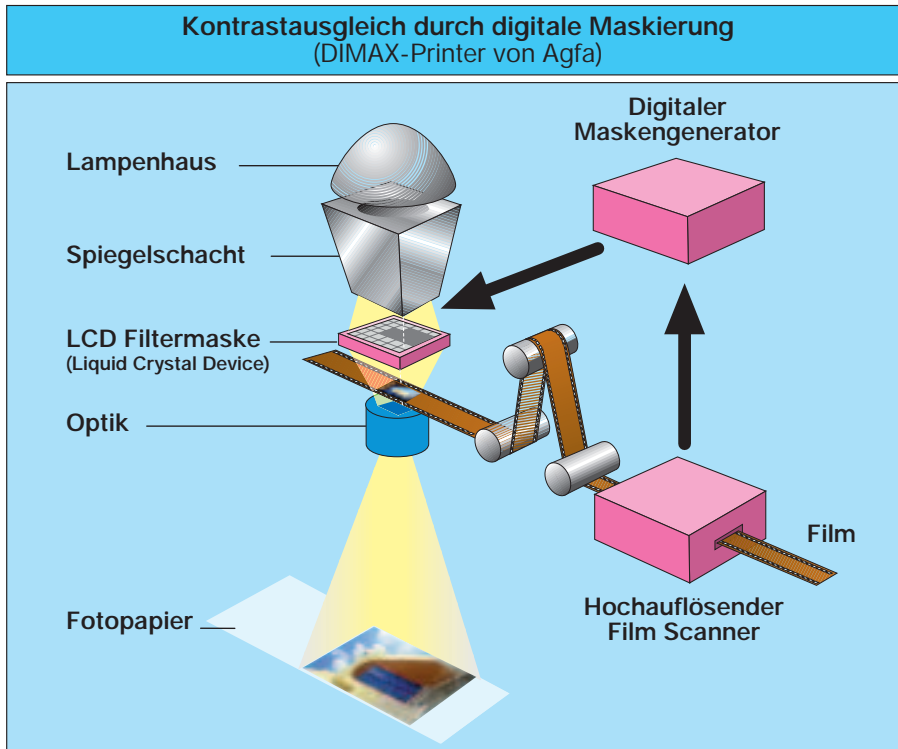


Abbildung 64  
(Folie 41)



Abbildung 65  
(Folie 42)

Für das weitergehende Studium fotografischer Fragestellungen wird die folgende Literatur empfohlen:

### 1. Geschichte

*Newhall, B.:*

The History of Photography; 50<sup>th</sup> ed., Museum of Modern Art, New York, 1982

*Tillmanns, U.:*

Geschichte der Photographie; Verlag Huber, Frauenfeld, Stuttgart, 1981

### 2. Allgemeine Lehrbücher

*Billmeyer, F. W./Saltzman, M.:*

Grundlagen der Farbtechnologie; 2. Aufl., Muster-schmidt, 1993; ISBN 3-7881-4051-8

*Böttcher, H./Epperlein, J.:*

Moderne photographische Systeme, Wirkprinzipien – Prozesse – Materialien; 2. Aufl., Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1988

*Handbook of Photographic Science and Engineering;* 2<sup>nd</sup> ed., Soc. Im. Sci. Techn. 1997; ISBN 0-89208-198-8

ISBN 0-89208-198-8

*Hunt, R. W. G.:*

The Reproduction of Colour, Fountain Press, 4<sup>th</sup> ed., 1987; ISBN 0-85242356

*Stroebel, L./Zakia, R. ed.:*

Encyclopedia of Photography, Focal press; 3<sup>rd</sup> ed., 1993; ISBN 0-240-80059-1

*Wyszecki, G./Stiles, W. S.:*

Color Science; 2<sup>nd</sup> ed., J. Wiley & Sons, 1982; ISBN 0-471-02106-7

### 3. Silberhalogenid-Fotografie

*Dietz, F.:*

Zum Stand der Theorie der spektralen Sensibilisierung, Teil I u. II; J. Signal AM 6, 245 u. 341 (1978)

*Glafkidès, P.:*

Chimie et Physique Photographiques, Bd. I und II; 5. Aufl., L'Usine Nouvelle, Paris, 1987

*Granzer, F./Moisar, E.:*

Der fotografische Elementarprozeß in Silberhalogeniden, Teil I und II; Physik in unserer Zeit 12, 22 und 36 (1981)

*Haist, G.:*

Modern Photographic Processing, Vol. I and II; J. Wiley and Sons, New York 1979

*James, H. T. (Hrsg.):*

The Theory of the Photographic Process; 4. Aufl., Macmillan, New York, London, 1977

*Moisar, E.:*

Physikochemie des fotografischen Prozesses; Chemie in unserer Zeit 17, 85 (1983)

*Nickel, U.:*

Wie entstehen farbige Sofortphotographien?; Chemie in unserer Zeit 19, 1 (1985)

*Photography,*

Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry; Vol A 20; p. 1 - 159; VCH Publishers, 1992; ISBN 0-89573-170-3

*Püschel, W.:*

Die Farbphotographie; Chemie in unserer Zeit 4, 9 (1970)

*Schellenberg, M./Schlunke, H.-P.:*

Die Silberfarbbleich-Farbphotographie; Chemie in unserer Zeit 10, 131 (1976)

*Tani, T.:*

- Photographic Sensitivity, Oxford University Press, New York, 1995; ISBN 0-19-507240-5
- Progress and Future Prospects of Silver Halide Photography Compared with Digital Imaging; J. Imag. Sci. Techn. 42, 1 (1998)

*Van de Sande, C.:*

Farbdiffusionssysteme in der Farbfotografie; Angewandte Chemie 95, 165 (1983)

### 4. Digitale Fotografie

*Die digitale Farbe;*

Schriftenreihe Agfa-Gevaert AG (9 Broschüren), Bestellformular-Nr. 9050 (über Fax-Nr. 0221 / 57 17 766)

*Häßler, U./Pfennig, F./Wüller, D.:*

Digitale Fotografie, Springer Verlag, 1998; ISBN 3-540-62887-8

*Jähne, B.:*

Digital Image Processing, Springer Verlag; 3<sup>rd</sup> ed., 1995; ISBN 3-540-59298-9

*Schlicht, H. J.:*

Bildverarbeitung digital; Addison-Wesley Publ. Co.; 2<sup>nd</sup> ed.; 1995; ISBN 3-89319-889-8

*Shin Ohno:*

Digital Photography and Color Printing, J. Imag. Sci. Techn. 40, 556 (1996)

## Abb.

Nr.	(F: Folie, K: Kopiervorlage)		Seite
1	(F 1)	Reproduktion einer Daguerreotypie .....	1
2	(F 2)	Fotografische Technologien (Übersicht) .....	4
3	(K 1)	Analoge und digitale Signalregistrierung .....	5
4	(F 3)	Bildaufzeichnungskette .....	5
5	(K 2)	Digitale Bildwiedergabe .....	6
6	(K 3)	Empfindlichkeit bildaufzeichnender Systeme .....	9
7	(F 4)	Elektrofotografisches Kopiergerät .....	9
8	(F 5)	Reaktionen im Silberhalogenid-Kristall I .....	12
9	(K 4)	Reaktionen im Silberhalogenid-Kristall II .....	12
10	(F 6)	Reziprozitätsfehler .....	13
11	(K 5)	Energieschema der Lichtabsorption .....	14
12	(F 7)	Spektrale Empfindlichkeit von AgBr-Emulsionen und vom Auge .....	14
13	(K 6)	Sensibilisierungsfarbstoffe .....	15
14	(K 7)	Entwicklung Silberhalogenid .....	16
15	(K 8)	Abscheidungsformen von Silber .....	17
16	(K 9)	Entwickler-Substanzen .....	18
17	(K 10)	Schwarzweiß-Verarbeitung .....	19
18	(F 8)	Negativ/Positiv-Verfahren .....	20
19	(F 9)	Silbersalz-Diffusion .....	21
20	(F 10)	Farbmischung in der Fotografie .....	22
21	(F 11)	Lichtfarben für Farbmischung .....	22
22	(F 12)	Additives Linienraster-Verfahren .....	24
23	(K 11)	Chromogene Kupplung I .....	25
24	(K 12)	Chromogene Kupplung II .....	25
25	(F 13)	Chromogene Entwicklung/Colornegativ-Film .....	26
26	(F 14)	Dünnschnitte durch Colornegativ-Film .....	27
27	(F 15)	Farbmaskierung .....	28
28	(K 13)	Chromogene Kupplung III .....	28
29	(F 16)	Farbverbesserung durch vertikale Inhibierung .....	29
30	(F 17)	Chromogene Entwicklung/Colorumkehr-Film .....	30
31	(F 18)	Silberfarbbleichverfahren .....	31
32	(F 19)	Farbstoff-Diffusion .....	31
33	(F 20)	Dichtekurve Negativfilm .....	32
34	(F 21)	Gradation: Einfluß auf Belichtungsumfang und Kontrast .....	34
35	(F 22)	Körnigkeit .....	35
36	(K 14)	Körnigkeitsmessung .....	36
37	(F 23)	Kanteneffekt .....	37
38	(F 24)	Modulationsübertragungsfunktion .....	37
39	(F 25)	CIE-Lab Farbraum .....	38
40	(K 15)	Silber (Recycling, Preis, Verbrauch) .....	40
41	(K 16)	Herstellung fotografischer Emulsionen .....	41
42	(F 26)	Kristallformen fotografischer Emulsionen .....	41
43	(F 27)	Beguß-Verfahren .....	43
44	(K 17)	Advanced Photo System APS .....	45
45	(F 28)	Gradationsvariables Schwarzweiß-Papier .....	45
46	(F 29)	Druckvorbereitung .....	46
47	(K 18)	Halbtonwiedergabe .....	47
48	(F 30)	Medizinische Röntgenaufnahme .....	48
49	(F 31)	Digitale Kamera .....	50
50	(F 32)	CCD-Bildsensor .....	51
51	(F 33)	Einfluß der Diskretisierung auf die Bildqualität .....	53
52	(K 19)	Signalumwandlung .....	53
53	(F 34)	Scanner .....	55

**Abb.**

Nr. (F: Folie, K: Kopiervorlage)

**Seite**

54	(K 20)	Daten-Transformation mit Hilfe eines LUT-Bausteines .....	56
55	(F 35)	Änderung von Bilddichte oder Kontrast .....	56
56	(F 36)	Änderung von Schärfe oder Farbsättigung .....	57
57	(K 21)	Verbesserung der Halbtonwiedergabe durch Dithering .....	58
58	(F 37)	Digitale Printer I (belichtende Printer) .....	58
59	(F 38)	Digitale Printer II .....	59
60	(F 39)	Digitale Röntgenverfahren .....	60
61	(F 40)	Sehende Systeme .....	61
62	(K 22)	Vergleich: Film und CCD-Chip .....	62
63	(K 23)	Eigenschaftsprofil einer digitalen Kamera .....	63
64	(F 41)	Kontrastausgleich durch digitale Maskierung .....	64
65	(F 42)	Wirkung eines Kontrastausgleiches .....	64

Begriff	Definition
• Bildauflösung .....	Maß für die Schärfe eines Bildes; bei digitalen Bildern als Anzahl Pixel pro Bildzeile (in Pixel/cm) oder pro Bildfläche (in Pixel/Bild) definiert
• Digitale Bildinformation .....	Datensatz mit der in Form von Zahlen gespeicherten Bildinformation
• Digitaler Printer .....	Druck- oder Belichtungsgerät, das die digital gespeicherte Bildinformation als Print ausgibt
• Digitales Bild .....	Ausdruck (Print) der in digitaler Form gespeicherten Bildinformation
• Digitalisierung = Diskretisierung .....	Umwandlung analoger Signale in digitale Signale
• Pixel = picture element = Bildelement .....	kleinstes Element eines Bildes (mit voller Farbinformation bei Farbbildern)
• Pixel-Tiefe = Farbtiefe = Quantisierung .....	Anzahl Dichtestufen pro (farbtüchtigem) Pixel (in Bit/Pixel)
• Printerauflösung .....	charakterisiert die Auflösung des Printverfahrens; Angabe in dots/cm oder dots per inch (dpi)
• Printpunkt = dot .....	kleinstes Element in einem punktwise ausgegebenen Bild (Print)
• Sensorauflösung .....	bestimmt durch die Anzahl der Sensorzellen pro Sensorzeile oder die Anzahl der Sensorzellen pro Sensorgesamtfläche
• Sensorzelle .....	kleinstes Element eines CCD-Bildsensors

(\* kennzeichnet Begriffe, die im Abschnitt A.3 näher definiert sind.)

Stichwort	Seite(n)	Stichwort	Seite(n)
Additive Verfahren	22 ff	Elektrofotografie	9, 59
Analoge Bildaufzeichnung	4 ff	Elektronische Fotografie: siehe Digitale Fotografie	
APS (Advanced Photo System)	44 ff	Elementarprozeß, fotografischer	11 ff
ASA-Empfindlichkeit: siehe ISO-Empfindlichkeit		Empfindlichkeit	9, 33, 42
Auflösung: siehe Bildauflösung		Emulsion	40 ff
Auge	47, 61	Entwickler	17, 18
Beguß	43	Entwicklung, allgemein	15 ff, 25 ff
Belichtung	13, 32 ff	Entwicklung, chemische	16 f
Belichtungsspielraum	32, 34	Entwicklung, chromogene	25 ff
Bildauflösung*	37, 52 ff, 57, 61, 63	Entwicklung, physikalische	16 f
Bildelement: siehe Pixel		Farbfotografie	14, 22 ff, 52
Bildspeicher	50 f	Farbmischung, additive	22 ff
Bildverarbeitung	6, 55 ff	Farbmischung, subtraktive	22 ff
Bit	51, 54	Farbsättigung	29, 38, 57
Bleichen	26, 30	Farbstoff-Diffusion	30 ff
Byte	51	Farbtiefe: siehe Pixel-Tiefe	
CCD-Bildsensor	51 ff, 62	Farbwiedergabe	38, 56
Charakteristische Kurve	32	Film, chromogener Schwarzweiß-	44
Chromogene Verfahren	25 ff	Film, Farb(Color-)negativ-	25 ff
CIE-Lab Farbraum	38	Film, Farb(Color-)umkehr-	30
Colorsofortbild	30 ff	Film, Lith-	47
Daguerreotypie	1	Film, Mikro-	42, 47
Defektelektron	11 ff	Film, Röntgen-	48
Detailwiedergabe	35 ff, 52, 54, 57	Film, Schwarzweiß-	18 f
Diazotypie	8, 47	Film, Schwarzweißumkehr-	20, 24, 49
Dichte, optische	4, 13, 32, 33	Fixieren	19, 26
Dichtekurve	32 ff	Fixiersalz	19
Diffusionsverfahren	20, 30, 49	Fotopapier	19, 29, 30, 34, 45, 64
Digital/Analog-Wandler	50, 53	Fotosatz	46
Digitale Bildaufzeichnung: siehe Digitale Fotografie		Gelatine	11, 40
Digitale Bildinformation*	5, 51, 54	Geschichte der Fotografie	1 ff
Digitale Fotografie	4 ff, 50 ff, 61 ff	Goldberg-Regel	34
Digitale Kamera	50 ff	Gradation	32, 34, 43, 45 f
Digitale Maskierung: siehe Kontrastausgleich		Halbton	46, 47, 54, 57, 58
Digitale Radiografie	60	Informationsmenge	51, 54, 62
Digitaler Printer*	6, 57 ff	Inkjet-Printer: siehe Digitaler Printer	
Digitales Bild*	6, 55 ff	Inter-Image-Effekt	29
Digitalisierung*	52 ff	ISO-Empfindlichkeit	33
DIN-Empfindlichkeit: siehe ISO-Empfindlichkeit		Kanteneffekt	29, 37
DIR-Kuppler	28, 29	Kaskadengießer	43
Diskretisierung: siehe Digitalisierung		Kontrast	34
Dithering	57 f	Kontrastausgleich	34, 63, 64
dot: siehe Printpunkt		Körnigkeit	27, 35 f, 42, 53
dpi (dots per inch)	57	Kopieren (von Negativen)	19, 20, 29, 30
Druck	46 f, 59, 60	Kopieren (Photokopieren)	8 ff
Drucker: siehe Printer			
Dry Silver: siehe Photothermografie			

Stichwort	Seite(n)	Stichwort	Seite(n)
Kuppler (allgemein)	25ff	T-Kristalle	41
Kuppler, DIR-	28f	Thermo-Printer: siehe Digitaler Printer	
Kuppler, Masken-	27f	Tintenstrahl-Printer: siehe Digitaler Printer	
Latentbildkeim (latentes Bild)	7, 11, 14ff, 42	Umkehrentwicklung: siehe Verarbeitung, Umkehr-	
Lichtempfindlichkeit: siehe Empfindlichkeit		Verarbeitung, Negativ/Positiv-	18f, 25ff
Linienraster	23, 24	Verarbeitung, Umkehr-	20, 24, 30, 49
LUT (Look-Up-Table)	55f	Verlustprozesse	11ff
Maskierung	27f	Verstärkerfolie (bei Röntgenfilm)	48
Megabyte (MB)	51	Vesicularprozeß	8
Modulationsübertragungsfunktion (MÜF)	36f	Vorhanggießer	43
Ortsfrequenz	36f, 57	Zelle: siehe Sensorzelle	
pAg-Wert	41	Zwischengitter-Silberion	11f
Photoelektron	11ff, 51, 62		
Photolithografie	46f		
Photolyse	8		
Photopolymerisation	8		
Photoresist	8		
Photothermografie	47		
Pixel*	5f, 51ff, 61f		
Pixel-Tiefe*	53f, 58		
Printer (siehe auch Digitaler Printer)	63f		
Printerauflösung*	57f		
Printpunkt (dot)*	57		
Quantisierung: siehe Pixel-Tiefe			
Rasterung	6, 46f, 52ff		
Recycling	39f		
Reifung, chemische	11f, 42		
Reifung, physikalische	41		
Rekombination	11f		
Reprografie	7ff, 46f, 59f		
Reziprozitätsfehler	13		
rms-Körnigkeit	36		
Röntgenfotografie	48, 60		
Scanner	5, 54f		
Schärfe (siehe auch Bildauflösung)	36ff		
Schichtaufbau	26ff		
Schleier	27, 32f, 42		
Schwarzschildeffekt: siehe Reziprozitätsfehler			
Sensibilisator	15		
Sensibilisierung, chemische: siehe Reifung, chem.			
Sensibilisierung, spektrale	13ff, 26, 42, 52		
Sensor	7, 9, 11, 50, 61f		
Sensorauflösung*	52, 54f		
Sensorzelle*	51f		
Silber	7, 9, 11ff, 39ff		
Silberfarbbleichverfahren	30f		
Silberhalogenid(-Kristalle)	7, 11ff, 40ff		
Silbersalz-Diffusion	20, 49		
Sofortbild: siehe Farbstoff-Diffusion			
Stabilität, Bild-	39		
Subtraktive Verfahren	22ff		

### Zur Geschichte

Der Fonds der Chemischen Industrie ist 1950 als „Hilfsfonds der Chemie“ (seit 1953 Bezeichnung „Fonds der Chemischen Industrie“) mit dem Ziel gegründet worden, den Aufbau der chemischen Grundlagenforschung an den deutschen Hochschulen zu fördern.

Im Laufe der Zeit sind Fragen der Forschungs-, Technologie-, Wissenschafts- und Bildungspolitik hinzugekommen. 1965 wurde die „Stiftung Stipendien-Fonds“ für die Nachwuchsförderung gegründet und 1982 der „Fonds für Biologische Chemie“ zur Förderung von Grundlagenforschung und Nachwuchs im interdisziplinären Bereich zu den Biowissenschaften.

### Entscheidungsgremium

Kuratorium: 12 Forschungsvorstände der chemischen Industrie, 6 Hochschullehrer der Chemie als Vertreter der einzelnen chemischen Fachgebiete (Anorganische, Organische, Physikalische, Technische/Makromolekulare und Biologische Chemie) sowie ex officio die Präsidenten des Verbandes der Chemischen Industrie (VCI) und der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh). Vorsitzender ist ein Vertreter der chemischen Industrie. Die Amtsdauer der Kuratoriumsmitglieder beträgt drei Jahre mit Wiederwahlmöglichkeit.

Die Mitglieder des Kuratoriums bilden zugleich den wissenschaftlichen Beirat der Stiftung Stipendien-Fonds und den Ausschuß für Forschungs- und Wissenschaftspolitik des VCI. Unterstützend ist zusätzlich ein Forschungsbeirat tätig.

### Beitragsaufkommen

0,12 Promille des deutschen Chemieumsatzes der Mitglieder des Verbandes der Chemischen Industrie. Zur Finanzierung der Förderungsmaßnahmen werden zusätzlich Zuschüsse des BMBF auf ausgewählten Forschungsfeldern gewährt.

### Zielsetzung

Sicherung des wissenschaftlichen Nachwuchses und der Grundlagenforschung in der Chemie durch leistungsbezogene Förderung von Lehrenden und Lernenden an Hochschulen und Gymnasien.

### Tätigkeitsschwerpunkte

Förderung von Forschung, Nachwuchs und Literatur/Information. Vorschläge zur Bildungs-, Wissenschafts-, Forschungs- und Technologiepolitik.

### Aufgabenbereiche

#### des Fonds der Chemischen Industrie

- Leistungsorientierte, personenbezogene Förderung von Lehrenden und Lernenden der Chemie ohne Projektbindung.
- Initiierung von Modellversuchen zur Aus- und Fortbildung, insbesondere von Diplom-Chemikern.
- Infrastrukturhilfeprogramme für Wissenschaftler in den Kooperationsbereichen mit dem BMBF „Bioinformation“ und „Neue Materialien“.
- Nachwuchsförderung (Dozenten-, Habilitations-, Promotions- und Lehramtsstipendien) im Bereich Chemie.
- Förderung der Mobilität besonders qualifizierter Diplom-Chemiker, die an einem anderen Ort in einem hervorragenden forschungsaktiven Arbeitskreis promovieren wollen.
- Stipendium für Chemiker mit dem Berufsziel „Wissenschaftsjournalismus“.
- Durchführung von wissenschaftlichen Veranstaltungen zur Vermittlung aktueller Forschungsergebnisse.
- Förderung der Aus- und Fortbildung von Chemielehrern durch Referendar- und Seminarleiter-spenden.
- Unterstützung des Chemieunterrichts an Gymnasien mittels Unterrichtsbeihilfen. Buchspenden für Schüler, Buchpreisen für Abiturbeste in Chemie sowie Finanzierung der Chemiepreise von „Jugend forscht“.
- Vermittlung spezifischer Informationen zu industrierelevanten Aspekten der Chemie, Ausbildung und Forschung etc. für Hochschullehrer der Chemie und für Chemielehrer an Gymnasien.
- Informationsmaterial für Hochschullehrer der Chemie, Chemielehrer und Lehrer der Naturwissenschaften an Gymnasien sowie Ausbilder in Mitgliedsunternehmen.
- Wissenschaftsmagazin „Chemie heute“.

### Kooperation

Der Fonds der Chemischen Industrie hat Kooperationen mit folgenden Partnern:

- Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF): Erweiterung des Förderspielraums in den Bereichen „Bioinformation“ sowie „Neue Materialien“.
- Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft: Programm „Chemie und Geisteswissenschaften“.