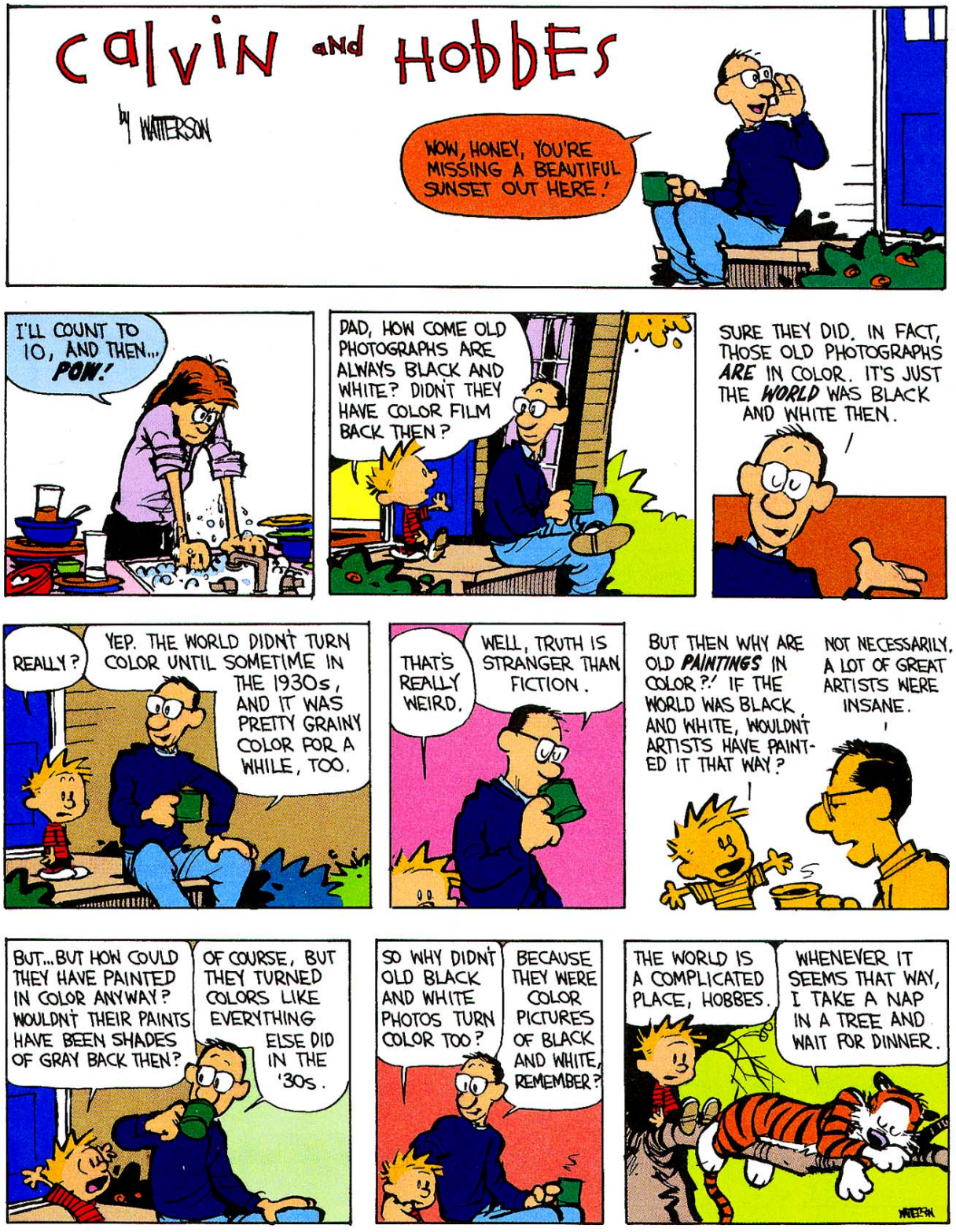
Skript zur Vorlesung

Farbphotographie

Institut für Medienwissenschaften
Universität Basel
Abteilung für Bild und Medientechnologien



aus "The Indispensable CALVIN and HOBBES" von Bill Watterson, Warner Books, London, 1992

Script zur Vorlesung

Farbphotographie

WS 2001/02

Regula Anklin-Mühlemann
PD Dr. R. Gschwind

Institut für Medienwissenschaften
Abteilung für Bild- und Medientechnologien
Universität Basel

Inhaltsverzeichnis: Seite

1.	**Geschichtlicher Überblick**	**1**
1.1.	Die Kamera obscura	1
1.2.	Frühe photochemische Versuche	1
1.3.	Die Erfindung der Photographie	2
1.4.	Gelatine und Trockenplatte	4
1.5.	Entwickler und Verarbeitungschemikalien	6
1.6.	Farbphotographie	6
1.6.1.	Direkte Verfahren	6
1.6.2.	Indirekte Verfahren	7
2.	**Grundlagen der Farbwissenschaft**	**13**
2.1.	Aufbau und Funktion des menschlichen Auges	13
2.2.	Licht und Farbe	18
3.	**Möglichkeiten der metameren Nachbildung der Farben**	**27**
3.1.	Additive Farbmischung	27
3.2.	Subtraktive Farbmischung	28
4.	**Farbsensitometrie**	**31**
4.1.	Der Grauaufbau	32
4.2.	Fehler in der Farbwiedergabe bei Kopierverfahren	32
4.2.1.	Ursache der Farbverschiebungen	32
4.2.2.	Schematische Farbwiedergabe bei der Kopie ab Dia	34
4.2.3.	Schematische Farbwiedergabe beim Negativ–Positiv–Prozess	34
4.3.	Komprimierung des Tonwertumfangs durch Kontrastmasken	35
4.4.	Automatische Farbstoffmasken	35
4.4.1.	Das Prinzip der automatischen Farbmaske	35
4.5.	Der Farbstich	38
4.6.	Das Farbkippen	38
5.	**Spektrale Sensibilisierung der Einzelschichten**	**40**
5.1.	Farbempfindlichkeit	40
5.2.	Erweiterung der Farbempfindlichkeit durch den Sensibilisiervorgang	40
6.	**Modernes Farbfilmmaterial**	**42**
6.1.	Geschichtliche Entwicklung ab 1900	42
6.2.	Aufbau eines chromogenen Farbfilms	43
6.2.1.	Schichtaufbau im Einzelnen	43
6.2.2.	Filmaufbau mit einer Doppel- und zwei Dreifachschichten	44

Seite

6.3. Effektive Lichtempfindlichkeit von Emulsionsschichten 47
6.4. Einfluss des topographischen Aufbaus auf die Qualität der Abbildung 47
6.5. Technische und chemische Anforderungen an Farbkuppler 48
6.6. DIR-Kuppler (Development Inhibitor Releasing Couplers) 49
6.7. Maskierende Farbkuppler in Farbnegativen 49
6.8. Der Kodachrome-Film 50

7. Chromogene Entwicklung 53
7.1. Schema der chromogenen Farbentwicklung 53
7.2. Mechanismus der Farbentwicklung 54
7.3. Farbstoffklassen für subtraktive Farben 57
7.3.1. Azomethin-Farbstoffe 59
7.3.2. Indoanilin-Farbstoffe 61
7.4. Farbige Kuppler für die Maskierung (Farbnegative) 62
7.5. DIR-Kuppler (Development Inhibitor Releasing Couplers) 63

8. Grundlagen und Eigenschaften der Filme 64
8.1. Körnigkeit und Auflösungsvermögen 64
8.2. Schärfe 65
8.3. Körnigkeit und Auflösungsvermögen einiger Farbnegativ- und Umkehrfilme 66
8.4. Charakteristische Kurven einiger Kodak-Farbumkehrfilme 67
8.5. Gradationskurven und spektrale Empfindlichkeitskurven der Kodak-Farbnegativfilme 68
8.6. Auflösungsvermö gen einiger Kodak-Farbfilme: Modulationsübertragungsfunktion (Müf) 69
8.7. Spektrale Empfindlichkeitskurven und Farbdichtekurven einiger Farbumkehrfilme 70

9. Farbphotographische Methoden 71
9.1. Farb-Aufbau 71
9.2. Farb-Abbau 71
9.3. Farb-Diffusion 71
9.3.1. Das Polacolor-Verfahren 72
9.3.2. Das Monoblatt-Verfahren 72
9.3.3. Der Polachrome Sofortdiafilm 74

Seite

10. Filter in der Farbphotographie 75
10.1. Konversionsfilter 75
10.2. Licht–Ausgleichsfilter 76
10.3. Farb–Korrekturfilter 80
10.4. UV–Sperrfilter 82
10.5. Polarisationsfilter 82
10.6. Neutraldichtefilter 83

11. Entwicklung von Farbfilmen 84
11.1. Der Farbumkehr-Prozess: E-6-Prozess 84
11.1.1. Genereller Vorgang 84
11.1.2. Genauere Angaben zu den einzelnen Entwicklungsschritten 85
11.1.3. Haltbarkeit angesetzter Lösungen für den Prozess E-6 87
11.1.4. Variation der Empfindlickeit bei Änderung der Entwicklung 87
11.1.5. Kleiner geschichtlicher Abriss über den E-6-Prozess 88
11.1.6. Schema für den Kodak E-6-Prozess 89
11.1.7. Tetenal: Prozess E-6/3-Bad 90
11.2. Der Farbnegativ-Prozess: C-41-Prozess 92
11.2.1. Genauere Angaben zu den einzelnen Entwicklungsschritten 92
11.2.2. Schema des Kodak C-41-Prozesses im Trommelprozessor 93
11.2.3. Kapazität der Lösungen 93
11.2.4. Aufbewahrung der Lösungen 93
11.2.5. Schematischer Entwicklungsgang der automatischen Farbmaskierung bei Kodak–Farbnegativfilmen 94

12. Aufbau und Entwicklung von Farbpapieren 95
12.1. Farbpapiere für das Negativ-Positiv-Verfahren 95
12.1.1. Schema des Kodak Ektaprint 2 Prozesses 95
12.1.2. Aufbewahrung und Kapazität der Lösungen 96
12.1.3. Spektrale Empfindlichkeitskurven zweier Papiere 96
12.2. Farbumkehrpapiere 96
12.2.1. Spektrale Empfindlichkeitskurve des Kodak Ektachrome 22 97
12.2.2. Beschreibung des Prozesses 97
12.3. Farbpositiv-Materialien 98
12.4. Allgemeines zu Printmaterialien 99
12.5. Aufnahmetechnik mit Farbfilmen 99
12.6. Text zur Farbkopie: Belichtung und Entwicklung diverser photographischer Materialien 100
A. Dreischichten-Farbumkehrfilm 100
B. Kodachrome-Prinzip 100

Seite

C. Kopie eines Farbnegativs auf ein Farbvergrösserungspapier 101
D. Schematische Darstellung der Belichtung und Entwicklung von Ilfochrome-Material 101
Farbkopie: Belichtung und Entwicklung diverser photographischer Materialien 102
12.7. Filmliste 103
12.7.1. Farbpositiv-Aufnahmematerialien 103
12.7.2. Farbnegativ-Aufnahmematerialien 103

13. Praxis der Farbkopiertechnik 105
13.1. Aufbau eines Vergrösserungsapparates 105
13.2. Beeinflussung der Intensität der Grungfarbzonen im Kopiervorgang durch Filter 106
13.3. Die subtraktive Filtermethode 106
13.3.1. Prinzip der subtraktiven Farbstichkorrektur 107
13.4. Die additive Filtermethode 108
13.4.1. Prinzip der additiven Farbstichkorrektur 109

14. Stabilität von photographischen Farbmaterialien 110

15. Empfindlichkeit, Belichtung und latentes Bild beim Farbfilm 112
15.1. Bestimmung der Lichtempfindlichkeit bei Farb–Umkehrfilmen 112
15.2. Bestimmung der Lichtempfindlichkeit bei Farb–Negativfilmen 114
15.3. Empfindlichkeit und Lagerung der Farbfilme 115
15.4. Das latente Bild im Farbfilm 116

16. Der Reziprozitätsfehler 117
16.1. Die Reziprozität der Belichtung 117
16.2. Der Reziprozitätsfehler und der Schwarzschildeffekt 117
16.3. Die Einflussfaktoren für den Reziprozitätsfehler 118
16.4. Filmempfindlichkeit und Reziprozität 120
16.4.1. Der Reziprozitätsfehler und die Filmtemperatur bei der Belichtung 121
16.4.2. Die Verbesserung des Reziprozitätsfehlers durch eine entsprechende Emulsionsherstellung 122
16.5. Verbesserung des Langzeitfehlers 122

Seite

16.6. Photographische Schichten ohne Reziprozitätsfehler? 122
16.6.1. Das lichtempfindliche Material 123
16.6.2. Entstehung des latenten Bildes 123
16.6.3. Die Ursache des Reziprozitätsfehlers 124
16.7. Der Langzeitfehler 124
16.8. Der Kurzzeitfehler 125
16.9. Die graphische Darstellung des Reziprozitätsfehlers 125

Anhang **127**
Ausführliches Kapitel über Farbsensitometrie

Literaturliste **132**

1. Geschichtlicher Ueberblick

1.1. Die Camera obscura:

384 - 322 v. Chr. **Aristoteles** beschreibt die Entstehung eines Bildes bei Lichteinfall durch eine kleine Oeffnung in einen dunklen Raum (Lochkameraprinzip)

965 - 1038 n. Chr. Der arabische Naturforscher **Ibn al Haitham** erwähnt zum ersten Mal die Camera obscura.

1452 - 1519 **Leonardo da Vinci** befasst sich verschiedentlich mit der Camera obscura, doch werden seine Schriften erst 1797 wieder gefunden.

1558 **Giovanni Battista della Porta** veröffentlicht die erste genaue Beschreibung einer Camera obscura.

1568 **Danielo Barbaro** ersetzt die Oeffnung durch eine Linse.

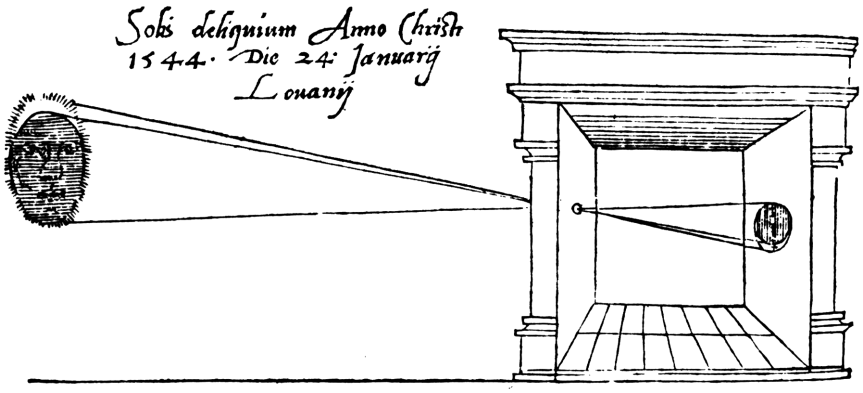


Abb. 1. Erste veröffentlichte Darstellung einer Camera obscura, verwendet zur Beobachtung einer Sonnenfinsternis im Januar 1544.

Die **Camera obscura**, zuerst so gross wie ein Zimmer, wurde mit der Zeit immer kleiner. Künstler und Naturwissenschaftler benutzten sie, um Gegenstände zu projizieren und dann nachzuzeichnen. Ein reines Zeichengerät erfand

1806 **W.H. Wollaston** mit seiner Camera lucida, die statt mit einer Linse mit einem Prisma ausgestattet ist.

1.2. Frühe photochemische Versuche:

13. Jh. **Albertus Magnus** beschreibt Zersetzung von Silbernitrat.

1565 Der deutsche Chemiker **Georg Fabricius** entdeckt das AgCl.

1663 **Roger Boyle** schreibt über die Farbänderung des AgCl, die er jedoch dem Einfluss der Luft zuschreibt.

1727 **Johann Heinrich Schulze** führt die Schwärzung von Silbernitrat auf den Einfluss des Lichts zurück.

1757 **Beccarius** entdeckt die Lichtempfindlichkeit des AgCl.

1777 **Carl Wilhelm Scheele** entdeckt, dass durch Licht geschwärztes AgCl in Ammoniak

nicht mehr völlig löslich ist und feinverteiltes, schwarzes Silber hinterlässt, das sich nicht weiter verändert.

1793 Erster Bericht der Gebrüder **Claude und Joseph Nicé phore Nié pce** über die Idee ein photographisches Verfahren zu entwickeln.

1802 Bericht von **Thomas Wedgwood und Humphrey Davy** über ein Kopierverfahren auf der Basis von Silbernitrat.

1810 **J.T.Seebeck**, Jena, versucht ein Sonnenspektrum auf einer nassen Silberchloridschicht farbig zu registrieren.

1814 **Humphrey Davy** entdeckt die Lichtempfindlichkeit von AgJ.

1816 **J.N.Nié pce** gelingt es erstmals, Bilder auf AgCl-Papier in der Camera Obscura herzustellen.

1819 Entdeckung des Natriumthiosulfats durch **F.W.Herschel**.

1824 Erste photographische Aufnahmen auf eine Zinkplatte mit lichtempfindlicher Asphaltschicht in der Camera Obscura durch **J.N.Nié pce**. Die Asphaltlösung verhärtet sich bei Lichteinfall, während die unbelichteten Bildstellen weich bleiben und mit einem Lösungsmittel (Terpentin) ausgewaschen werden können. Die Platten werden anschliessend tiefgeätzt und mit Druckfarben eingefärbt. Nié pce nennt dieses Verfahren Heliographie.

1826 **Balard** berichtet über Silberbromid.

1.3. Die Erfindung der Photographie:

1827 Erste erhaltene Photographie von **Joseph Nicé phore Nié pce** mit der Camera Obscura. Entwicklung der Heliographie.

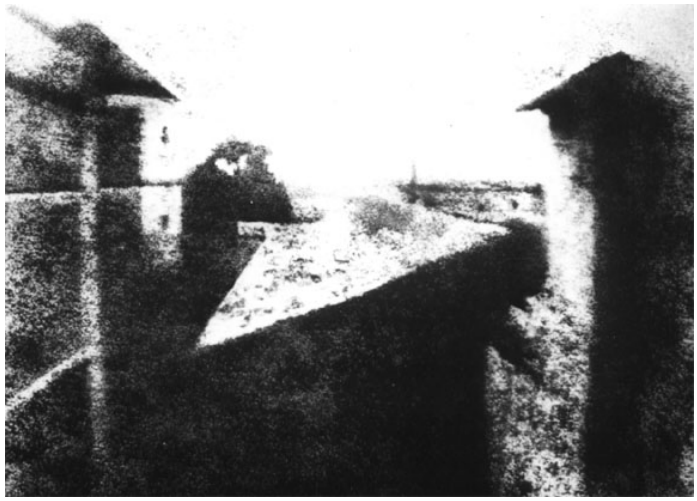


Abb. 2. Die älteste Photographie der Welt. Sie wurde 1827 von Joseph Nicé phore Niépce (Bild links) aufgenommen und zeigt den Blick aus seinem Arbeitszimmer. Die zwei einander gegenüberliegenden Fassaden, die beide von der Sonne angestrahlt werden, beweisen, dass die Belichtungs-zeit mindestens 8 Stunden dauerte.

1829 Partnerschaftsvertrag zwischen **J.N. Niépce und Louis Jacques Mandé Daguerre**.

1833 Tod von **J.N.Niépce**.

1835 **Daguerre** entdeckt das "latente" Bild einer mit Jod sensibilisierten Silberplatte und die Entwicklunsmöglichkeit durch Quecksilberdampf (=Daguerréotypie).

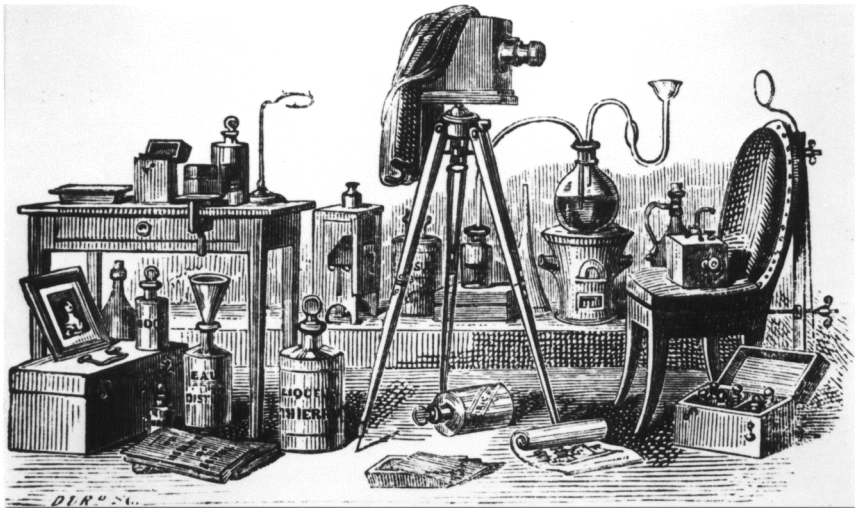


Abb 3: Ausrüstungszubehör eines Daguerreotypisten. (Holzschnitt 1847)

1835 **Fox Talbot** entwickelt Kalotypie: photographische Aufnahmen auf Chlorsilberpapier (Neg/Pos-Prozess). Fixieren mit Kochsalz.

1837 **Daguerre** entdeckt Kochsalzlösung als Fixiermittel.

1839 Veröffentlichung der Verfahren von **Daguerre und Talbot**.

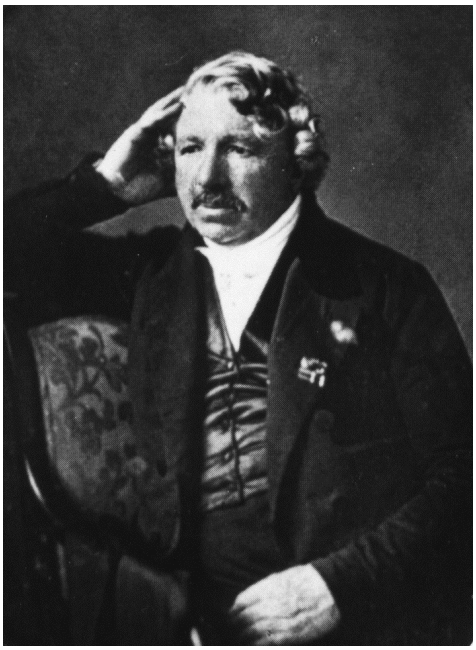


Abb. 4a: Louis Jacques Mandé Daguerre (1787-1851)

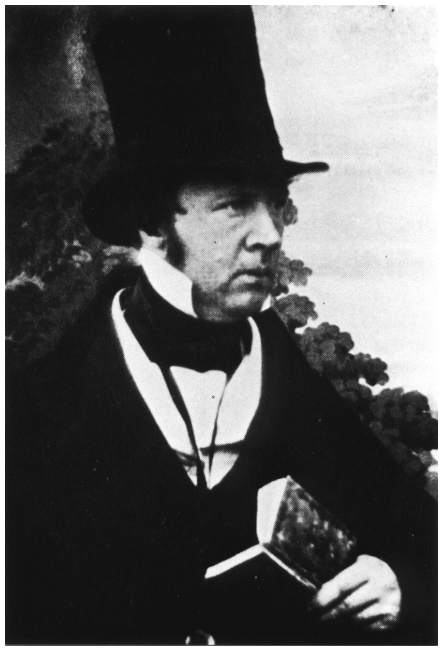


Abb. 4b: William Fox Talbot (1800-1877)

1839 **Mungo Ponton** entdeckt die Lichtempfindlichkeit chromsaurer Salze in Gegenwart von Kolloiden.

1840 **Hippolyte Bayard** beschreibt Direktpositiv-Verfahren auf Papier.

1841 Entdeckung der höheren Lichtempfindlichkeit der Daguerré otypie durch Einwirkung von Brom-Jod auf die Silberplatte durch **F.Kratochwila und J.F. Goddard**.

1847 **Abel Niépce de St.Victor** stellt Glasnegative mit AgJ-Eiweiss (als Kolloid) her.

1848 Berichte über "Collodion, eine neue Kleb- und Haftflüssigkeit" (Schiessbaumwolle in Alkohol-Äther gelöst).

1851 **Frederick Scott Archer** beschreibt das **nasse Kollodiumverfahren** in verständlicher und anwendbarer Form. Dieses Verfahren ersetzt schnell die Daguerreotypie und wird bis nach dem 2. Weltkrieg in Reprobetrieben benutzt. Jodiertes Kollodium wird in Aether gelöst und auf eine Glasplatte gegossen, die nach Verdunsten des Aethers mit einer Silbernitratlösung sensibilisiert wird. Die Platte wird im nassen Zustand belichtet. Anschliessend entwickelt man in $FeSO_4$ (Eisensulfat) und fixiert in KCN ("Zyankali"). Die Empfindlichkeit des Verfahrens liegt um den Faktor hundert höher als jene der Daguerreotypie. Wie die Daguerreotypie ist die Kollodiumplatte ein Unikat. Normalerweise wurden von Kollodiumaufnahmen Kontaktkopien hergestellt. - Um aber die Negativ-Platte selbst als ein Positiv sehen zu können, wird ein schwarzer Hintergrund (schwarzer Lack) auf die Schichtseite aufgetragen. Die Betrachtung erfolgt von der Glasseite.

1862 **Charles Rusell** erfindet die Umkehrentwicklung.

Abb.5: Ausrüstungszubehör des Reisephotographen mit Dunkelkammerzelt, um 1865.
Im Dunkelzelt mussten die Platten unmittelbar vor der Aufnahme präpariert und sofort danach entwickelt werden.

1.4. Gelatine und Trockenplatte

1871 **Richard Leach Maddox** benützt an Stelle des Kollodiums eine Gelatinetrockenplatte mit eingelagertem Silberbromid. Er steigert die Empfindlichkeit nochmals um den Faktor 100 und erreicht damit eine Empfindlichkeit von ca. 5 ISO.

1873 **Hermann William Vogel** will den "Lichthof" der Photoplatten (Reflexion der Lichtstrahlen an der Glasplatte) vermeiden und fügt der Emulsion deswegen gelben Schirmfarbstoff zu. Weil dieser Farbstoff an den Silberhalogenidkristallen absorbiert wird, erweitert Vogel damit ungewollt die spektrale Empfindlichkeit der Silberhalogenide bis in den Grünbereich des sichtbaren Spektrums (bis ca. 600nm). Er

nennt seine Platten orthochromatisch (griechisch: ortho = richtig).

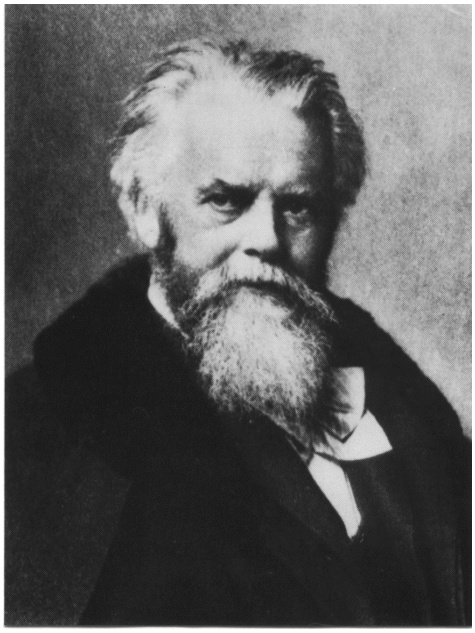


Abb. 6: Hermann Wilhelm Vogel,

1878 **Charles Bennet** entdeckt die physikalische Reifung. Bei der Emulsionsherstellung wird nach der Fällung die Gelatine durch eine Wärmebehandlung empfindlicher gemacht.

1879 **Désiré van Monckhoven** entdeckt die Anwendung einer Emulsion mit Ammoniak.

1879 **Alfred H. Harman** gründet die Britannia Works Co. in der Ortschaft Ilford in der Nähe von London. Binnen 10 Jahren wurde sie zum grössten Produzenten von Trockenplatten auf der ganzen Welt.

1880 **Georg Eastman** gründet die Firma Kodak.

1884 Panchromatische Sensibilisierung durch Hermann William **Vogel**.

1887 **Hannibal Goodwin** erhält ein Patent für die Herstellung von biegsamem durchsichtigem Rollfilm aus Zelluloid.

1888 **George Eastman** verwendet den Rollfilm in seiner Boxkamera. Erste Massenverbreitung eines photographischen Verfahrens.

1890 **Ferdinand Hurter** (CH) und **Vero Charles Driffield** (GB) erarbeiten die Grundlagen der Sensitometrie.

1925 **S.E.Sheppard**: Schwefelsensibilisierung.

1936 **R.Koslowsky**: Goldsensibilisierung.

1938 **E.Weyde** entdeckt Silbersalzdiffusion. Grundlage des "Sofortbildverfahrens" und der ersten Photokopie.

1947 Polaroid s/w-Sofortbildverfahren durch **E. Land**.

1.5. Entwickler und Verarbeitungschemikalien:

1835 Gallussäure (Talbot)

1844 Eisenvitriol (Robert Hunt)

1855 Brenzkatechin (Rudolf Wagner)

1877 Eisenoxalat-Entwickler (Carey Lea)

1880 Hydrochinon (William de Wiveleslie Abney)

1882 Natrium-Sulfit (Herbert Bowyer, Berkeley)

1888 Paraphenylendiamin (Momme Andresen)

1891 p-Aminophenol "Rodinal" (Momme Andresen)

1891 Metol (Methyl-p-Aminophenol) und Glyzin (J.Hauff, A.Bogisch)

1893 Kombination Metol-Hydrochinon (A.Bogisch)

1935 Ascorbinsäure (K.Maurer, G.Zapf)

1940 Phenidon (1-Phenyl-3 Pyrazolidon) (Kendall, Ilford)

1955 Kombination Phenidon-Hydrochinon (Ilford; GEIGY)

1.6. Farbphotographie:

1.6.1. Direkte Verfahren:

Zu den direkten Farbverfahren zählt man Prozesse, bei denen durch die Einwirkung von farbigem Licht ein Farbbild mit den gleichen Farben wie das Originalbild entsteht.

1810 **Thomas Johann Seebeck** (Jena) beobachtet, dass Silberchlorid die Spektralfarben in gewissem Umfang wiedergibt: Dazu hatte er eine "Höllenstein-" und eine "Kochsalzlösung" zusammengebracht, wobei ein käsiger Niederschlag von "Hornsilber" entstand. Diese Paste brachte er auf ein Filterpapier und strich sie mit der Rückseite eines Löffels glatt. Wenn er dieses Papier einige Minuten bis Stunden an die Sonne legte, verfärbte sich die aufgetragene Schicht: man erhielt einen schwarzblauen Grundton (Ag). Wenn man über diese Schicht jetzt ein farbiges Glasbild (Original) legte und die Sonne weiter einige Stunden einwirken liess, veränderte sich die Oberfläche des Filterpapieres so, dass man ein farbiges Abbild der Vorlage, eine "Heliochromie" (=Sonnenfarben") erhielt:

1.	$AgNO_3$ Höllenstein	+ NaCl Kochsalz	----->	AgCl Hornsilber
2.	AgCl	+ kurzwelliges Licht	----->	Ag
3.	Ag auf AgCl	+ langwelliges Licht	----->	**"Seebeck-Effekt"**

Bei der Belichtung des AgCl entsteht verständlicherweise Auskopiersilber. Die Bilder sind nicht haltbar, sie können auch nicht fixiert werden, weil man die Farben nur dann wahrnehmen kann, wenn sie sich auf dem "Mutterkristall" befinden.

1848 **Edmond Becquerel** nimmt Sonnenspektrum mit Silberchlorid beschichteten Silberplatten auf. Das Bild kann jedoch nicht fixiert werden.

1891 **Gabriel Lippman** stellt der Französischen Akademie sein Interferenzverfahren vor und erhält dafür 1908 den Nobelpreis.

1.6.2. Indirekte Farbverfahren:

Unter indirekten Farbverfahren versteht man Prozesse, bei denen von einem farbigen Objekt **drei Farbauszüge** durch die Aufnahmefilter **Blau, Grün und Rot** hergestellt werden müssen. Erst nach der Weiterverarbeitung dieser **drei Teilbilder** werden Farben sichtbar.

1666 **Isaac Newton**, Spektrale Zusammensetzung des Sonnenlichts

1704 **Le Blond, Gautier**: Farbige Kupferstiche mit Dreifarbendruck

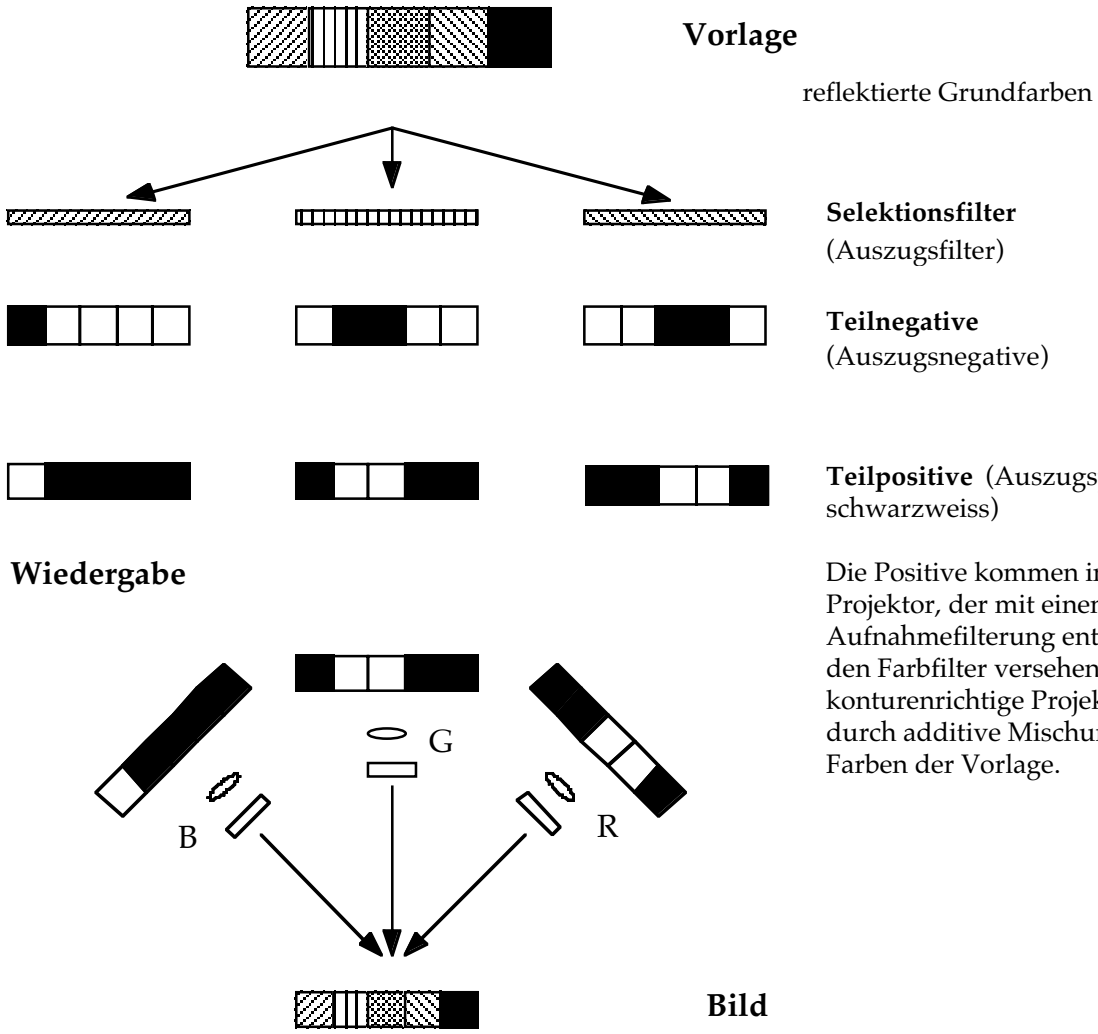
1802 **Thomas Young**: Theorie des Farbsehens

1852 **Hermann Helmholtz**: erweiterte Theorie des Farbsehens, Farbnachbildung, Farbdreieck

1861 **James Clerk Maxwell**: additive Farbphotographie mit Dreifarbenprojektion

Das additive System von Maxwell:
Erstmals erfolgte eine farbige Wiedergabe mittels dreier übereinander projizierter Teilfarbbilder. Massgebend war folgende Ueberlegung:
Wenn das Auge nach den Theorien von Young und Helmholtz Farben durch Aufspaltung in drei primäre Farben bzw. Farbreize empfindet, muss es möglich sein, diese Aufspaltung photographisch durch drei sukzessive Aufnahmen mit den Grundfarbfiltern Blau, Grün und Rot nachzuahmen. Projiziert man diese drei Teilregistrierungen als Diapositive je mit dem entsprechenden Farbfilter in Konturendeckung übereinander, so muss eine farbige Wiedergabe entstehen.
---> siehe Zeichnung auf der folgenden Seite

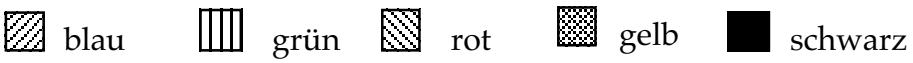
Das additive System von MAXWELL:



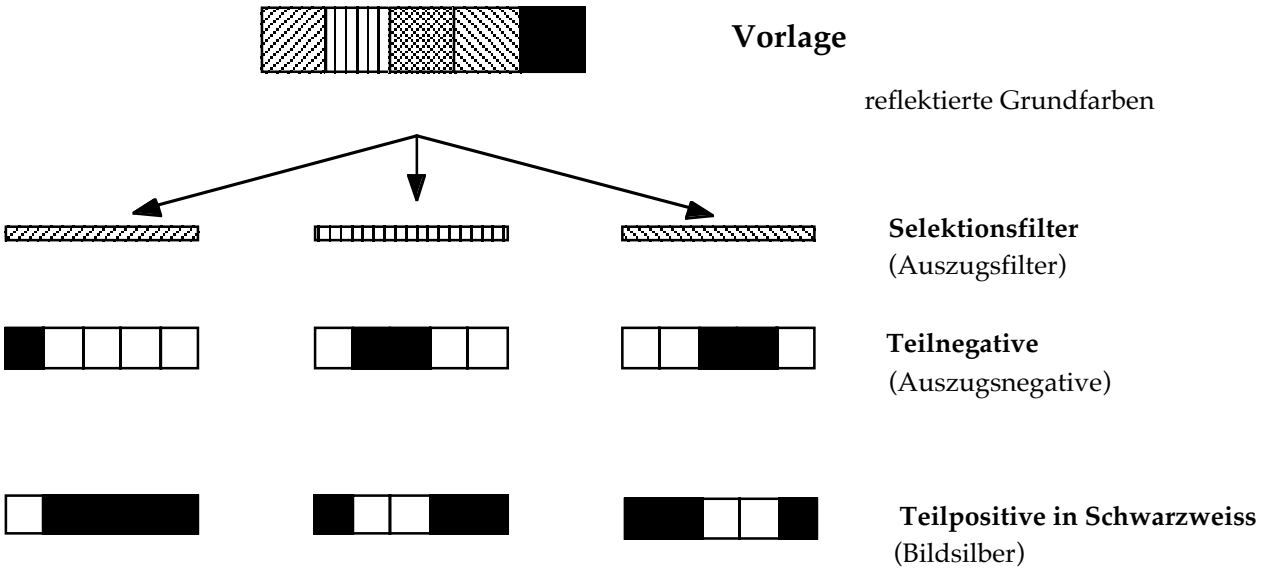
Die Positive kommen in je einen Projektor, der mit einem, der Aufnahmefilterung entsprechenden Farbfilter versehen ist. Die konturenrichtige Projektion ergibt durch additive Mischung die Farben der Vorlage.

Maxwell stand seinerzeit noch kein sensibilisiertes Photomaterial zur Verfügung, deshalb war bei der Aufnahme des Rot-Anteils zeichnerische Nachhilfe nötig. Bei der ersten Vorführung in der "Royal Society of Great Britain" im Jahre 1861 wies Maxwell darauf hin, dass eine praktische Realisierung der Methode bessere Farbempfindlichkeit voraussetze, was erst nach 1873 (Sensibilisierung bis gelb) und v. a. nach 1904 (Rot-Sensibilisierung) möglich war. Maxwell wies ferner darauf hin, dass von denselben Auszugspositiven auf subtraktivem Wege metamere Farbnachbildungen ebenfalls möglich sind. Der heutige Dreifarbenbuchdruck verwendet genau die subtraktive Methode von Maxwell.

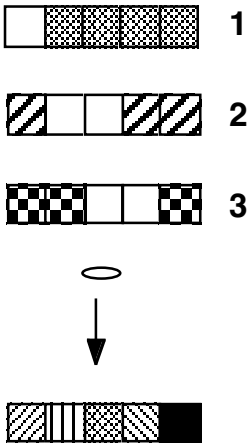
Die Farben von Vorlage, Filter und Wiedergabe sind durch Schraffuren angedeutet:



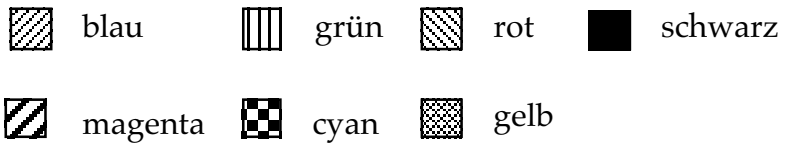
Subtraktive Methode:



Wiedergabe subtraktiv



Bei der Blaufilter-Aufnahme wirkt nur die Grundfarbe **Blau** belichtend und entsprechend den Reflexionsintensitäten resultieren nach dem Entwickeln mehr oder weniger dichte Silberstellen. Nicht zur Wirkung gelangen die beiden anderen Farben Grün und Rot. Da diese additiv Gelb ergeben, kann gesagt werden, die transparenten Stellen im Teilnegativ repräsentieren **Gelb** , bzw. die nach dem Kopieren im Teilpositiv 1 vorhandenen Stellen schwarzen Bildsilbers seien gleichzusetzen mit dem zur subtraktiven Nachbildung nötigen **Gelb**. Dieses Silber ist somit durch Gelbfarbstoff zu ersetzen, d.h. durch die Gegenfarbe des Aufnahmefilters **Blau**.
Analoges gilt für die beiden anderen Teilbilder:
Beim Teilpositiv 2 (Grünfilter-Aufnahme) hat belichtend nur **Grün** gewirkt, nicht aber Blau undRot. Da diese beiden Farben additiv **Magenta** ergeben, entsprechen somit die transparenten Stellen im Negativ, bzw. die geschwärzten Stellen im Positiv 2 der Farbe **Magenta** . In diese Farbe ist das Silber des Positivs 2 überzuführen, d.h. in die Gegenfarbe von **Grün**.
Beim Teilpositiv 3 hat bei der Aufnahme nur **Rot** gewirkt, nicht aber Blau und Grür Diese beiden Farben ergeben additiv **Cyan**, also ist im Teilpositiv 3 das Bildsilber in Cyan zu verwandeln, d.h. in die Gegenfarbe von **Rot**. Werden jetzt die drei Teilbilder in Konturendeckung in beliebiger Reihenfolge übereinander montiert, so ergibt die Projektion mit einem Gerät durch subtraktive Mischung die metamere Nachbildung der Farben der Vorlage.



1867 **Charles Cros** und

1869 **Louis Ducos du Hauron**: finden unabhängig voneinander technische Lösungen für das Verfahren von Maxwell und beschreiben das subtraktive Verfahren. Cros und du Hauron haben für viele später verwendete Verfahren die Grundlagen gefunden.

1869 **Charles Cros**: Farbausbleichverfahren
1889 **Raphael E. Liesegang**: verbesserte Methode
1895 **Otto Wiener**: Silber als Katalysator für die Bleichung
1934 **Bela Gaspar**: Gasparcolor, technische Lösung für Silber-Farbbleichprozess, Vorgänger des späteren "Cibachrome" (heute Ilfochrome).

1875 **Du Hauron**: Rasterverfahren

1892 experimentierte **J.W.Mc Donald** mit Glasplatten, die er mit Farbpulverteilchen einfärbte und darüber eine Emulsionsschicht aufgoss. Diese erste Autochromplatte wurde patentiert, wegen der Verbreitung der Lippmann–Photographie aber nicht weiter verfolgt.

1895 **John Joly**: Linienraster
Prof. J. Joly (Dublin) färbte Lösungen von Nitrozellulose mit blauer, roter resp. grüner Farbe ein. Nach dem Erstarren wurden die Nitrozelluloseblöcke in feine Scheiben geschnitten. Man legte dann abwechselnd eine rote, grüne und eine blaue Scheibe übereinander, bis ein neuer Block entstanden war. Stirnseitig wurden die übereinander liegenden, ca. 0,1 - 0,15 mm dicken Schichten wieder geschnitten, sodass ein feines Häutchen mit einem farbigen Streifenmuster entstand. Dieses Streifenfilter wurde auf eine Glasplatte aufgezogen. Zur Aufnahme wurde auf diese Farbrasterplatte, Schicht auf Schicht, eine panchromatische schwarz-weiss Platte gelegt und diese durch den Glasträger und das Streifenfilter belichtet. Nach einer Umkehrentwicklung vereinigte man die Streifenfilterplatte mit dem entstandenen Positiv und erhielt so ein Farbdiapositiv für die Projektion.
Weil das **Joly-Verfahren** nur eine geringe Bild-Detail-Auflösung brachte, versuchte man, die Farbrasterplatte mit feineren Mustern zu versehen. Anfänglich wurden feinere Farbstreifen erzeugt, indem man Streifen von Schutzlack auf eine beispielsweise rot eingefärbte Gelatineschicht druckte und dann die rote Farbe aus der restlichen freiliegenden Gelatineschicht auswusch. Wenn man die Platten in ein grünes Farbbad legte, entstanden neben den roten jetzt noch grüne Farbstreifen. Nachdem die Schicht vom lipophilen Schutzlack befreit war, konnten drucktechnisch andere Gebiete mit Schutzlack geschützt werden, aus den freistehenden Gelatineschichtgebieten die eingelagerte Farbe (Rot, Grün) mit Wasser ausgewaschen und an ihre Stelle ein dritter Farbstoff (Blau) eingebracht werden. Durch mehrfache Bearbeitung erhielt man feine Filterrasterstrukturen: Omnicolore, dioptichrome Thames Platte von Finlay und viele mehr kamen auf den Markt. Richtig durchgesetzt hat sich dann aber erst das **Kornrasterverfahren der Gebrüder Louis und Auguste Lumiè re.**

1904 **Auguste und Louis Lumiè re**: Kornrasterverfahren, Autochrom-Platte
Aus rohen, zerkleinerten Kartoffeln lassen sich transparente Stärkekörner gewinnen, die alle einen Korndurchmesser von 15-20 μ m besitzen. Gleiche Volumenanteile solcher Stärkekörner wurden mit den Farbstoffen Blau, Grün und Rot eingefärbt und nach dem Trocknen gemischt. Dieses Pulvergemisch wurde auf Glasplatten gebracht, die mit Leim versehen waren. So blieb eine einfache Kornlage auf der Oberfläche kleben. Um die Zwischenräume zwischen den einzelnen Stärkekörnern lichtundurchlässig zu machen, wurden diese mit sehr viel kleineren Russpartikeln ausgestäubt. – Auf die so entstandene "Viel-Filterschicht" wurde jetzt eine panchromatische Schicht aufgegossen. – Die Belichtung erfolgte von der Trägerseite der so präparierten Platte. Durch eine Umkehrentwicklung erhielt man Farbdiapositive.

1910 **L.Dufay**: Linienrasterfilm Dufaycolor
1916 **Agfa**: Agfa Kornrasterplatte, ab 1932 Agfacolor-Rasterfilm
Die Firma **AGFA (Wolfen)** produzierte die Autochrom-Platten mit Dextrinkörnern

anstelle von Stärkekörnern, die entsprechend eingefärbt waren und die Eigenschaft hatten, dass sie - in einen Strom von Wasserdampf gebracht- aufquollen. Dadurch erübrigte sich das Ausstäuben mit Russpartikeln. Das fertige Dia hatte somit eine geringere Minimaldichte, was zur damaligen Zeit von grossem Vorteil war.

1925 **Kodak**: Kodacolor Linsenrasterschmalfilm
Allgemeines zum Linsenrasterverfahren: Im Unterschied zu den Korn- und zu den Linienraster-Photomaterialien war der Linsenrasterfilm nicht mit Farbstoffpartikeln beschichtet. Der Trick, mit einem Schwarzweiss-Film farbig zu photographieren, geschah hier durch besondere optische Massnahmen: Vor dem Objektiv der Kamera befand sich ein Filter mit roten, grünen und blauen Farbstreifen. Durch in den Schichtträger des Films eingeprägte linsenförmige Strukturen (eignete sich naturgemäss nicht für Glasplatten) wurden die Farbstreifen auf der lichtempfindlichen Schwarzweiss-Photoschicht in Form nebeneinanderliegender Farbauszugsstreifen abgebildet. Daher kann man dieses Prinzip auch als "optischen Linienraster" bezeichnen. Bei der Projektion verlief dieser Weg umgekehrt, um auf der Leinwand schliesslich ein leuchtend-farbiges Bild zusammenzusetzen. Bei blosser Betrachtung sah der Film natürlich nur schwarz-weiss aus. Man konnte bei genauem Hinsehen aber die feine Linsenriffelung der Schichtrückseite erkennen. Der Linsenrasterfilm war also nur für die Projektion bestimmt, und farbig abgebildete Aufnahmen in Zeitschriften und Büchern sind daher selten zu finden.

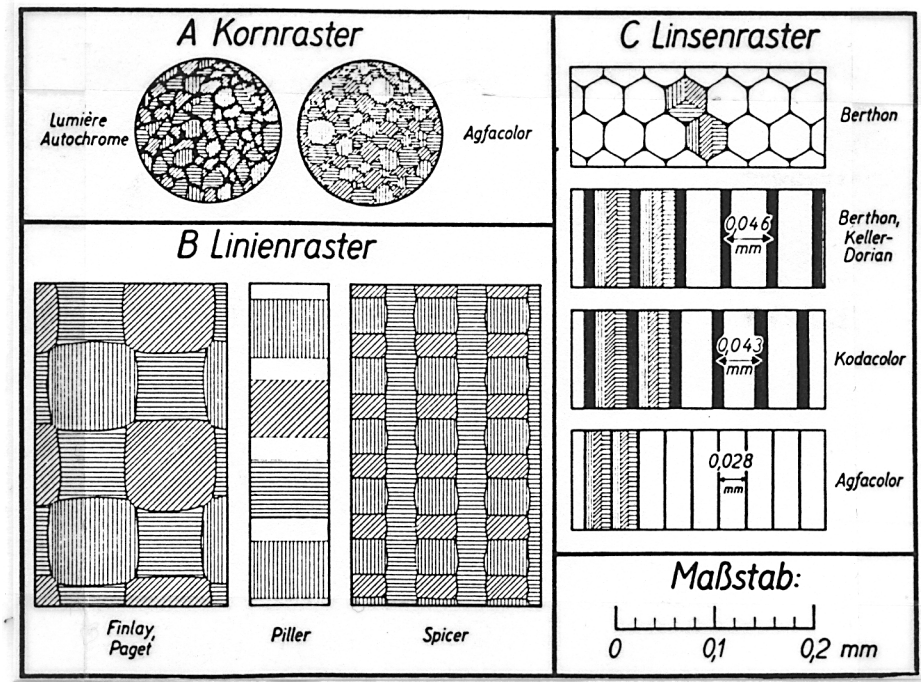


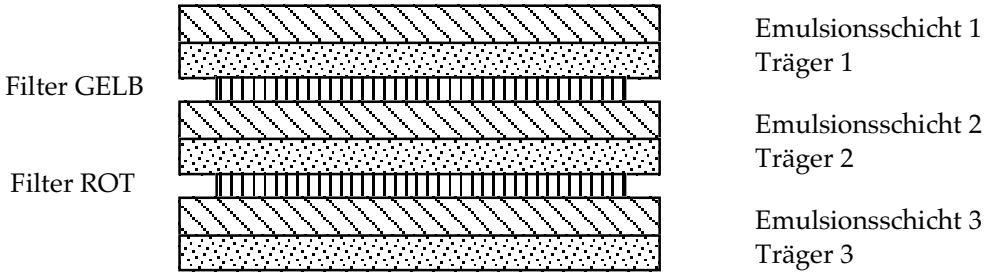
Abb. 7: Bei allen Rasterverfahren erfolgte die Exposition durch den Schichtträger, d.h. durch das Raster. Bei den Linsenrastersystemen erzeugt das eingeprägte Linsensystem eine Abbildung der streifen-förmigen Auszugsfilter auf der Kameraoptik.

1881 **Cros**: Hydrotypie, Farbübertragungssystem mit vielen späteren Varianten, z.B.:

1915 **Kodak**: "Kodachrome" Kinofilm
1925 **Kalmus**: erstes Technicolor-Verfahren
1926 **Kodak**: Wash-Off-Prozess, heute Dye-Transfer

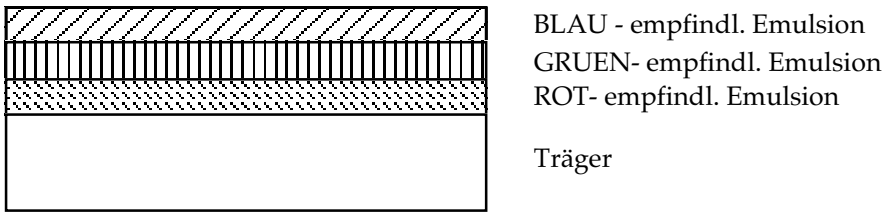
1897 **Du Hauron**: Tri-Pack: Drei Photoplatten mit je zugehörigem Träger werden nicht nacheinander oder simultan durch Strahlenteilung belichtet, sondern als Sandwich übereinanderangeordnet. Zwischen den Platten sind Filter. Zur Verarbeitung werden die Platten getrennt.

TRIPACK von Du Hauron:



1903 **J.H.Smith**: Monopack: 3 Emulsionen mit unterschiedlicher Farbempfindlichkeit auf einem Träger. Nach der Aufnahme werden die Emulsionen abgelöst (stripping) und separat verarbeitet.

MONOPACK nach Smith:



1904 **Homolka**: Beobachtung über die Entstehung von Farbstoffen bei der Entwicklung von AgBr mit Indoxyl und Thioindoxyl.

1909 **Rudolf Fischer, Hans Siegrist**: Monopack mit chromogener (farbgebender) Entwicklung in einem Arbeitsgang. Grundlegend für die moderne Farbphotographie. **Monopack nach Fischer** (Patent 1912): es werden drei verschieden farbempfindliche Emulsionen auf einen Schichtträger gegossen. Damit die bei jeder Emulsion vorhandene Eigenempfindlichkeit des Halogenids bei den grün- und rot-sensibilisierten Emulsionen nicht stört, wird zwischen die blauregistrierende Emulsion und die quasi orthochromatisch sensibilisierte Emulsion (grün-empfindlich) ein Gelbfilter gegossen. Dieses Filter kann ein gelber Farbstoff sein, der beim Verarbeiten des Films verschwindet oder feinst verteiltes kolloidales Silber in gelbbrauner Farbe, das ebenfalls im Entwicklungsverlauf entfernt wird.
Jede Emulsionsschicht enthält zusätzlich eine, an sich farblose, Substanz, die bei der Entwicklung mit einem Derivat des p-Phenylendiamins durch Kupplung mit dem Oxidationsprodukt des Entwicklers die nötige Gegenfarbe zur Emulsionsfarbempfindlichkeit ergibt.

Diese Kupplungskomponenten waren:
– für die **Gelb-Kupplung**: Acetessigester (offene Methylenkette)
– für die **Magenta-Kupplung**: p-Nitrophenylacetonitril (offene Methylenkette)
– für die **Cyan-Kupplung**: Phenole oder 1- Naphtolderivate

In den ersten beiden Fällen resultieren Azomethin-Farbstoffe, im dritten Indoaniline.
Viele der heute verwendeten Kuppler stehen in enger Verwandtschaft mit den von **Fischer** aufgezählten Möglichkeiten; unterschiedlich sind heute die Magenta-Kuppler, die vorwiegend von Pyrazolen abgeleitet sind, also cyklische Methylenketten aufweisen.

2. Grundlagen der Farbwissenschaft

2.1. Aufbau und Funktion des menschlichen Auges:

Die Funktion des Auges besteht darin, ein scharfes Bild der ausserhalb liegenden Welt auf die lichtempfindliche Netzhaut, die **Retina** abzubilden. Die **Hornhaut** (der transparente, vorderste Teil des Auges) und die **Linse** bilden das Analogon zu einer Kameraoptik. Etwa 2/3 der Lichtbrechung entfällt auf die Luft-Hornhautoberfläche, die Linse liefert das letzte Drittel der benötigten Brechkraft für die Fokussierung. Die Akkomodation, d.h. das Fokussieren auf nahe und entfernte Gegenstände wird erreicht, indem die Form der gummiartigen Linse durch einen Satz radialer Muskeln (Ciliar-Muskeln) verändert wird. Ein weiterer Satz von Muskeln ändert den Durchmesser der **Iris** und bestimmt so die Menge Licht die in das Auge eintritt, genau wie die Blende einer Kameraoptik.

Die lichtempfindliche Retina ist ein äusserst interessantes Gebilde. Sie wandelt das einfallende Licht in Nervenimpulse um und erlaubt uns bei Sternenlicht, aber auch bei hellstem Sonnenlicht zu sehen, sie diskriminiert Wellenlängen, so dass wir Farbe sehen können und ist derart fein, dass wir auf einige Meter Distanz ein menschliche Haar erkennen können.

Die Retina ist ein Teil des Gehirns, die Verbindung zu diesem erfolgt über den **optischen Nerv**. Die Retina ist ca. 1/4 mm dick und besteht aus drei Schichten von Nervenzellen. Die hinterste Zellreihe der Retina enthält die Lichtrezeptoren: die Stäbchen und Zapfen. Stäbchen, die viel zahlreicher sind als Zapfen, sind für das Sehen bei Dämmerungslicht verantwortlich (bei hellem Licht sind sie übersteuert). Zapfen reagieren erst bei hellerem Licht (und funktionieren nicht bei Dämmerlicht), sie sind jedoch verantwortlich dafür, dass wir feine Details und Farbe sehen können.

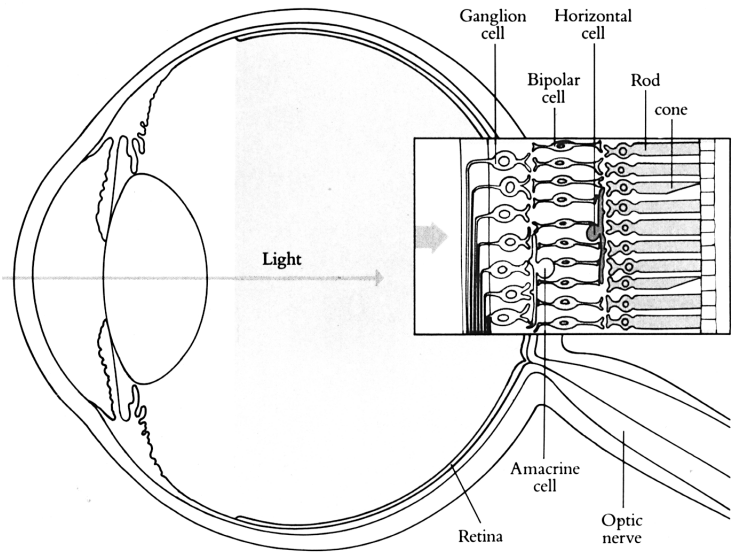


Abb. 8:
Der vergrösserte Ausschnitt zeigt die Anordnung der drei Netzhautschichten. Das Licht muss zuerst die Ganglionzellschicht und die bipolare Zellschicht durchdrin gen, bevor es zu den lichtempfindlichen Zapfen (cones) und Stäbchen (rods) gelangt.

Die Zahl der Stäbchen und Zapfen variiert stark auf der Retina. Im eigentlichen Zentrum (auf der optischen Achse), wo unsere Detailerkennung am besten ist, hat es nur Zapfen. Diese Stäbchen-freie Zone wird **Fovea** (oder Netzhautgrube) genannt und ist ca. 1/2 mm gross.

Damit das Licht auf die Rezeptoren fällt, muss es zuerst die anderen Schichten durchqueren. Hinter den Rezeptoren ist eine Schicht von Zellen, die das dunkle Pigment Melanin enthalten. Diese Schicht schluckt das durch gehende Licht und wirkt wie eine Lichthofschutzschicht in einem Film. Ausserdem helfen die melanin-haltigen Zellen das lichtempfindliche visuelle Pigment in den Photorezeptoren wiederherzustellen, nachdem es durch das auffallende Licht ausgebleicht wurde.

Die Schichten vor den Rezeptoren sind ziemlich transparent. Im zentralen Millimeter, wo unsere Sicht am schärfsten ist, sind die beiden anderen Schichten etwas auf die Seite verschoben und bilden einen Ring dickerer Netzhaut, so dass die zentralen Zapfen zuvorderst liegen. Damit wird jede Spur von Unschärfe unterdrückt.

Oberhalb der Stäbchen und Zapfen liegt eine mittlere Schicht, die drei verschiedene Nervenzellen enthält: bipolare Zellen, horizontale Zellen und Amacrin-Zellen. Bipolare Zellen empfangen die Signale der Photorezeptoren und leiten diese weiter an die Ganglion-Zellen. Horizontal-Zellen verbinden die Rezeptoren und die bipolaren Zellen durch relativ lange Verbindungen die parallel innerhalb der Retina liegen. Auf ähnliche Weise verbinden die Amacrinzellen die bipolaren Zellen mit den retinalen Ganglion-Zellen.

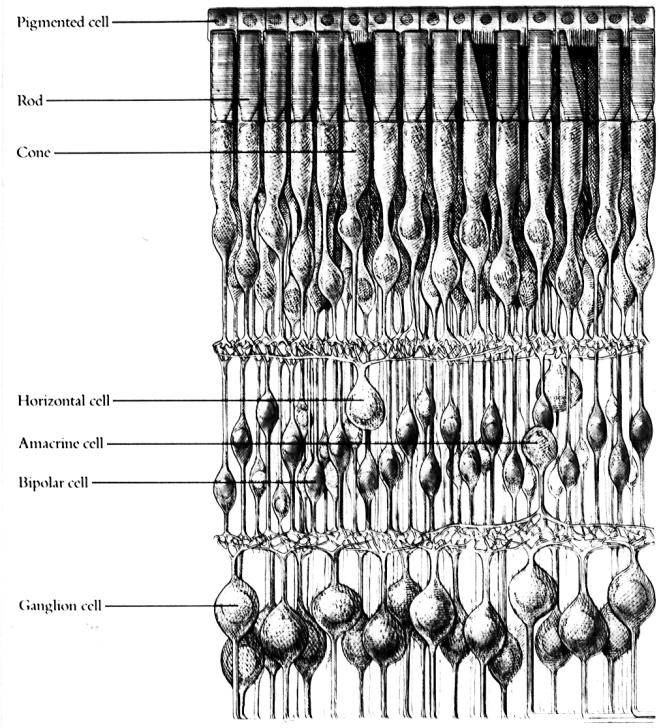


Abb. 9:
Querschnitt durch die Retina:
Schnitt etwa auf halber Höhe zwischen Fovea und Peripherie, wo die Stäbchen viel zahlreicher als die Zapfen sind.

Die vorderste Zellschicht der Retina enthält retinale Ganglion-Zellen, deren Axone auf der Oberfläche der Retina zu einem Bündel zusammenlaufen und das Auge als optischer Nerv verlassen. Jedes Auge enthält ca. 125 Millionen Stäbchen und Zapfen, aber nur etwa 1 Million Ganglion-Zellen. Angesichts dieser Diskrepanz muss man sich fragen wie die visuelle Information möglichst detailliert erhalten werden kann.

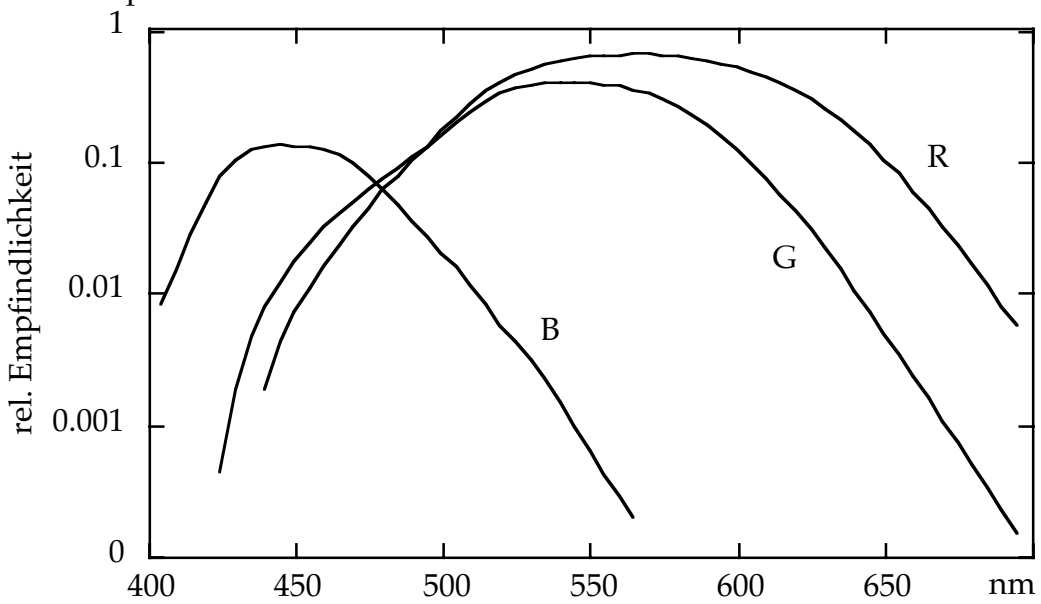
Eine Untersuchung der Verbindungen zwischen den Zellen der Retina gibt darüber Auskunft. Der Informationsfluss durch die Retina folgt zwei verschiedenen Wegen: ein direkter Weg, von den Photorezeptoren über die bipolaren Zellen zu den Ganglionzellen, und ein indirekter Weg, wo die Horizontalzellen zwischen Photorezeptoren und bipolaren Zellen zwischengeschaltet sind, und die Amacrinzellen zwischen bipolaren und Ganglionzellen. Der direkte Weg ist hochspezifisch oder kompakt in dem Sinne, dass nur ein Rezeptor (oder nur sehr wenige) Signale an eine bipolare Zelle weitergibt und ebenso nur eine (oder nur sehr wenige) bipolare Zelle Signale an eine Ganglionzelle. Der indirekte Weg ist diffuser oder weiter ausgebreitet über grössere laterale Verbindungen.

Dieser generelle Aufbau gilt für die ganze Retina, aber im Detail variieren die Verbindungen stark zwischen der Fovea, wo unsere Sehschärfe am höchsten ist und den weit aussen liegenden, peripheren Gebieten, wo die Sehschärfe stark abnimmt. Zwischen Fovea und Peripherie nimmt das Verhältnis direkt <-> indirekt stark ab. In und nahe der Fovea gilt in der Regel der direkte Weg, d.h. ein einzelner Zapfen ist mit einer bipolaren Zelle verbunden und eine einzelne bipolare Zelle mit einer Ganglionzelle. Je weiter man in die peripheren Gebiete kommt, desto mehr Rezeptoren konvergieren in eine bipolare Zelle und mehrere bipolare Zellen in eine Ganglionzelle. Dieser hohe Grad an Konvergenz in den peripheren Zonen der Retina zusammen mit dem kompakten, direkten Weg in und nahe der Fovea erklären, warum wir trotz eines 125:1-Verhältnisses von Photorezeptoren zu optischen Nervenfasern eine gute Sehschärfe haben und gleichzeitig ein weites Sehfeld erfassen.

Stäbchen und Zapfen unterscheiden sich in mehrerer Hinsicht. Der Hauptunterschied liegt in der relativen Empfindlichkeit: Stäbchen sind noch bei sehr wenig Licht empfindlich, Zapfen hingegegen haben einen viel grösseren Helligkeitspegel. Beide, Stäbchen und Zapfen enthalten lichtempfindliche Substanzen. Stäbchen enthalten alle des gleiche Pigment; bei den Zapfen gibt es drei verschiedene Typen, wovon jeder eine andere lichtempfindliche Substanz enthält. Diese vier Substanzen sind auf verschiedene Wellenlängen des Lichtes empfindlich und im Falle der Zapfen sind diese Unterschiede die Grundlage des Farbensehens.

Die Lichtempfindlichkeit beruht auf einer photochemischen cis-trans-Isomerisierung von Retinal (Vitamin A Aldehyd). Retinal ist an ein Protein

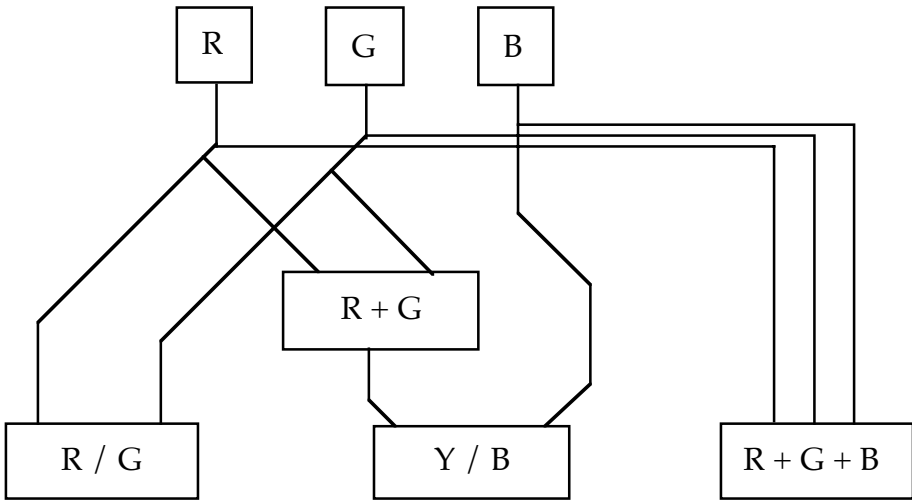
(Opsin) gebunden. Dieser Komplex aus Protein und Chromophor ist auf elektromagnetische Strahlung im Bereich von 400 - 700 nm, also auf sichtbares Licht empfindlich.



Die lichtempfindliche Substanz in den Stäbchen wird **Rhodopsin** genannt und hat das Absorptionsmaximum bei ca. 500 nm, wohingegegen die Zapfen-Pigmente maximal um 450 nm, 530 nm und 565 nm absorbieren. Man spricht deshalb von "Blau", Grün" und "Rot"-empfindlich. Das zahlenmässige Verhältnis der Zapfen beträgt ca. Blau : Grün : Rot ≈ 1 : 10 : 11. Die effektive Blauempfindlichkeit wird ausserdem durch die Filterwirkung der gelbgefärbten Augenmedien (Hornhaut, Glaskörper, Linse ...) auf etwa 10% reduziert.

Die lichtempfindliche Substanz in den Stäbchen, das Rhodopsin, hat seine maximale Absorption im grünen Bereich und reflektiert Blau und Rot, die Eigenfarbe ist also Purpur. Da Rhodopsin in relativ grossen Mengen im Auge vorkommt, kann es extrahiert werden und ist seit langem unter dem Trivialnamen Sehpurpur bekannt. "Sehpurpur" kommt also von der Eigenfarbe des Rhodopsins, während bei den Zapfen die Begriffe "Blau", Grün" und "Rot" sich auf die relativen spektralen Empfindlichkeiten beziehen. Man beachte, dass diese Namensgebung zu grosser Verwirrung führen kann.

Die verschieden farbempfindlichen Zapfen sind untereinander querverbunden, was für die verschiedenen physiologischen und farbpsychologischen Effekte bedeutungsvoll ist. Die von Young und Helmholtz aufgestellte Theorie des Farbensehens mittels dreier, für Blau, Grün und Rot empfindlicher Netzhautelemente ist nur eine grobe Vereinfachung. Sie genügt zur Erklärung der Phänomene der Farbmischung und entsprechend auch zur Deutung der prinzipiellen Vorgänge in der Farbphotographie.



Aus dem Schema der Verknüpfungen erkennt man, dass das Gehirn Farben nicht "Blau - Grün - Rot" empfindet, sondern z.B. "Hell-Dunkel" und "Gelb-Blau" resp. "Rot-Grün" oder dann mit den 3 Attributen "Farbton" (engl. hue), "Sättigung" (engl. saturation) und "Helligkeit" (engl. brightness). Wesentlich ist der **dreidimensionale** Charakter der Farbe.

Ändert man jeden dieser Parameter kontinuierlich, kann man den ganzen Farbraum damit abdecken. Die Farbempfindung ist trivariant und eine Klassifikation von Farben kann prinzipiell in jedem dreidimensionalem Koordinatensystem erfolgen.

Historisch gesehen gibt es zwei Farbsysteme. Das eine beruht darauf, dass in einem Farbmischgerät (Kolorimeter) mittels einer Mischung von dreifarbigen Lichtern ("Blau", "Grün" und "Rot" als die drei Primärfarben) praktisch alle anderen Farben nachgemacht werden können (color matching). Das Intensitäts-Verhältnis der drei Primärfarben dient als Farbkoordinate. Man spricht hier von der **additiven Farbmischung**.
-->**Vorteil:** Exakt und reproduzierbar, Farbkoordinaten können auch messtechnisch bestimmt werden.
-->**Nachteil:** Interpretation schwierig, schlechte Korrelation mit der Farb-"Empfindung".

Das andere Farbsystem beruht auf der **Farbempfindung**, dem Prinzip der gleichmässigen Farbabstufung (uniform color scales, Farbordnung). Hier werden eine grosse Zahl von Farbmustern empirisch so ausgewählt und angeordnet, dass die Farben gleichmässig verteilt und in gleichem Abstand zueinander (aequidistant) erscheinen. Die Charakterisierung erfolgt nicht in einem B/G/R-Verhältnis, sondern in den empfindungsmässigen Werten "Helligkeit, Farbton und Farbsättigung".
-->**Vorteil:** entspricht der menschlichen Farbempfindung
-->**Nachteil:** schlecht reproduzierbar und quantifizierbar

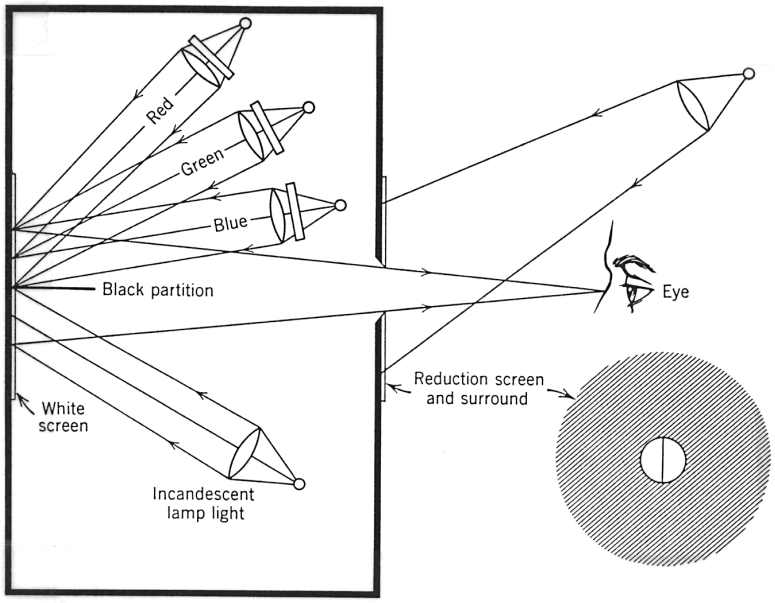
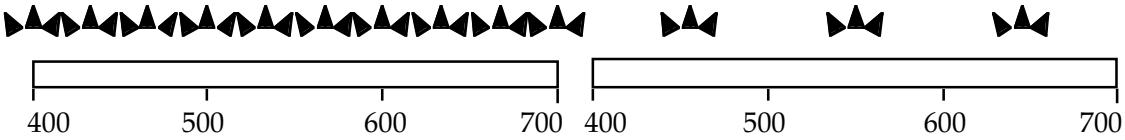


Abb. 10: Experimentelle An–ordnung (Kolori–meter) zur Untersu–chung der additiven Farbmischgesetze mit Hilfe von farbigen Lichtern

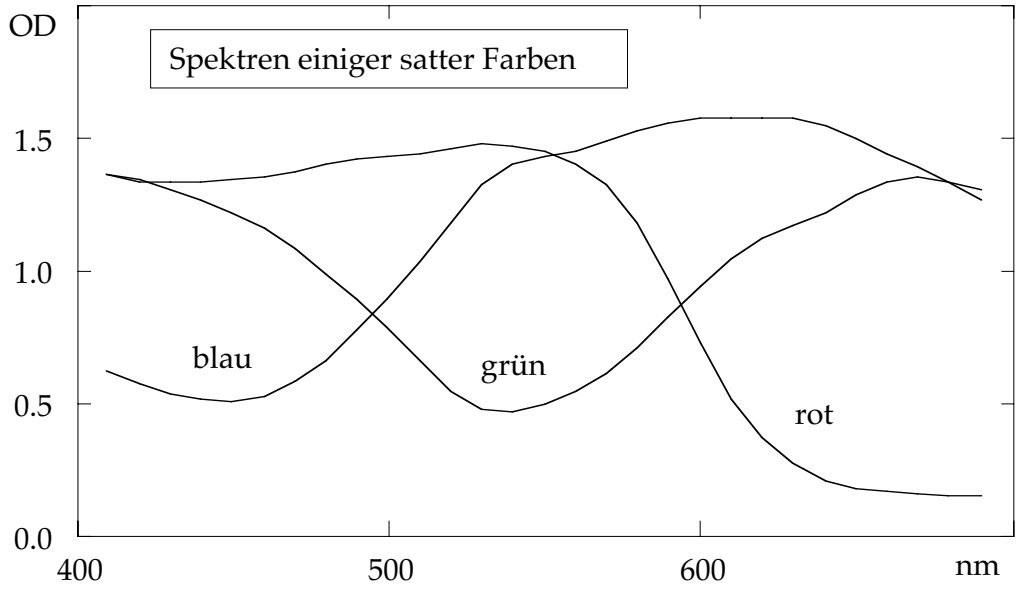
2.2. <u>Licht und Farbe:</u>

Elektromagnetische Strahlung, die alle Wellenlängenanteile von 400 bis 700 nm enthalten, ergeben den Eindruck von "weissem" Licht. Theoretisch handelt es sich um ein gleich-energetisches Spektrum, in Praxis hängt die Empfindung von "Weiss" von der Adaption des Beobachters ab, auch eine ungleichmässigere spektrale Verteilung wird alls Weiss empfunden (Tageslicht-Kunstlicht).



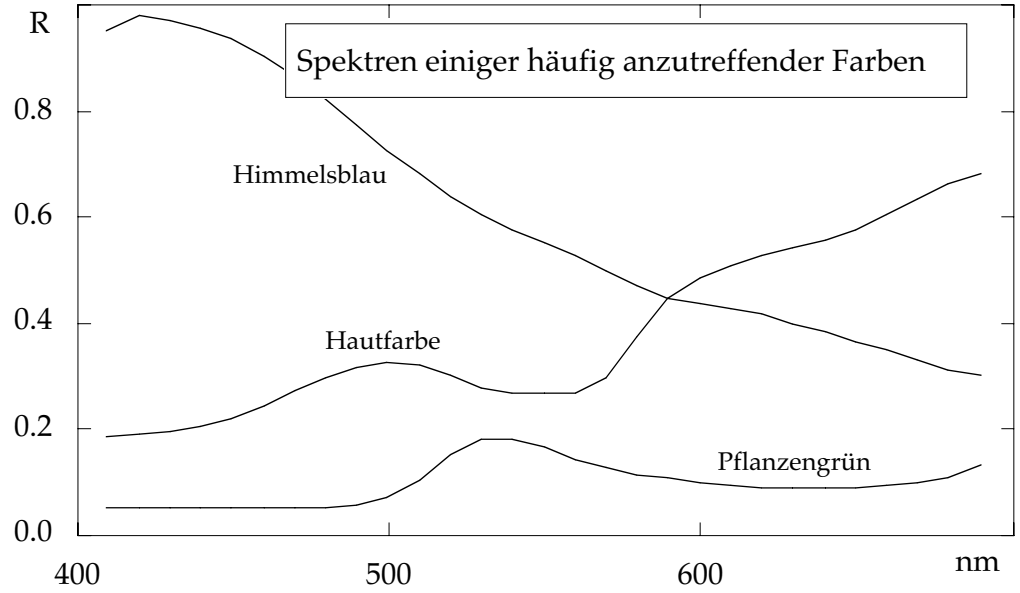
Im Grunde genommen ist es nicht die Gleichmässigkeit der spektralen Verteilung, die uns "weiss" empfinden lässt, sondern die Eigenschaft, dass die 3 Zapfen im Auge im richtigen Verhältnis zueinander angeregt werden.

Wird ein Teil der Strahlung von der "weissen" Lichtquelle entfernt, z.B. durch ein farbiges Filter, so erscheint uns dieses Licht farbig. Ebenso erscheinen uns Gegenstände farbig, da sie nicht alle Strahlungen reflektieren. Ein Objekt erscheint uns grün, nicht weil es grünes Licht reflektiert, sondern weil die anderen Anteile der Strahlung (hauptsächlich Blau und Rot) **nicht** reflektiert werden. In den zwei nachfolgenden Abbildungen sind die Spektren von einigen satten und von häufigen Farben dargestellt.



Je ungleichmässiger die spektrale Verteilung des Lichtes, desto farbiger erscheint es uns. Die sattesten Farben sind somit die monochromatischen Spektralfarben, die wir erreichen, wenn weisses Licht in einem Prisma oder Beugungsgitter aufgepalten wird.

Im Grunde genommen spielt es keine Rolle ob der Ursprung der Farbempfindung von einer reflektierten Farbe oder einem farbigen Licht stammt, der Lichtfluss, der das Auge erreicht, ist in beiden Fällen der gleiche.



Die Farbempfindung ist, wie schon erwähnt, trivariant und ziemlich unabhängig von der Art des physikalischen Ursprungs der Farbe. Aus photometrischen Untersuchungen anhand von Lichtmischungen in einem

Kolorimeter, konnte Grassmann schon 1853 einige Beziehungen herleiten, die heutzutage als *Grassmann´s Gesetze* bekannt sind:

- Drei Parameter sind notwendig und genügend, um die Farbe eines Lichtes zu definieren
- Farbmischungen sind stetig
- Das Resultat einer additiven Mischung von farbigen Lichtern hängt nur von ihrer visuellen Erscheinung ab, es ist unabhängig vom physikalischen Ursprung (=Spektrum) der farbigen Lichter.

Farbmischungen können algebraisch beschrieben werden (kolorimetrische Gleichungen):

Photometrische Gleichheit der beiden Lichter A, B der beiden Hälften des Kolorimeters wird durch Zugabe einer identischen Menge Licht (C) nicht gestört

gilt $A = B$, dann ist auch $A + C = B + C$

Innerhalb der Grenzen des normalen Tageslichtsehens (photopisch) hat die Multiplikation der Helligkeiten der beiden Hälften des Kolorimeters um den gleichen Faktor keinen Einfluss auf die Farbgleichheit

$A = B$, somit $kA = kB$

$A + B = C$ und $A = D + E$, so gilt auch $(D + E) + B = C$ und $D + E + B + F = C + F$

Die Mischung von farbigen Lichtern, jedes identisch zu einer dritten Farbmischung, sind äquivalent

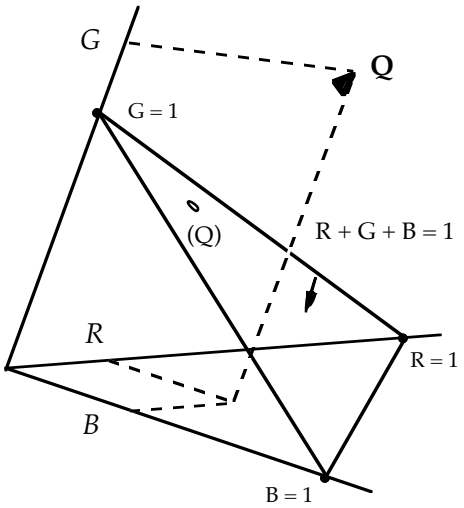
Wenn $A + B = C$ und $D + E = C$, dann $A + B = D + E$

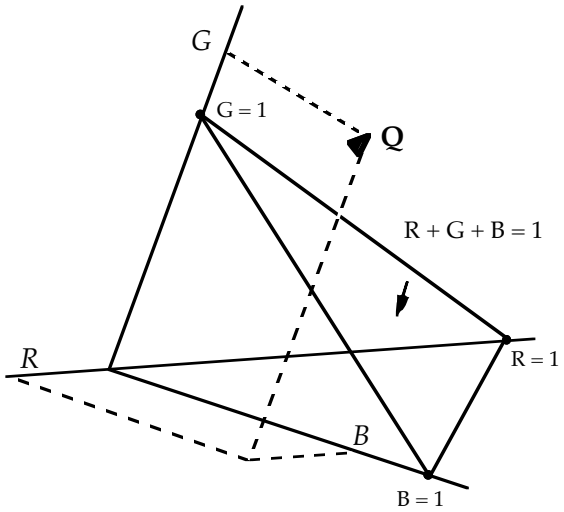
Weil das Auge nicht unendlich viele, sondern nur drei Farbrezeptoren besitzt, müssen für eine exakte Farbwiedergabe die Intensitätskurven zweier Farben selbst nicht übereinstimmen, damit sie für den Menschen gleich aussehen. In einem solchen Fall spricht man von **metamerer Uebereinstimmung**. Im Gegensatz zur absoluten Uebereinstimmung von zwei Farben (gleiche Intensitätsverteilung), ist aber die metamere von der Lichtquelle abhängig, bei der das Bild betrachtet wird.

Ganz generell können additive Farbmischungen durch **Vektoren** in einem dreidimensionalen Raum, dem sogenannten **Tristimulus-Raum** dargestellt werden. Mit drei Primärfarben **R**, **G**, **B** (die durch ihre spektrale Verteilung charakterisiert sind) kann man in einem Kolorimeter durch additive Mischung eine beliebige 4. Farbe **Q** nachmachen (color match) und diese als

Vektorgleichung ausdrücken (s. linke Zeichnung unten)

$\mathbf{Q} = R\mathbf{R} + G\mathbf{G} + B\mathbf{B}$





Dabei nennt man R, G, B die *Tristimulus-Werte* von **Q** .

Obige Gleichung gilt generell auch in dem Falle, wo eine Farbe **Q** nicht aus den drei Primärfarben nachgemacht werden kann, sondern zuerst mit einer (oder zwei) der Primärfarben entsättigt werden muss, bevor ein Farbabgleich mit den restlichen Primärfarben erreicht wird. So soll z.B. (s. Figur oben rechts) ein tiefsattes Blaugrün (= **Q**) aus den 3 Primärfarben nachgemacht werden; dabei stellt man fest, dass das gar nicht geht, die Mischungen aus B und G sind alle weniger farbsatt als das gewünschte **Q**. Die einzige Art einen Colormatch zu erreichen besteht darin, das Farbfeld **Q** mit dem Rot-Primär zu entmischen, also

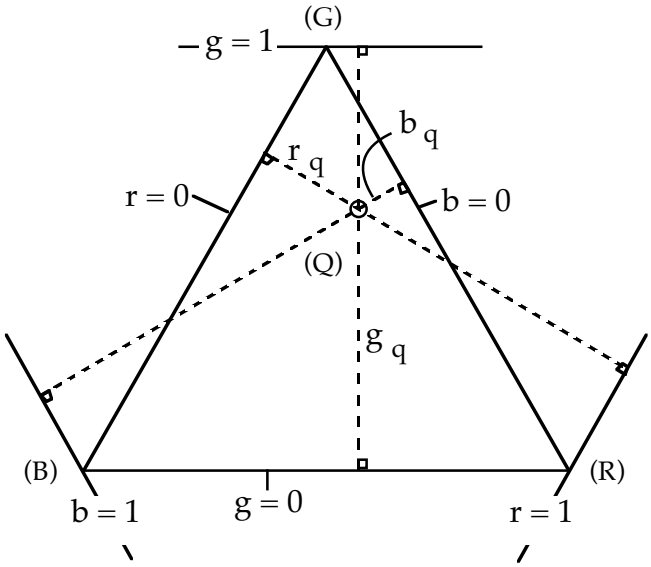
$\mathbf{Q} + R\mathbf{R} = G\mathbf{G} + B\mathbf{B}$, das führt nun zu: $\mathbf{Q} = -R\mathbf{R} + G\mathbf{G} + B\mathbf{B}$

resp. mit $R = -R$: $\mathbf{Q} = R\mathbf{R} + G\mathbf{G} + B\mathbf{B}$

Obwohl die Darstellung von Farbreizen als Vektoren im Tristimulus-Raum alle Informationen enthalten, wird in der Praxis eine 2-dimensionale Darstellung bevorzugt. Eine dieser Darstellungen wird in der Einheitsebene, $R + G + B = 1$, erhalten. Alle Tristimuli-Vektoren **Q** schneiden die Einheitsebene an einem Punkt Q .

Praktische Koordinaten werden aus dem unten gezeigten (r, g, b)-**Chromazitäts-Diagramm** gewonnen, die sogenannten Chromazitäts-Koordinaten. Ist das Chromazitäts-Diagramm ein gleichseitiges Dreieck, spricht man vom *Maxwell Farbdreieck*. Praktischer und üblich ist jedoch ein

Dreieck bei dem die r- und g-Koordinate senkrecht aufeinander stehen.



$$r = \frac{R}{R + G + B}$$

$$g = \frac{R}{R + G + B}$$

$$b = \frac{R}{R + G + B}$$

$$r + g + b = 1$$

Wenn man versucht Spektralfarben nachzumischen, erhält man sogenannte Mischungskurven $\mathbb{r}(\lambda)$, $\mathbb{g}(\lambda)$, $\mathbb{b}(\lambda)$. Sie kommen zustande, indem man für die monochromatischen Spektralfarben aller Wellenlängen die Koeffizienten $\mathbb{r}(\lambda)$, $\mathbb{g}(\lambda)$, $\mathbb{b}(\lambda)$ der Gleichung

$$\text{Spektralfarbe}(\lambda) = \mathbb{r}(\lambda)R + \mathbb{g}(\lambda)G + \mathbb{b}(\lambda)B$$

bestimmt. Die sehr gesättigten Spektralfarben können in Wirklichkeit nicht metamer nachgemischt werden. Das ist nur mathematisch möglich, indem die Koeffizienten $\mathbb{r}(\lambda)$, $\mathbb{g}(\lambda)$, $\mathbb{b}(\lambda)$ zum Teil negative Werte annehmen. Als Beispiel diene das Nachmischen der blaugrünen Spektralfarbe bei 490 nm, wobei als Primärfarben ebenfalls Spektralfarben, z.B. Rot bei 640 nm, Grün bei 510 nm, und Blau bei 450 nm benutzt werden sollen.

$$\text{Blaugrün (490 nm)} = \mathbb{r}\ \text{Rot(640 nm)} + \mathbb{g}\ \text{Grün(510 nm)} + \mathbb{b}\ \text{Blau(450 nm)}$$

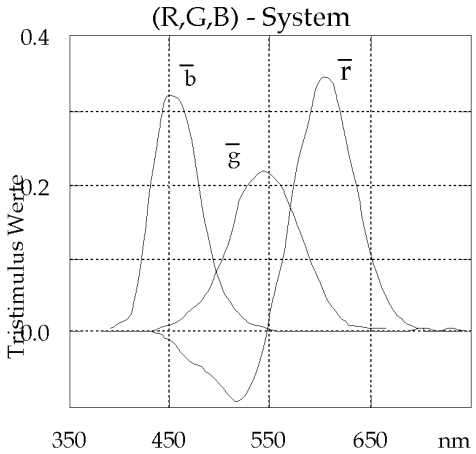
$\mathbb{g}$ und $\mathbb{b}$ erhalten dabei positive Werte g und b, $\mathbb{r}$ einen negativen -r. Besser verständlich wird die Gleichung, wenn man sie zu

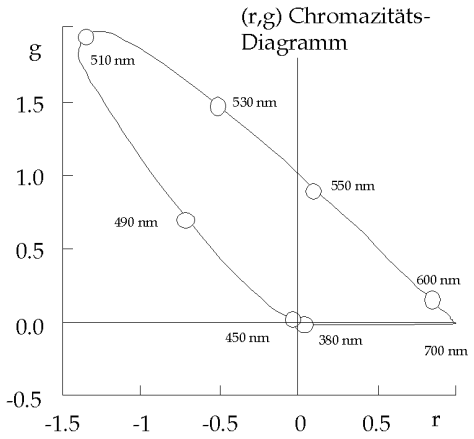
$$\text{Blaugrün (490 nm)} + r\ \text{Rot(640 nm)} = g\ \text{Grün(510 nm)} + b\ \text{Blau(450 nm)}$$

umschreibt, was bedeutet, dass die blaugrüne Spektralfarbe bei 490 nm erst nach Entsättigung mit einer gewissen Menge (r) der roten Spektralfarbe metamer durch die blaue und grüne Spektralfarbe nachgebildet werden kann.

Man hat experimentell diese Mischungskurven für die Primärfarben b: 436nm, r : 546 nm und r : 700nm bestimmt. Die Wahl der Primärfarben B,G,R ist prinzipiell willkürlich und nur durch technische Gegebenheit bestimmt:

436nnm und 546 nm sind 2 Spektrallinien aus dem Quecksilberspektrum. Die so gewonnenen Mischkurven oder Tristimulus-Werte $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ sind unten dargestellt, auch in Form eines Chromazitätsdiagrammes.





Tristimuluswerte und Chromazitätsdiagramm für das R,G,B- Farbsystem

Mit den Mischungsfunktionen $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ dieser Primär farben R, G, B lassen sich die Koeffizienten einer Gleichung $I = rR + gG + bB$ bei bekanntem $I(\lambda)$ folgendermassen bestimmen:

$$r = \int_{400nm}^{700nm} I\,\bar{r}(\lambda)d\lambda, \qquad g = \int_{400nm}^{700nm} I\,\bar{g}(\lambda)d\lambda, \qquad b = \int_{400nm}^{700nm} I\,\bar{b}(\lambda)d\lambda$$

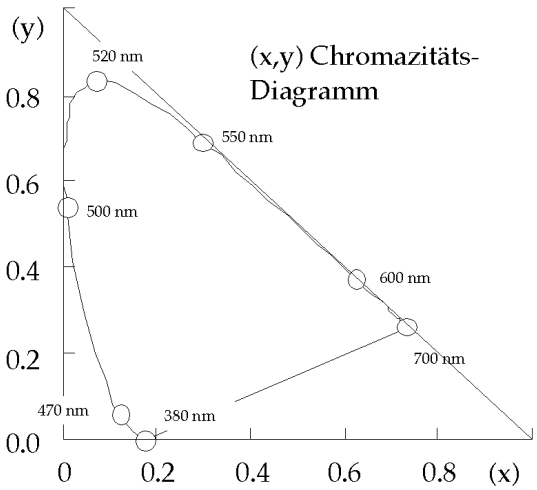
Mit Hilfe von Linearkombinationen lässt sich aus einem Satz von Primärfarben R, G, B ein neuer Satz X, Y, Z berechnen:

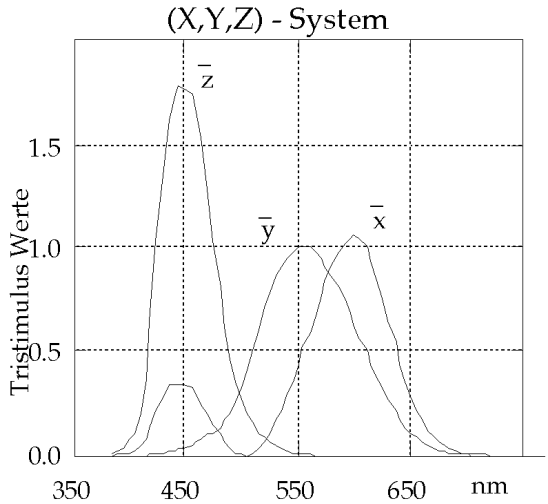
$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

Wenn einige Elemente der 3*3-Matrix **M** dabei negative Werte besitzen, können aus real existierenden Farben R, G, B, imaginäre erzeugt werden, die teilweise negative Intensitäten aufweisen. Irgendeine Farbe, die durch R, G, B gemäss der Gleichung
$I = bB + gG + rR$ nachgebildet wird, kann auch durch X, Y, Z nachgebildet werden (zumindest im mathematischen Sinn): $I = xX + yY + zZ$, wobei die Koeffizienten x, y, z bei bekanntem $\mathbf{M}^{-1}$ aus r, g, b berechnet werden können:

$$\begin{pmatrix} x \\ x \\ z \end{pmatrix} = \left(M^{-1}\right)^{T} \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix}$$

Die Mischungskurven $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ liefern durch dieselbe Rechnung auch die Mischungskurven $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$. Die imaginären Primärfarben X, Y, Z können so definiert werden, dass $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ wie unten abgebildet für alle $\lambda \geq 0$ sind.

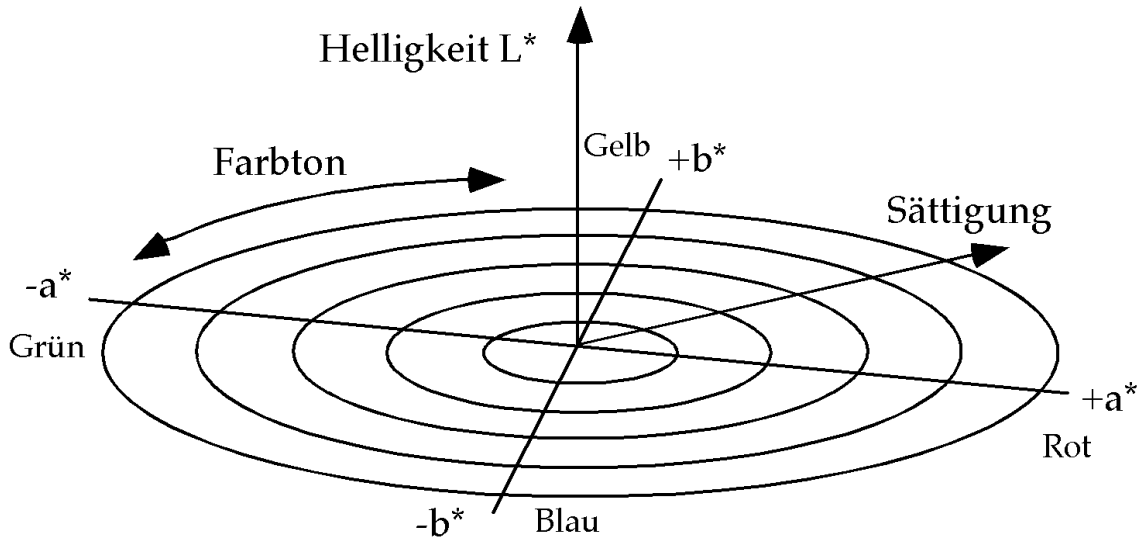




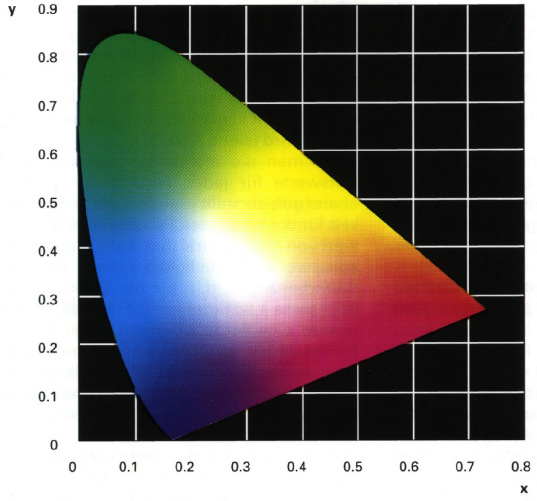
Tristimuluswerte und Chromazitätsdiagramm für das X, Y, Z (CIE 1931)-Farbsystem

Die im Jahre 1931 von der **CIE (Commission Internationale de l'Eclairage)** definierten Grössen X, Y, Z bilden die Grundlage weiterer und wichtiger kolorimetrischer Systeme. Das System wurde so gewählt, dass ein energiegleiches weisses Licht $x = y = z = 0.3333$ wird, und dass die $\bar{y}(\lambda)$-Kurve mit der relativen Helligkeitsempfindlichkeit eines durchschnittlichen Menschen übereinstimmt.

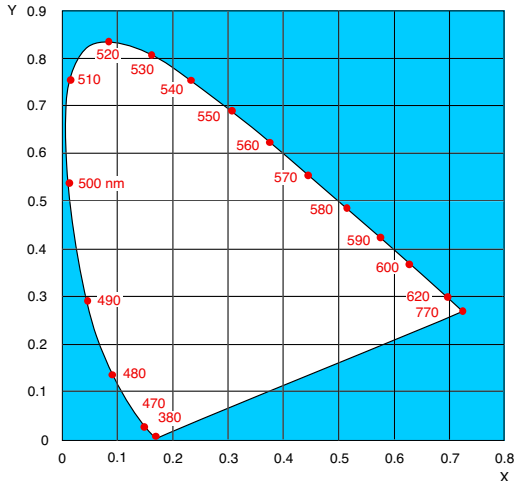
Mit dem CIE–Farbsystem lassen sich Farben exakt und reproduzierbar bestimmen, sowohl rechnerisch aus dem Spektrum wie auch direkt messtechnisch mit einem 3-Farbenkolorimeter. Das System hat jedoch einen grossen Nachteil: Die so erhaltenen Farbkoordinaten korrelieren schlecht mit der Farbempfindung, die Farben sind sehr ungleichmässig im Farbempfindungsraum verteilt. 1976 wurde deshalb von der CIE das CIELAB-1976 Farbsystem definiert, das farbempfindungsmässig dem Auge angepasst ist. Hier werden die Farben in den 3 Farbkoordinaten L^*, a^*, b^* angegeben, wobei L^* der Helligkeit entspricht und a^* und b^* sowohl Farbton als auch Sättigung bedeuten.


Helligkeit L*
Farbton
Gelb
+b*
Sättigung
-a*
Grün
+a*
Rot
-b*
Blau

Zu Kapitel 2:

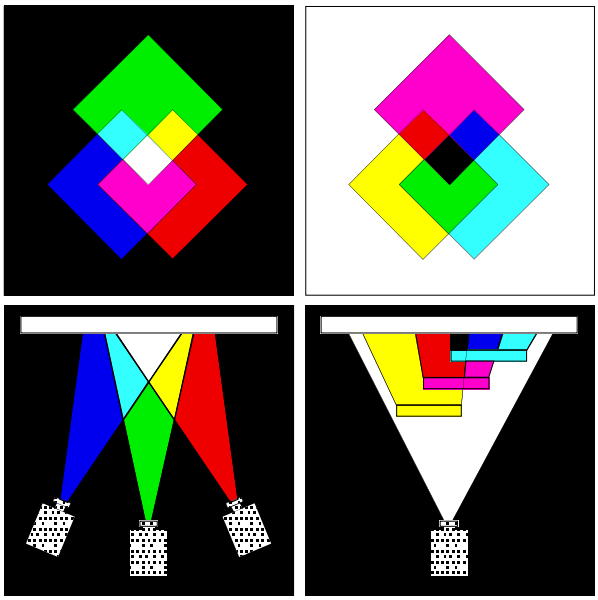


CIE – Farbendreieck



Farborte der Spektralwerte von 380–770nm (Spektralfarbenzug)

Zu Kapitel 3:



Additive und Subtraktive Farbmischung:

Links unten: Die additive Farbmischung. Schematische Darstellung der Anordnung von drei Projektoren, die blaues, grünes und rotes Licht auf eine Leinwand projizieren.

Links oben: Die daraus resultierende additive Farbmischung . Blau + Grün ergeben Cyan, Blau + Rot ergeben Magenta und Grün und Rot ergeben Gelb. Die Übereinanderprojektion aller drei Farben ergibt Weiss.

Rechts unten: Die subtraktive Farbmischung. Schematische Darstellung der Anordnung von drei Farbfiltern, Gelb, Magenta undCyan, im Strahlengang eines Projektors, der weisses Licht auf eine Leinwand ausstrahlt.

Rechts oben: Die daraus resultierende subtraktive Farbmischung. Gelb + Magenta ergeben Rot, Magenta + Cyan ergeben Blau und Cyan + Gelb ergeben Grün. An der Stelle, an der alle drei Filter übereinanderliegen, wird alles Licht absorbiert, so dass die Fläche schwarz bleibt.

3. Möglichkeiten der metameren Nachbildung der Farben:

Unter dem Begriff **Metamerie** versteht man, dass zwei Farben visuell gleich sein können, aber verschiedene Spektren haben.

Möglichkeiten der metameren Nachbildung von Farben:

1. durch Addition von Spektralbereichen in Form farbigen Lichtes,
2. durch Subtraktion von Spektralbereichen des weissen Lichtes mittels absorbierender Pigmente.

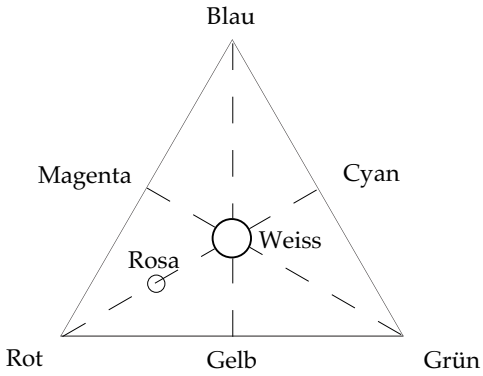
3.1. Additive Farbmischung:

Es werden drei Grundfarblichter verwendet, die den primären Grundfarben Blau, Grün und Rot entsprechen, also die Bereiche 400 – 500nm, 500 – 600nm und 600 – 700nm umfassen. Durch Uebereinanderprojektion dieser Grundfarblichter im verdunkelten Raum entsteht beim Betrachten als Summe der Reize der metamere Farbeindruck einer neuen Farbe. Die Grundkombinationen dieses **additiven Farbmischsystems** bei Verwendung je gleich intensiver (reizender) Strahlung sieht folgendermassen aus:

Blau 400 – 500 nm	+ Grün 500 – 600 nm		= Blaugrün (Cyan)
Blau 400 – 500 nm		+ Rot 600 – 700 nm	= Purpur (Magenta)
	Grün 500 – 600 nm	+ Rot 600 – 700 nm	= Gelb (Yellow)

Ueberwiegt bei dieser additiven Mischung die Intensität oder der Spektralbereich des einen Farblichtes, d.h. ist dessen Reiz stärker, so verschiebt sich die Farbempfindung in Richtung auf das intensivere und somit stärker reizende Farblicht.
Im Beispiel der Mischung von Grün + Rot entsteht so, je nach Intensität, eine Farbskala, die vom reinen Rot über Orange, Gelb, Gelbgrün bis zum reinen Grün reicht.
Die drei primären Farben ergeben bei Addition in reizmässig gleicher Wirkungsweise den Eindruck "Weiss", da alle Teile des Spektrums "weissen" Lichtes vereinigt werden. Wird zu einer Mischung aus zwei Grundfarben (mit gleicher Reizwirkung) die dritte Farbe in reduzierter Intensität addiert, so resultiert eine Farbempfindung zwischen der Mischfarbe der beiden Grundfarben und "Weiss". Die entstehende Farbe hat somit einen Weissgehalt oder ist verweisslicht (Beispiel: Rosa, Hellblau usw.). Die total in

additiverweise mischbaren Farben lassen sich graphisch durch ein gleichseitiges Dreieck darstellen ----> **additives Farbdreieck.**



Im **additiven Farbdreieck** stehen sich jene Farben gegenüber (Ecke und Seitenmitte), die sich als Lichter zum Eindruck "Weiss" ergänzen. Diese Farbenpaarungen nennt man Ergänzungs-, Komplementär- oder Gegenfarben. Dies sind:

Gelb	(aus Grün und Rot)	+	Blau	= "Weiss"
Cyan	(aus Blau und Grün)	+	Rot	= "Weiss"
Magenta	(aus Blau und Rot)	+	Grün	= "Weiss"

Gegenfarbenpaare müssen prinzipiell zusammen das ganze Spektrum "weissen" Lichtes enthalten, deshalb sind beliebig mehr Farbenpaare möglich. Ausser zur Erklärung der Farbempfindung im Auge spielt die additive Farbmischung technisch nur eine unbedeutende Rolle, da sie nur durch Projektion im dunklen Raum möglich ist. Da Farbempfindungen auf additiver Weise auch durch nebeneinander angeordnete Farbflecke entstehen können, wenn sie wegen ihrer Kleinheit und entsprechendem Betrachtungsabstand auf einzelne Zapfen abgebildet werden, ermöglicht dieses Farbrasterverfahren die Farbnachbildung im Monitor von Farbfernseher und Computer. Möglich ist ferner die additive Farbentstehung durch rasch nacheinander auf dieselben Zapfen fallende Grundfarblichter.
Das Polachrome-Sofortdia-Verfahren von Polaroid arbeitet als einziges heute noch verwendete photographische Verfahren nach der additiven Farbmischung (--> Linienraster).

3.2. Subtraktive Farbmischung:
Die für Farbdruck und Farbphotographie einzig in Frage kommende zweite Möglichkeit des metameren Nachbildens durch **Subtraktion von Spektralbezirken des "weissen" Lichtes** arbeitet mit Absorbern =Pigmenten, die je ungefähr einen Drittel des vollen Spektrums absorbieren, die beiden andern hingegen reflektieren oder transmittieren. Eine blaue Oberfläche z.B. ist darum blau, weil sie Blau als einzige Farbe nicht absorbiert; sinngemäss trifft dies auch für die von einem durchsichtigen Objekt hindurchgelassene Farbart zu, in diesem Beispiel also blaues Glas. Jedes farbige Objekt absorbiert also die zu seiner Eigenfarbe komplementäre Farbe. Dies ist der ganze übrige Teil des Spektrums.

Diese absorbierenden Grundfarben des subtraktiven Mischsystems sind jene Farben, die bei gleich intensiver Additionsmischung der primären Grundfarben entstehen:

Cyan	Blau und Grün enthaltend	----> Rot absorbierend
Magenta	Blau und Rot enthaltend	----> Grün absorbierend
Gelb	Grün und Rot enthaltend	----> Blau absorbierend

Sie sind somit die Gegenfarben der primären Farben. Die subtraktiven Farben werden auch als "Minus-Farben" bezeichnet, d.h.
Cyan = Minus Rot Magenta = Minus Grün Gelb =Minus Blau

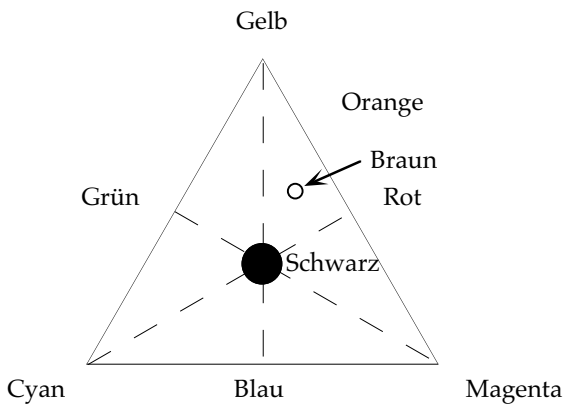
Bei Vorliegen von "weissem" Licht, d.h. dem vollen Spektrum, subtrahieren diese subtraktiven Grundfarben in Mischungen sukzessive die von ihnen nicht reflektierten oder transmittierten primären Grundfarben Blau, Grün und Rot. Was resultiert, ist die beiden Mischkomponenten gemeinsam anteilige primäre Grundfarbe.

Die grundlegenden Mischungspaare, bei je gleicher Absorption, sind:

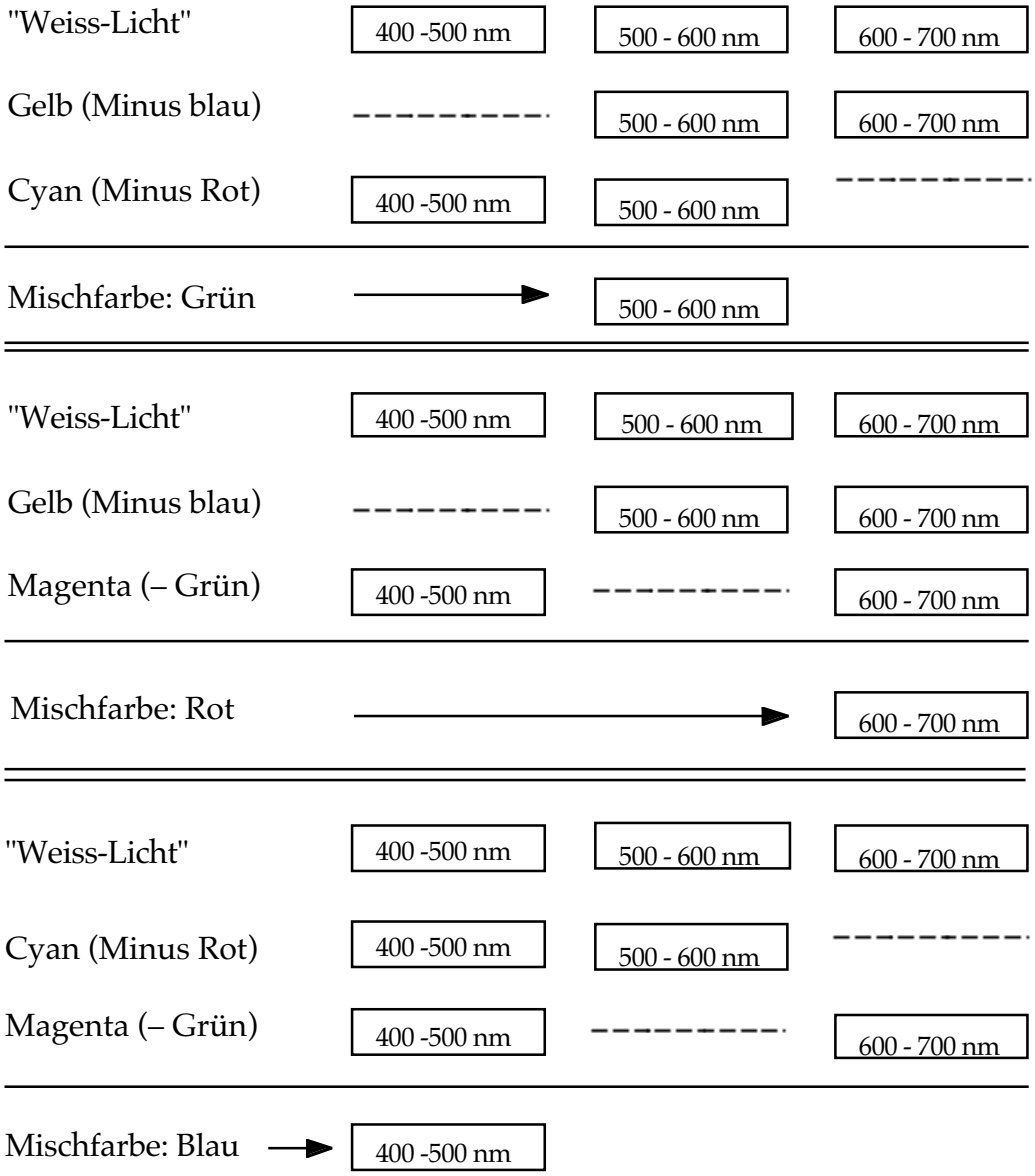
Gelb mit Cyan	gemischt = Grün	(–Blau/–Rot)
Gelb mit Magenta	gemischt = Rot	(–Blau/–Grün)
Cyan mit Magenta	gemischt = Blau	(–Rot/–Grün)

Sind die Intensitäten der Mischkomponenten ungleich, so resultieren je nachdem Farbtöne, die empfindungsmässig näher bei der einen Mischkomponente liegen. Durch unterschiedliche Mischung von z.B. Gelb mit Magenta resultiert eine Farbskala von:
reinem Gelb – Orange – Rot – Scharlachrot – Magenta.

Subtraktives Farbdreieck



Während bei der additiven Farbmischung durch die Vereinigung der drei Spektralbereiche **Weiss** entsteht, resultiert für die subtraktive Farbmischung bei Mischung der drei Grundfarben in gleicher Intensität **Schwarz**. Werden zwei Grundfarben in gleicher Intensität gemischt und gelangt die dritte Farbe in reduzierter Intensität hinzu, so ergibt sich ein Farbton, der zwischen Schwarz und der binären Mischfarbe liegt, also einen Schwarz-Gehalt aufweist oder verschwärzlicht ist (hier z.B. Braun).



Das **System der subtraktiven Farbmischung** ist ebenfalls durch ein gleichseitiges Dreieck symbolisierbar (siehe vorherige Seite). Allerdings sind hier die Positionen der Farben im Vergleich mit dem additiven Dreieck vertauscht, aber wieder stehen sich die Gegenfarben (je Ecke und Seitenmitte vis-à-vis) gegenüber, jetzt ergänzen sie sich aber zu **Schwarz**.
Erfolgt die subtraktive Mischung mit wenig farbintensiven Komponenten, die somit die Gegenfarbe nicht völlig absorbieren, so resultieren ebenfalls verweisslichte Farben. Mit der subtraktiven Mischung können sowohl verschwärzlichte Farben (wie Braun, Olive usw.) als auch verweisslichte Farben erzeugt werden. Bei der additiven Mischung lassen sich verschwärzlichte Farbtöne nur in Bezug auf eine helle weisse Fläche, unmittelbar um die projizierte Farbe herum, erhalten.

4.Farbsensitometrie:

Für die Farbsensitometrie gelten grundsätzlich alle Begriffe, Gesetzmässigkeiten und Problemstellungen, die in der SW-Sensitometrie gültig sind. Es kommt nur das Element **Farbe** hinzu. Während in der SW-Photographie Silber als "Licht-Absorber" wirkt, sind es in der Farbphotographie Farbstoffe. Silber hat die Eigenschaft, Licht über das ganze Spektralgebiet ziemlich gleichartig zu absorbieren, während Farbstoffe spezifische Absorptionskurven besitzen.

Die Farbsensitometrie ist deshalb ein komplexeres Gebiet weil,

a) man mit Densitometern arbeitet, welche mit Filtern für speziell Spektralbereiche versehen sind und man deshalb den genauen spektralen Absorptionsverlauf des Farbstoffs gar nicht erfassen kann
b) die in der Farbphotographie verwendeten Farbstoffe wegen ihren Nebenabsorptionen überhaupt nicht den Idealvorstellungen entsprechen.

Eine Farbsensitometrie ist nur dann sinnvoll, wenn man diese beiden Aspekte berücksichtigt.

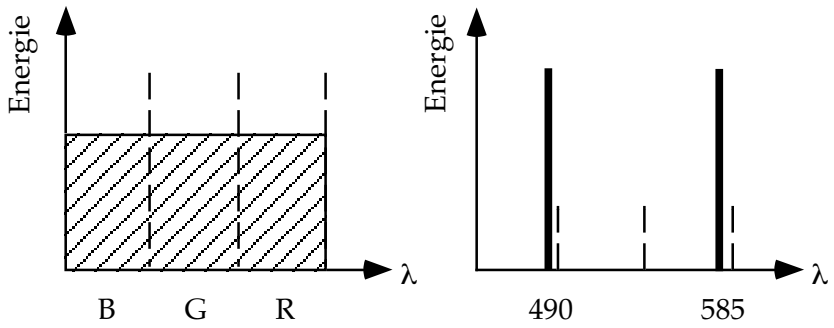
Es ist ebenfalls nötig, auf den Unterschied der Farberscheinung für das menschliche Auge und für das Messgerät hinzuweisen: zwei Farben können für den menschlichen Beobachter gleich erscheinen und für die Messung verschieden sein. - Man unterscheidet zwischen **bedingt gleichen und unbedingt gleichen** Farben:

Unbedingt gleiche Farben haben über den gesamten sichtbaren Bereich das gleiche Absorptionsspektrum. Unter jeder beliebigen Beleuchtung erscheinen sie dem menschlichen Beobachter auch immer gleich.

Bedingt gleiche Farben haben spektral verschiedene Absorptionskurven, sie erscheinen dem Menschen nur unter einer gegebenen Beleuchtung gleich. Verändert man die Beleuchtungsbedingungen, so ergeben sich andere Farbeindrücke (metamere Farben).

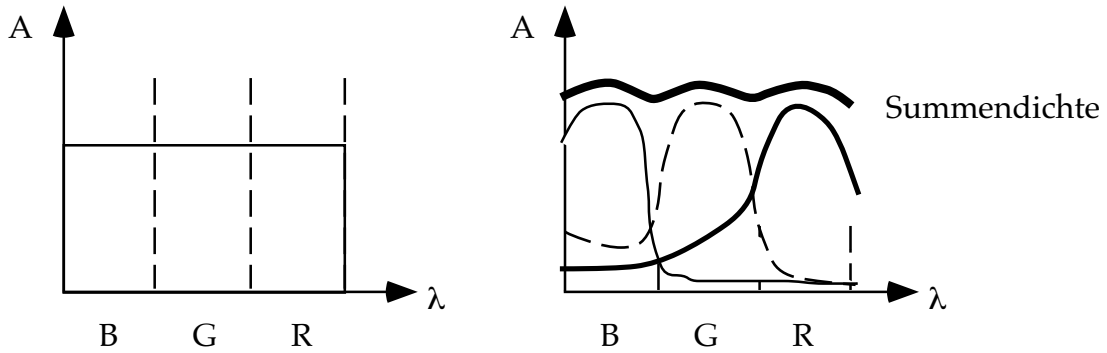
Ein Beispiel für ein bedingt gleiches Farbenpaar:

Man weiss, dass der Seh-Eindruck "weiss" erreicht wird, wenn die Strahlung alle Wellenlängen des Spektrums enthält. Man kann aber auch einen **Weiss-Eindruck** erhalten, wenn man die **monochromatisch gelbe Strahlung** mit einer geeigneten **monochromatisch blauen Strahlung** mischt. (Siehe dazu Abb. 11)



4.1. Der Grauaufbau.

Eine der wichtigsten Bedingungen, die bei einer qualitativ guten Farbwiedergabe erfüllt sein muss, ist die **korrekte Grau-Wiedergabe.** Während dies in der SW-Photographie kein Problem ist, weil fein verteiltes Silber das Licht aller Wellenlängen ziemlich gleichmässig absorbiert, ergibt sich in der Farbphotographie ein Problem. Die Grauskala muss aus drei Farbstoffen aufgebaut werden. Den Eindruck "Grau" erhält man bei Farbbildern, die dreifarbig aufgebaut sind, durch den korrekten Anteil von Gelb, Magenta und Cyan. Ein visueller Grauton setzt sich aus der **Summendichte** der einzelnen Farbstoffe zusammen. Die spektrale **Absorption dieses unechten Graus** ist also für jede Wellenlänge unterschiedlich, erscheint aber dem menschlichen Beobachter wie ein **echtes Grau.**



echtes Grau unechtes Grau

Könnte man die Densitometer mit Blau-, Grün- und Rot-Filtern ausrüsten, die der Augenempfindlichkeit angepasst sind und damit messen, so ergäbe sich für die **Graubedingung:**

∑ abs Blau =∑ abs Grün = ∑ abs Rot oder anders gesagt

$$\sum D_{yellow} = \sum D_{Magenta} = \sum D_{cyan}$$

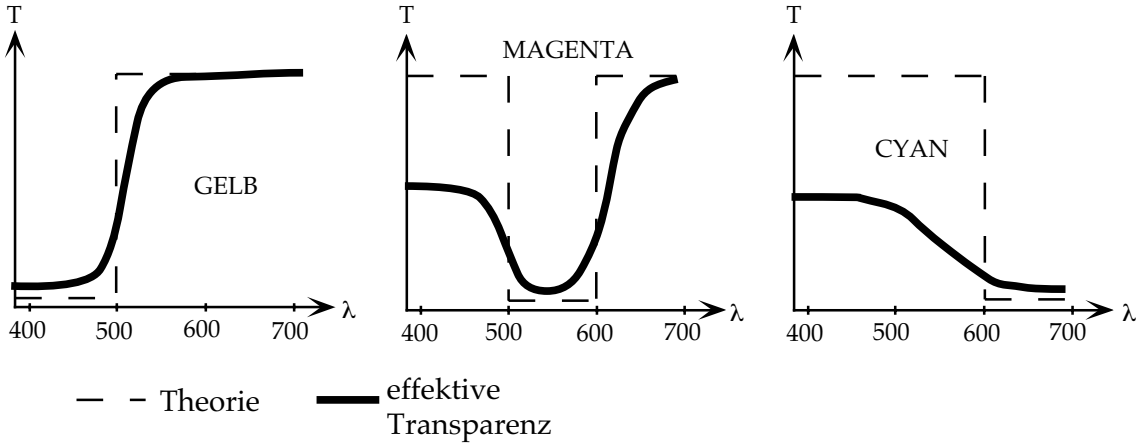
4.2. Fehler in der Farbwiedelgabe bei Kopierverfahren:

Beim Kopieren von gewöhnlichen Farbnegativen, beim Erstellen von Kopien ab Diapositiv oder beim Duplizieren von Diapositiven ergeben sich in allen genannten Fällen Farbtonverschiebungen und bei Kopien ab Diapositiv zusätzlich Kontrastverfälschungen.

4.2.1. Ursache der Farbverschiebungen:

Auch bei idealem Kurvenverlauf der Farbdichte unterliegt die Reinheit der Farbwiedergabe gewissen Einschränkungen. Diese sind in den Absorptionseigenschaften der in den Schichten entstehenden Farbstoffe begründet. Ein purpurner Farbstoff z. B. sollte seine Komplementärfarbe Grün völlig absorbieren, seine Anteilfarben Blau und Rot ungehindert reflektieren bzw. transmittieren. Der Farbstoff der Blaugrünschicht hingegen sollte für rotes Licht völlig undurchlässig, für blaues und grünes Licht durchlässig sein. Das

wirkliche Verhalten der Schichtfarbstoffe stimmt aber nicht mit den Mischungsregeln für subtraktive Farben überein. Abb. 12 zeigt das Absorptionsvermögen der Farbstoffe in Abhängigkeit von der Wellenlänge der einzelnen Farben. Diese haben zwar in ihrem hauptsächlichen Absorptionsbereich ein Maximum, aber sie greifen auch in das Absorptionsgebiet der Nachbarfarbe über. Man sagt sie weisen **"Nebendichten"** in den benachbarten Absorptionsgebieten auf.



Diese sog. falschen oder unerwünschten Absorptionen sind nicht bei allen Magenta- oder Cyan- Farbstoffen gleich, aber prinzipiell liegen solche Effekte überall vor. Schematisch kann für obige Farbstoffe angenommen werden:

- Magenta lässt nicht 100% Blau durch, sondern nur etwa 50%.
- Magenta lässt nicht 100% Rot durch, sondern nur etwa 70%.
- Zusätzlich wird Grün nicht zu 100% absorbiert sondern nur zu etwa 90%.
- Cyan lässt nicht 100 % Blau durch, sondern nur etwa 50%.
- Cyan lässt nicht 100% Grün durch, sondern nur etwa 25%.
- Zusätzlich wird Rot nicht zu 100% absorbiert, sondern nur zu etwa 90%.
- Gelb zeigt angenähert je 100% Transparenz für Grün und Rot weist dafür noch eine restliche Durchlässigkeit für Blau von ca. 10%.

Je nach Art der entstehenden Schichtfarbstoffe schwanken diese Werte etwas, generell ist aber festzustellen, dass dadurch beim Belichten eines Farbpositivpapiers oder eines Duplizierfilms in den Einzelschichten ungenügende oder eventuell zu starke Belichtungen durch die drei Grundfarbzonen des Kopierlichtes resultieren. In beiden Fällen wirken sich die unerwünschten Absorptionen und falschen Transparenzen in Verschwärzlichungen oder Verweisslichungen der resultierenden Bildfarben aus.

4.2.2. Schematische Farbwiedergabe bei der Kopie ab Dia: (oder Diaduplikat)

Farben des Dias	**Blau**	**Gelb**	**Rot**	**Grün**	**Cyan**
Aufbau der Farben im Dia:	— Magenta Cyan	Gelb — —	Gelb Magenta —	Gelb — Cyan	— — Cyan
Theoretische Durchlässigkeit	100 % B 0%G 0%R	0% B 100% G 100% R	0% B 0% G 100% R	0% B 100% G 0% R	100% B 100% G 0% R
Effektive Durch lässigkeit bei unerwünschten Absorptionen:	25% B 5% G 5% R	10% B 95% G 95% R	5% B 10% G 50% R	5% B 25% G 10% R	50% B 25% G 10% R
Bei Belichtung auf die **gelbe** Bildstelle wird:	Blau zu dunkel	**Gelb richtig**	Rot etwas zu dunkel+ gelblich	Grün zu dunkel	Cyan etwas zu dunkel+ bläulich
Wird länger be-lichtet, damit blaue Stellen richtig werden so wird:	**Blau richtig**	Gelb zu hell, we-gen Blau-Transpa renz	Rot zu hell und zu gelblich	Grün zu gelblich	Cyan etwas zu hell mit Blaustich

4.2.3. Schematische Farbwiedergabe beim Negativ-Positiv-Prozess
(bei Filmen ohne Farbmaskierung)

Farben des Negativs	**Blau**	**Gelb**	**Rot**	**Grün**	**Cyan**
Theoretische Durchlässigkeit	100 % B 0%G 0%R	0% B 100% G 100% R	0% B 0% G 100% R	0% B 100% G 0% R	100% B 100% G 0% R
Effektive Durch-lässigkeit bei unerwünschten Absorptionen:	25% B 5% G 5% R	10% B 95% G 95% R	5% B 10% G 50% R	5% B 25% G 10% R	50% B 25% G 10% R
Bei Belichtung auf die **gelbe** Negativstelle, d. h. blaue Stelle im Positiv wird:	Gelb zu hell	**Blau richtig**	Cyan etwas zu hellund zu bläulich	Magenta zu hell und zu bläulich	Rot etwas zu hell und gelblich
Wird länger belichtet, damit gelb im Positiv gesäftigt wird, so werden:	**Gelb richtig**	Blau zu dunkel,	Cyan zu Blau und etwas zu dunkel	Magenta zu Blau und etw. zu dunkel	Rot zu gelblich und etwas zu dunkel

Bei der Kopie ab Diapositiv bewirken die unerwünschten Absorptionen bei richtiger Belichtung auf gelbe oder weisse Bildelemente ungenügende Exposition der betreffenden Teilemulsionen, so dass für die Umkehr-entwicklung zuviel AgBr verbleibt, was zur Verschwärzlichung führt. Bei längerer Belichtung ergeben die falschen Transparenzen durch zu starke Wirkung entwickelbare Stellen in den Teilemulsionen, so dass für die Umkehrung zuwenig AgBr verbleibt, was zur Verweisslichun oder Farbtonverschiebung führt. Analog sind die Verhältnisse bei der Negativ-Positiv-Kopie.

4.3. Komprimierung des Tonwertumfangs durch Kontrastmasken:

Transparente Diafilme sind in der Lage einen wesentlich höheren Helligkeitsumfänge aufzuzeichnen, als mit einem Aufsichtsbild wiedergegeben werden kann. Solange ein Dia nur projiziert wird, ist das ein Vorteil. Wird ein Dia aber in ein Aufsichtsbild umgewandelt, muss der Helligkeitsumfang der Vorlage reduziert werden. Das Ausmass hängt vom gewählten Verfahren ab: Abzüge auf ein gutes photographisches Material verkraften einen wesentlich höheren Umfang als Drucke auf ein billiges Papier.

Den Tonwertumfang eines Dias kann man entweder linear komprimieren oder man kann die Schatten, die Lichter oder die Mitteltöne überdurchschnittlich komprimieren. Die Erfahrung zeigt, dass optimale Aufsichtsbilder nur dann erhalten werden, wenn sich die Art der Kompression nach dem Motiv richtet.

Im Falle von photographischen Abzügen erfolgt die Kompression der Tonwerte teilweise durch die Gradation des Materials, teilweise durch zusätzliche Masken. Bei solchen Masken handelt es sich um Schwarzweissnegative, welche beim Vergrössern dem farbigen Diapositiv passgenau überlagert werden (z.B. Kodak Pan Masking-Film). Der Dichteverlauf der Maske muss nun so gesteuert werden, dass diese zusammen mit dem Dia den gewünschten Tonwertumfang gibt. Da der Detailkontrast des Dias in den Lichtern in der Regel erhalten bleiben soll (ausgenommenbei Porträtaufnahmen), wird die Maske in den Lichtern keine Wirkung zeigen dürfen. Man erreicht das durch eine zweistufige Maskierung, indem vor der **Kontrastmaske** noch eine **Hochlichtmaske** mit einem kontrastreichen Film (z.B. Lithfilm) angefertigt wird. Die Hochlichtmaske deckt die Lichter ab, so dass diese in der Kontrastmaske offenbleiben. je stärker die Lichterzeichnung in der Kopie erhalten bleiben soll, umso höher muss die Maximaldichte der Hochlichtmaske sein. Die Kontrastmasken haben den erwünschten Effekt nur den Helligkeitskontrast zu reduzieren, nicht aber die Farbigkeit des Bildes. Da das Verpassen dieser Masken absolut masshaltigen Film erfordert und zudem ziemlich heikel ist, werden alle Masken durch die Verwendung von leicht opaken Zwischenfolien leicht unscharf emacht. Dadurch treten Fehler beim Zusammenpassen der verschiedenen Filmschichten nicht störend in Erscheinung.

4.4. Automatische Farbstoffmasken:

Am zuverlässigsten und am elegantesten funktionieren Farbmaskensysteme, wie sie zuerst von Kodak für die Ektacolor- und Kodacolor- Negativfilme entwickelt wurden und wie sie heute bei allen anderen Negativfilmen in prinzipiell ähnlicher Weise angewendet werden.

4.4.1. Das Prinzip der automatischen Farbmaske:

Betrachtet man eine einzelne Farbdichtekurve, z.B. für die Magenta-Schicht, so ergibt sich neben der richtigen Absorption von grünem Licht (Grün-Dichte) eine unerwünschten Blau-Absorption, d.h. die entsprechend Nebenfarbdichte für Blau. Ebenso im Prinzip eine solche für Rot, die allerdings vernachlässigbar ist.

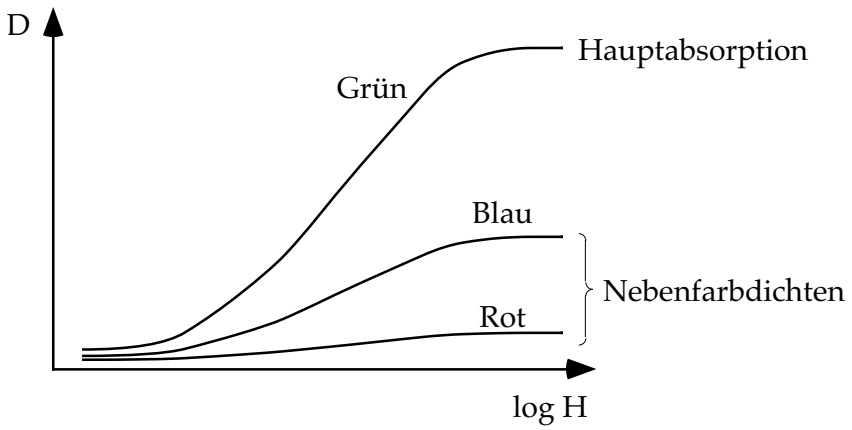
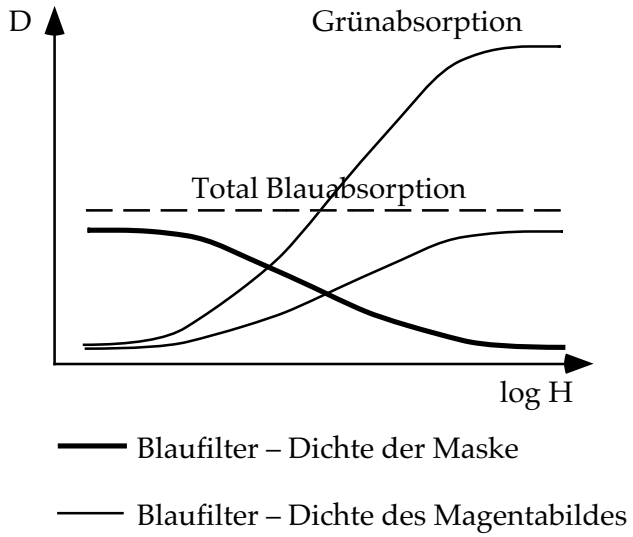


Abb. 13: Farbdichtekurve für die Magentaschicht

Diese Nebenfarbdichte für Blau lässt sich beheben, wenn der Magentakuppler des Films zum Vornherein eine Eigenfarbe aufweist, deren Blauabsorption gleich gross ist, wie die maximale Absorption des entstandenen (beim Entwickeln) Magenta. je nach der Belichtungsintensität d.h. der beim Entwickeln entstehenden Farbe, verschwindet die Eigenfarbe des Kupplers.

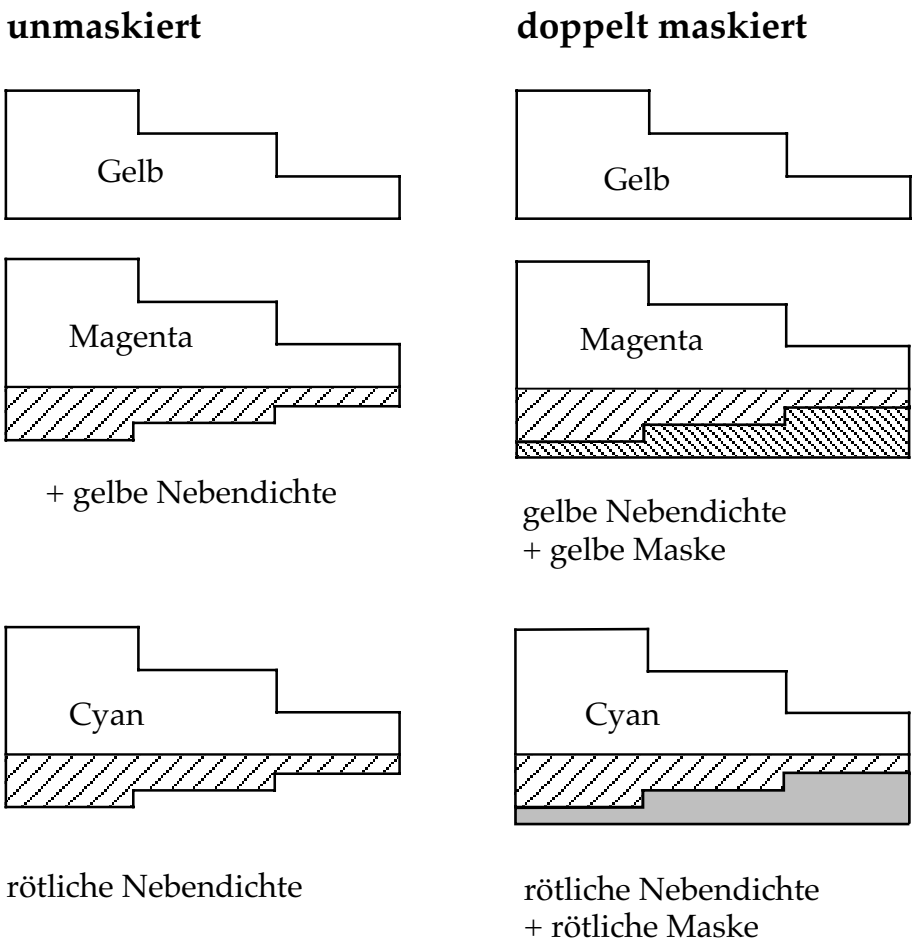


Damit erreicht man, dass an sämtlichen Stellen stets dieselbe Nebenfarbdichte für Blau resultiert und somit gleicht sich die unerwünschte Absorption des Magenta im Blau aus. Entsprechend muss der Kuppler gelblich sein. Da bei der Cyan-Schicht nicht nur die Nebenfarbdichte im Blau, sondern auch im Grün vorliegt, muss der Cyan-Kuppler im unentwickelten Zustand ebenfalls eine Eigenfarbe aufweisen, die sowohl die falsche Blau-, als auch die falsche Grün-Absorption zu kompensieren erlaubt. Dies bedeutet, dass der Cyan-Kuppler ursprünglich orangerot ist. Beim Kuppeln werden die Azogruppen zerstört, der Kuppler verliert die Eigenfarbe und ergibt mit dem Oxidationsprodukt des Farbentwicklers die Cyan-Farbe.

Auf diese Weise erzielt man in den Magenta- und Cyan- Farbstoffschichten gegenüber einem unmaskierten Film die gewünschte Beseitigung der unerwünschten Absorptionen und erhält eine wesentlich verbesserte Farbwiedergabe hinsichtlich Farbsättigung und Farbton.

Den Aufbau eines solchen **"doppelt maskierten" Farbnegativfilms** zeigt Abb. 14.

Abb. 14:



Damit durch die Erhöhung der Dichten für blaues und für grünes Kopierlicht nicht extreme Filterungen nötig werden, weist das verwendete Positivpapier entsprechend erhöhte Schichtempfindlichkeiten (im Blau und im Grün) auf. Dann ist mit mässigen, d.h. normalen Kopierfilterkombinationen auszukommen.

Infolge der Maskierfarbstoffe in den Emulsionen erhalten die heutigen Farbnegativfilme das gelborange Aussehen, das die Beurteilung der Belichtungsgenauigkeit erschwert. Alle transparenten Stellen zeigen die volle Maskierdichte.

Die orangerote Maskenfarbe macht die Kopiertechnik auf normales Schwarzweisspapier - wegen dessen ungenügender Farbempfindlichkeit - etwas schwierig. Erstens wird die Belichtungszeit sehr gross und zweitens gibt es eine schlechte Tonwert-Wiedergabe, da das SW-Papier nur blauempfindlich ist. Gut können Kopien nur mit dem speziellen panchromatischen *Panalure*-Papier von Kodak erhalten werden, das in den 3 Gradationen: weich, mittel und hart hergestellt wird.

Farbstich und **Farbkippen** sind die häufigsten Fehler, die bei Farbvergrösserungen auftreten:

4.5. Der Farbstich:,

Es gibt verschiedene Ursachen wie Farbstiche auftreten können:

- bei Verwendung eines Aufnahmelichtes, dessen Farbtemperatur nicht der Filmsensibilisierung entspricht
- bei der Reflexion grösserer farbiger Flächen in der Nähe des Aufnahmemotivs (z.B. portraitierte Person unter rotem Regenschirm)
- bei Schwankung der Netzspannung bei Kunstlichtaufnahmen
- bei Schwarzschild-Effekten (sehr kurze resp. lange Belichtungszeiten)

In Abbildung 15 zeigt der Farbnegativfilm einen Farbstich. Die 3 Dichtekurven liegen nicht übereinander, in jedem Punkt der Belichtungsachse liegt die Gelbdichte höher als die Magenta-, und Cyandichte. **Die vertikale Dichte-differenz ist gegenüber dem grauäquivalenten Zustand ein Mass für den Farbstich**.

Der Farbstich kommt durch eine Parallelverschiebung (Belichtungs-veränderung) z.B. der Yellow-Kurve gegenüber den beiden anderen Farbkurven auf der Belichtungsachse zustande. Betrachtet man die Dichtedifferenz ΔD von Yellow zu Magenta und Cyan an verschiedenen Keilstufen (Belichtungspunkten; siehe Abb. 15), so sieht man deutlich, dass in den Punkten 1 und 4 die entsprechenden ΔD-Werte deutlich kleiner werden. Punkt 2 und 3 ergeben einen mittleren Grautonwert, Punkt 1 und 4 liegen in der Schulter resp. im Fuss der Dichte-kurven. **Der Stich darf also nur in einem mittleren Grautonwert beurteilt werden.**

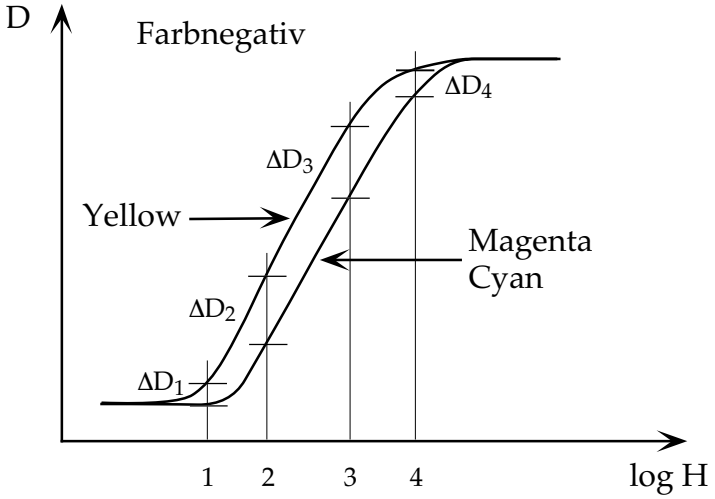


Abb. 15:

4.6. Das Farbkippen:

Bei heutigen Filmen ist das Farbkip'pen eine seltene Erscheinung. Es gibt aber diverse Gründe warum dieses Phänomen trotzdem auftreten kann.

- bei Ueberlagerung oder falscher Lagerung der Filme
- bei nicht typengemässer Verarbeitung
- bei Mischung von Tages- und Kunstlicht
- selten bei fehlerhafter Emulsionsherstellung

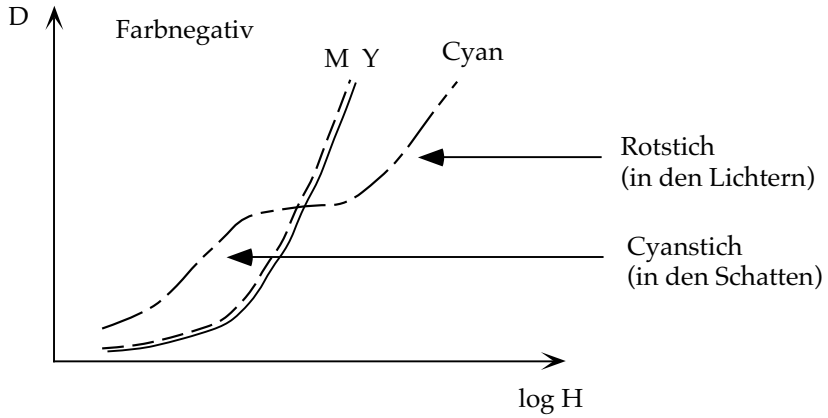


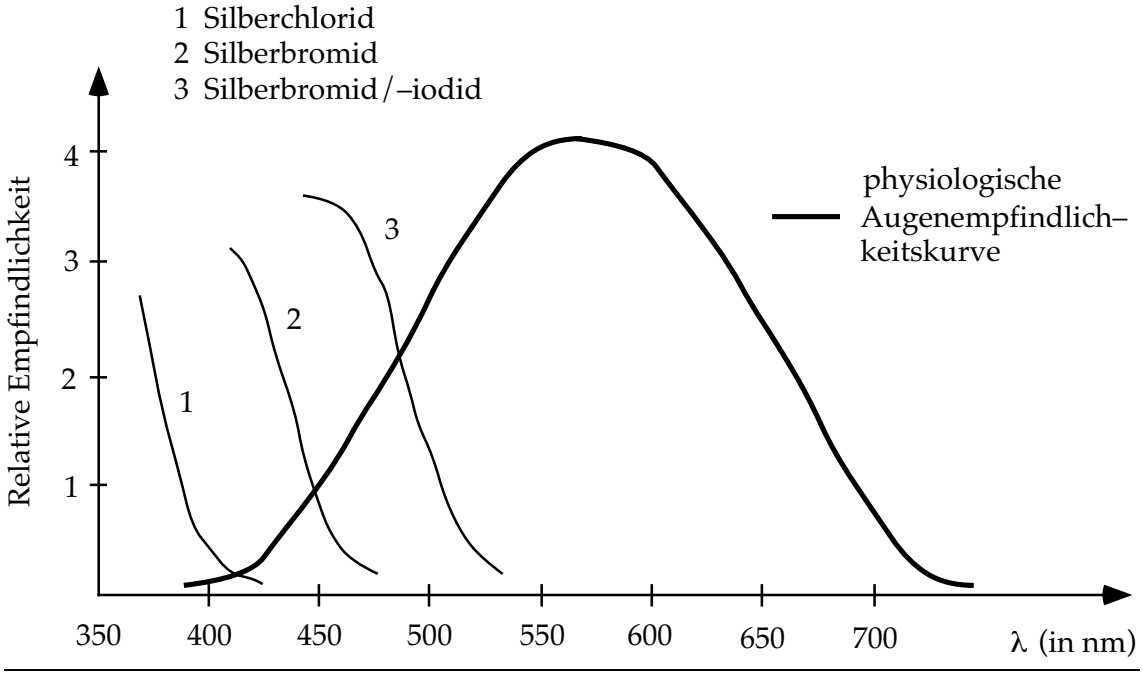
Abb. 16: Die 3 Farbdichtekurven einer Schicht laufen nicht mehr parallel, sie haben unterschiedliche Steigungen (γ -Werte), hier im Beispiel u.a. die Cyan-Kurve.

Jeweils im Bereich kleiner und grösserer Belichtungen, d.h. in den *Schatten* und in den *Lichtern* herrscht ein komplementärer Farbstich. So sind (s. Beispiel Abb. 16). im Negativ die Schatten cyanstichig, da die Cyandichte überwiegt und die Lichter rotstichig, da die Gelb- und Purpurdichte überwiegen, die zusammen Rot ergeben. In der Positivkopie ist dann das Umgekehrte der Fall, hier sind die Schatten rötlich und die Lichter blaugrün verfärbt. Diese komplementären Stiche kann man nicht durch Filtern neutralstellen. Ein Kippen von Magenta zu Grün ist übrigens für den Betrachter besonders störend.

5. Spektrale Sensibilisierung der Einzelschichten:

5.1. Farbempfindlichkeit:

Lichtempfindliche Systeme besitzen im allgemeinen und primär jeweils nur eine beschränkte Spektralempfindlichkeit. Diese primäre Farbempfindlichkeit nennt man Eigenempfindlichkeit. Für die drei Silberhalogenide umfasst diese Eigenempfindlichkeit den Wellenlängenbereich von etwa 200nm bis gegen 500nm in Abhängigkeit von der Art des Halogenids. Damit aber Photoschichten der an sie gestellten Aufgabe, Farben helligkeitsrichtig oder tonwertrichtig (entsprechend der physiologischen Augenempfindlichkeit) wiederzugeben, gerecht werden, müssen ihre spektralen Empfindlichkeiten erweitert werden. Da die meisten andern Systeme dies nicht zulassen, ausser den elektrophotographischen, besteht hier eine absolute Ueberlegenheit des klassischen Silbersalzmaterials.



5.2. Erweiterung der Farbempfindlichkeit durch den Sensibilisiervorgang:

1873 hat **H.W. Vogel** entdeckt, dass durch nachträgliches Behandeln (Baden in Farbstofflösung und Trocknen) oder durch Zusatz von bestimmten Farbstoffen die spektrale Empfindlichkeit von Emulsionen in Richtung längerer Wellenbezirke (gegen gelb und rot) erweitert werden kann. Der Vorgang als solcher ist kompliziert, er kann vereinfacht als Energietransfer aufgefasst werden. Nicht behandeltes Silberhalogenid (unsensibilisiertes) ist nur für Ultraviolett, Violett, Blau und Blaugrün empfindlich. Vogel konnte durch Zusatz von Erythrosin oder Eosin diese Spanne auf Grün und Gelb erweitern,

d.h. von 500nm bis fast nach 600nm die Grenze verschieben. **A. Miethe und A. Traube** fanden 1904 weitere Farbstofftypen (Cyanine) mit denen bis ins beginnende Infrarot sensibilisiert werden konnte. Nach 1919 wurde das sensibilisierbare Spektralgebiet stufenweise erweitert bis über 1300nm.

Vogel	ab 1873:	200 – 600nm
Traube + Miethe	ab 1904:	200 – 680nm
Adams + Haller	ab 1919:	200 – 740nm
Clarke	ab 1925:	200 – 900nm
Brooker	ab 1931:	200 – 1100nm
Dieterle + Riester	ab 1937:	200 – 1200nm
Heseltine	ab 1952:	200 – >1300nm

Je nach Erweiterung des Sensibilisierungsvorgangs kann zwischen orthochromatischem, panchromatischem und infrarot–empfindlichem Material unterschieden werden:

Orthochromatisches Material: Dieser Term wird für photographisches Material verwendet, welches grün–empfindlich ist. Demzufolge kann in der Dunkelkammer mit Rotlicht gearbeitet werden. (Bsp. einige SW–Filme)

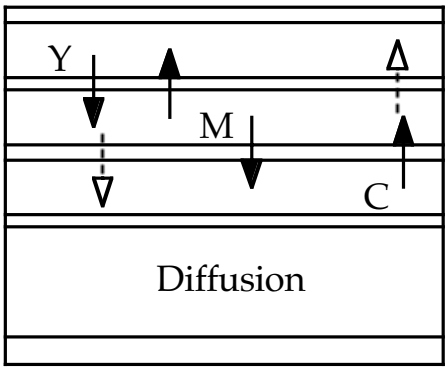
Panchromisches Material: Dieser Term wird für photographisches Material verwendet, welches grün– und rotempfindlich ist, welches also für den ganzen sichtbaren Bereich sensibilisiert ist (Bsp. Die meisten SW–Filme und alle Farbmaterialien). In der Dunkelkammer muss auf jegliches Licht verzichtet werden.

Infrarotempfindliches Material: Dieser Term wird für photographisches Material verwendet, welches bis weit in den Infrarotbereich empfindlich ist. Es sind meist SW–Filme für spezielle Anwendungen. Von Kodak ist jedoch auch ein Farbumkehrfilm erhältlich: der Ektachrome Infrared Film (auch Falschfarbenfilm genannt), seine spektrale Empfindlichkeit reicht von 380nm – 880nm. Seine drei lichtempfindlichen Schichten sind für Infrarot, Grün und Rot sensibilisiert. Da alle drei Schichten auch blauempfindlich sind (Blau erscheint auf dem IR–Film schwarz), ist in allen Fällen ein Gelbfilter (Kodak Wratten Nr.12) zu verwenden.
Die drei farbbildenden Schichten (Cyan, Gelb, Magenta) entsprechen zwar in ihrer Einfärbung jener eines normalen Farbumkehrfilms, sind aber in der spektralen Zuordnung verschoben, wodurch ein vom normalen Augeneindruck abweichendes Farbbild entsteht; deshalb auch der Name Falschfarbenfilm.

6. Modernes Farbfilmmaterial:

6.1. Geschichtliche Entwicklung ab 1900:

Das Verfahren der farbbildenden (chromogenen) Entwicklung ist wohl die wichtigste Erfindung für die heutige Farbphotographie. Bereits im Jahre 1907 fand **B. Homolka**, dass eine grössere Zahl von chemischen Verbindungen in der Lage ist, bei der Entwicklung von belichtetem Silberhalogenid ausser dem Silber auch **Farbstoffe** zu bilden. – Auf diese Beobachtungen gestützt, haben **Rudolf Fischer** (1881–1957) und **Hans Siegrist** zuerst Entwicklungssubstanzen benutzt, die bei der Oxidation selbst Farbstoffe ergaben. Fischer hat später empfohlen, den geeigneten Entwicklungssubstanzen sogenannte "Farbbildner" oder Farbkuppler beizufügen, die mit den oxidierten Farbentwicklern Farbstoffe bilden. Fischer hat auch die Methode entwickelt, jeder Schicht in einem Mehrschichtenfilm einen anderen Kuppler zuzusetzen, sodass mit **einem Entwickler** in den verschiedenen Schichten **verschiedene Farbstoffe** entstehen. Nach dem Patent von Fischer wäre also schon 1912 Farbphotographie im heutigen Sinne des Negativ-Positiv-Prozesses möglich gewesen.



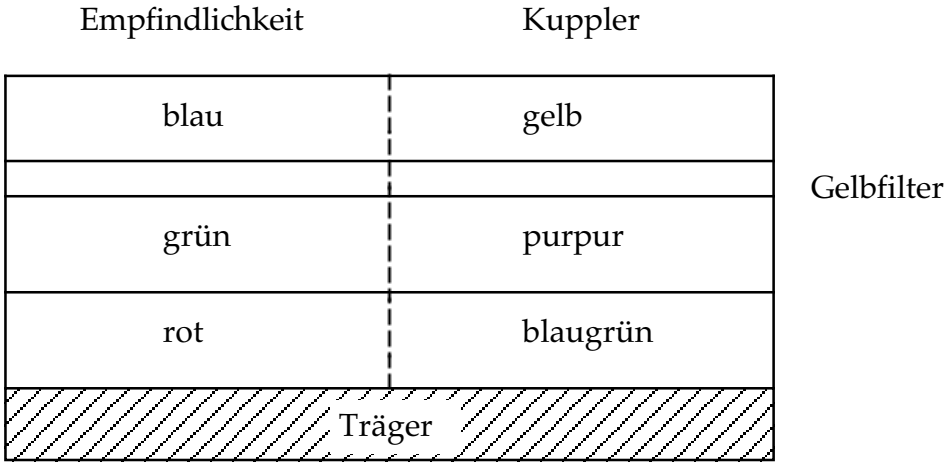
Allerdings scheiterte die praktische Durchführung an der zu hohen Löslichkeit der Kupplungskomponenten in wässrigen Lösungen. Dies hatte zur Folge, dass diese Kuppler z.T. bereits beim Giessen der Emulsionen und erst recht beim Entwickeln in andere Schichten **diffundierten** und dort unerwünschte, falsche Farbstoffanteile bewirkten (siehe Abb. links). Auch Gelatinezwischenschichten halfen nichts.

Während die fertigen Farbstoffe nicht wasserlöslich waren und auch fest in der vorgegebenen Schicht sitzen blieben, war der Weg für diffusionsechte Kuppler damals noch nicht bekannt. Der eigentliche Durchbruch der chromogenen Entwicklung schaff-ten die beiden Weltfirmen KODAK und AGFA erst in den dreissiger Jahren.
Bei KODAK waren es **Leopold Mannes und Leo Godowsky**, welche 1935 den **Kodachromefilm** entwickelten. Sie konnten das Problem der Diffusionsechtheit der Farbkuppler umgehen, indem sie den Dreischichtenfilm ohne Farbkuppler herstellten, aber drei verschiedene Farbentwickler zur Anwendung brachten, denen der entsprechende Farbkuppler beigemischt war. Einzelheiten werden in einem späteren Kapitel erläutert. Schliesslich fand die Firma AGFA **diffusionsechte Farbkuppler** (farblose Stoffe), die mit einem langen "Kohlenwasserstoffschwanz" (meist Stearyl $C_{17}H_{35}$) in der Gelatine verankert

werden konnten und liessen diese Erfindung 1936 durch viele Patente schützen. Diese **sogenannten Agfacolor-Typen** mit Kupplern in den Emulsionen nennt man "Farbfilme mit langkettigen Kupplern oder mit eingelagerten Kupplern".

6.2. Aufbau eines chromogenen Farbfilms:

Praktisch alle heutigen Farbschichten sind nach dem folgenden Muster aufgebaut. Auf dem Filmträger liegt zuerst eine rotempfindliche Schicht, darüber folgt eine grünempfindliche und zuletzt eine blauempfindliche.
Bei den meisten chromogenen Verfahren (Ausnahme: Kodachrome-Film) sind die drei Schichten mit verschiedenen Kupplern versehen: die blauempfindliche Schicht mit einem **Kuppler für Gelb**, die grünempfindliche Schicht mit einem **Kuppler für Purpur**
und die rotempfindliche Schicht mit einem **Kuppler für Blaugrün**. – Weil im kurzwelligen Strahlungsgebiet alle Halogensilbersalze empfindlich sind, wird unter die oberste blauempfindliche Schicht eine Gelbfilterschicht gegossen, welche die kurzwellige Strahlung von der grün - und rotempfindlichen Schicht fernhält.



6.2.1. Schichtaufbau im Einzelnen:

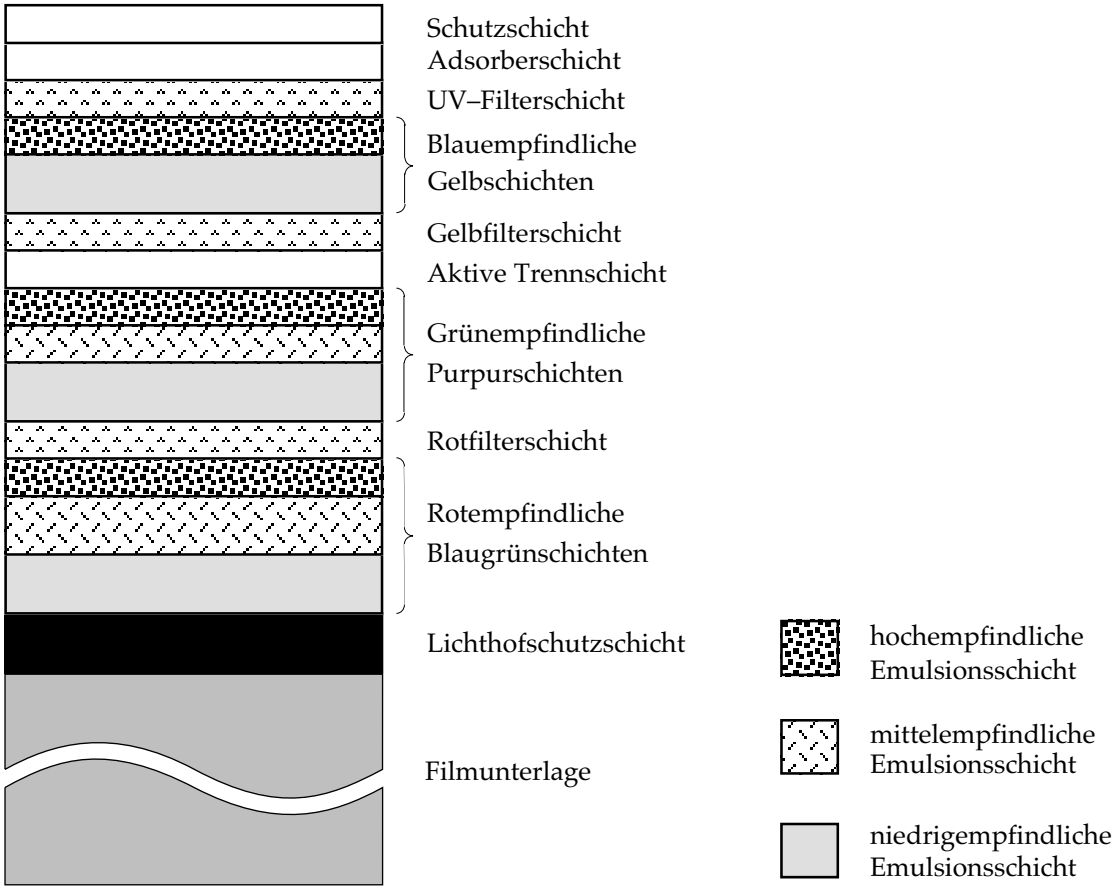
Die heutigen Farbfilme besitzen bis zu 18 verschiedene Schichten, wenn man Schutz-, Trenn-, und Filterschichten mitrechnet. Die Gesamtschichtdicke konnte dank neuer Giesstechniken (z.B. Kaskadenguss, Vorhangguss) und Fortschritte in der Emulsionstechnik häufig noch verringert werden, was wegen der verringerten Lichtstreuung der Bildschärfe zugutekommt. Emulsionsschichten, das heisst farbempfindliche Schichten mit Silberhalogenid–Kristallen und Farbkupplern, sind dabei nur maximal neun vorhanden, nämlich bis zu drei mal drei Schichtverbände unterschiedlicher Empfindlichkeit und damit auch Korngrössen für jeden Sensibilisierungs– und Farbstoffbereich. Dabei ist

zumindest eine obere hochempfindliche Teilschicht, welche die maximal erreichbare Empfindlichkeit bestimmt, und deren gröberes Farbkorn in den dunkleren Stellen des Positivs nicht stört, mit einer unteren mittelempfindlichen Teilschicht, welche die Detailwiedergabe in den bildwichtigen Bereichen bestimmt, kombiniert. Bei drei Teilschichten ist die mittlere mittelempfind-lich und die unterste niedrigempfindlich.

6.2.2. Filmaufbau mit einer Doppel– und zwei Dreifachschichten:

Beispiele. Agfacolor Portrait 160 Professional; Fujichrome 50 und 100; alle Fujicolor Super G und HG Filme; Konica Color Super SR 200 und Super SR 400

Die einzelnen Schichtdicken liegen zwischen 1 und 2μ m.



Durch Schichtteilungen in hoch-, mittel- und niedrigempfindlich, wie sie im obigen Beispiel gezeigt werden, kann die Empfindlichkeit gesteigert, der Belichtungsspielraum erweitert und die Feinkörnigkeit insgesamt verbessert werden. Beim Kodachrome–Film und wenigen anderen Filmen (z.B. Agfachrome 1000 RS prof.) handelt es sich nach wie vor um Dreischichtenfilme.

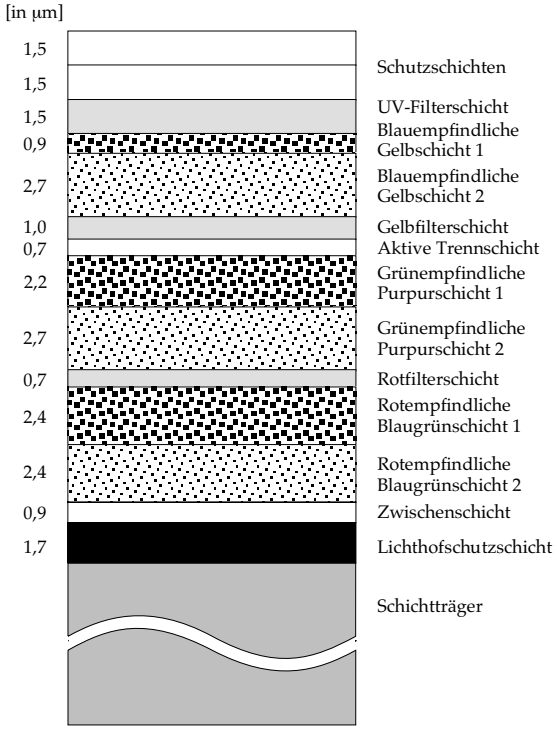
In den nachfolgend gezeigten Filmbeispielen (Seite 46; Agfachrome und Agfacolor) bestehen die Schichtträger (Filmunterlagen) aus Acetylzellulose. Ihre Stärken sind beim Kleinbildfilm 130μ m, beim Rollfilm 100μ m und beim Planfilm 200μ m. Bei Roll– und Planfilmen wird auf der Rückseite eine gehärtete Gelatineschicht aufgebracht.

Gesamtdicke der Schichten (ohne Schichtträger):

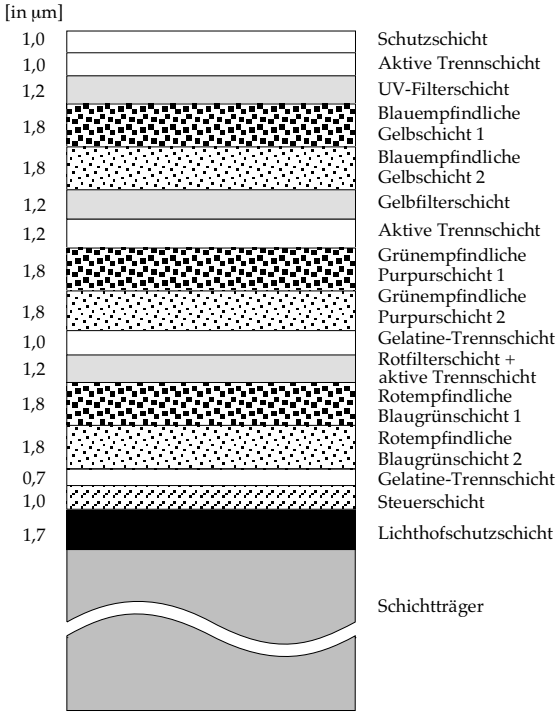
**Agfachrome 50 RS und 100 RS prof.	= 23μ m
Agfachrome 1000 RS prof.	= 24μ m
**Agfacolor XRS 100, 200 resp. 400 prof.	= 23 resp.27μ m
Agfacolor XRS 1000 prof.	= 30μ m

Die mit ** bezeichneten Filme besitzen zusätzlich eine Rotfilter–Schicht zwischen den grün– und rotsensibilisierten Schichten. Diese Rotfilterschicht bewirkt eine strengere Rotsensibilisierung dieser Filme und damit eine reinere und brillantere Blau– und Grünwiedergabe. Ausserdem besitzen diese genannten Filme (inkl. Agfachrome 1000RS prof.) noch eine UV–Filterschicht.

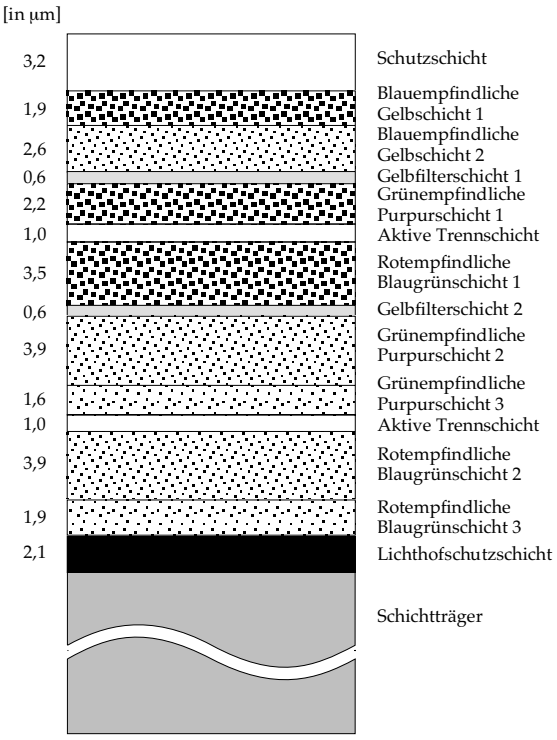
AGFACOLOR XRS 100, XRS 200, XRS 400 PROFESSIONAL



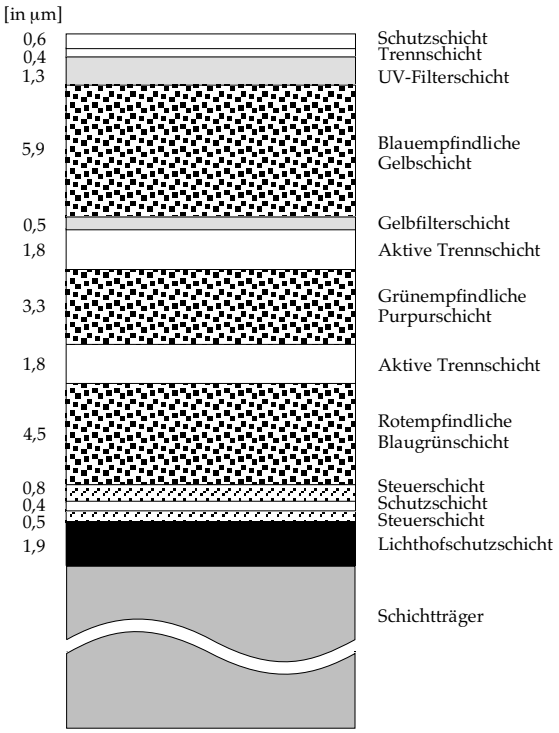
AGFACHROME 50 RS / 100 RS PROFESSIONAL



AGFACOLOR XRS 1000 PROFESSIONAL

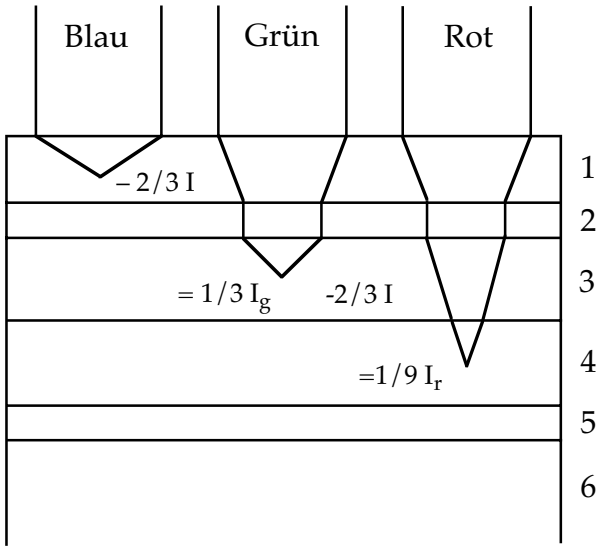


AGFACHROME 1000 RS PROFESSIONAL



6.3. Effektive Lichtempfindlichkeit von Emulsionsschichten:

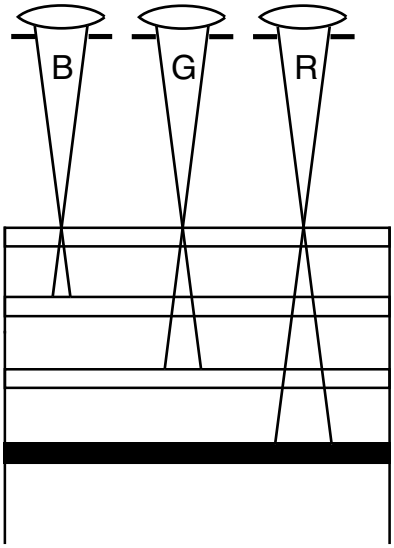
Bei der Feststellung, ein Farbfilm enthalte drei verschieden farbempfindliche Emulsionsschichten wird oft zu wenig berücksichtigt, wie deren effektive Lichtempfindlichkeiten beschaffen sein müssen. Denn beim Passieren der obersten Emulsionsschicht (1 im folgenden Schema) erleiden die Grün– und Rotanteile nicht nur eine Streuung des Abbildungsstrahlengangs, sondern ebenso auch eine Intensitätsab-schwächung. Für die Rot–Anteile kommt zusätzlich die Intensitätsreduktion in der zu passierenden grünempfindlichen Emulsion. Aufgrund von Vergleichen mit dünnschichtigem SW–Material, z.B. Reproduktionsfilmen, ist festzustellen, dass die Intensität auf etwa 1/3 reduziert wird. Das bedeutet, dass die grünempfindliche Emulsion rund die dreifache Empfindlichkeit der obersten blauempfindlichen Emulsion haben muss. Für die rotregistrierende Emulsion kann eine nochmalige Reduktion auf 1/3 der Intensität angenommen werden, was im Endeffekt bedeutet, dass nur noch 1/9 des auf der Filmoberfläche ankommenden Rotanteils belichtend wirkt. Folglich muss die rotempfindliche Emulsion im Vergleich zur blauempfindlichen etwa die neunfache Empfindlichkeit aufweisen . Aus diesem Grunde kann ein Farbfilm, wenigstens nach den heutigen Aufbaumethoden, nie die Empfindlichkeit eines höchstempfindlichen SW–Filmes besitzen.



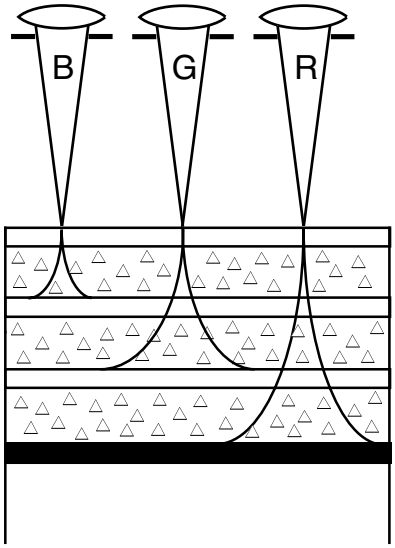
6.4. Einfluss des topographischen Aufbaus auf die Qualität der Abbildung:

Da die zu registrierenden Grundfarbenanteile im Remissionslicht eines Motivs in unterschiedlichen Schichttiefen zur Wirkung gelangen, ergibt sich primär bereits ein reduziertes Auflösungsvermögen im Vergleich zum SW-Material. Da aber die Grün - und Rotanteile eine bzw. zwei Emulsionslagen

durchdringen müssen, welche nicht transparent, sondern opak sind, ergibt sich durch Lichtstreuung an den AgBr-Körnern der Emulsionen eine zusätzliche Verschlechterung im Auflösungsvermögen des Films.
Das Auflösungsvermögen eines Farbfilms ist somit stets erheblich schlechter als jenes eines SW-Films. Diese Reduktion der Detailwiedergabe wird zudem gesteigert sichtbar, weil die Bildelemente in den dunkelsten Farben Cyan und Magenta deutlich unscharf in Erscheinung treten, während das schärfere Bild in der obersten Emulsionsschicht durch das hellwirkende Gelb wenig wahrgenommen wird.



Strahlengang bei ideal–transparenten Emulsionen ohne Streuung



Strahlengang mit Streuung am AgBr-Korn

6.5. Technische und chemische Anforderungen an Farbkuppler:

Farbkuppler müssen eine ganze Reihe von Bedingungen erfüllen:

1. Die mit dem Entwickleroxidationsprodukt entstehenden Farben müssen dem System der subtraktiven Farben angehören.
2. Die entstehende Farbe muss möglichst komplementär zur Schichtempfindlichkeitsfarbe sein.
3. Die Kuppler müssen diffusionsfest sein.
4. Die Kuppler dürfen sich beim Lagern des unbelichteten Films nicht spontan zersetzen.
5. Die Kuppler dürfen die photographischen Eigenschaften der Silberbromidemulsion nicht verändern, d.h. keinen Einfluss ausüben auf Lichtempfindlichkeit und deren Stabilität, auf Gradation, Schleierfreiheit, Haltbarkeit der latenten Bilder und Entwickelbarkeit.
6. Die Kuppler dürfen durch vorausgehende photographische

Behandlungen nicht verändert werden.

7. Die Kupplungsgeschwindigkeit der drei verwendeten Farbbildner eines Films sollten möglichst gleich gross sein.
8. Die entstehenden Farbstoffe dürfen durch photographische Lösungen nicht verändert werden, vor allem nicht irreversibel.
9. Die resultierenden Farbstoffe sollten möglichst widerstandsfähig sein gegen UV, Licht, Wärme und Chemikalien, d.h. sie sollten optimale Echtheit besitzen.

Die Einhaltung dieser Bedingungen, besonders der unter 9. aufgeführten, ist sehr schwierig.

6.6. DIR-Kuppler:

Die von Kodak seit 1972 eingesetzten und später auch von anderen Herstellern eingeführten DIR-Kuppler (DIR = Developer Inhibitor Releasing) geben während der Entwicklung einen "Verzögerer" = Inhibitor frei, der von den stärker belichteten Bereichen in die Zonen geringerer Belichtung wandert, um dort den Entwicklungsvorgang zu bremsen. Dadurch kommt es zu einer schärferen Kantenbildung zwischen hellen und dunkeln Bildpartien mittels zusätzlicher Farbstoffbildung an den Abgrenzungen, was somit zur **Schärfesteigerung** führt. Der DIR–Kuppler, der selbst nicht der Farbstofferzeugung dient, bringt durch eine wesentliche Verringerung der Farbstoffwölkchen eine **Erhöhung der Feinkörnigkeit**. Ausserdem ist der Inhibitor dazu fähig, senkrecht durch den Schichtverband zu diffundieren, um eine **Steigerung der Farbsättigung** durch Unterdrücken störender Nebenfarbdichten in der Nachbarschicht zu erzielen. Dabei wird die vorherrschende Farbe in ihrer Dichte erhöht.
Bei den Farbnegativfilmen hängen die DIR-Kuppler an den eigentlichen Farbkupplern, während beim Diafilm DIR-Verbindungen verwendet werden, die im Erstentwickler aktiv werden.

6.7. Maskierende Farbkuppler in Farbnegativen:

Alle heute verwendeten Farbnegativfilme sind maskiert. Der Zweck dieser Maskierung ist die Eliminierung der Nebenfarbdichten. Genauer gesagt, werden die Nebenfarbdichten durch die Masken zu einheitlichen ausfilterbaren Farbstichen komplettiert. Die Masken entstehen selbsttätig bei der Belichtung und Entwicklung des Farbnegativfilms. (Siehe v.a. im Kapitel Farbsensitometrie, S. 30ff)

6.8. Der Kodachrome – Film:

Auf der Grundlage der chromogenen Entwicklung erarbeiteten Mannes und Godowsky das Kodachrome–Verfahren, das erste photographische Verfahren mit einem Mehrschichtenfilm (1935; 16mm Kodachrome–Schmalfilm). In den drei unterschiedlich farbsensibilisierten schwarz-weiss Schichten sind aber **keine Kuppler** eingelagert. Dadurch wird die Schichtdicke erheblich dünner als bei übrigen Farbfilmen (8-10 μ m statt wie üblich ca. 25-35 μ m). Die Verarbeitung, die früher auf einem **"kontrollierten Diffusions-Bleichprozess"** beruhte (1935 – 1938), verläuft heute wie nachfolgend beschrieben.
Zum Verständnis des Kodachrome Prozesses soll vorausgeschickt werden, dass bei allen chromogenen Prozessen für die grün- und die rotsensibilisierten Schichten beim Emulsionierungsprozess entsprechende spektrale Sensibilisierungs-Farbstoffe auf den Silberhalogenidkristallen **adsorbiert** werden müssen. Wenn solche Schichten in ein Verarbeitungsbad kommen, dann ist es meist so, dass die Sensibilisatoren von der Kornoberfläche **desorbieren** und in die Verarbeitungslösung gehen. Demgegenüber werden beim heutigen Kodachromefilm **diffusions- bzw. desorptionsechte Spektral-sensibilisatoren** eingesetzt. Die spektral selektive Empfindlichkeit bleibt auch nach der Erstentwicklung erhalten.

Jede Schicht wird separat farbentwickelt:

Das Verarbeitungsschema (Kodachrome–Prozess K 14) sieht folgendermassen aus:

1. Bildmässige Belichtung
2. Schwarz-weiss Erstentwicklung
3. Erste diffuse Umkehrbelichtung der Cyanschicht (rotempfindliche Schicht) durch die Trägerseite mit **rotem Licht**.
4. Entwicklung des **Cyanbildes** in einem Farbentwickler, dem ein

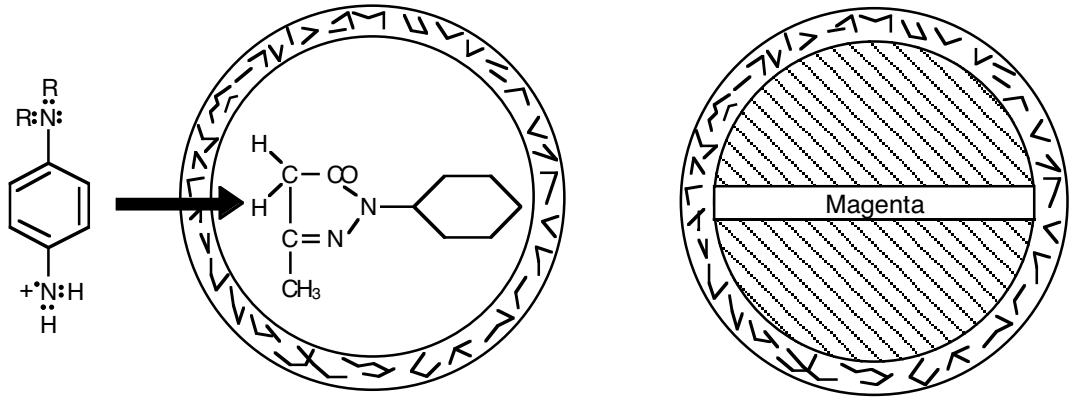
Cyankuppler beigemischt ist.

5. Zweite Belichtung der blauempfindlichen Schicht von der Emulsionsseite her mit **blauem Licht**. Die noch immer vorhandene Gelbfilterschicht absorbiert das blaue Licht, welches die grünempfindliche Schicht belichten könnte.
6. Entwicklung des **Gelbbildes** in einem Farbentwickler, dem ein Gelbkuppler zugemischt ist.
7. Entwicklung des **Magentabildes** in einem **schleiernden** (genügend tiefes Reduktionspotential) Farbentwickler, dem ein Magentakuppler zugesetzt ist. (Dadurch wird eine weitere Belichtung mit grünem Licht überflüssig.)
8. Stoppbad, Wässern
9. Bleichbad: Das bei der SW- und Farbentwicklung entstandene Silber und die aus Silber bestehende Gelbfilterschicht wird aufoxidiert und wegen der Anwesenheit von Halogenionen zu Silberhalogenid konvertiert.
10. Fixierbad. Die Silberhalogenide werden aufgelöst.
11. Wässern. Trocknen.

Die komplizierte Entwicklungsweise scheint auf einen sehr lange dauernden Arbeitsprozess hinzuweisen. Da die Vorgänge aber bei höherer Temperatur (27° C) ablaufen und alle nötigen Wässerungen als sogenannte Sprühwässerungen (aus Düsen) erfolgen, dauert die ganze Entwicklung kaum länger als 30 Minuten.

Herausragendes Merkmal dieses Films ist die sehr gute Bildschärfe und seine gute Feinkörnigkeit. In Ausnahmefällen können aber die in der Gelatine zurückbleibenden Sensibilisatorfarbstoffe in den "Lichtern" störend in Erscheinung treten. Trotz der sehr umständlichen Entwicklung (Kodachrome–Prozess K14), die nur in den Kodak-Laboratorien durchgeführt werden kann, hat sich dieser Film nun über bald 60 Jahre im Verkaufsprogramm halten können!
Im zweiten Weltkrieg ergab sich bei der amerikanischen Armee die Notwendigkeit, Farbaufnahmen an Ort und Stelle entwickeln zu können. Kodachrome-Filme mussten stets nach Rochester zur Verarbeitung gesandt werden. Es musste ein Weg gefunden werden, die Agfa–Patente mit den diffusionsechten Kupplern zu umgehen. In der Folge schuf Kodak ein weiteres Farbfilmprinzip, das zwar im wesentlichen vom Agfacolor-Typus abgeleitet war, aber im Gegensatz dazu nicht Kuppler mit langkettigen Molekülen verwendete, sondern die Kuppler in geschützter Form in den Emulsionen aufweist. Diese Farbfilmvariante nennt man Typus mit eingebetteten Kupplern. Nach diesem Prinzip arbeiten die **Ektachrome-Filme**, welche ab 1946 auch für zivile Zwecke freigegeben wurden.

Die Idee war, die wasserlöslichen Kuppler in schwer wasserlösliche Trägerstoffe einzugiessen, um so die Kuppler gegen das "Ausbluten" zu schützen. Das Trägermaterial war z.B. der Triarylester der Phosphorsäure, Methylphthalat oder auch Dibutylphthalat. Die mit Kuppler versehenen, feinverteilten lipophilen Tröpfchen werden der Emulsion zugesetzt. Dies machte die Verwendung von Benzylalkohol im Farbentwickler notwendig, ein Stoff, der in der Lage ist, diese Kunststofftröpfchen anzulösen, sodass die oxydierten Farbentwicklermoleküle zu den eingeschlossenen Farbkupplern diffundieren konnten und dort den entsprechenden Farbstoff bilden konnten (hier im Beispiel Magenta). Aus dieser Methode resultierte eine geringere Auswirkung der Kuppler auf die Emulsion, eine bessere Lagerfähigkeit der Filme vor der Entwicklung und die Möglichkeit einer aggressiveren Behandlung bei der Verarbeitung.



Vorausetzung für den Einsatz solcher Kunststoffe in Photoschichten ist, dass deren Brechungsindex identisch ist mit dem einer getrockneten Gelatineschicht, da sonst eine lichtstreuende Schicht entsteht, welche die Bildschärfe stark negativ beeinflusst. Ein mit weisser Strahlung stark belichteter und verarbeiteter Farbumkehrfilm ist transparent und glasklar. Legt man ihn ins Wasser, dann quillt die Gelatine auf. Der Brechungs index der Gelatine nimmt ab, während der Brechungsindex der Kunststofftröpfchen unverändert bleibt. Als logische Folge davon erscheint ein **nasser Film**, der nach dem Verfahren der geschützten Farbkuppler aufgebaut ist, **trübe**.

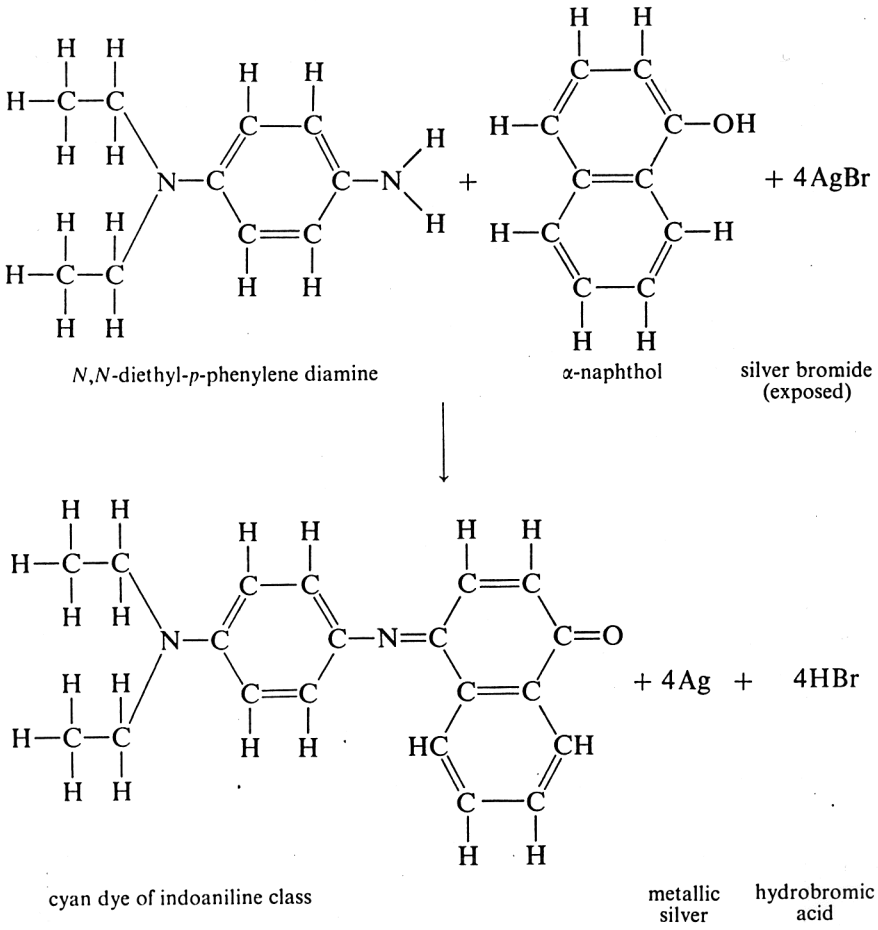
Nachdem in der Mitte der siebziger Jahre viele Firmen (auch AGFA) dieses Prinzip übernommen haben, gelten die gemachten Bemerkungen heute für praktisch alle Filmmaterialien.

7. Chromogene Entwicklung:

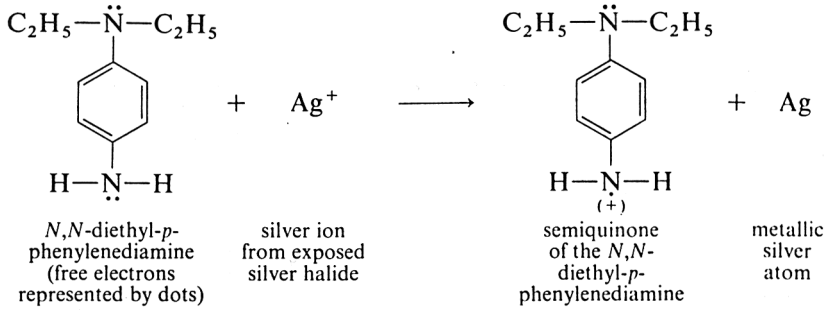
Das Prinzip des Farbstoffaufbaues nahezu aller Dreischichtenfarbfilme - Umkehr- und Farbnegativfilme - beruht auf der "chromogenen Entwicklung". Das heisst, dass sowohl der Farbentwickler als auch die Farbkomponenten zunächst farblose Substanzen sind. Erst die durch die SW–Entwicklung gebildeten Oxidationsprodukte, die durch die Reduktion des belichteten Silberhalogenids entstehen, führen durch eine Kupplung mit den Farbkomponenten zu Farbstoffen. Das Silberbild wird nach der Entwicklung durch Bleichen und Fixieren aus der Schicht entfernt, so dass das reine Farbstoffbild übrig bleibt.

7.1. Schema der chromogenen Farbentwicklung: (für Chemiker)

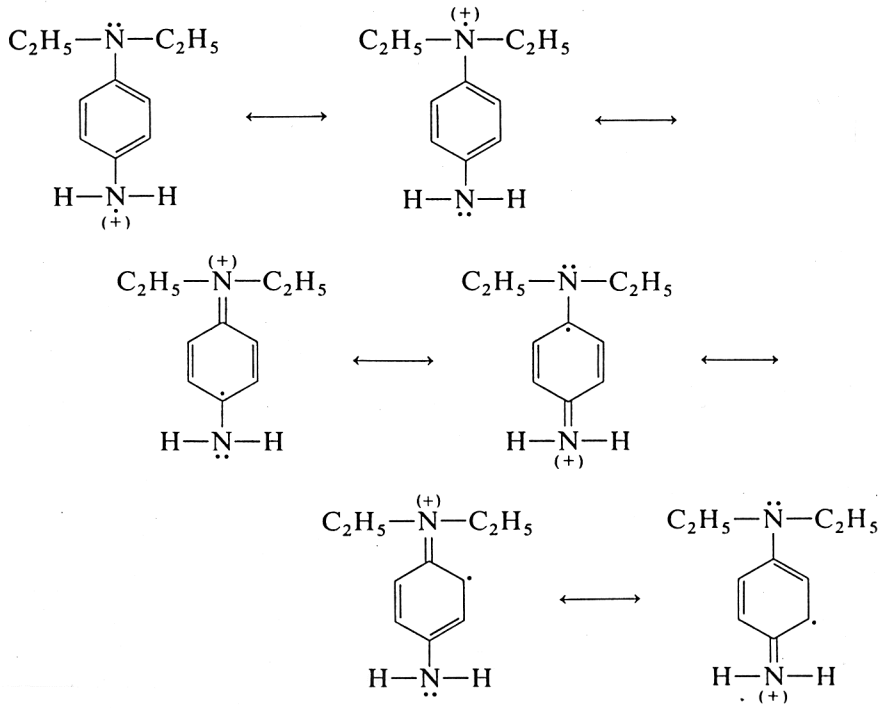
a) belichtetes AgX + Farbentwickler ---> metallisches Silber + oxidierter Farbentwickler,
b) oxidierter Farbentwickler + Kuppler ---> Farbstoff

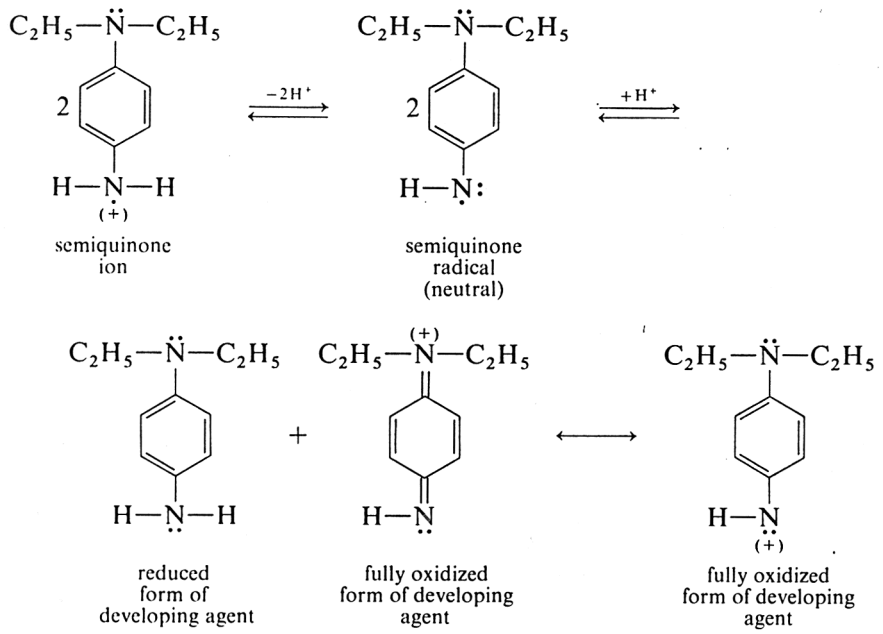


7.2. <u>Mechanismus der Farbentwicklung:</u>
Bei der Reduktion des Silberions entsteht das Radikalkation von N,N-diethyl-p-Phenylendiamin

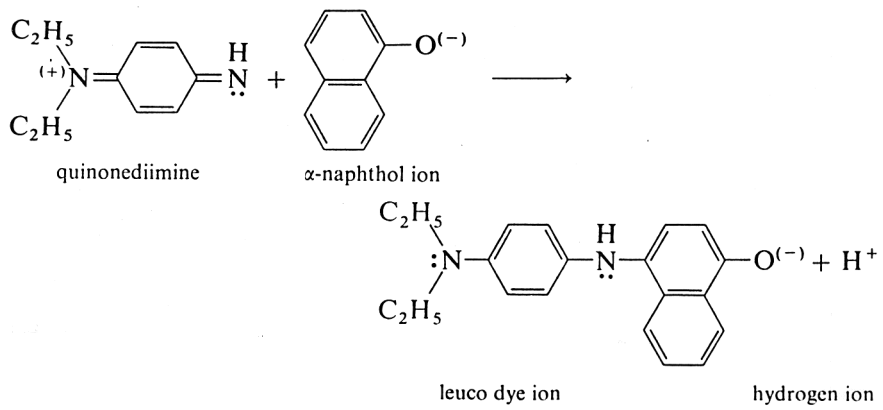


Das Semichinon-Ion ist reaktiv und bildet via das Semichinon-Radikal die oxidierte Form des Farbentwicklers: **Chinondiimin**

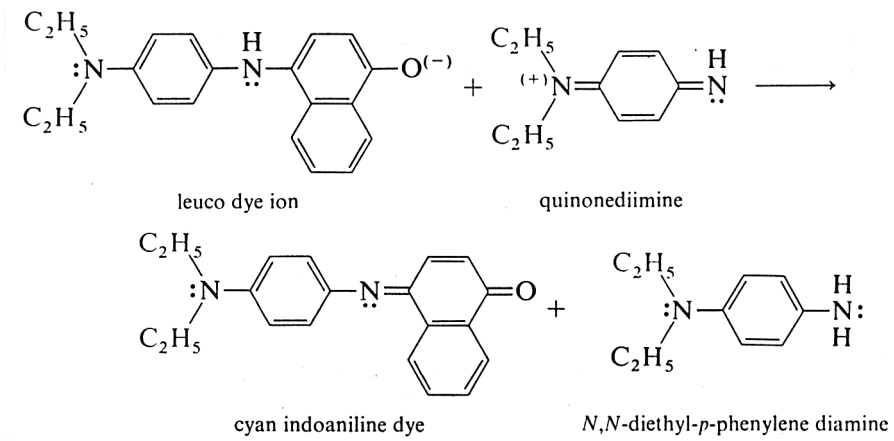




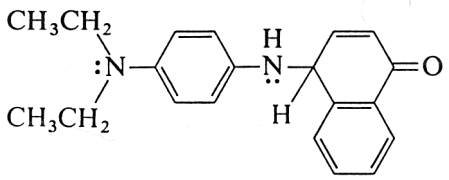
Anschliessend Kupplungsreaktion des positiv geladenen Chinondiimins mit dem negativ geladenen Kupplermolekül.



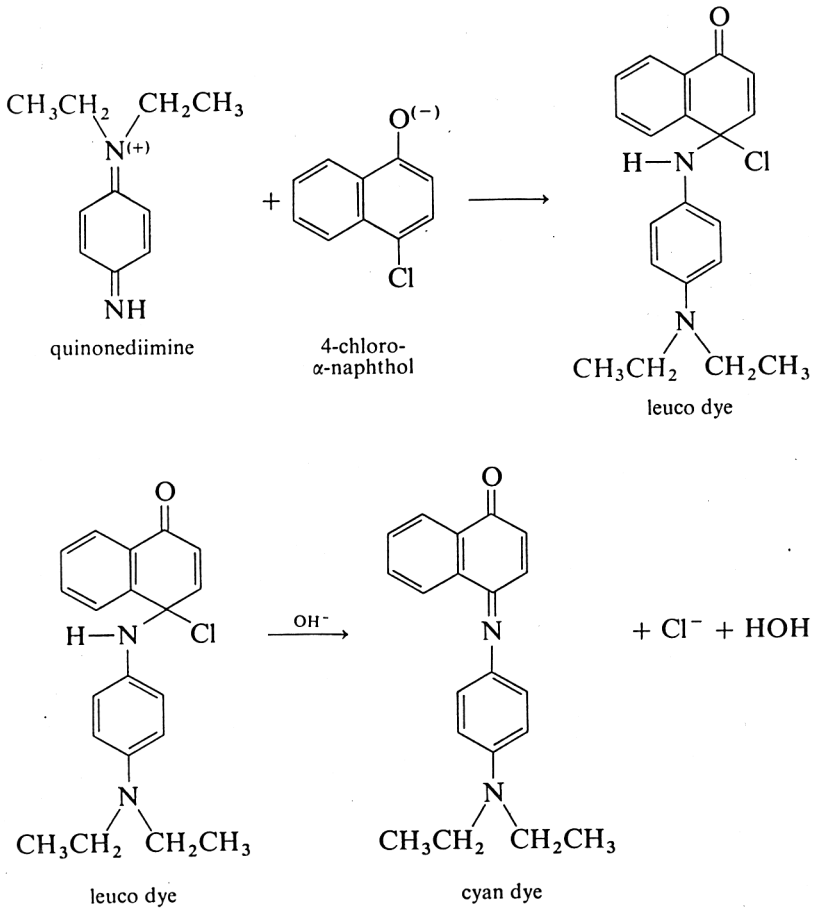
Der entstehende Leukofarbstoff reagiert mit einem zweiten Chinondiimin zum Farbstoff. Da total 4 Silberionen benötigt werden spricht man von einem 4-Äquivalent-Kuppler.



Die Struktur des Leukofarbstoffes kann anders formuliert werden:

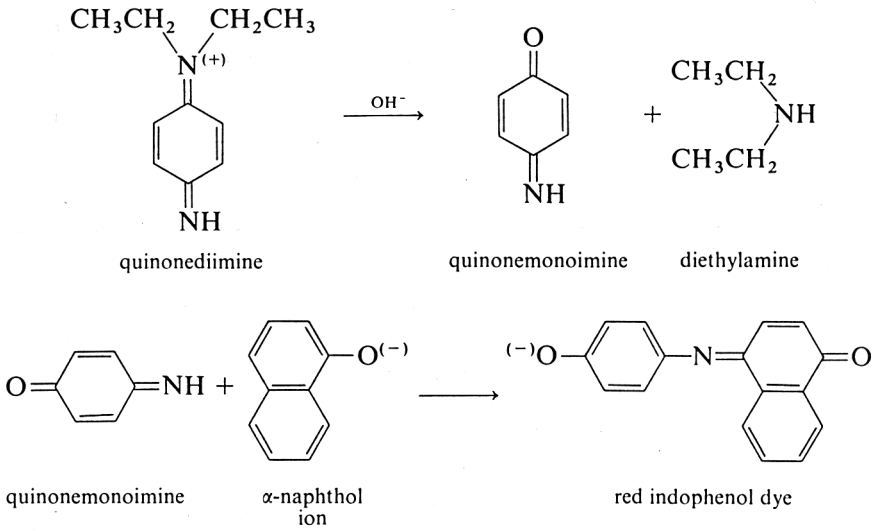


Wenn der Substituent in der Kupplungsstelle eine gute Abgangsgruppe ist (z.B. Chlor in 4-Stellung von a-Naphthol), wird zur Farbbildung nur ein Chinondiiminmolekül benötigt, d.h. nur 2 Silberionen. Man spricht von einem Zwei-Äquivalent-Kuppler:

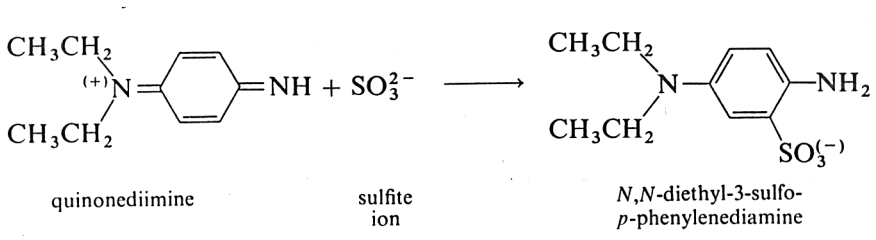


Unerwünschte Nebenreaktionen:

Chinondimin kann mit dem Alkali zu einem reaktiven Chinonmonoimin reagieren, das mit dem Kuppler einen neuen Farbstoff bildet:

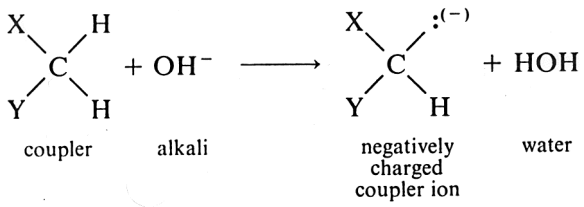


Na-Sulfit, das als Schutzmittel gegen Oxidation beigegeben wird, kann nur in kleinen Mengen verwendet werden, da es mit dem Chinondiimin reagiert. Das macht Farbentwickler (im Gegensatz zu s/w-Entwickler) zu instabilen Lösungen:

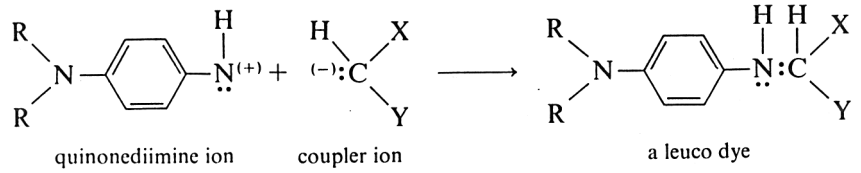


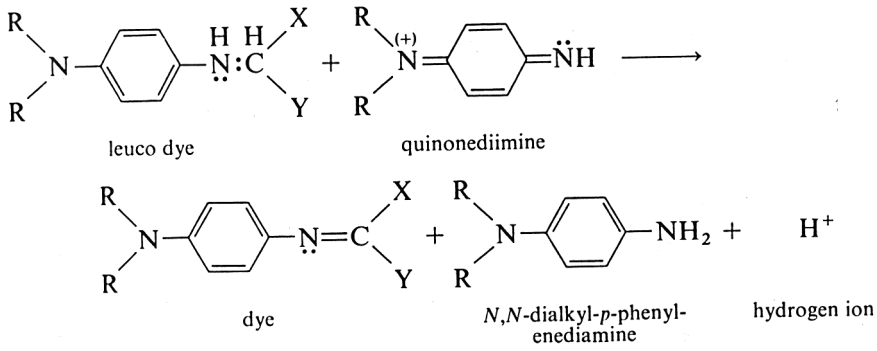
7.3. Farbstoffklassen für subtraktive Farben:

Farbkuppler sind Verbindungen mit aktivierten Methylengruppen $XYCH_2$. X,Y sind Teile von Ketten oder Ringstrukturen, die elektronenanziehend wirken. In alkalischer Lösung wird der Kuppler negativ geladen, da ein Wasserstoff abgespalten wird:

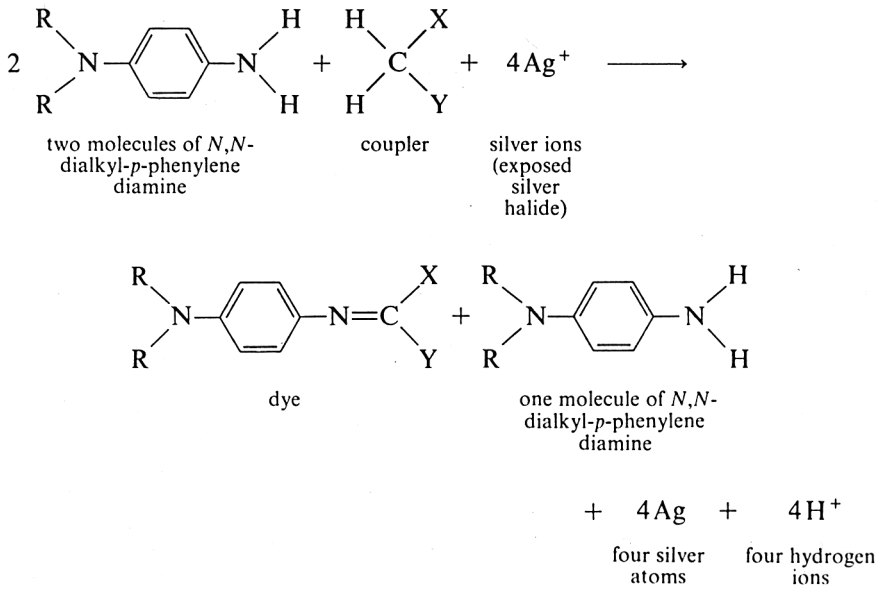


Die positiv geladene Aminogruppe des Chinondiimins und der negativ geladene Kuppler kondensieren zu einem Leukofarbstoff:



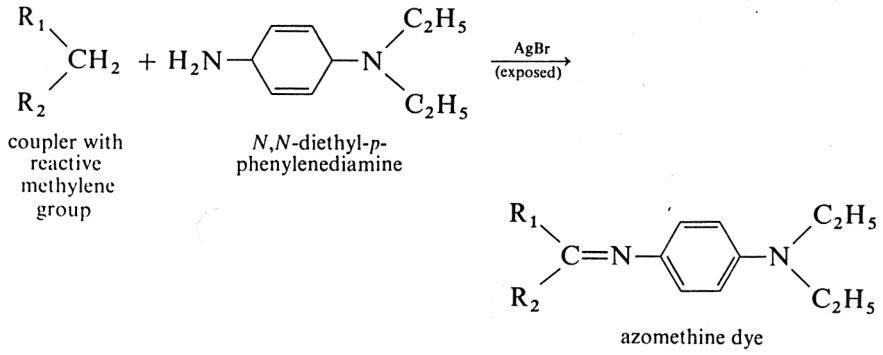


Die chromogene Farbentwicklung lässt sich deshalb zusammenfassen wie:

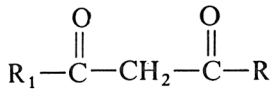


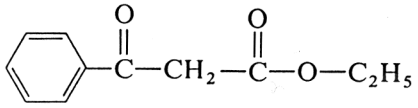
2 Farbstoffklassen von subtraktiven Farben werden allgemein für die chromogene Entwicklung verwendet

7.3.1. <u>Azomethin-Farbstoffe</u>, gebildet aus p–Phenylendiamin und einem Kuppler der eine aktivierte Methylengruppe enthä lt. R_1 und R_2 enthalten elektronenanziehende Gruppen, die als gerade Kette oder in Ringstruktur existieren.

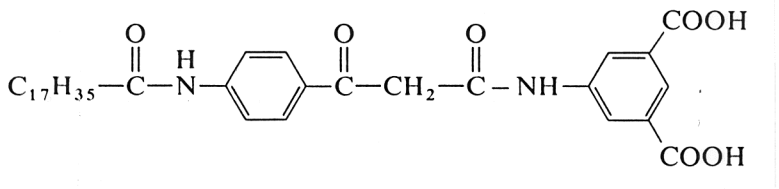


Kuppler auf der Basis von 1,3-Diketonen bilden bevorzugt die **Gelb-Kuppler**:

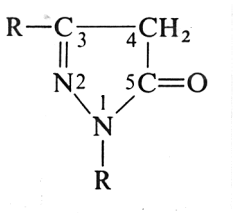


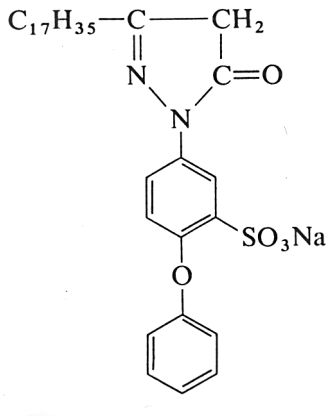


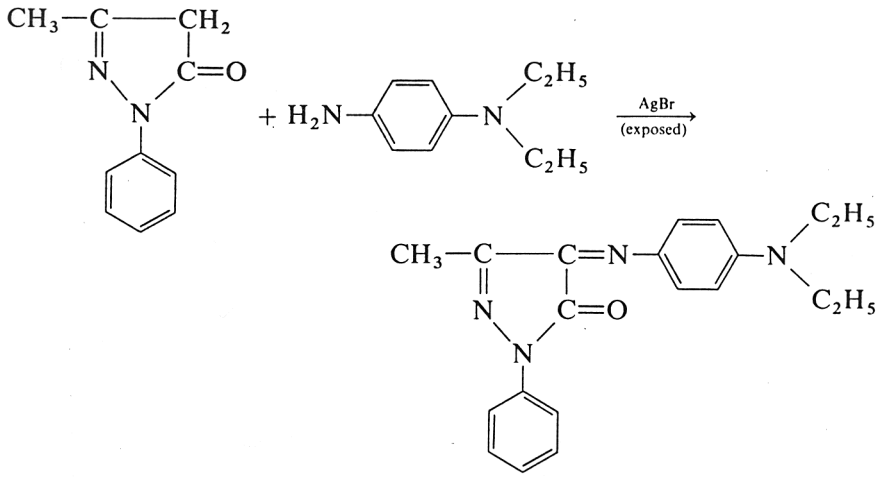
Als Beispiel sei erwähnt



Kuppler auf der Basis von 5-Pyrazolonen sind die bevorzugten **Magentakuppler**:

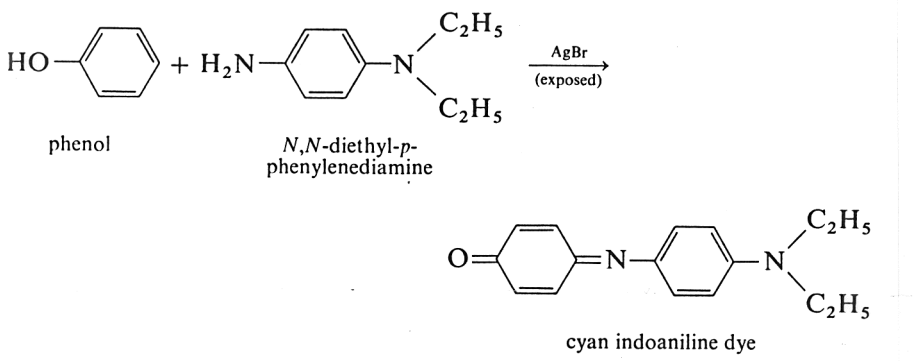




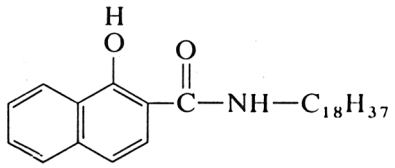


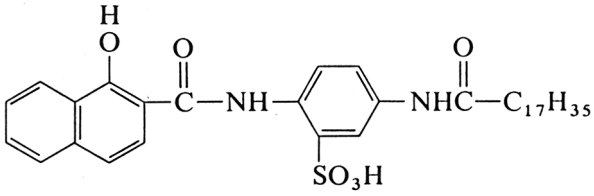
magenta azomethine dye

7.3.2. <u>Indoanilin-Farbstoffe</u> bilden sich aus einem Phenol und einem p-Phenylendiamin:



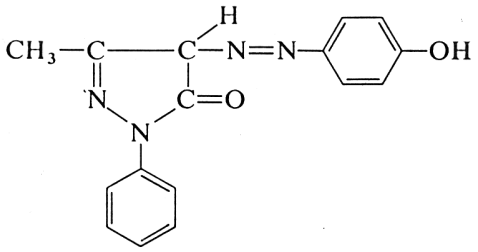
Indoaniline, besonders auf der Basis von Naphtholen bilden die Gruppe der **Cyan-Farbstoffe**:



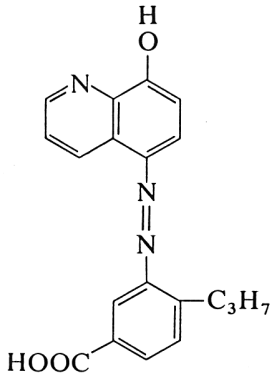


7.4. Farbige Kuppler für die Maskierung (Farbnegative)

An die Kupplungsstelle ist ein Azo-Farbstoff angehängt, der bei der Kupplung abgespalten wird. Die Eigenfarbe des Kupplers ist so gewählt, dass sie der Nebenabsorption des entstehenden Farbstoffes entspricht.



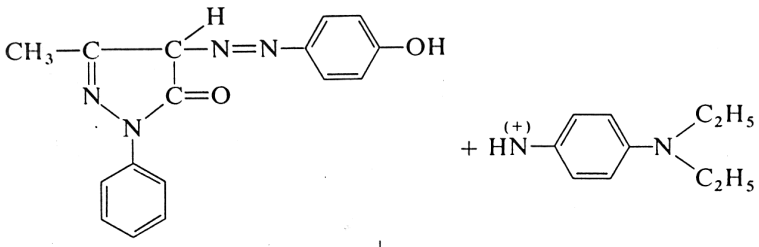
1-phenyl-3-methyl-4-(4-hydroxy phenyl-azo)-5-pyrazolone

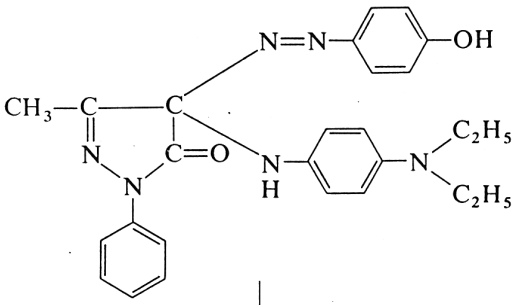


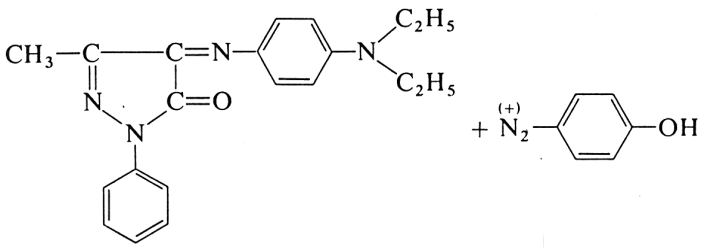
5-(5′-carboxy-2′-isopropyl-phenyl-azo)-8-hydroxyquinoline

Kuppler	Gelb	Rotorange
Farbstoff	Magenta	Cyan

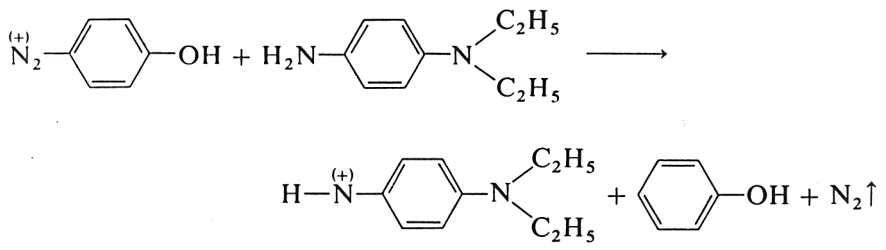
Bei der Kupplung wird der Azofarbstoff als Diazoniumsalz abgespalten .





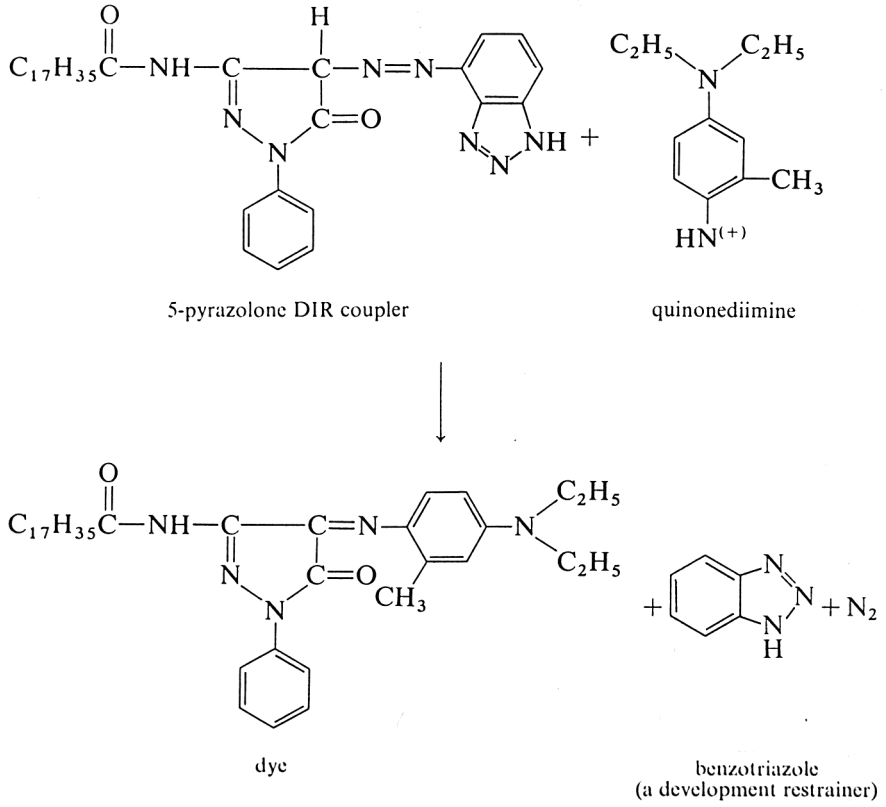


Das abgespaltete Diazoniumion reagiert dann mit einem Entwicklermolekül und wird dabei zerstört:



7.5. DIR-Kuppler (Development-Inhibitor-Releasing Couplers)

Wird als Abgangsgruppe ein Entwicklungsverzö gerer (Antischleiermittel) genommen (Benzotriazol, 1–Phenyl-5-mercaptotetrazol), hat das positive Eigenschaften auf Korn, Schärfe und Farbwiedergabe .



8. Grundlagen und Eigenschaften der Filme:

Zur Abbildungsqualität eines Films gehören die drei Merkmale Körnigkeit, Auflösungsvermögen und Schärfe.

8.1. Körnigkeit und Auflösungsvermögen:

Unter **Körnigkeit** versteht man die Anhäufungen und Ballungen des entwickelten metallischen Silbers (Schwarzweissfilm) oder der Farbstoffelemente (Farbfilm) im entwickelten Film. Sie hängt von der Belichtung, der Entwicklung und der Gradation des Films ab. Zumeist wird in den technischen Datenblättern ein RMS-Wert angegeben (RMS =Root Mean Square). Für dessen Feststellung werden mit einem Mikrodensito-meter die Abweichungen von einer bestimmten Dichte, welche durch die körnige Struktur der Filmschicht(en) verursacht werden, gemessen. Dabei strahlt ein geeichtes Mikrodensitometer ein Lichtbündel aus, das von der Kornstruktur moduliert wird. Der RMS -Wert entspricht dem 1000fachen Wert der Standardabweichung der optischen Dichtefluktuation. Grundsätzlich wird dazu von der Wiedergabe einer mittleren Graufläche der Dichte 1,0 auf dem Film ausgegangen. Je kleiner der Wert ist, desto feinkörniger ist der Film (siehe Tabelle). Kodak hat inzwischen die RMS–Bewertung fallengelassen, da mit der bisherigen Standard-Messmethode bei den – dank der Weiterentwicklung der Emulsionstechnologie – feinkörnigen Emulsionen keine aussagekräftigen Ergebnisse mehr zu erreichen sind. Ein neuer Standard soll deshalb eingeführt werden.

Der alte Grundsatz, dass die Körnigkeit gröber wird, je höher die Empfindlichkeit ist, ist tatsächlich inzwischen durch die Verwendung neuer Silberhalogenidkristall-Formen (z.B. T – Grains, Doppelstrukturkristalle) bei hochempfindlichen Filmen durchbrochen worden. Die Filmhersteller haben weitgehend das Ziel erreicht, trotz hohen Empfindlichkeiten noch ein feines Korn aus gleichmässig strukturierten Bildsilberelementen (Schwarz-weissfilm) beziehungsweise Farbstoffwolken (Farbfilm) zu erzeugen. Eine starke Ueberbelichtung oder eine Ueberentwicklung können auch zu gröberer Körnigkeit führen, da auch benachbarte Silberhalogenidkristalle angeregt werden.

Diafilme zeigen bei gleicher Empfindlichkeit ein feineres Korn und eine bessere Schärfe als Farbnegativfilme, wenn beide auf einer Papierkopie verglichen werden. Die Erklärung liegt in der Verarbeitungsweise: Beim Negativfilm werden zuerst die grossen Silberhalogenid–Kristalle entwickelt, welche für das Korn verantwortlich sind. Beim Diafilm gibt es zuerst eine SW–Entwicklung, wo auch hier die grossen Kristalle entwickelt werden, dann folgt aber noch eine kornbestimmende Umkehrentwicklung, wo die kleineren Kristalle "zum Zuge" kommen.

Tabelle	RMS-Werte:		
55 – 45	sehr grob	20 –16	fein
42 – 33	grob	15 – 11	sehr fein
30 – 26	mittelgrob	10 –5	extrem fein
24 – 21	mittel	< 5	mikrofein

Die Körnigkeit kann auf zwei Arten betrachtet werden: subjektiv betrachtet versteht man darunter den Körnigkeitseindruck, den man hat, wenn man eine Schicht aus einem bestimmten Betrachtungsabstand anschaut. Das **visuelle Korn (graininess)** wird am deutlichsten in einer gleichmässig geschwärzten, nicht allzu dunklen Fläche sichtbar. Die **objektive Körnigkeit (granularity)** beruht auf Messungen, die aus RMS–Werten gewonnen werden. Es ist zu beachten, dass Materialien, die gleiche RMS–Werte aufweisen, nicht auch denselben visuellen Eindruck der Körnigkeit (= Korn) erwecken müssen!
Unter **Auflösungsvermögen** versteht man die Fähigkeit eines Films, nebeneinander-laufende Linien von ausreichendem Kontrast getrennt wiederzugeben. Ein hohes Auflösungsvermögen setzt ein feines Korn mit gleichmässiger Verteilung sowie einen wirksamen Lichthofschutz voraus.
Die in den technischen Daten angegebenen Zahlenwerte geben die unter dem Mikroskop ermittelte Menge von parallelen Linien eines fotografierten Rasters an, die - je nach Kontrast des Testobjekts - noch auf einem Millimeter Filmoberfläche deutlich getrennt wiedergegeben werden (Angabe: Linien/mm). Je höher also diese Werte sind, desto besser ist das Auflösungsvermögen des Films. Das praktisch erreichte Auflösungsvermögen hängt vom Kameraobjektiv sowie von einer korrekten Belichtung und Entwicklung des Films ab. Die angegebenen Zahlenwerte sind daher die erreichbaren Bestwerte des Films, werden aber in der Praxis kaum erreicht. Für die bildmässige Fotografie ist der niedrigere Kontrast (1,6 : 1) praxisnäher. Werte (bei Objektkontrast 1000 : 1) über 200 L/mm kennzeichnen eine äusserst hohe Auflösung, über 125 L/mm eine sehr hohe, über 80 eine hohe, um 80 L/mm eine mittlere und um 50 L/mm eine niedrige.

8.2. Schärfe:

Die Schärfeleistung eines Films wird nach seiner Fähigkeit beurteilt, Dichte und Farbunterschiede feiner Details klar abgegrenzt wiederzugeben, und hängt daher auch stark mit der Modulationsübertragungsfunktion zusammen, auf welche später noch eingegangen wird. Der Objektkontrast und die Gradation des Films beeinflussen den Schärfeeindruck, indem kontrastreichere Motive oder härtere Filme die Bildkonturen stärker hervorheben. Auch die Lichtstreuung in den Filmschichten hat Einfluss auf den Schärfeeindruck. Je dünner die Filmschichten sind, desto höher ist die Schärfe. Das hängt mit den feiner verteilten Silberhalogenidkristallen und der geringeren Lichtstreuung in

den Schichten zusammen. Daher arbeiten die dünnschichtigen Kodachrome Filme besonders scharf. Andererseits ist die Schärfeleistung höchstempfindlicher Filme (dicke Filmschichten) weniger gut. Positiven Einfluss auf die Schärfe haben DIR–Kuppler (siehe früheres Kapitel) und beispielsweise die von Kodak patentierten "ultraflachen" Silberhalogenide, die T–Grains.
Mehr Aufschluss über das unterschiedliche Auflösungsvermögen verschiedener Filme gibt die **Modulationsübertragungsfunktion (Müf; engl. MTF = Modulation Transfer Function)**, die bei vielen Filmen in den technischen Datenblättern als Kurve abgebildet wird. Dazu wird auf den Film ein Strichraster mit zunehmender Ortsfrequenz (Linien/mm bzw. Perioden/mm) und abgestimmter Intensität aufbelichtet und mit einem Mikrodensitometer festgestellt, wie der Modulationsgrad der Abbildung mit zunehmender Ortsfrequenz prozentual abnimmt. Die Müf beruht daher auf der Beziehung zwischen Kontrastwiedergabe und Auflösungsvermögen und gibt auch Aufschluss über das Schärfeverhalten eines Films. Eine originalgetreue Kontrastwie-dergabe ergibt einen Modulationsübertragungswert von 100% (= Müf-Faktor 1). Das Auflösungsvermögen ist umso besser, je höher die Müf-Kurve ist und je später sie "nach unten abbiegt" (siehe Beispiele S. 69).

8.3. Körnigkeit und Auflösungsvermögen einiger Farbnegativ- und Umkehrfilme:

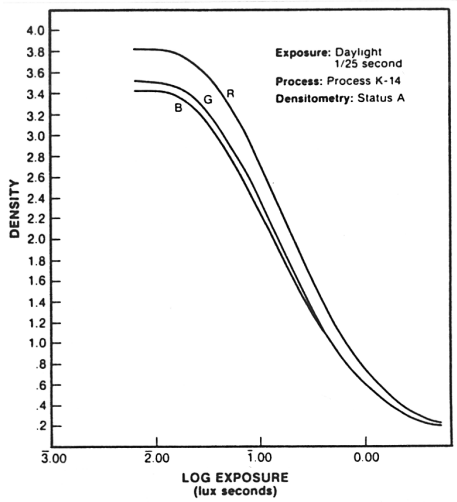
Farbnegativfilme: Körnigkeit (RMS)	Objektkontrast in L/mm 1,6 : 1	1000 : 1	
Kodak Ektar 25 prof.	–	80	200
Fujicolor Reala 100	4	63	125
Agfacolor XRG 100	4,5	50	130
Kodak Gold II 100	–	50	100
Vericolor III prof. Type S	–	50	100
Fujicolor 400 Super G	4	50	100
Kodak Gold II 400	–	50	100
Agfacolor XRS 1000 prof.	8	40	100
Kodak Ektar 100	–	40	80
Fujicolor Super HG 1600	10	–	–
Kodak Ektapress Gold prof. 1600	11	40	80
Farbumkehrfilme:			
Fujichrome Velvia prof. (50 ASA)	9	80	160
Kodachrome 25	9	63	100
Agfachrome RS 50 plus prof.	10	–	–
Kodachrome 64	10	63	100
Ektachrome 100 prof.	11	50	100
Kodachrome 200	16	50	100
Ektachrome 400 HC	17	40	80
Agfachrome 1000 RS prof.	26	–	–
Ektachrome P800/1600 prof.	–	40*	80*
		32**	63**

* bei 400/800 ASA Empfindlichkeit ** bei 1600/3200 ASA Empfindlichkeit

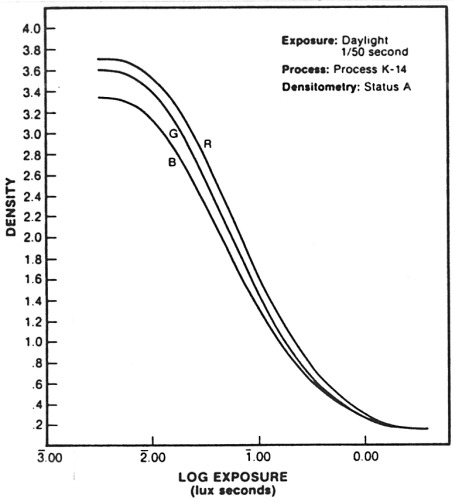
8.4. Charakteristische Kurven einiger Kodak-Farbumkehrfilme:

Beim Farbfilm mit drei verschieden empfindlichen Emulsionen gibt es entsprechend drei verschieden verlaufende Teilgradationskurven. Durch emulsionstechnische Tricks kann allerdings eine Anpassung der geradlinigen Teile der Kurven erzielt werden, aber in den Anfangs- und Endteilen der 3 Kurven ergeben sich Differenzen, die kaum zu vermeiden sind. Da sich aber theoretisch die drei Farbdichtekurven eines Films völlig decken sollten, damit Grautöne neutral wiedergegeben werden, so resultieren am Kurvenfuss und vor allem an der Kurvenschulter sehr leicht Unterschiede, die sich in Farbstichen in hellen und dunkeln Bildteilen äussern können. Aus diesem Grund ist z.B. das bei einem Umkehrfilm völlig chromogen entwickelte, da unbelichtete, Anfangsstück nie rein schwarz, sondern zeigt unterschiedliche verschwärztlichte Farben wie rotbraun, dunkelgrün oder dunkelviolett.
Bei Darstellungen von Gradationskurven wird diese Divergenz deutlich sichtbar:

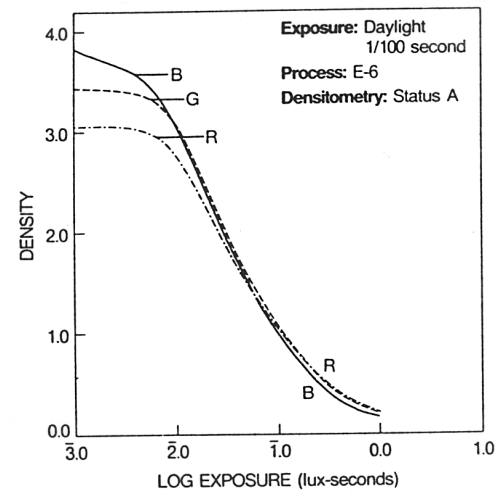
Kodachrome 25



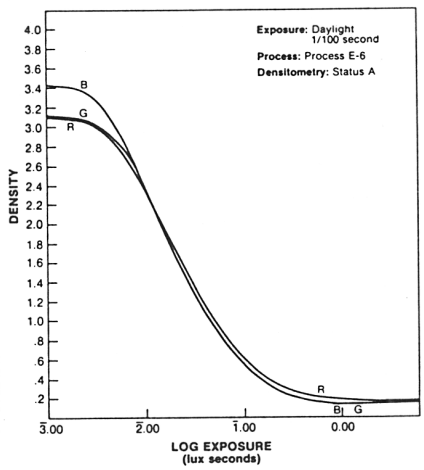
Kodachrome 64



Ektachrome 100 plus



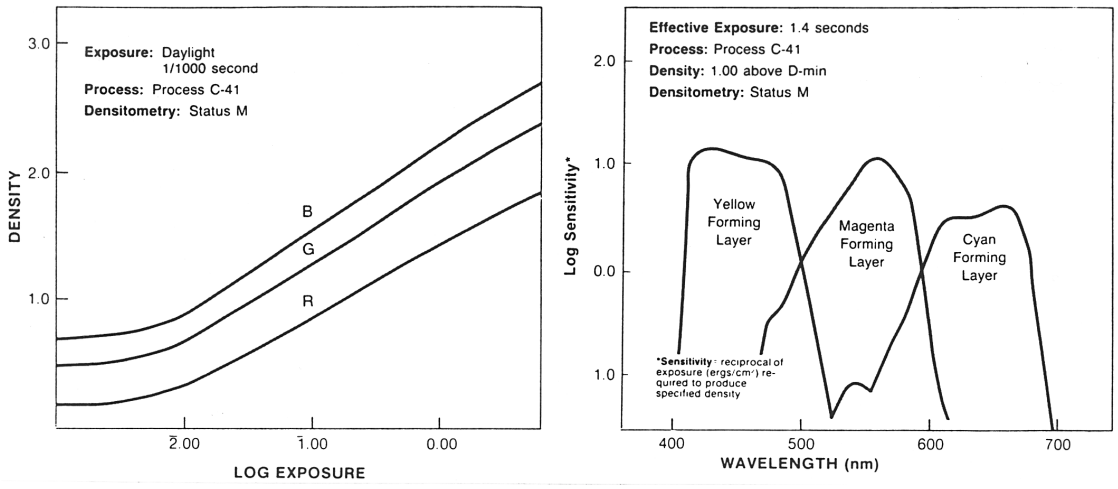
Ektachrome 200 prof.



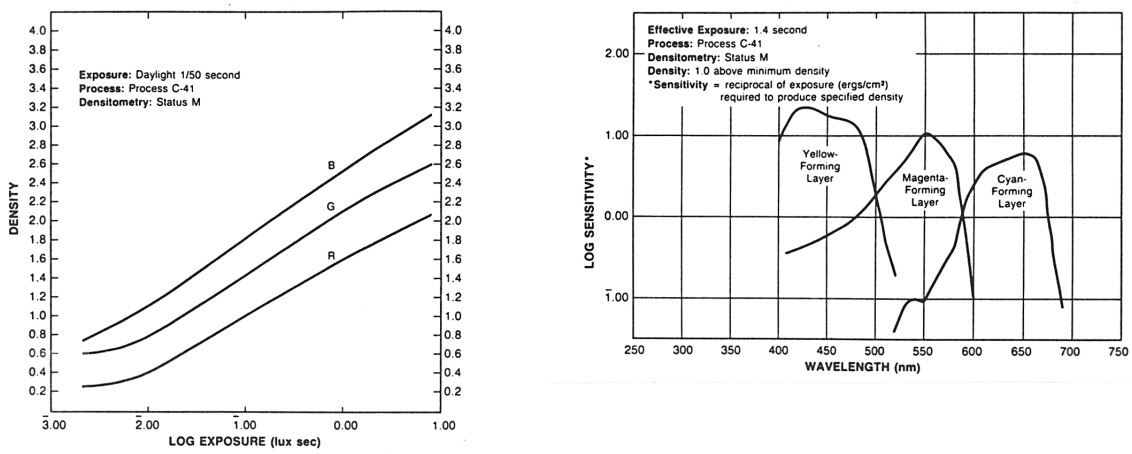
8.5. Gradationskurven und Spektrale Empfindlichkeitskurven einiger Kodak- Farbnegativfilme:

Die **spektrale Empfindlichkeit** (auch spektrale Sensibilisierung genannt) ist die photographische Reaktion eines empfindlichen Materials auf Strahlen mit verschiedenen Wellenlängen, welche über das sichtbare und unsichtbare Spektrum verteilt sind. Durch Zugabe von Farbstoffen (sog. Sensibilisatoren) zur Emulsion lässt sich die natürliche "Nur – Blau – Empfindlichkeit" von Silberhalogeniden erweitern. Schon H. W. Vogel entdeckte 1873, dass mit Farbstoffen die Empfindlichkeit von Silberhalogeniden auch für grünes und gelbes Licht erweitert werden kann (---> orthochromatisch). Die Schichten eines heutigen Farbmaterials sind bekanntlich auf Blau, Grün und Rot sensibilisiert (---> panchromatisch), und zwar so, dass es bei einer dafür vorgesehenen Farbtemperatur farbneutrale Resultate liefert.

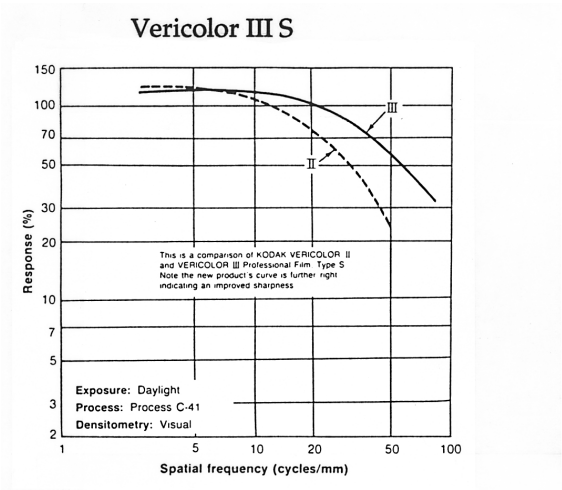
Vericolor III S

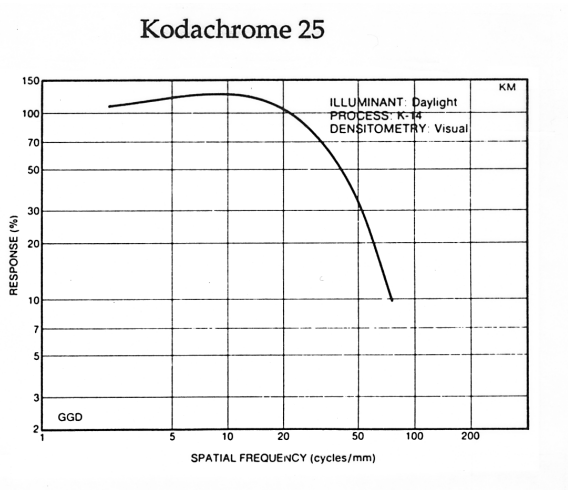


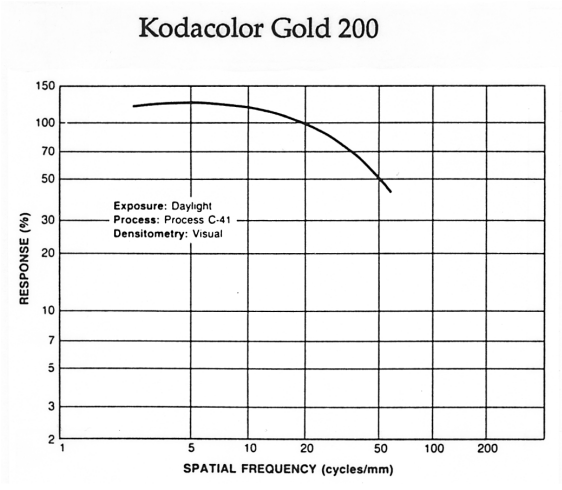
Kodacolor 200 Gold

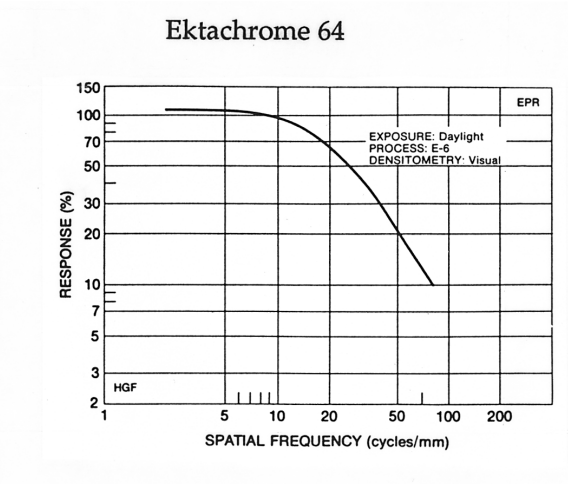


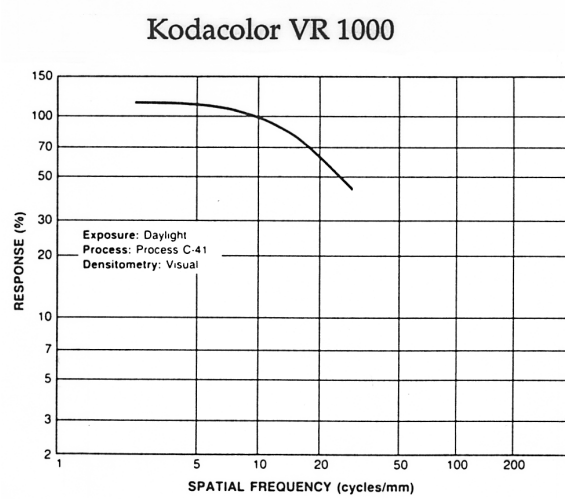
8.6. Auflösungsvermögen einiger Kodak-Farbfilme: Modulationsübertragungsfunktion (Müf)

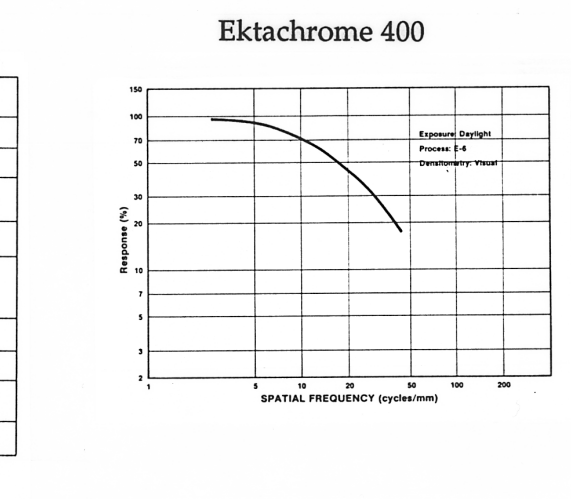






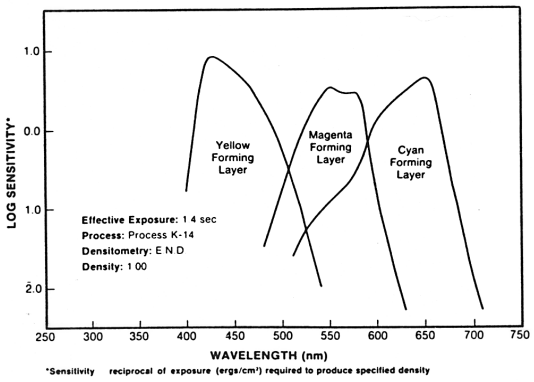


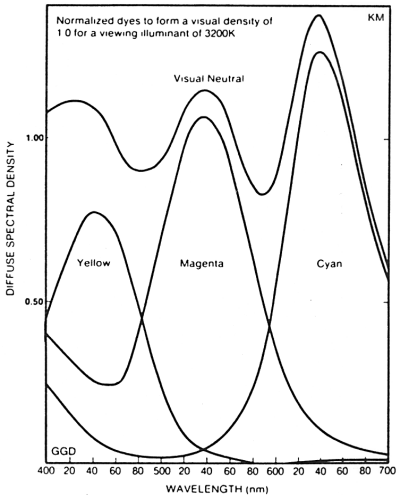




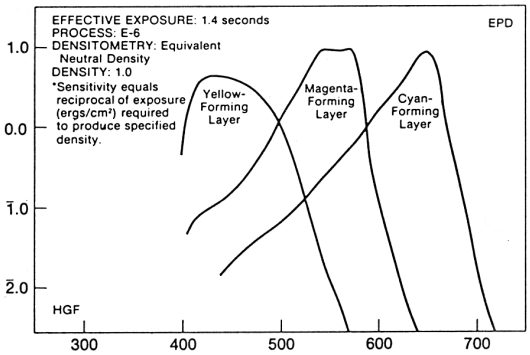
8.7. Spektrale Empfindlichkeitskurven und Farbdichte-Kurven einiger Farbumkehrfilme:

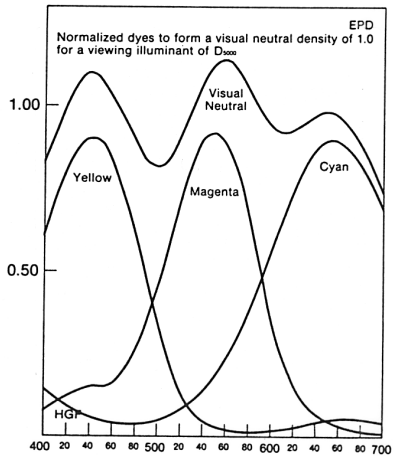
Kodachrome 25



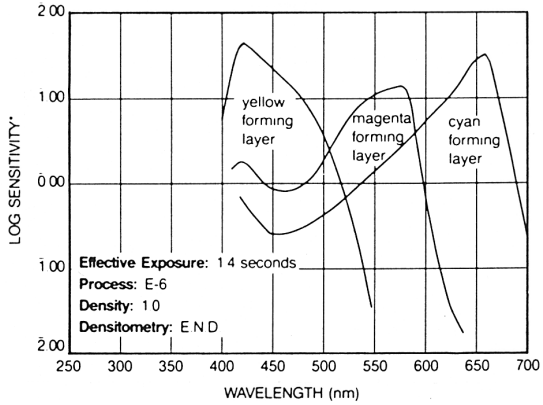


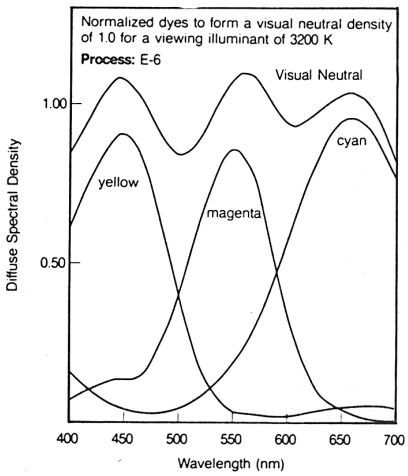
Ektachrome 200 prof.





Ektachrome Panther 1600





9. Farbphotographische Methoden:

Die drei wesentlichen Methoden, die in der Farbphotographie Verwendung finden, um Farbbilder herzustellen, sind:

9.1. Farb–Aufbau:

Auf den chromogenen Farbaufbau wurde schon in einem früheren Kapitel eingegangen.
Die Farbstoffe werden während dem Entwicklungsprozess aus den Kupplern gebildet, welche in den einzelnen Schichten verankert sind (Agfachrome– resp. Ektachrome) oder der Kuppler wird der Entwicklerlösung beigegeben (z.B. Kodachrome–Film).

9.2. Farb–Abbau:

Das **Silberfarbbleich–Verfahren** ist ein chromolytisches Farbverfahren (farbstoffabbauendes Verfahren), das v.a. zur Herstellung von Farbbildern ab Farbdiapositiven dient. Es ist unter dem Namen **Ilfochrome** resp. unter dem veralteten Namen Cibachrome bekannt. Die Farben entstehen nicht aufgrund eingelagerter Farbkuppler und einer chromogenen Entwicklung, sondern sind als Azofarbstoffe bereits in den Schichten des Materials enthalten. Durch die Belichtung werden diese eingelagerten Farbstoffe zerstört (reduktive Spaltung): Eine Rotbelichtung führt zur Zerstörung des Cyan–Farbstoffes, eine Grünbelichtung zur Zerstörung des Magenta–Farbstoffes und schliesslich führt eine Blaubelichtung zur Zerstörung des Gelb–Farbstoffes. Im Farbstoffbleichbad wird das vom Farbstoff nicht oxidierte Silber noch oxidiert. Der verbleibende Farbstoff ergibt nach dem Fixieren ein haltbares und vor allem sehr lichtechtes, positives Farbbild. Zudem resultieren bei diesem Verfahren geringere Diffusionslichthöfe, was eine bessere Schärfeleistung zur Folge hat.
Silberfarbbleich–Verfahren gehen auf die Erfindung von Karl Schinzel aus dem Jahre 1905 und auf ein Verfahren von Bela Kaspar (etwa 1933) zurück. Seit 1962, und vereinfacht seit 1974, ist das Verfahren auch für den Amateur zugänglich gemacht worden.

9.3. Farb–Diffusion:

Beim **Sofortbildverfahren** werden die Farbbilder unmittelbar nach der Aufnahme erzeugt. Die in den Schichtverband eingelagerten Farbstoffe oder Farbstoffvorläufer werden durch eine mit ihnen verbundene, d.h. ebenfalls eingelagerte Entwicklersubstanz entwickelt.

Da die Farbstoffmoleküle aus den Negativschichten in eine Positivschicht (Auffangschicht) diffundieren, werden diese Verfahren auch **Farbstoffdiffusions Verfahren** genannt. Eine Ausnahme davon bilden die PolaChrome Filme.
Bei den Sofortbildverfahren spielt sich alles in den photographischen Schichten des Materials ab, das Bild entsteht völlig selbsttätig. Die komplizierten Farbprozeduren führen allerdings zu einem ausserordentlich vielschichtigen Aufbau des Sofortbildmaterials. Doch zunächst zum Prinzip:
Beim normalen photographischen Verfahren entsteht immer ein Negativ, erst im Kopier- oder Umkehrprozess davon ein Positiv. Beim Umkehrprozess wird nun die Tatsache ausgenutzt, dass im belichteten Negativ schon die Positivinformation drinsteckt, die das Ziel des ganzen photographischen Verfahrens ist. Das unbelichtete Silberhalogenid, das eigentliche "Restbild" wird in einer zweiten Belichtung und Entwicklung zum Positiv geschwärzt, nachdem das negative Silberbild durch Ausbleichen aus der Schicht entfernt wurde.
Beim Sofortbild kommt es nun ebenfalls auf dieses Restbild an, nur muss es auf ein Papier übertragen und das überflüssige Negativ muss beseitigt werden. Hier bot sich das schon länger bekannte **sog. Silbersalzdiffusions-verfahren** an, bei welchem das Restbild gewissermassen "auswandert" (aus der Schicht herausdiffundiert).
Der erste farbige Sofortbildfilm war der 1963 herausgegebene Polacolor-Film. Es existierte jedoch schon seit 1947 von E. Land das Silbersalzdiffusionsverfahren für die SW-Photographie.

Grob gesprochen kann man drei verschiedene Sofortbildverfahren unterscheiden:

9.3.1. Das Polacolor-Verfahren:

Wegen des Auseinandertrennens der beiden Schichteinheiten nach der Entwicklung, werden die nach diesem Verfahren arbeitenden Filme auch Trennblatt- oder Zweiblattverfahren genannt. Oft wird es auch nach seinem Erfinder als Polaroid-Land-Verfahren bezeichnet. Es wurde, wie bereits erwähnt, 1963 eingeführt.
Das Aufnahmematerial der Polaroid-Land-Kamera besteht aus einer Kombination von Negativ, silberkeimhaltigem Übertragungspapier und Kapseln mit dickflüssigem Fixierentwickler.

9.3.2. Das Monoblatt-Verfahren

Das Polaroid SX-70 Color System ist ein Integralverfahren. Das Verfahren benötigt keine Negativblätter mehr, alle Entwicklungsvorgänge spielen sich in den 17 Schichten eines einzigen Filmblattes ab. Das Aufnahmematerial liefert

also nach Belichtung und Ausstoss aus der Kamera direkt Papierbilder.
In einer Kassette befinden sich 10 "Filmblätter" mit je einer Batterie, von denen jedes ein Papierbild liefert. Im Filmblatt sind, wie aus Abb. 17 ersichtlich, Negativ und Positiv vereinigt. Die Belichtung erfolgt durch das vorerst transparente Positiv. Beim Ausstossen des belichteten Blattes wird zwischen Negativ und Positiv eine lichtundurchlässige Paste (Dichte > 5!) gepresst (Schirmfarbstoff) und damit eine "Negativdunkelkammer" aufgebaut. An Stelle der früheren Kuppler sind in die Schichten "Farbstoffentwicklermoleküle" eingebaut, die nach der Auflösung in der alkalischen Aktivatorpaste belichtete AgX–Kristalle entwickeln. Erfolgt eine solche Reduktion, bleibt der Farbstoff mit dem Entwicklermolekül an Ort und Stelle blockiert. Wenn keine Entwicklung stattfindet, können die Farbstoff–Entwicklermoleküle durch die verschiedenen Schichten diffundieren, bis sie schliesslich in der Positiv–Empfangsschicht blockiert werden.
Nachdem eine genügende Menge alkalischer Lösung auf die "Polymerisierte Schirmschicht" (Indikatorwirkung) aufgetroffen ist, entsteht aus dieser Wasser und Säure, d.h. eine Neutralisierung des Systems. Dabei wird der Schirmfarbstoff (schwarz) entfärbt und die Polymerschicht bildet nun nach Abschluss der Entwicklung den weissen Untergrund.

Schematischer Schichtaufbau des SX–70 Filmblattes:

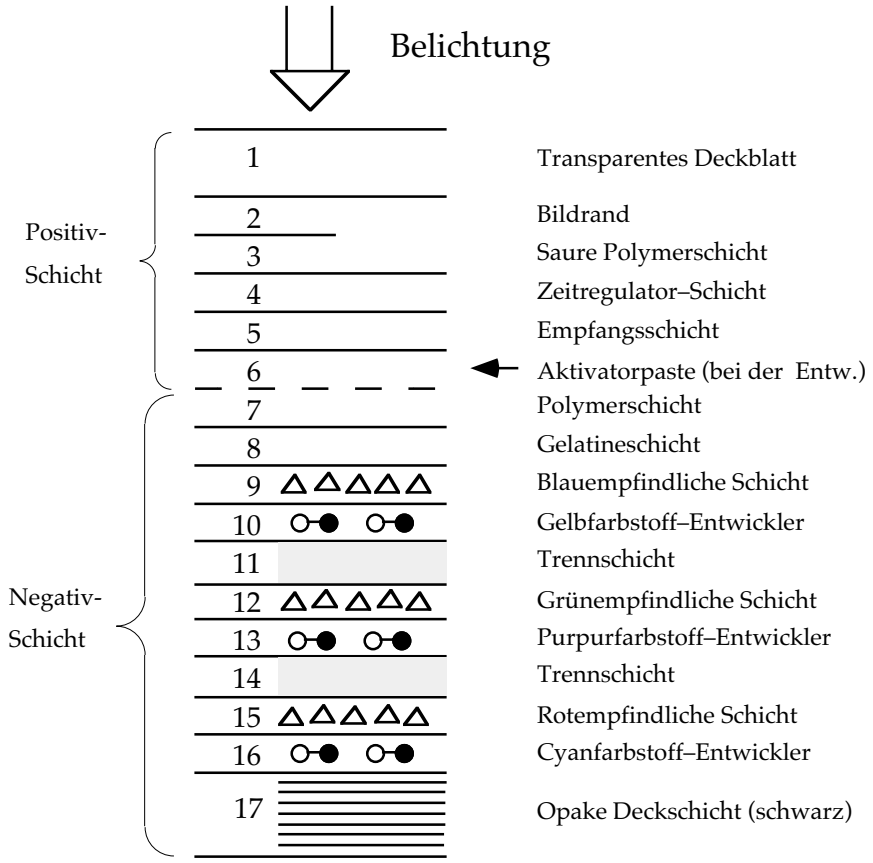
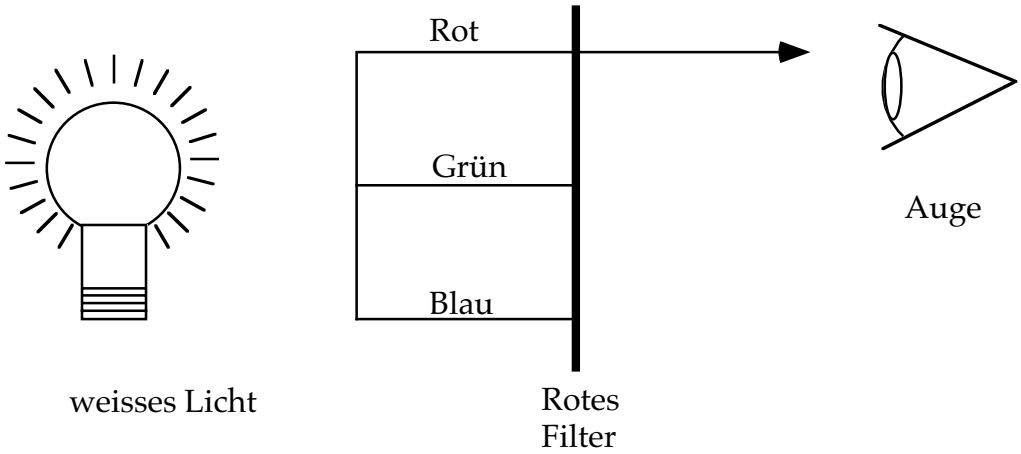


Abb. 17:

9.3.3. <u>Der Polachrome Sofortdiafilm</u> (35 mm Kleinbildfilm)
von Polaroid arbeitet nach einer Kombination des alten Linienraster-Verfahrens mit dem bei den SW-Sofortbildfilmen benutzten Silbersalzdiffusionsverfahren:
Das den bei der Aufnahme unbelichteten Silberhalogeniden entsprechende schwarzweisse (Silbersalz-)Positivbild diffundiert während der Entwicklung aus der Negativschicht in eine dünne Auffangschicht, die dann automatisch losgetrennt wird. Das farbige Bild wird dadurch erzeugt, dass sich vor dem Schwarzweisspositiv 118 parallel laufende Farbstofflinien (in Rot, Grün und Blau) pro Millimeter Filmfläche befinden.
Dieser Farbraster dient bei der Belichtung und Betrachtung oder Projektion des Diafilms als Mehrfarbenfilter, der auf dem Film entsprechende linienförmige Farbauszüge (den roten, grünen und blauen Farbanteilen im Motiv entsprechende schwarzweisse Teilbilder) hinterlässt, und dann das Dia in der Durchsicht oder Projektion passgerecht an den Farbauszugsstreifen wieder "einfärbt". Dieses Verfahren arbeitet somit im Unterschied zu allen anderen heutigen farbphotographischen Systemen ähnlich dem Farbfernsehbildschirm nach der **<u>addititven Farbmischung</u>** (mit den Grundfarben Rot, Grün und Blau, die zusammen Weiss ergeben). Die PolaChrome Filme werden in einem Entwicklungsgerät (Auto Prozessor mit Handbetrieb oder motorisierter Power Prozessor) innerhalb von 60 sec. entwickelt. Dabei wird der Film mit einem mit Entwicklerflüssigkeit getränkten Streifen in Verbindung gebracht, der als Entwicklerpack der Filmschachtel beigefügt ist.

10. Filter in der Farbphotographie:

Photographische Filter entfernen Teile der einfallenden Strahlung durch Absorption oder Reflexion, so dass die transmittierte Strahlung der gewünschten Wellenlänge (spektralen Verteilung) entspricht. Filter können natürlich nichts zur einfallenden Strahlung hinzufügen – ein rotes Filter kann nicht rotes Licht transmittieren, wenn in der Lichtquelle kein Rot vorhanden ist. Eine Hauptregel für Farbfilter ist die folgende: Ein Objekt mit der gleichen Farbe wie die des Filters wird aufgehellt, ein Objekt mit der Gegenfarbe des Filters wird abgedunkelt. z.B. wird ein rotes Filter Rot, Magenta und Gelb aufhellen, die Gegenfarbe Cyan (und damit auch Blau und Grün) hingegen wird dunkler erscheinen. Wenn gleichzeitig Gelb aufgehellt und Rot verdunkelt werden soll, dann muss ein grünes Filter verwendet werden.



Die in der Farbphotographie verwendeten Filter sind folgendermassen einzuteilen:

1. Konversionsfilter (für grosse Farbtemperatur{ =FT} –Unterschiede)
2. Licht–Ausgleichsfilter, "Light balancing filters" (für kleine FT–Unterschiede)
3. Farb–Korrekturfilter, "Color correction filters" (z.B. CC–Filter von Kodak)
4. UV–Sperrfilter
5. Polarisationsfilter
6. neutrale Graufilter oder Neutraldichte–Filter

10.1. Konversionsfilter:

Konversionsfilter werden verwendet, wenn die FT des Aufnahmelichtes dem verwendeten Tages- oder Kunstlichtfilm angepasst werden muss. Mit anderen Worten: Ein Tageslichtfilm kann so auch bei Kunstlicht verwendet werden und umgekehrt kann ein Kunstlichtfilm auch bei Tageslicht Anwendung finden. Orangefarbene Konversionsfilter (z.Bsp. Kodak–Filter 85B) reduzieren und blaue (z.Bsp. Kodak–Filter 80A, 80B) erhöhen die Farbtemperatur. Um das

passende Filter verwenden zu können, muss neben der FT der Lichtquelle die FT–Abstimmung des Farbfilms bekannt sein, was meist der Gebrauchsanleitung zu entnehmen ist:
Die heutigen Kunstlicht–Farbumkehrfilme sind alle auf eine Farbtemperatur von 3200 K abgestimmt, weicht die Lichtquelle von dieser Norm ab, müssen Farbkorrekturfilter verwendet werden.

Heute sind noch folgende Kunstlicht–Filme im Handel erhältlich:

- Fujichrome 64T prof.
- Kodak Ektachrome 64T prof.
- Kodak Ektachrome 160 (prof.)
- Kodak Ektachrome 320T prof.
- Scotch Chrome 640T

Zudem sei noch bemerkt, dass praktisch alle heutigen Farbaufnahme–Filme Tageslichtfilme sind und die Kunstlichtfilme nur einen kleinen Marktanteil besitzen, aber in bestimmten Aufnahmesituationen unerlässlich sind.

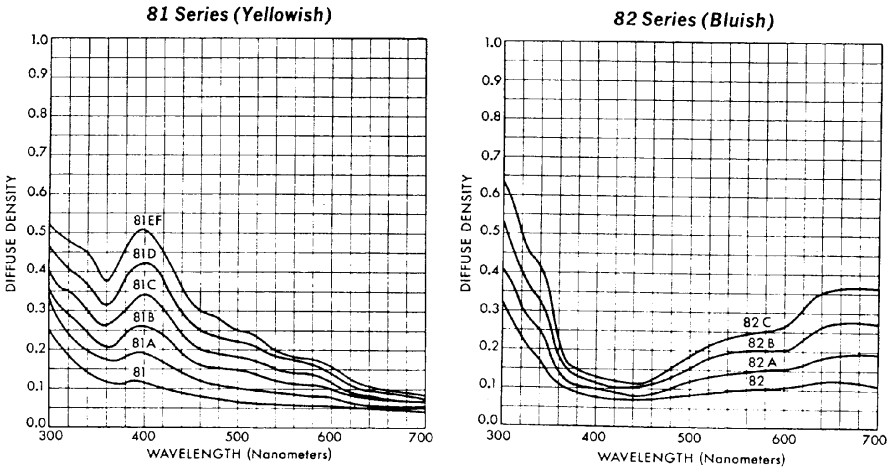
10.2. Licht–Ausgleichsfilter:

Zum Ausgleich geringerer FT–Unterschiede werden die **Licht–Ausgleichsfilter** verwendet, die schwächer eingefärbte Varianten der Konversionsfilter darstellen, also in schwach bläulicher oder hell-oranger Tönung von verschiedenen Herstellern geliefert werden (z.B. Kodak 81A–EF{ bräunlich} und 82A–C { bläulich}). Während die Konversionsfilter nur für den Ausgleich zwischen Kunst– und Tageslicht angewendet werden, gelangen die Licht-Ausgleichsfilter für die unterschiedlichsten Korrekturen bei hohen oder niedrigen FT–Werten zur Anwendung. Weil aber der Korrektureffekt eines solchen Filters, ausgedrückt in Kelvin–Werten in Abhängigkeit des FT–Wertes der Lichtquelle, unterschiedlich ist, musste ein spezieller Zahlenwert, **das Mired (Micro–reciprocal–degrees)**, geschaffen werden. Ein Mired entspricht dem Kehrwert der Farbtemperatur einer Lichtquelle (in Kelvin), multipliziert mit einer Million.

$$M = \frac{10^6}{FT}$$

Durch diese Mired–Werte (M), bzw. die zehnmal grössere Einheit der Dekamired kann die Wirkung eines Konversionsfilters– oder eines Lichtausgleichsfilters genau definiert und vor allem für Berechnungen verwendet werden.

Abb. 18: Transparenz der Kodakfilter 81 und 82:



Mired–Werte für Farbtemperaturen von 1000 – 12000 K:

K	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
1000	1000	910	835	760	715	647	626	589	555	526
2000	500	476	455	435	417	400	385	370	357	345
3000	333	323	312	303	294	286	278	270	261	256
4000	250	244	238	233	227	222	217	213	208	204
5000	200	196	192	189	185	182	179	175	172	169
6000	167	164	161	159	156	154	152	149	147	145
7000	143	141	139	137	135	133	132	130	128	127
8000	125	123	122	120	119	118	116	115	114	112
9000	111	110	109	108	106	105	104	103	102	101
10000	100	99	98	97	96	95	94	94	93	92
11000	91	90	89	88	88	87	86	86	85	84
12000	84	83	82	81	81	80	79	79	78	78

Zur Berechnung des erforderlichen Filters geht man von der Mired–Zahl der Farbabstimmung (des Films!) aus und subtrahiert davon die Mired–Zahl der Beleuchtung. Hat die entstandene Differenz:

----> **positives Vorzeichen**, so ist ein orange–farbenes Ausgleichsfilter zu verwenden. Hat die Differenz

----> **negatives Vorzeichen**, so ist ein bläuliches Filter zu gebrauchen.

Oder in einer Formel ausgedrückt: (alle Werte werden in Mired angegeben)

$$\Delta\ FT_{Filter} = FT_{Film} - FT_{Licht}$$

Kodak Konversions– und Lichtausgleichfilter:

No.	Mired	Farbe	No.	Mired	Farbe
80A	– 131	blau	85B	+ 131	orange
80B	– 112	blau	85	+ 112	orange
80C	– 81	blau	85C	+ 81	orange
80D	– 56	blau	81EF	+ 52	bräunlich
82C	– 45	bläulich	81D	+ 42	bräunlich
82B	– 32	bläulich	81C	+ 35	bräunlich
82A	– 21	bläulich	81B	+ 27	bräunlich
82	– 10	bläulich	81A	+ 18	bräunlich
			81	+ 9	bräunlich

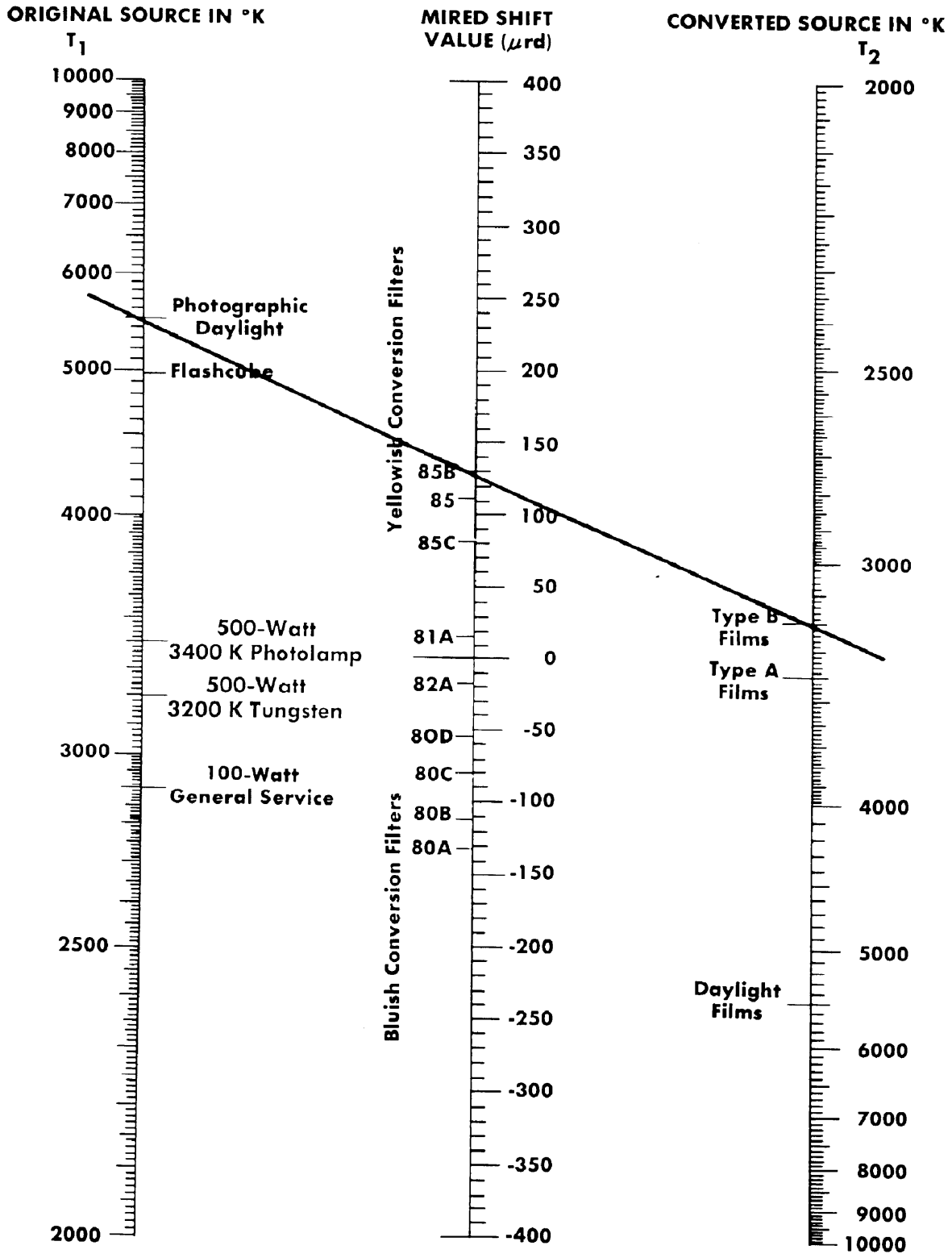
Andere Filterhersteller:
z.B. Schott–, Cokin–, Hoya–, B+W– oder Hama–Filter
(früher hat auch die Firma Agfa–Gevaert Filter hergestellt, diese werden aber nicht mehr produziert)

Einige Beispiele:
A) Film mit 5500 K (Tageslicht) wird bei Kunstlicht (3200 K) verwendet:
5500 K ---> 182 Mired
–3200 K--->– 312 Mired
Differenz – 130 Mired (Negativ; also muss ein bläuliches Filter eingesetzt werden, z.B. Kodak-Filter 80A)

B) Film mit 5500 K---> 182 Mired
– Licht mit 9000 K--->– 111 Mired
Differenz ---> 71 Mired (Positiv; also muss ein orangefarbenes Filter verwendet werden, z.B. Kodak 81A + 81EF)

Bei Filterkombinationen, wie hier im Beispiel B (18 + 52) addieren sich die Mired–Werte. Genaues Uebereinstimmen der Zahlenwerte ist nicht nötig, im allgemeinen ist es besser, einen kleineren Filterwert darunter zu wählen.

Nomogramm zur Ermittlung der Filterkorrektur:



10.3. Farb–Korrekturfilter:

Mit **Farb–Korrekturfiltern** sind sehr präzise Korrekturen des Aufnahme-Farbgleichgewichts möglich. Die Filterdichte ist **bei Kodak** jeweils mit einer zweistelligen Zahl, die Filterfarbe mit einem Buchstaben angegeben.

z.B. CC20B (20 Blue)
CC10Y (10 Yellow)
CC05C (5 Cyan) usw...

CC–Filter lassen sich einzeln oder kombiniert in der Farbphotographie einsetzen. Filter dieser Art können in Kombination im Prinzip auch zum Ausgleich der FT verwendet werden, hauptsächlich werden sie aber zum Ausgleich von Emulsionseigenschaften gebraucht. Da es kaum Farbfilme gibt, bei denen die 3 Farbdichtekurven absolut in Deckung liegen, geben die Hersteller für die Professional-Filme (Plan– und Rollfilme) die für bestimmte Belichtungsbereiche nötige Korrekturfilterung in den Gebrauchsanweisungen an. Zusätzlich werden diese Filter zum Ausgleich der Farbverschiebungen bei Langzeit–Belichtungen verwendet, vor allem aber für Aufnahmen mit Leuchtstoffröhren.

Es ist zu beachten, dass jedes Filter einen sog. **Filterfaktor** besitzt, der besagt wieviel länger belichtet werden muss resp. um wieviel die Blende geöffnet werden muss. Bei Kodak werden Blendenstufen angegeben:
z.B. +1, +1/3 usw. Andere Hersteller geben Filter–Faktoren an, wobei ein Faktor 2 eine Verdoppelung der Belichtungszeit bedeutet resp. eine Blendenöffnung um eine Stufe.

Einige Beispiele:

A) Konversionsfilter:

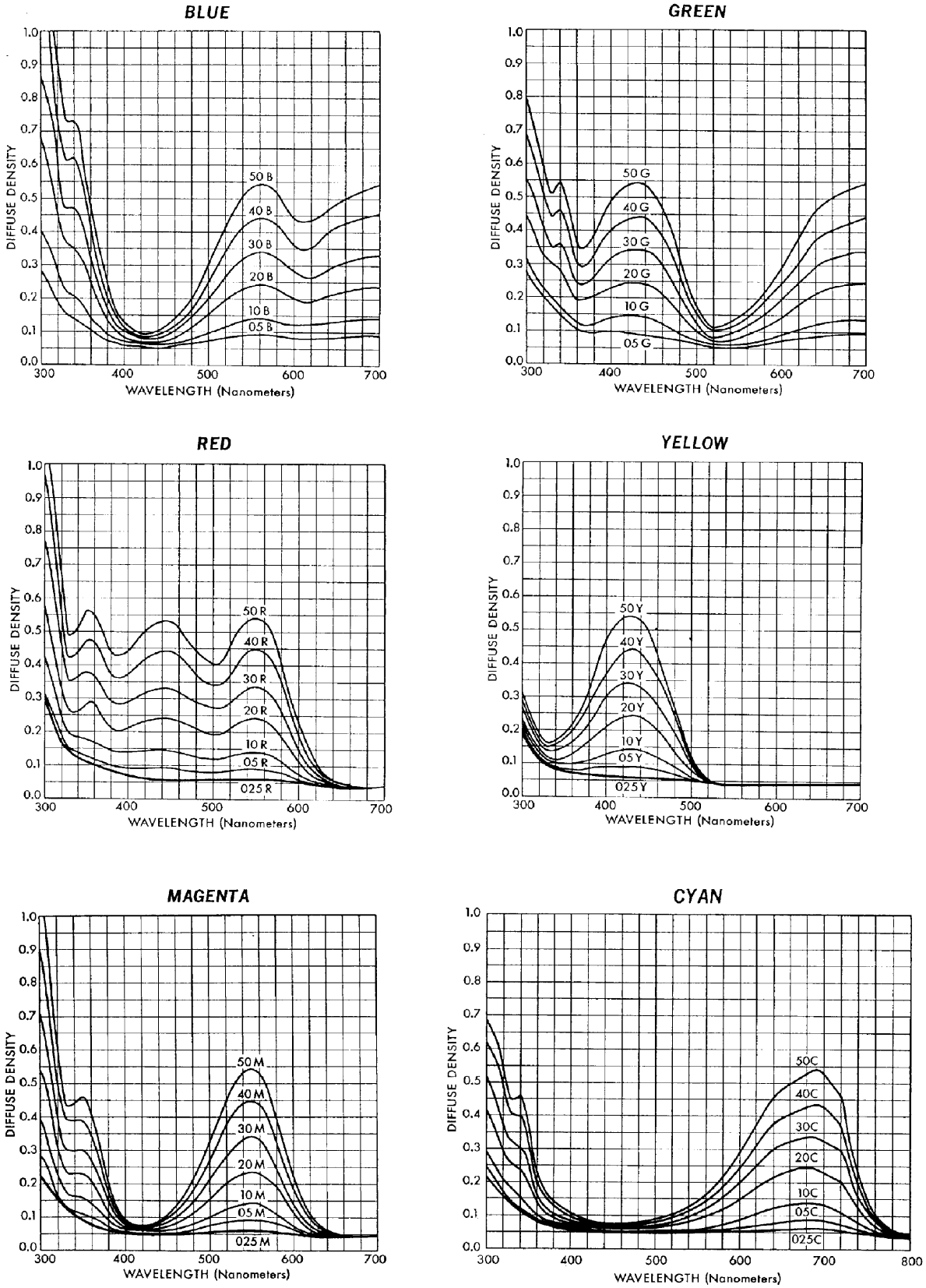
Filter 80A:	Faktor 4	resp. + 2,0 Blendenstufen
Filter 80B:	Faktor 3	resp. + 1,6 Blendenstufen
Filter 85B:	Faktor 1,6 – 2	resp. + 0,6 Blendenstufen

B) Licht–Ausgleichsfilter:

Diese allgemein nur schwach eingefärbten Filter beider Farbreihen besitzen nur sehr geringe Verlängerungsfaktoren im Bereich von 1,1 bis 1,6.

Sowohl Konversions– als auch Licht–Ausgleichsfilter können bei Hinterlinsen-belichtungsmessung der Kamera auf dem Objektiv belassen werden. Infolge des breiten Transparenzspektrums ergeben sich keine Fehler in der Belichtungs-messung.

Farb–Korrekturfilter von Kodak: Je eine abgestufte Reihe der Farben Blau, Grün, Rot, Gelb, Magenta und Cyan.



10.4. UV–Sperrfilter:

Das **Ultraviolett–Sperrfilter** hat heute nicht mehr die gleiche Bedeutung wie früher. Die heutigen Objektive lassen meist gar kein UV mehr durch, auch die Farbfilme sind wegen den eingelagerten UV–Absorbern (Silberhalogenide sind UV empfindlich) im kurzwelligen Bereich nicht mehr empfindlich. Da diese Filter praktisch farblos oder höchstens sehr schwach gelblich resp. zart rosa (Kodak 1A = Skylight–Filter) sind, können sie unbedenklich auf dem Objektiv verbleiben, was z.B. auch als Staub– oder mechanischer Schutz vorteilhaft ist. Die Kodak–Filter 2A, 2B und 2E sind auch UV–Sperrfilter, sie besitzen aber schon eine deutliche Gelbfärbung, so dass bei der Anwendung mit Farbfilmen ein leichter Gelbstich entstehen kann.

10.5. Polarisationsfilter:

Das **Polarisationsfilter** hat eine Art Gitterwirkung. Es polarisiert einerseits hindurchfallendes unpolarisiertes Licht, andererseits lässt es bereits polarisiertes Licht nur dann hindurch, wenn dessen Schwingungsebene mit der "Gitterebene" des Filters übereinstimmt. Die Gitterwirkung des Filters kommt aufgrund einer eingelegten Kunststoffolie mit orientierten Molekülen zwischen Glasscheiben zustande. Als Analysator absorbiert es polarisiertes Licht, wenn dessen Schwingungsebene senkrecht zur Gitterstruktur des Filters steht.
Ist die Gitterstruktur zur Schwingungsebene des Lichtes parallel, so durchdringt auch polarisiertes Licht das Filter. Es wirkt in diesem Fall, aufgrund seiner Dichte, als neutrales Graufilter. Polarisationsfilter lassen sich nicht nur zur Reflexverminderung verwenden, sondern ergeben besonders bei seitlich einfallendem Licht eine bessere Farbsättigung sowie eine Abdunklung des Himmelslichtes, da dieses teilweise polarisiert ist.

Himmelsstrahlung und Dunst (nicht Wolken oder Nebel!) sind infolge der Streuung des Sonnenlichts an Luftmolekülen und Aerosolteilchen in der Atmosphäre teilweise polarisiert, der Grad der Polarisation ist abhängig vom Sonnenstand, von der Trübung der Atmosphäre sowie der Höhe über dem Horizont. Zudem ist er auch für die einzelnen Wellenlängenbereiche unterschiedlich.
Lichtstrahlen, welche an **nichtmetallischen Flächen (z.B. Glas, Wasser, Kunststoff)** in einem Winkel von etwa 34° reflektieren, können je nach Stellung des Filters reduziert bis eliminiert werden. Dieser Winkel ist abhängig vom Brechungsindex des Materials.
Polarisationsfilter sind ausserdem empfehlenswert bei Aufnahmen von Pflanzen, da damit die diffuse Reflexion des Himmelslichtes an der oft glänzenden Blattoberfläche verhindert wird und das Blattgrün besser zur

Geltung kommt. Die Auslöschung der Reflexe sollte bei Aufnahmen von Wasser nicht total sein, da sonst das Wasser "tot" wirkt.

10.6. Neutraldichte–Filter:

Neutraldichte–Filter werden in der SW– und Farbphotographie für das Abschwächen der Lichtintensität in genau bestimmtem und bekanntem Mass eingesetzt. Die Farben des Aufnahmeobjektes werden dadurch nicht beeinflusst. Diese Filter bestehen aus kolloidaler in Gelatine dispergierter Kohle sowie geeigneten Farbstoffen und sind ausschliesslich für den sichtbaren Spektralbereich bestimmt. Es dürfen nur Filter mit gleichmässiger spektraler Absorption verwendet werden (z.B. Kodak No. 96). Sie können ins optische System eingeschaltet werden; die Belichtungszeitfaktoren ergeben sich aus der optischen Dichte (z.B. Dichte 0,3 = Faktor 2; Dichte 0,6 = Faktor 4 usw.). Einzelne Dichten können miteinander kombiniert werden.

11. Entwicklung von Farbfilmen:

11.1. Der Farbumkehr–Prozess: E-6–Prozess

Der quasi Standard–Prozess für alle Farbumkehrmaterialien ist der **E-6–Prozess**. Eine Ausnahme macht dabei der Kodak Ektachrome Infrared Film (Falschfarbenfilm), der noch heute im E-4–Prozess verarbeitet werden muss. Der E-6–Prozess basiert auf chemischer Bildumkehrung in einem Umkehrbad anstelle der Zwischenbelichtung. Bei der hohen Prozesstemperatur von 38° C dauert der gesamte Verarbeitungsgang nur gerade 35 Minuten. Er kann problemlos in einem Kleinlabor durchgeführt werden.
Sämtliche Hersteller von Farbumkehrfilmen fabrizieren eigene Verarbeitungsprozesse, die zum E-6–Prozess von Kodak vollständig kompatibel sind. (z.Bsp. AGFA: Prozess AP 44 oder FUJI: CR 56)
Die Firma Tetenal hat sogar einen noch weniger aufwendigen Prozess auf den Markt gebracht, der E-6 / 3 Bad. Er ist aber durch die Verminderung der Chemikalien durchaus nicht umweltverträglicher geworden, im Gegenteil. Durch das Zusammenmischen von Bleich– und Fixierbad beispielsweise, können die beiden Bäder nur schlecht regeneriert resp. recycliert werden, was im herkömmlichen E-6-Prozess problemlos geht; da wird das Bleichbad durch Zufuhr von Luftsauerstoff wieder aufoxidiert und das Fixierbad kann elektrolytisch entsilbert werden, beide zum nochmaligen Gebrauch. Zudem gibt es beim Kodak E-6–Prozess dank der Durchführung eines Konditionierbades nur gerade eine Wässerung nach dem Erstentwickler plus die Schlusswässerung und nicht noch eine zusätzliche nach dem Farbentwickler.

11.1.1. Genereller Vorgang: (siehe Farbkopie Bsp. A, Seite 102)

Während der Erstentwicklung wird das latente Bild zu einem schwarz–weissen negativen Silberbild entwickelt. Das noch verbliebene, unbelichtete Silberhalogenid bildet die Grundlage für das positive Bild. Nach der Umkehrentwicklung in Form einer chemischen Verschleierung mit Zinnchlorid, bei der das restliche Silberhalogenid reduziert wird (Effekt wie bei einer zweiten Belichtung), erfolgt die Farbentwicklung. Dabei wird simultan ein positives Silberbild und durch die Oxidationsprodukte des Farbentwicklers, aus den farblosen Farbkomponenten in den drei Schichten, ein Farbstoffbild hervorgerufen. Die Menge des sich bildenden Farbstoffes verhält sich dabei umgekehrt proportional zur ursprünglichen Aufnahmebelichtung. Damit nur das gewünschte Farbstoffbild übrig bleibt, muss das entwickelte Bildsilber in einem Bleichbad wieder rehalogenisiert und anschliessend durch Fixieren aus den drei Schichten herausgelöst werden. Zurück bleibt das reine Farbstoffbild.

Auf die Entwicklung der Kodachrome–Filme, die in einem speziellen Prozess (Kodak K–14) verarbeitet werden, wurde bereits in einem früheren Kapitel eingegangen, zudem ist auch hier eine schematische Darstellung auf der Farbkopie S. 102, Bsp. B zu finden.

11.1.2. Genauere Angaben zu den einzelnen Entwicklungsschritten:

Erstentwickler:
Der Erstentwickler stellt die kritischste Phase des Verarbeitungsprozesses dar. Zeit, Temperatur und Bewegung, sowie die Art und Weise der Aufbewahrung der Lösung müssen genauestens eingehalten werden. Ausserdem sind chemische Verunreinigungen zu vermeiden. Abweichungen von den Entwicklungsbedingungen können sich auf folgende Faktoren auswirken: Dichte (Empfindlichkeitsausnutzung), Kontrast, Farbbalance, Maximaldichte und Schleier.

Erste Wässerung:
Die erste Wässerung dient dazu, die chemischen Reaktionen nach Ablauf der Erst-entwicklerzeit schnell zu unterbrechen und eine Verschleppung von Erstentwickler in das Umkehrbad zu verhindern. Ungenügende Wässerung, inkorrekte Wassertemperatur oder zu lange Wässerungszeiten können Veränderungen der Dichte sowie Farbverschiebungen verursachen.

Umkehrbad:
Das Umkehrbad enthält eine chemische Umkehrsubstanz, die denselben Zweck wie eine Umkehrbelichtung erfüllt, indem sie die nach der Erstentwicklung verbliebenen Silberhalogenidkristalle zur Silberbildung anregt.
Zwischen Umkehrbad und Farbentwicklung darf keine Wässerungsstufe eingefügt werden, da es zur vollständigen Umkehrung erforderlich ist, dass sich die Umkehrsubstanz bei Eintritt des Filmmaterials in den Farbentwickler noch in der Emulsion befindet.

Farbentwickler:
Die nach der Erstentwicklung verbliebenen Silbersalze werden in dieser Verarbei-tungsstufe zu metallischem Silber reduziert. Während in der Filmemulsion metallisches Silber gebildet wird, reagieren die oxidierten Farbentwicklersubstanzen mit den in der Emulsion bereits eingebetteten Farbkupplern und bilden die jeweiligen Farbstoffe: Jede Emulsionsschicht besitzt einen speziellen farbstoffbildenden Kuppler, so dass in den entsprechenden Emulsionsschichten die erforderlichen Farbstoffe Gelb, Magenta und Cyan entstehen. Abweichungen von der Alkalität des

Farbentwicklers, fehlerhafte Lagerungsbedingungen, falscher Ansatz sowie inkorrekte Bewegung oder abweichende Temperaturen der Lösungen können sich auf Farbbalance, Kontrast, Maximaldichte, Schleier und Gleichmässigkeit der Entwicklung auswirken.

Konditionierbad:
Im Konditionierbad wird das in Erst– und Farbentwickler entwickelte metallische Silber für die Oxidation zu Silberhalogenid in der nachfolgenden Bleichstufe vorbereitet. Gleichzeitig dient dieses Bad dazu, den Säuregrad der Bleichbadlösung aufrecht zu erhalten, indem es die Verschleppung von Farbentwickler in das Bleichbad verhindert.
Zwischen Konditionierbad und Bleichbad darf keine Wässerungsstufe eingefügt werden, da das verschleppte Konditionierbad ein notwendiger Bestandteil eines gebrauchten Bleichbades ist. Der vollständige Abschluss der Konditionierung ist davon abhängig, dass die Emulsion mit Konditionierbad durchsetzt ist, wenn das Filmmaterial mit dem Bleichbad in Kontakt kommt.

Bleichbad:
Im Bleichbad wird das in den beiden Entwicklungsstufen geformte metallische Silber in Silberhalogenid umgewandelt, so dass es anschliessend durch das Fixierbad gelöst werden kann. Durch die Umwandlung des metallischen Silbers in Silbersalz wird die Bleichsubstanz reduziert. Die Bleichsubstanz wird dann durch den Kontakt mit Luft zurückoxidiert. Ungenügende Belüftung, unkorrekte Verarbeitungszeiten, sowie niedrige Temperaturen und übermässige Verdünnung der Bleichbadlösung durch das Einschleppen von Konditionierbad können folgende Fehler verursachen: Silberrückstände, niedrige Maximaldichte im Rot und Gelbschleier (hohe Maximaldichte im Blau).

Fixierbad:
Im Fixierbad werden die in der Filmemulsion enthaltenen Silberhalogenide in lösbare Silberkomplexverbindungen umgewandelt. Der Grossteil dieser Verbindungen verbleibt im Fixierbad und kann durch Silberrückgewinnung wieder verwendet werden.

Schlusswässerung:
Durch die Schlusswässerung werden Fixierbadreste und zurückgebliebene Silberkomplexverbindungen aus dem Film entfernt. Chemikalien, die nach der Verarbeitung im Filmmaterial zurückbleiben, greifen die Farbstoffe langsam an und führen zu Farbveränderungen oder Ausbleichen des Bildes. Aus diesem Grund beeinträchtigt eine unzureichende Schlusswässerung die Stabilität der Bildfarbstoffe.

Stabilisierbad:
Das Stabilisierbad enthält ein Netzmittel um Trockenflecken auf den Oberflächen der verarbeiteten Filme zu vermeiden und Formaldehyd, um die Stabilität der Farbstoffe zu verbessern. Das Stabilisierbad soll in regelmässigen Abständen erneuert werden.

11.1.3. Haltbarkeit angesetzter Lösungen für den Prozess E–6:

Lösung	gebraucht in voller Flasche	ungebraucht in voller Flasche	gebraucht oder ungebraucht in halbgefüllter Flasche
Erstentwickler Umkehrbad Konditionierbad	4 Wochen	8 Wochen	1 Woche (!!)
Farbentwickler	8 Wochen	12 Wochen	6 Wochen
Bleichbad Fixierbad Stabilisator	24 Wochen	24 Wochen	24 Wochen

11.1.4. Variation der Empfindlichkeit bei Aenderung der Entwicklung:

Wurde ein Diafilm absichtlich (sog. Pushen) oder ungewollt unter– resp. überbelichtet, kann durch eine Aenderung der Erstentwicklungszeit die Entwicklung trotzdem zu einem befriedigenden Resultat führen:
Wurde der Film 2 Blenden unterbelichtet, muss der Film 5 Min. länger im Erstentwickler entwickelt werden. Ist er nur eine Blende unterbelichtet, wird er 1,5 Min. länger entwickelt. Fand eine Ueberbelichtung um eine Blende statt, so wird 2 Minuten kürzer entwickelt.
Kodak macht diese Angaben unter Vorbehalt. Entsprechend der verwendeten Entwicklungstechnik sind die genauen Werte auszutesten.

8.1.5. Kleiner geschichtlicher Abriss über den E-6–Prozess:

Gleich wie Empfindlichkeit, Schichtaufbau und Sensibilisierung von Farbfilmen laufend verändert wurden, variieren auch die Lösungszusammensetzung und die Entwicklungstechnik. Eine Zusammenstellung der Entwicklungsprozeduren für Ektachrome–Filme zeigt, wie sich in 30 Jahren die Verhältnisse geändert haben. In den letzten bald 20 Jahren hat sich aber am E-6–Prozess nichts Grundlegendes mehr verändert.

Entwicklungsprozess: (Jahr der Einführung)	**E–1 (1946)**	**E–2 (1950)**	**E–3 (1958/59)**	**E–4 (1965)**	**E–6 (1975/76)**
Verarbeitungstemperatur:	20° C	24° C	24° C	29,5° C	38° C ± 0,3
Behandlungsstufe:					
Vorhärter				3 Min.	
Neutralisator				1 Min.	
Erstentwickler	15 Min.	10 Min.	10 Min.	6 Min.	6 Min.
Wässerung	1 Min.	1 Min.	1 Min.		2 Min.
Härtungsbad	5–10 Min.	3–10 Min.	3 Min.		
Stopbad				2 Min.	
Wässerung	5 Min.	3 Min.	3 Min.	4 Min.	
Umkehrbad					2 Min.
Nachbelichtung	+	+	+	–	–
Farbentwicklung	25 Min.	15 Min.	15 Min.	15 Min.	6 Min.
Wässerung	5 Min.	5 Min.	5 Min.		
Konditionierbad					2 Min.
Klärbad	5 Min.	5 Min.	5 Min.		
Stopbad				3 Min.	
Wässerung	1 Min.	1 Min.	1 Min.	3 Min.	
Bleichbad	10 Min.	8 Min.	8 Min.	5 Min.	7 Min.
Wässerung	1 Min.	1 Min.	1 Min.		
Fixierbad	5 Min.	4 Min.	6 Min.	4 Min.	4 Min.
Wässerung	10 Min.	8 Min.	8 Min.	6 Min.	6 Min.
Stabilisator		1 Min.	1 Min.	1 Min.	1 Min.
Zeitaufwand:	87 – 94 Min.	64 – 71 Min.	67 Min.	53 Min.	35 Min.
Anzahl Wässerungen	6	6	6	3	2

c) Schema für den Kodak E-6–Prozess: Maschine mit Rotationstrommel (z.B. Jobo)
(Angaben von 1990)

Verarbeitungsstufe	Temperatur ° C	Verarbeitungszeit in Minuten einzeln	Gesamtzeit	Bemerkung
Aufwärmung	38	4	4	mit Film in der Dose
Erstentwickler*	38 ± 0,3	7,5	11,5	* Verlängerung, wenn Film gepusht wurde
Wässerung	38 ± 1	2	13,5	Alle 30 sec. Wasser wechseln
Umkehrbad	38± 1	2	15,5	
Farbentwickler	38± 1	4	19,5	
Konditionierbad	20 – 40	2	21,5	
Bleichbad	33 – 40	6	27,5	
Fixierbad	33 – 40	3	30,5	
Wässerung	33 – 40	3	33,5	Nach jeder Minute Wasser wechseln
Stabilisierbad	Umgebungs-	0,5	34	Ausserhalb der Maschine
Trocknung	max. 60	–	–	

Ausnutzbarkeit der Lösungen: Pro 500ml Lösung können 6 Kleinbildfilme à 20 Aufnahmen resp. 4 Kleinbildfilme à 36 Aufnahmen entwickelt werden. Nach der Hälfte der entwickelten Filme muss allerdings die Erstentwicklungszeit um 30 sec. verlängert werden. In 500ml Lösung können auch 4 Mittelformat-filme (120 er) entwickelt werden.

ANSATZVORSCHRIFT

Für jeweils 1 Liter Arbeitslösung. Ansatztemperatur: 25 - 40 °C

Bad	Wasservorgabe		Part 1		Part 2	
Erstentwickler	800 ml	+	200 ml			1)
Farbentwickler	680 ml	+	200 ml	+	120 ml	1 + 2 + 3)
Bleichfixierbad	600 ml	+	200 ml	+	200 ml	
Stabilisierbad	900 ml	+	100 ml			4)

1) Eine Verunreinigung des Erstentwicklers mit Farbentwickler ist zu vermeiden, darum sollte z. B. der **Erst**entwickler unbedingt **zuerst** angesetzt und die Lösung im Behälter gut verschlossen werden.

2) Die blauviolette Färbung der Arbeitslösung des Farbentwicklers ist normal. Sie schlägt nach längerer Standzeit in Gelbbraun um.

3) Das Abmessen der Farbentwickler-Konzentrate ist sehr sorgfältig vorzunehmen. Schon kleinere Abweichungen führen zu Verschiebungen der Farbbalance.

4) Die Ansatztemperatur des Stabilisierbades sollte 25 °C nicht überschreiten.

ALLGEMEINE HINWEISE

Die in den Tabellen angegebenen Entwicklungszeiten stellen Durchschnittswerte dar, die für die gegebene Kombination aus Entwicklungsgerät, Bewegung bei der Entwicklung und Verhältnis Filmfläche pro Menge Erstentwickler evtl. individuell angepaßt werden müssen. Eine Verlängerung der Erstentwicklungszeit führt zu helleren, eine Verkürzung zu dichteren Dias.

Die Erstentwicklung ist die kritische Phase des Verarbeitungsprozesses. Um größtmögliche Konstanz zu erzielen, müssen Zeit, Temperatur und Bewegung ständig kontrolliert und genauestens eingehalten werden. Abweichungen von diesen Bedingungen bei der Erstentwicklung wirken sich auf folgende Faktoren aus: Minimaldichten (Schleier), Dichte (Empfindlichkeitsausnutzung) und Maximaldichten.

- Die angegebenen Verarbeitungszeiten umfassen den Zeitraum vom ersten Kontakt des betreffenden Bades mit dem Filmmaterial bis zum ersten Kontakt des folgenden Bades bzw. Wässerung.
- Die Wässerungen können intensiver oder mit verlängerten Zeiten durchgeführt werden.
- Vorwärmen der Entwicklungsdose bzw. Trommel mit eingespultem Film im Wassermantelbad des Prozessors (Tabelle A) mit Temperatureinwirkung nur von außen: mindestens 5 Minuten.
- Die Temperatur des Wassermantelbades im Prozessor ist so einzustellen, daß die Bäder konstant auf Verarbeitungstemperatur gehalten werden.
- Die Trocknungstemperatur sollte nicht höher als 60 °C sein!
- Gebrauchte und ungebrauchte Lösungen sollten wegen der Gefahr möglicher Verunreinigungen nicht miteinander vermischt werden! Werden gebrauchte Bäder wiederverwendet, so bleiben die Verarbeitungszeiten und -temperaturen (mit Ausnahme der Erstentwicklungszeit) bis zur Grenze der Ergiebigkeit konstant.
- Eine Verunreinigung des Erstentwicklers schon durch geringste Spuren des Farbentwicklers (auch Dämpfe!) würde zu geringeren Enddichten (Maximaldichten) führen.
- Einige Kunststoffe adsorbieren Spuren des Farbentwicklers stark und dauerhaft. Rotationsgeräte mit Kunststoffwannen und anderen Kunststoffteilen, die mit den Lösungen in Berührung kommen, können dementsprechend für diesen Prozeß ungeeignet sein.
- Bei Verwendung von Rotationsprozessoren wie z. B. JOBO ATL sind Dose, Deckel und Filmspirale nach jedem Entwicklungsdurchgang mit warmem Wasser intensiv zu reinigen. Sie müssen dann vor jedem Verarbeitungsdurchgang absolut trocken sein.

VERARBEITUNG IN ROTATIONS-PROZESSOREN (wie z. B. JOBO ATL)

Tabelle A

Stufe	Verarbeitungsbad	Temperatur	Zeit	
0	Vorwärmen	38 ± 0,3 °C	5 min	
1	Erstentwickler	38 ± 0,3 °C	6 min 15 s	
2	Wässerung	38 ± 0,5 °C	2 min 30 s	1)
3	Farbentwickler	38 ± 0,5 °C	6 min	
4	Wässerung	36 ± 3 °C	2 min 30 s	1)
5	Bleichfixierbad	36 ± 3 °C	6 min	
6	Schlußwässerung	36 ± 3 °C	4 min	1)
7	Stabilisierbad	20 – 25 °C	1 min	2)

Die Verarbeitungsschritte 0 - 2 müssen bei völliger Dunkelheit durchgeführt werden.

1) Wässerung mit fließendem Wasser oder Wasserwechsel alle 30 Sekunden.

2) Durchführung außerhalb der Trommel!

VERARBEITUNG IN ROTATIONSENTWICKLUNGSANLAGEN (wie z. B. Colenta, Mafina, Metorette)

Tabelle B

Stufe	Bad	Temperatur	Zeit	
0	Vorwärmen	39 °C	–	1)
1	Erstentwickler	38 °C	7 min	2)
2	Wässern	38 °C	2 min 30 s	3)
3	Farbentwickler	38 °C	6 min	
4	Wässern	38 °C	2 min 30 s	3)
5	Bleichfixierbad	38 °C	6 min	
6	Schlußwässerung	38 °C	4 min	
7	Stabilisierbad	20 – 25 °C	1 min	4)

Die Verarbeitungsschritte 0 - 2 müssen bei völliger Dunkelheit durchgeführt werden.

1) Die Innenraumtemperatur der Maschine soll während des gesamten Prozesses 39 °C betragen: Aufgespannten Film in das Gerät einlegen und Geräteheizung einschalten. Warten bis die Temperaturanzeige 39 °C erreicht hat. Bei Geräten ohne Wassermantelbad mindestens weitere 15 min warten, damit auch Wanne und Rotor temperiert werden.

2) Die richtige Entwicklungszeit ist für jedes Gerät individuell zu ermitteln und richtet sich neben der Temperatur auch nach dem verwendeten Filmfabrikat und nach der jeweiligen Umdrehungszahl. Varianten von 37 - 38 °C und Zeiten von 6 - 9 min sind möglich. Die einmal ermittelten Werte sind dann mit einer Konstanz von ± 0,3 °C und ± 5 sec einzuhalten.

3) Die Wässerung kann mit fließendem Wasser oder durch fünfmaligen Wasserwechsel von jeweils 30 Sekunden vorgenommen werden.

4) Außerhalb des Gerätes durchzuführen.

Veränderung der Erstentwicklungszeit bei Mehrfachverwendung von 1 l Arbeitslösung

Um konstante Ergebnisse zu erzielen, muß die **Erstentwicklungszeit** nach je 4 Kleinbildfilmen (oder andersformatigen Filmen mit gleicher Fläche) verändert werden:

1. - 4. Film	5. - 8. Film	9. - 12. Film
Standardzeit	Standardzeit + 15 sec	Standardzeit + 30 sec

Wird die maximal mögliche Filmmenge, d. h. 10 oder 12 Filme, in einem Durchgang entwickelt, so gilt die Verarbeitungszeit für den 5. - 8. Film!

ERGIEBIGKEIT

Mit dem Inhalt dieser Packung können 60 Kleinbild-Umkehrfilme 36 Exp. oder andersformatige Filme mit gleicher Fläche verarbeitet werden, das sind z. B. 60 Rollfilme 120 bzw. 30 Rollfilme 220. Die max. Ergiebigkeit kann nur erreicht werden, wenn immer mindestens 2 Filme gleichzeitig entwickelt werden.

HALTBARKEIT DER GEBRAUCHSLÖSUNGEN

(in Glas- oder PVC-Flaschen)

Flaschen vollständig gefüllt oder teilgefüllt und mit Protectan gegen Oxidation geschützt.

	Frischansatz	benutzte Lösung
Erstentwickler	8 Wochen	2 Wochen
Farbentwickler	12 Wochen	6 Wochen
Bleichfixier- und Stabilisierbad	3 Monate	3 Monate

Die Konzentrate sind in Originalflaschen nach Teilentnahme 6 Monate haltbar, wenn sie mit Protectan abgedeckt und dicht verschlossen sind.

EMPFINDLICHKEITSÄNDERNDE ENTWICKLUNG

Unterbelichtete Filme können empfindlichkeitssteigernd verarbeitet werden, wenn die Erstentwicklungszeit verlängert wird. Ebenso können versehentlich überbelichtete Filme durch Verkürzung der Erstentwicklungszeit „gerettet" werden.

2 Blenden unterbelichtet: Erstentwicklung um 5 min 30 sec verlängern
1 Blende unterbelichtet: Erstentwicklung um 2 min verlängern
1 Blende überbelichtet: Erstentwicklung um 2 min verkürzen
2 Blenden überbelichtet: Erstentwicklungs-Zeit nicht verändern, aber Temperatur auf 30,6 °C senken.

BEEINFLUSSUNG DER FARBBALANCE

Zur Kontrolle der Entwicklung können E-6 Kontrollstreifen benutzt werden.

Wenn die Kontrollwerte für die Empfindlichkeitsstufe (LD) innerhalb der Toleranzgrenzen liegen, die Farbbalance (HD) jedoch eine starke Spreizung aufweist, kann das Farbgleichgewicht durch Änderung des pH-Wertes im Farbentwickler wiederhergestellt werden. Dafür darf nur verdünnte Schwefelsäure (H_2SO_4) oder verdünnte Natriumhydroxidlösung (NaOH) verwendet werden. Vorher ist jedoch sicherzustellen, daß Temperatur, Zeit und Bewegung der Bäder den Verarbeitungsvorschriften entsprechen.

Ansatz der Schwefelsäure- und Natriumhydroxid-Lösung und Sicherheitsvorschriften siehe letzte Seite.

ALKALITÄTSÄNDERUNGEN BEIM FARBENTWICKLER

Film-Hersteller	Farbabweichung vom Bezugsstandard	Dichteabweichung in der Farbstufe (Die maximale Spreizung von 0,13 wird überschritten)	Entsprechender Zusatz von Säure oder Base	Ungefähre Veränderung der Dichtewerte in der Farbstufe
Kodak	nach Blau-Magenta	Blaudichte liegt unter Rotdichte, Gründichte liegt über Rotdichte	1 ml verdünnte Natriumhydroxidlösung pro Liter Farbentwickler	+ 0,05 nach Gelb-Grün
	nach Gelb-Grün	Blaudichte liegt über der Rotdichte, Gründichte liegt unter Rotdichte	1 ml verdünnte Schwefelsäure pro Liter Farbentwickler	+ 0,05 nach Blau-Magenta
Fuji	nach Rot	Rotdichte liegt unter der Blau- und Gründichte	1 ml verdünnte Natriumhydroxidlösung pro Liter Farbentwickler	+ 0,05 nach Blau-Grün
	nach Blau-Grün	Rotdichte liegt über der Blau- und Gründichte	1 ml verdünnte Schwefelsäure pro Liter Farbentwickler	+ 0,05 nach Rot
Agfa	nach Rot	Rotdichte liegt unter der Blau- und Gründichte	2,5 ml verdünnte Natriumhydroxidlösung pro Liter Farbentwickler	+ 0,05 nach Blaugrün
	nach Blau-Grün	Rotdichte liegt über der Blau- und Gründichte	1,5 ml verdünnte Schwefelsäure pro Liter Farbentwickler	+ 0,05 nach Rot

11.2. Der Farbnegativ–Prozess: C-41–Prozess

Der Aufbau der Farbnegativ–Filme ist dem der Umkehrfilme ähnlich. Da man ein Negativ aber für Kopierzwecke verwendet, arbeitet der Film wesentlich weicher. Zudem ist er zur besseren Farbwiedergabe auf dem Papierbild mit Farbkorrekturmasken versehen. (Siehe im Kapitel Farbsensitometrie S. 30ff) Diese Farbmasken verleihen den Farbnegativen ihr orangerotes Aussehen, ein Farbstich, der sich beim Anfertigen der Vergrösserung korrigieren lässt.

Die lichtempfindlichen Schichten sind für einen bestimmten Spektralbereich sensibilisiert. Auf den Schichtträger wird eine Haft– und eine Lichthofschutzschicht aufgegossen, der zwei rotempfindliche Schichten und eine Rotfilterschicht folgen. Sie verhindert bei der Belichtung eine Rückstreuung von grünem Licht in die grünempfindlichen Schichten, die wesentlich für den visuellen Schärfeeindruck verantwortlich sind. Nach einer Trennschicht folgt eine Gelbfilterschicht, die verhindert, dass die rot– und grünempfindlichen Schichten durch blaues Licht belichtet werden. Die blauempfindliche Schicht wird durch eine Gelatineschutzschicht gegen mechanische Verletzungen geschützt.
Da seit 1982 von praktisch allen Herstellern für Farbnegativfilme nur noch wasserunlösliche ölgeschützte Farbkuppler verwendet werden, hat sich der Verarbeitungsprozess C–41 von Kodak als Standard durchgesetzt. Aequivalente Prozesse gibt es auch hier von anderen Firmen z.Bsp. von AGFA (Prozess AP 70) und von FUJI (Prozess CN 16).

Mit dem Farbnegativ–Prozess sind durchaus auch Push–Entwicklungen möglich, z.B. eignen sich die Kodak Ektapress Professional Filme 400 ASA und 1600 ASA für ein Pushen bis über zwei Blenden. Amateur–Filme wie z.B. der Kodacolor Gold oder dergleichen, eignen sich dagegen überhaupt nicht dafür.

11.2.1. Genauere Angaben zu den einzelnen Entwicklungsschritten:

Entwickler:
Der Entwickler reduziert die Silberhalogenide in metallisches Silber. Bei dieser Reduktion wird der Farbentwickler oxidiert. Gleichzeitig reagiert der oxidierte Farbentwickler mit den in jeder Schicht eingelagerten Farbkupplern. Dadurch bilden sich die drei Farbstoffe Gelb, Magenta und Cyan, welche zusammen das Negativbild ergeben.

Bleichbad:
Das Bleichbad stoppt zuerst die Entwicklung. Dann verwandelt dieses das metallische Silber in Silberhalogenide.

Fixierbad:
Verwandelt alle in der Emulsion enthaltenen Silberhalogenide in lösliche Silberkomplexe. (z.B. Thiosulfat–Komplexe)

Stabilisierbad:
Gewährleistet die Stabilität der Farben und ermöglicht eine gleichmässige Trocknung des Films. Enthält Formaldehyd.

11.2.2. Schema des Kodak C-41–Prozesses im Trommelprozessor:

Verarbeitungs–stufen:	Zeit: (Min.)	Temperatur: ° C	Bemerkung:
Vorwärmen	2	37,8 ± 0,15	mit dem Film in der Trommel
Entwickler	3:15	37,8 ± 0,15	
Bleichbad	6:30	24 – 38	
Fixierbad	6:30	24 – 38	
Wässerung	3	24 – 38	
Stabilisierbad	1:30	24 – 38	
Trocknung	–	20 – 60	

11.2.3. Kapazität der Lösungen:

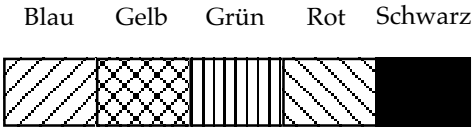
Die Kapazität des Entwicklers ohne Nachfüllen ist der folgenden Aufstellung zu entnehmen. Die Bleich–, Fixier– und Stabilisierlösung weisen die doppelte Kapazität auf. Dabei ist zu bemerken, dass bei der Verarbeitung höher empfindliche Filme mehr Chemikalien verbrauchen als niederempfindliche. Pro Liter Lösung können 4 Kleinbildfilme à 36 Aufnahmen verarbeitet werden oder 3 resp. 2 Mittelformatfilme (120 resp. 220) oder 10 Planfilme 4x5 inch. Diese Angaben gelten für 100 und 200 ASA Filme oder solche mit noch niedrigerer Empfindlichkeit. Für 400 und 1000 ASA Filme können pro Liter Lösung ein Film resp. 2 Planfilme weniger entwickelt werden. Nähere Angaben können den Kodak–Datenblättern entnommen werden.

11.2.4. Aufbewahrung der Lösungen:

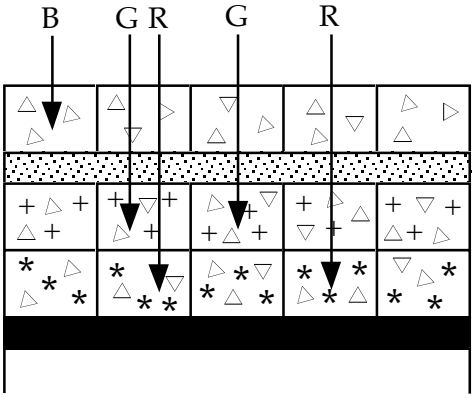
In hochgefüllten, geschlossenen Glasflaschen sind die angesetzten Bäder (gebraucht oder ungebraucht) folgendermassen haltbar:

Entwickler	6 Wochen
Bleichbad	nicht limitiert
Andere Lösungen	8 Wochen

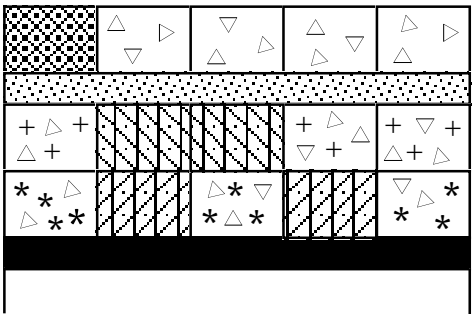
11.2 .5. <u>Schematischer Entwicklungsgang der automatischen Farbmaskierung bei Kodak-Farbnegativfilmen:</u>



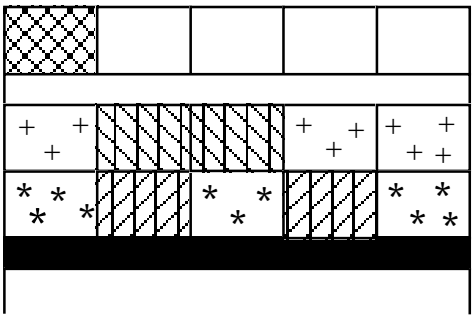
Vorlage



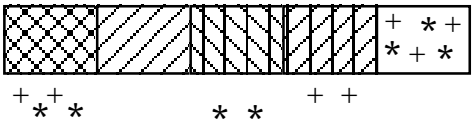
1 blauempfindliche Schicht mit normalem Gelb-Kuppler
2 Gelbfilter
3 grünempfindliche Schicht mit gelbem Magenta-Kuppler + + +
4 rotempfindliche Schicht mit orangerotem Cyan-Kuppler ***
5 Lichthofschutzschicht
6 Filmträger



<u>Zustand nach Farbentwicklung</u>
an den entwickelten Stellen verlieren die Kuppler für Magenta und Cyan ihre Maskierfarbe.



<u>Zustand nach Bleichen und Fixieren</u>
verbleibende Maskierfarben
+ + + und ***



<u>Negativ</u>
die Farben sind überlagert durch die beiden Masken.

Maskierfarbanteile + + / **

12. Aufbau und Entwicklung von Farbpapieren:

Wir unterscheiden grundsätzlich drei verschiedene Arten von Farbpapieren:

12.1. Farbpapiere für das Negativ-Positiv-Verfahren:

Der Schichtaufbau des Farbpapiers weist die umgekehrte Reihenfolge eines Dreischichtenfarbfilms auf. Dieser Schichtaufbau ist durch die Verwendung neuartiger Sensibilisatoren in der grün– und rotempfindlichen Schicht möglich geworden, die bei der Unterdrückung der naturgemässen Blauempfindlichkeit nur für sehr eng begrenzte Spektralbereiche empfindlich sind. Dadurch werden die blauen Strahlen nur in der blauempfindlichen Schicht registriert. Die **umgekehrte Reihenfolge der Schichten** hat eine Verbesserung des Auflösungsvermögens zur Folge, da die zuoberst liegende Cyan–Schicht massgeblich für die Schärfe verantwortlich ist. Abgesehen davon **entfällt das Aufgiessen der Gelbfilterschicht**. Die Empfindlichkeit der drei Schichten ist so konzipiert, dass der Maskenschleier (Farbmaske) der Farbnegativfilme kompensiert wird. Farbstiche, die herstellungs– oder aufnahmetechnisch bedingt sind, können mittels Korrekturfilter ausgefiltert werden. Bei der Farbentwicklung werden die belichteten Stellen zu schwarzem Silber reduziert, wobei aus der Entwicklersubstanz ein Oxidationsprodukt entsteht, das mit den Farbkupplern reagiert, die dann den subtraktiv wirkenden Farbstoff bilden. **Kodak** stellt ein Entwicklungsverfahren namens **Ektaprint 2 (EP–2)** zur Verfügung. Darin können Kodak Ektacolor Papiere verarbeitet werden, welche im Labor nur einer Sicherheitsbeleuchtung (Kodak Sicherheitsfilter Nr. 13, Bernstein) ausgesetzt werden dürfen. Das Verfahren besteht aus 2 Bädern: einem Entwickler– und einem Bleichfixierbad. Zwischen diese Bäder und am Ende werden noch je eine Wässerung eingeschaltet. Im professionellen Bereich und bei "Mini–Labs" wird v.a. der RA–4 (Rapid Access) Prozess verwendet, der ebenfalls ein Zweibad–Prozess ist und mit nur einer Wässerung auskommt.

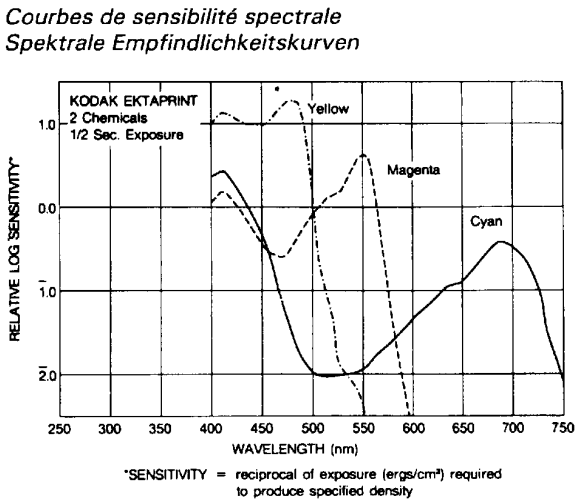
12.1.1. Schema des Kodak Ektaprint 2 Prozesses: (z.B. mit Jobo Rotationsmaschine)

Verarbeitungs–stufe	Verarbeitungs–zeit in Min.	Temperatur in ° C	Bemerkung
Entwickler	3,5	32,8 ± 0,3	Kodak Sicherheitsfilter Nr. 13
Mögliche Zwischenstufen: (entweder/oder)			
Stoppbad	1	30 – 34	2%ige Essigsäurelösung
Zwischenwässerung	1	30 – 34	fliessendes Wasser
Bleichfixierbad	1,5	30 – 34	
Wässerung	3,5	30 – 34	fliessendes Wasser
Trocknung		max. 107	Lufttrocknung
Total Verarbeitungszeit:	**8,5 Min**.	(ohne Zwischenstufe)	

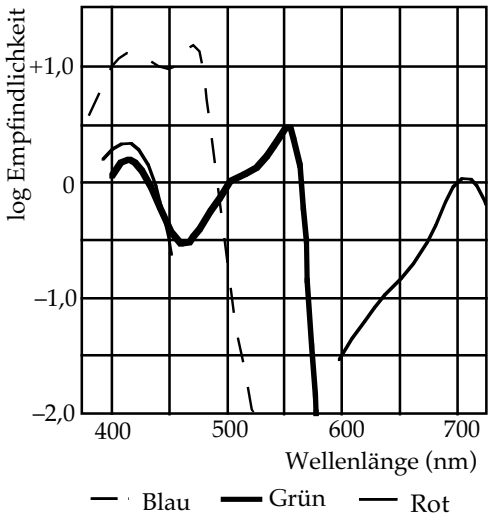
12.1.2. Aufbewahrung und Kapazität der Lösungen:
In aufgefüllten geschlossenen Glasflaschen lässt sich ein ungebrauchter Entwickler 6 Wochen aufbewahren. Ist der Entwickler teilweise gebraucht und wurde nicht nachgefüllt, so ist er nur gerade 2 Wochen haltbar. Die restlichen Lösungen (Bleichfixierbad und Stoppbad) sind 8 Wochen haltbar. Die Kapazität der Entwickler– und Bleichfixierlösungen liegt bei 82 dm^2 pro Liter.

12.1.3. Spektrale Empfindlichkeitskurven zweier Papiere:

a) Kodak Ektacolor Plus:



b) Agfacolor Typ 8

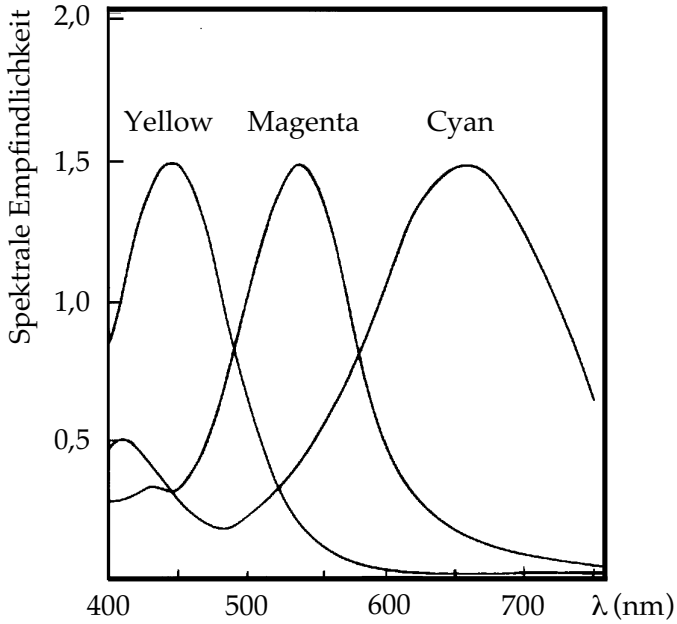


12.2. Farbumkehrpapiere:

Um von einem Diapositiv ein farbiges Aufsichtsbild zu erhalten, verwendet man ein Farbumkehrpapier. Dieses ist grundsätzlich gleich aufgebaut wie ein Dreischichtenfarbfilm, d.h. in umgekehrter Schichtfolge eines Farbpapiers für den Farbnegativ–Prozess. Die Gradationen der drei Schichten sind wesentlich flacher, da ein Diapositiv einen höheren Kontrast aufweist als ein Farbnegativ. Während der Farbumkehrentwicklung entsteht nach dem Prinzip der chromogenen Entwicklung ein Farbstoffbild.
Mit dem **Kodak Ektachrome R-3–Prozess** (3-Bad–Prozess) lassen sich die Ektachrome–Papiere und der Ektachrome Overhead–Film für die Hellraumprojektion verarbeiten. Die Verarbeitungstemperatur beträgt 38° C und die totale Verarbeitungs zeit liegt bei ungefähr 10 Minuten. Dieser Prozess eignet sich nicht so gut für die Verarbeitung in der eigenen Dunkelkammer, da er zu heikel ist.

12.2.1. Spektrale Empfindlichkeitskurve des Kodak Ektachrome 22: (Farbumkehrpapier)

Abb. 19:
Mehrschichtiges Farbumkehrpapier mit kunststoffbeschichtetem Schichtträger



12.2.2. Beschreibung des Prozesses:

Erstentwickler:
Der Erstentwickler reduziert die Silberhalogenide bei der Belichtung in metallisches Silber und bildet drei Negativbilder, die dem Rot, dem Grün und dem Blau des Originalbildes entsprechen.

Erste Wässerung:
Unterbricht die Wirkung des Erstentwicklers und scheidet dessen Ueberbleibsel vollständig aus, so dass eine Verunreinigung des Farbentwicklers verhindert wird.

Zwischenbelichtung:
Die im Erstentwickler nicht reduzierten Silberhalogenide werden belichtet, damit im Farbentwickler das Positivbild entstehen kann.

Farbentwickler:
Dieser Entwickler reduziert die bei der Umkehrbelichtung belichteten Silberhalogenide in ein Positivbild. Die oxidierten Produkte reagieren sodann mit den in der Schicht eingeschlossenen Kupplern, um damit die Farben Gelb, Magenta und Cyan zu bilden.

Zweite Wässerung:
Scheidet die Ueberbleibsel des Farbentwicklers aus, so dass eine einwandfreie Wirkung des Bleichfixierbades gewährleistet ist.

Bleichfixierbad:
Verwandelt das Silbermetall gleichzeitig in Silberhalogenide und dann in wasserlösliche Salze um.

Schlusswässerung:
Scheidet die Ueberbleibsel des Bleichfixierbades aus, so dass eine einwandfreie Bildstabilität gewährleistet ist.

12.3. Farbpositiv–Materialien: (ohne Farbumkehrentwicklung)

Siehe auch im Kapitel 9.2. Farb–Abbau S. 70
Nach dem **Prinzip des chromolytischen Silberfarbbleich–Verfahrens** (Ilfochrome, früher Cibachrome genannt!) entsteht ein positives Farbbild direkt nach einem Diapositiv. Die subtraktiven Farbstoffe sind bereits in den Schichten vorhanden und werden auf direktem Weg, ohne Umkehrentwicklung an den nichtbenötigten Stellen ausgebleicht.
Der **Ilfochrome–Prozess P–3 und P–30** wird für die Verarbeitung von Ilfochrome– Papier verwendet. Er umfasst die 3 Prozessschritte: Entwicklung, kombinierte Farb– und Silberbleichung und Fixierung, sowie die üblichen Zwischen– und Schlusswässerungen. Der P–3 Prozess ist ein professioneller Prozess, dessen schnellere Variante der P–3X ist . Beide werden als Flüssigkonzentrate angeboten. Der P–30 Prozess hingegen ist auf den Amateurbereich ausgerichtet (kleinere Mengen erhältlich) und wird in Pulverform angeboten.

Schema für den Ilford Ilfochrome P-3 Prozess:

Verarbeitungssequenz	Temperatur	Zeit	Bemerkung
Entwickler DE-3	30 ± 1/2	3 Min.	
Wässerung (1x)	30 ± 1/2	45 Sek.	nicht länger!
Bleichbad BL-3	30 ± 1	3 Min.	
Wässerung (1x)	30 ± 1	1 Min.	
Fixierbad FX-3	30 ± 1	3 Min.	
Schlusswässerung	30 ± 2	4 1/2 Min.	Wasserwechsel alle 30s oder Schlusswässerung in der Schale

Trocknung erfolgt in der Trocknungsmaschine (max. 70 °)
Schichtträger von Farbpapieren bestehen entweder aus einem Kunststoff-Papier-Sandwich (RC–Papier) oder aus reinem Kunststoff.

12.4. Allgemeines zu Printmaterialien:

Im Falle der Printmaterialien bestehen zwei grundsätzlich verschiedene Problemstellungen. Auf der einen Seite werden Prints direkt vom Dia gemacht, auf der anderen Seite wird ein Negativ aufgenommen, und die Prints vom Negativ vergrössert. Im Falle des Dias sind die darin verwendeten Farbstoffe so gewählt, dass sie möglichst gut auf das Auge abgestimmt sind und sich eine optimale Farbwiedergabe ergibt. Das Umkehrpapier, das für Abzüge von Dias verwendet wird, muss also optimal für diese Farbstoffe mit Absorptionsmaxima bei ca. 450nm, 550nm und 650nm sensibilisiert sein. Im Falle der Negativmaterialien müssen die gebildeten Farbstoffe nicht den idealen Farbstoffen für das Auge entsprechen. Der gebildete Cyanfarbstoff hat seine Maximalabsorption bei fast 700nm (siehe Spektren S. 96). Dadurch ist es möglich, eine saubere Kanaltrennung (d.h. eine Separation der einzelnen Farbdichtekurven) zu erhalten, und zugleich ergibt sich eine Lücke im Spektrum, die für eine Dunkelkammerbeleuchtung genutzt werden kann. Das Negativ–Positivmaterial muss entsprechend den Negativfarbstoffen sensibilisiert sein, und die darin gebildeten Farbstoffe entsprechen wieder den idealen Farbstoffen für das Auge und somit einer korrekten Farbwiedergabe.

12.5. Aufnahmetechnik mit Farbmaterialien:

Da alle Typen von Farbfilmen (Umkehr– und Negativmaterial) zwangsläufig nach einem kontrastmässig nicht beeinflussbaren Verfahren (Einerseits E-6–Prozess für die Umkehrmaterialien, andererseits C-41–Prozess für die Negativmaterialien) verarbeitet werden, müssen bei der Aufnahme die Kontrastverhältnisse des Motivs, d.h. dessen Helligkeisumfang, berücksichtigt werden. Die Möglichkeiten des SW– Prozesses durch die Wahl des geeignetsten Entwicklers, der passenden Entwicklungszeit und der optimalen Gradation des Vergrösserungspapiers fehlen.
Erschwerend kommt die relativ steile Gradation der Farbumkehrfilme dazu (γ–Werte zwischen 1,6 – 1,8, im Gegensatz zu einem γ–Wert von 0,45 – 0,8 für SW– Filme), welche kaum viel Belichtungsspielraum erlaubt, wenn die Zeichnung in den "Lichtern" und "Schatten" optimal sein soll. In der Praxis hat sich gezeigt, dass der Motivkontrast, d.h. der Helligkeitsunterschied von bildwichtigen Licht– und Schattenpartien im Maximum 1 : 30 betragen darf. Dann kann in der Projektion eines Dias bei richtiger Belichtung noch eine genügende Durchzeichnung von sowohl "Lichtern" als auch "Schatten" erwartet werden.
Will man ganz sicher gehen, dass ein Dia richtg belichtet ist, so empfiehlt es sich zum gemessenen Belichtungswert je 1/2 bis 1/3 Blende unter– resp. überzubelichten.

12.6. Text zur Farbkopie auf Seite 102:

Belichtung und Entwicklung diverser photographischer Materialien

A. Dreischichten–Farbumkehrfilm: (z.B. Kodak E-6–Prozess)

1. Farbvorlage
2. Querschnitt durch den Dreischichtenfarbfilm nach der Belichtung und SW–Entwicklung
3. Der Farbumkehrfilm nach der chemischen Verschleierung (chemical fogging) und Farbentwicklung
4. Querschnitt des gebleichten und fixierten silberfreien Farbumkehrfilms
5. In der Durchsicht betrachtet, ergibt der Farbumkehrfilm ein getreues Abbild der Farbvorlage.

B. Kodachrome–Prinzip: (Kodak K-14–Prozess)
Wurde eingehend im Kapitel "Modernes Farbfilmmaterial", S. 50 erklärt.

1. **Original**
2. **Belichtung und Erstentwicklung**
   Entstehung des latenten Bildes und SW–Erstentwicklung: Die belichteten Stellen werden zu Silber reduziert.
3. **Zwischenbelichtung mit rotem Licht durch die Trägerseite**
   Die bei der Erstentwicklung nicht geschwärzten Stellen der untersten rotempfindlichen Schicht werden belichtet. Dann erfolgt eine **Farbentwicklung mit Cyankuppler.**
   Die durch die Erstentwicklung nicht geschwärzten Stellen der untersten Schicht werden zu Silber reduziert. Gleichzeitig bildet sich mit dem Farbkuppler das Cyan–Farbstoffbild.
4. **Zwischenbelichtung mit blauem Licht durch die Emulsionsseite**
   Die bei der Erstentwicklung nicht geschwärzten Stellen der ersten blauempfindlichen Schicht werden belichtet. Danach erfolgt die **Farbentwicklung mit Gelbkuppler.**
   Die durch die Erstentwicklung nicht geschwärzten Stellen der obersten Schicht werden zu Silber reduziert. Gleichzeitig bildet sich mit dem Farbkuppler das gelbe Farbstoffbild.
5. Auf eine **Zwischenbelichtung mit grünem Licht kann verzichtet werden**, weil die Entwicklung des Magentabildes in einem schleiernden Farbentwickler durchgeführt wird, dem ein Magentakuppler zugesetzt ist.
6. **Bleich– und Fixierbad**
   Im Bleichbad wird alles Silber in fixierbadlösliches Komplexsalz

(Silberhalogenid) umgewandelt und im Fixierbad entfernt.

7. **Diapositiv**
In der Durchsicht ergeben sich durch die drei übereinanderliegenden subtraktiven Farbstoffbilder die Originalfarben.

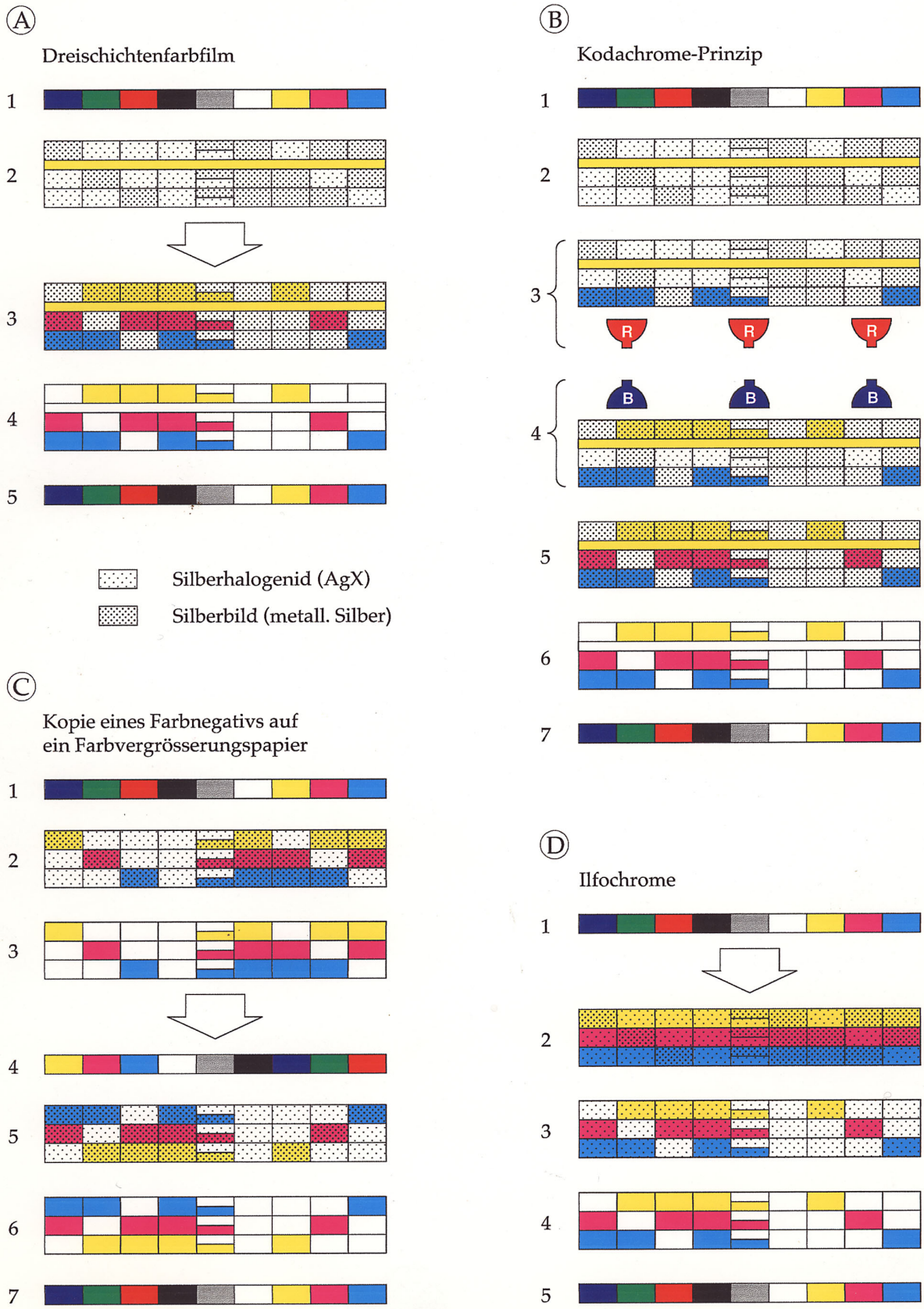
C. <u>Kopie eines Farbnegativs auf ein Farbvergrösserungspapier</u>
(z.B. Kodak Ektaprint 2 Prozess)

1. Farbvorlage
2. Querschnitt des belichteten und entwickelten Farbnegativfilms
3. Farbnegativfilm nach dem Bleichen und Fixieren
4. Komplementärfarbiges Farbnegativ, welches mit Hilfe einer Lichtquelle auf ein Farbpositivmaterial (Farbvergrösserungspapier) kopiert wird.
5. Querschnitt des belichteten und entwickelten Farbvergrösserungspapier
6. Gebleichtes und fixiertes silberfreies Farbvergrösserungspapier
7. In der Aufsicht betrachtet, erhält man ein getreues Abbild der farbigen Vorlage.

D. <u>Schematische Darstellung der Belichtung und Entwicklung von Ilfochrome–Material:</u> (z.B. Ilford P-3 resp. P-3X Prozess)

1. Vorlage
2. Nach der Belichtung und Schwarzweissentwicklung
3. Nach dem Farbbleichbad ist an allen belichteten Stellen, an denen sich metallisches Silber befand, der Farbstoff ausgebleicht und das metallische Silber selbst wurde rehalogeniert.
4. Nach dem Fixieren ist alles Silberhalogenid aus den Schichten entfernt und es verbleibt nur noch das reine Farbstoffbild.
5. Im fertigen Bild ergeben die drei Schichten Gelb, Magenta und Cyan ein exaktes Abbild der ursprünglichen Vorlage.

Belichtung und Entwicklung diverser photographischer Materialien



12.7. Filmliste: Stand: Mai 1994

12.7.1. Farbpositiv–Aufnahmematerialien:

Film	Formate	Prozess	Empfindlichkeit Sensibilisierung	Bemerkung
Ektachrome EPY 64 T	135;120;PF	E6	64/19°	T
Ektachrome EPX 64 X	135;120;PF	E6	64/19°	D
Ektachrome EPR 64	135;120;PF	E6	64/19°	D+ Spez-Formate
Ektachrome EPN 100	135;120;PF	E6	100/21°	D
Ektachrome EPP 100 Plus	135;120;PF	E6	100/21°	D+ Spez-Formate
Ektachrome EPZ 100 X	136;120;PF	E6	100/21°	D
Ektachrome EPD Panther 200X	135;120;PF	E6	200/24°	D+ Spez-Formate
Ektachrome EPJ 320	135	E6	320/26°	T
Ektachrome EPL 400 X	135;120	E6	400/27°	D
Ektachrome Panther 1600	135	E6-P	400-3200	D Push-Prozess
Ektachrome Slide Duplicating 5071	135	E6	6/9°	T Diaduplikat + Spez-Formate
Ektachrome SE Slide Duplicating SO-366	135	E6		D Blitzlicht + Spez-Formate
Ektachrome Infrared IE	135	E4	S. Packungsabgaben	D Infrarot
Kodachrome PKM 25	135	K14	25/15°	D
Kodachrome PKR 64	135	K14	64/19°	D
Kodachrome PKL 200	135	K14	200/24°	D
Agfachrome 50 RS Plus	135;120;PF	E6,AP44	50/18°	D
Agfachrome 100 RS Plus	135;120;PF	E6,AP44	100/21°	D
Agfachrome 200 RS	135;120	E6,AP44	200/24°	D
Agfachrome 1000 RS	135;120	E6,AP44	1000/31°	D
Fujichrome Velvia RVP 50	135;120;PF	E6	50/18°	D
Fujichrome prof. D RDP 100	135;120;PF	E6	100/21°	D+ Spez-Format
Fujichrome prof. D RHP 400	135;120	E6	400/27°	D
Fujichrome prof. D RSP 1600	135	E6	1600/33°	D
Fujichrome prof. T RTP 64	135;120;PF	E6	64/19°	T
Fujichrome Provia prof.100 (RDP II)	135;120;PF	E6	100/21°	D
Fujichrome Provia prof.400 (RHP)	135;120;PF	E6	400/27°	D
Fujichrome Provia prof.1600 (RSP)	135;120;	E6	1600/33°	D
Fujichrome Duplicating CDU	35mm (nur 30m); PF	E6	6/9°	T Diaduplikat

12.7.2. Farbnegativ–Aufnahmematerialien:

Ektar PHR 25	135;120	C41	25/15°	D
Ektar 100	135	C41	100/21°	D
Ektar 1000	135	C41	1000/31°	D
Ektacolor Gold 2 GPF	135;120	C41	160/23°	D
Ektacolor Gold 2 EGP	135;120	C41	400/27°	D
Ektapress Gold 2 100	135	C41	100/21°	D
Ektapress Gold 2 400	135	C41	400/27°	D Push-Prozess mögl.
Ektapress Gold 2 1600	135	C41	1600/33°	DPush-Prozess mögl.

Vericolor 3 VPS	135;120;PF	C41	160/23°	D + Spez-Format
Vericolor 2 VPL	120;PF	C41	100/21°	T
Vericolor VPH	135;120	C41	400/27°	D
Vericolor VHC	120;PF	C41	100/21°	D
Vericolor Slide 5072	135;30m	C41	10/11°	T Dia ab Negativ
Vericolor Print 4111	PF	C41	10/11°	T Dia ab Negativ
Agfacolor Ultra 50	135;120	C41,AP70	50/18°	D
Agfacolor Optima 125	135;120;PF	C41,AP70	125/22°	D
Agfacolor Optima 200	135;120	C41,AP70	200/24°	D
Agfacolor Portrait 160	135;120	C41,AP70	160/23°	D
Agfacolor XRS 400	135;120	C41,AP70	400/27°	D
Agfacolor XRS 1000	135;120	C41,AP70	1000/31°	D
Fujicolor Super G 100	135;120	C41,CN16	100/21°	D
Fujicolor Super G 200	135	C41,CN16	200/24°	D
Fujicolor Super G 400	135;120	C41,CN16	400/27°	D
Fujicolor Super HG 1600	135	C41,CN16	1600/33°	D
Fujicolor Reala 100	135;120	C41,CN16	100/21°	D
Fujicolor NSP 160 S	135;120;PF	C41,CN16	160/23°	D
Fujicolor NLP 160 L	120;PF	C41,CN16	160/23°	T
Fujicolor NHG 400	135;120	C41,CN16	400/27°	D

Abkürzungen:

Formate:
135: 35mm Film (135/36 Aufnahmen resp.135/20 Aufnahmen)
120: Rollfilm (meist werden zusätzlich auch 220er Rollfilme angeboten)
PF: Planfilme: 4x5 inch/ 8x10 inch
Spezialformate: 70mm und 35mm Rollenware (30m, 300m)

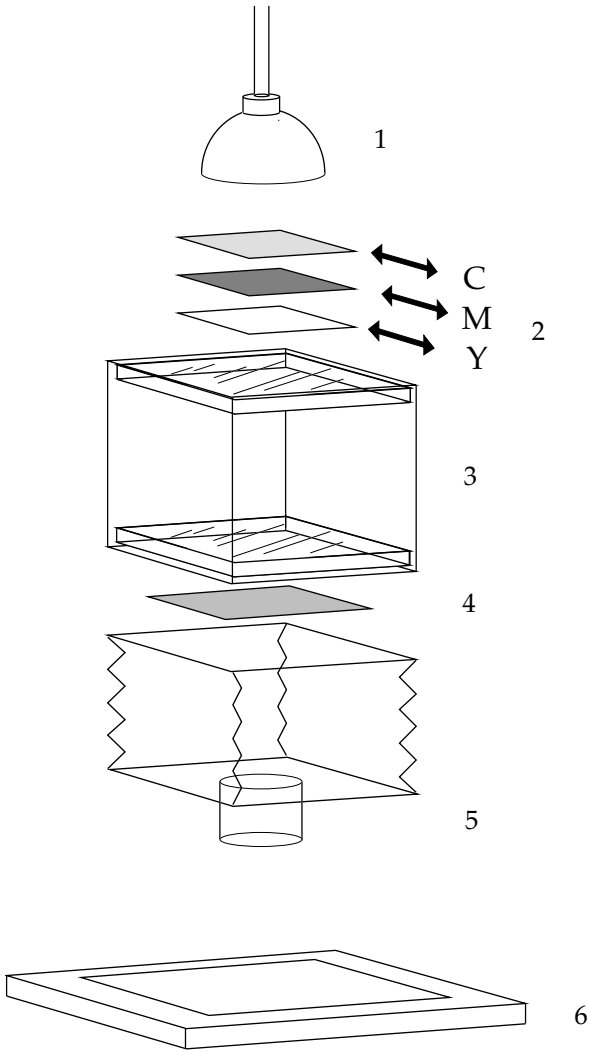
Prozesse:
AP44: E-6 kompatibler Prozess von Agfa (Umkehrentwicklung)
CN16: C41 kompatibler Prozess von Fuji (Entwicklung von Farbnegativen)
E6-P: E6 Push-Prozess für gesteigerte Empfindlichkeitsausnutzung (verlängerte Erstentwicklung)
Push-Prozess bei Farbnegativen: Entwicklungszeit wird verlängert

D = Tageslicht (Daylight)
T = Kunstlicht (Tungsten)

13. Praxis der Farbkopiertechnik:

13.1. Aufbau eines Vergrösserungsapparates:

Betrachtet man den Aufbau eines Farb–Vergrösserers mit Farbmischkopf, so zeigen sich eine Reihe von Faktoren, welche die korrekte Farbwiedergabe ganz erheblich beeinträchtigen können.



1. Lichtquelle (Halogenlampe) müsste:
a. energiegleiches Spektrum besitzen,
b. in allen Apparaten vom selben Typ sein,
c. stets mit genau gleicher Spannung betrieben werden und
d. auch nach längerer Verwendung noch gleiche Spektralintensitäten abgeben.

Farbmischkopf bestehend aus 2 und 3:

2. Es müssen dichroitische Filter verwendet werden
3. Farbmischbox müsste qualitativ hochwertig sein, um ein homogenes Licht zu garantieren

4. Negativ müsste:
a. absolutes Gleichgewicht der 3 Emulsionen aufweisen und
b. immer genau gleich entwickelt sein.

5. Objektiv müsste
a. an allen Apparaten vom selben Typ sein und
b. dürfte keine Farbintensitätsverschiebung bewirken.

6. Colorpapier müsste:
a. stets dieselben ausgeglichenen Schichtempfindlichkeiten aufweisen,
b. dürfte keine Farbverschiebung bei unterschiedlichen Belichtungszeiten bewirken und
c. müsste in standardisierter Weise verarbeitet werden.

Da vorwiegend die unter 1., 2., 3. und 5. genannten Teile sehr unterschiedlich sind, war es sinnlos, Farbnegativfilme für ganz bestimmte Farbtemperaturen herzustellen und entsprechend bei der Fabrikation der Colorpapiere auf stets gleiche Empfindlichkeiten der drei Emulsionen zu tendieren.

13.2. Beeinflussung der Intensität der Grundfarbzonen im Kopiervorgang durch Filter:

Hierfür sind zwei Möglichkeiten vorhanden, indem durch subtraktive Farbfilter in den Grundfarben Gelb (Y), Magenta (M) und Cyan (C) dominierende Grundfarb anteile des im Papier einfallenden Lichtes kompensiert werden. Die zweite Möglichkeit besteht in additiver Belichtung durch drei sukzessive Expositionen mit schmalbandigen Filtern in den drei Grundfarben Blau, Grün und Rot. Beide Methoden werden praktisch angewendet, sie besitzen Vor- und Nachteile. Die subtraktive Filtermethode wird im Amateurbereich, d.h. allg. in Kleinlabors angewendet (z.B. Vergrösserungsgeräte mit Farbmischkopf oder mit einer Filterschublade). In Grosslabors mit grosser Printdurchlaufrate werden oft additive Filtermethoden oder Mischformen beider Filtermethoden verwendet.

13.3. Die subtraktive Filtermethode:

Die verschiedenen Filtersätze sind durch Ziffern in ihrer Subtraktionswirkung gekennzeichnet, die z.T. die optische Dichte gegenüber der Komplementärfarbe bezeichnen. Mit Gelb–Filtern wird die Intensität des Blauanteils, entsprechend mit Magenta–Filtern die des Grünanteils und mit Cyan–Filtern jene des Rotanteils reguliert.

Eine Grundregel lautet:

Eine Farbdominante, bzw. ein Farbstich des Positivs wird durch Zugabe oder Erhöhung der Filterdichte in der gleichen Farbe beseitigt.
Da eine weitere Regel sagt: **Es dürfen nie gleichzeitig alle drei Filterfarben vorhanden sein** (da sie sich ganz oder teilweise zu Grau kompensieren)**, kann ein Farbstich auch durch gleichzeitige Reduktion der beiden anderen Farbfilterdichten beseitigt werden.**

13.3.1. Prinzip der subtraktiven Farbstichkorrektur:

Ein Farbstich der Kopie wird beseitigt durch:

Farbstich		mehr Filter			oder	weniger Filter
rein	gelb	+ gelb			– magenta	und – cyan
"	magenta	+ magenta			– gelb	und – cyan
"	cyan	+ cyan			– gelb	und – magenta
"	blau	+ magenta	und	+ cyan	– gelb	
"	grün	+ gelb	und	+ cyan	– magenta	
"	rot	+ magenta	und	+ gelb	– cyan	

Das Bestimmen der richtigen Filterkombination bei Farbstichen, die nicht ausgesprochene Typfarben sind (Gelb usw.), erfordert Erfahrung. Bei der Wahl muss stets die Überlegung ausschlaggebend sein, dass ein Stich durch zu intensive Belichtung mit der komplementären Lichtfarbe entsteht und somit durch ein Filter mit gleicher Tönung wie sie der Stich besitzt, zu kompensieren ist. Bei Farbstichen wie z.B. orange ist zu überlegen, dass hier neben zu starker Gelb-Bildung auch mässig starke Magenta-Bildung vorlag. Somit ist die für das zuviel an Gelb massgebende Blau-Intensität durch ein intensives Gelb-Filter zu reduzieren und das zuviel an Grün im Kopierlicht (ergibt Dominante im Magenta) durch ein etwas schwächeres Magenta-Filter zu reduzieren.

Heute finden sich im Handel eine Reihe von Geräten zur Filterbestimmung, die farbdensitometrische Messungen ergeben. Ihre Anwendung ist aber nur sinnvoll, wenn auf der Aufnahme ein neutralgraues Feld vorhanden ist, welches ausgemessen werden kann. Möglich ist auch eine separate Aufnahme einer Grautafel unter denselben Beleuchtungsbedingungen vor der eigentlichen Bildaufnahme.

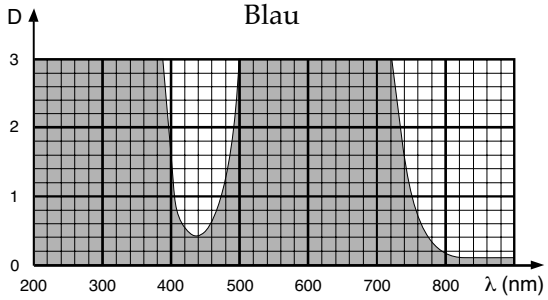
Bei der Arbeit, vor allem bei den Belichtungs- und Filterproben sind die Bilder mit den verwendeten Filterarten und Zahlenwerten anzuschreiben. Dies geschieht am besten nach der Methode von Agfa, wobei eine mehrstellige Zahlengruppe verwendet wird.
Die erste Zahlengruppe (von links) ist für Gelb, die zweite für Magenta und die letzte für Cyan reserviert. Da nie alle drei Farben verwendet werden sollen, zeigt somit mindestens eine Gruppe einen Nullwert an, als Ziffern 00 oder als Querstrich –. Somit bedeuten:

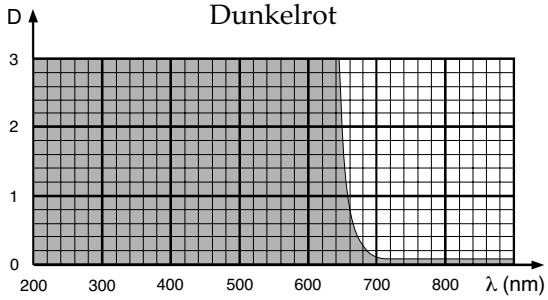
	80	00	50	Gelb 80 / Magenta 00 / Cyan 50
oder	–	30	45	Gelb 00 / Magenta 30 / Cyan 45

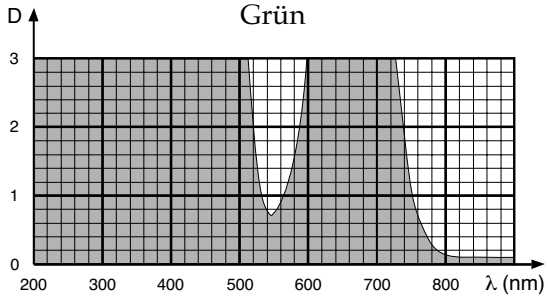
Die Lichtabsorption der Filter ist beim Belichten, entsprechend den Vorschriften für den betreffenden Filtersatz zu berücksichtigen, d.h. die Belichtungszeit muss entsprechend verlängert oder verkürzt werden. Dabei ist zu beachten, dass schon relativ mässige Belichtungsänderungen Farbverschiebungen infolge des Schwarzschild-Effekts bewirken können. Analoges gilt bei starken Aenderungen des Vergrösserungsmassstabes. Hier muss durch Regulieren der Objektivblende auf ungefähr gleiche Lichtintensität (ohne Filter) auf dem Grundbrett tendiert werden.

13.4. Die additive Filtermethode:

Das Prinzip dieser Farbstichkorrektur beruht auf der Veränderung der Teilexpositionszeit für die drei Grundfarbenanteile des Kopierlichtes durch entsprechend engbandige Filter vor dem Objektiv oder durch Einsetzen oberhalb des Kondensors. Somit wird für das additive Verfahren nur ein Minimalsatz von 3 Filtern benötigt gegenüber maximal 36 subtraktiven Filtern. Allerdings wird diese Einsparung kompensiert durch die Notwendigkeit, 3 Belichtungsschaltuhren zu verwenden, damit reproduzierbare Belichtungen möglich sind.
Durch die 3 Engbandfilter, z.B. Kodak Wratten Nr. 98 (Blau), 99 (Grün) und 70 (Dunkelrot) bewirkt man je eine Teilexposition einer Emulsion. Da alle Positivmaterialien (Papier und Positivfilm) die Sensibilisierungsmaxima an nahezu gleichen Wellenlängenwerten aufweisen, können dieselben Filter für verschiedene Papiermarken verwendet werden. Gleiches gilt übrigens auch für die subtraktiven Kopierfilter.







Jedes Filter wirkt somit nur auf eine farbempfindliche Schicht belichtend ein, während bei der subtraktiven Methode die belichtende Wirkung eines Filters stets auf zwei Emulsionen wirkt.

13.4.1. Prinzip der additiven Farbstichkorrektur: Ein Farbstich der Kopie wird beseitigt durch:

Farbstich	längere Belichtung	oder	kürzere Belichtung
rein Gelb	Grün und Rot		Blau
rein Magenta	Blau und Rot		Grün
rein Cyan	Blau und Grün		Rot
rein Blau	Blau		Grün und Rot
rein Grün	Grün		Blau und Rot
rein Rot	Rot		Blau und Grün

Statt die Intensität einer Grundfarbe durch ein komplementäres Filter zu steuern, wird beim additiven Verfahren die Expositionszeit für die betreffende Grundfarbe verändert.

14. Stabilität von photographischen Farbmaterialien:

Die meisten der heute verwendeten Farbmaterialien weisen, wenn sie im Dunkeln und bei niedriger Temperatur und Luftfeuchtigkeit aufbewahrt werden, eine sehr hohe Lebensdauer auf. Fehlen diese Voraussetzungen, erweisen sich die in der Farbphotographie verwendeten Farbstoffe als relativ kurzlebig, Farbverschiebungen und völliges Ausbleichen sind die Folge. Aeltere Farbmaterialien waren meist viel weniger lang haltbar, die Ausbleichung war oft schon nach wenigen Jahren stark sichtbar.

Der Zerfall der Farbmaterialien kann aus folgenden Gründen erfolgen:

- Unsaubere Verarbeitung kann dazu führen, dass Farbbilder, die nach der Verarbeitung eigentlich korrekt aussehen, viel schneller als normal altern. Eine unsachgemässe Stabilisierung kann z.B. dazu führen, dass die Farbstoffe schneller ausbleichen, da nicht die richtige chemische Umgebung für eine hohe Dunkelstabilität geschaffen worden ist. Ein anderes häufiges Problem stellt der zu hohe Restthiosulfatgehalt dar, der durch eine zu kurze Wässerung entstehen kann. Das Thiosulfat führt vor allem zu einer Zerstörung des Cyanfarbstoffes.
- Biologische Bildzerstörung, die infolge zu hoher Luftfeuchtigkeit (> 60% rel. LF) zu einer Zersetzung der Gelatine führt (Bakterienbefall, Schimmelbildung).
- Physikalische Bildzerstörung durch mechanische Beanspruchung der Filmschicht beim Gebrauch und Lagern (Schrumpfung, Verkleben, Rissbildung, Abblättern der Emulsionsschicht usw.).
- Chemische Bildzerstörung (Dunkelbleichung), da infolge interner (Bildfarbstoffe, Emulsion, Schichtträger) und externer Faktoren (Verarbeitungschemikalien, Wärme, Feuchtigkeit und Stoffe in der Umgebungsluft) durch Hydrolyse und Redoxprozesse die Bildfarbstoffe zerstört werden. Insbesondere ist hier auch die Zerstörung durch Chemikalien in der Umgebungsluft nicht zu unterschätzen.
- Photochemische Bildzerstörung (Lichtbleichung), da in Abhängigkeit von Belichtungswellenlänge und -intenstität sowie Umgebungsmilieu die Bildfarbstoffe infolge photooxidativer und photodissoziativer Prozesse zerstört werden.

Zur Abschätzung der Farbstoffstabilität sind beschleunigte Alterungsversuche im Labor erforderlich. Nach mehrjährigen Vorarbeiten ist 1993 ein ISO Standard zur Bestimmung der Bildstabilität von Farbmaterialien veröffentlicht worden. Hat der Ausbleichprozess bei Farbildern einmal begonnen, so ist er mit chemischen Methoden nicht mehr rückgängig zu machen. Das Ausbleichen der Farbstoffe ist ein irreversibler Prozess. Mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung ist es aber heute möglich, die

ursprüngliche Farbinformation (nicht die ursprünglichen Farbstoffe!) wieder zu rekonstruieren.

Zur Frage der Archivierung sind folgende Punkte zu beachten:

- Filmmaterialien sauberhalten. Fingerabdrücke, Schmutz und Staub enthalten oft Chemikalien oder Pilzsporen, die das photographische Bild angreifen können.
- Verwendung spezieller, archivfester Verpackungshüllen.
- Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit beachten. -18° C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 30 bis 35% wären ideal, aber schon eine Lagerung unter normalen Kühlschrankbedingungen bringt sehr viel.
- Filmmaterialien im Dunkeln aufbewahren. Es empfiehlt sich eine Lagerung in Metallbehältern, da Holz- oder Plastikschachteln flüchtige Stoffe enthalten können, die die Materialien angreifen können.
- Es dürfen sich keine Chemikalien in der Umgebungsluft befinden.
- Dias nicht in Glas rahmen, da dies zu Fleckenbildung führen kann.
- Falls Dias oft betrachtet werden müssen, sollten für den Gebrauch Duplikate hergestellt und die Originaldias unter optimalen Bedingungen gelagert werden.
- Um den bequemen Zugang zu Farbvergrösserungen zu gewährleisten, sollten sie in Alben aufbewahrt werden. Aber es ist zu beachten, dass geeignetes Kartonmaterial, Photoecken und archivfeste Tinte (für die Beschriftung) verwendet werden.

Literatur zur Haltbarkeit von fotografischen Farbmaterialien:

1 Preservation of Photographs, Eastman Kodak Company, (1979)
2 Storage and care of KODAK Color Material, Eastman Kodak Company (1982)
3 H. Böttcher, Bildstabilität fotografischer Colormaterialien, Bild und Ton 36 (1983), nr.5, p. 131
4 Conservation of Photographs, Eastman Kodak Company (1985)
5 Kodak, Storage and Care of Kodak Films and Papers - Before and after Processing, Kokak Publication No. E-30, 1985
6 S. Anderson and R. Goetting, Environmental Effects on the Image Stability of Photographic Products, *J. Imaging Technology*, **14**: 111 (1988)
7 K.B. Hendriks, S*tability and Preservation of Recorded Images; in: Imaging Processes and Materials*, Nebelettes 8th edition, Van Nostrand, NY, 1989, p637
8 ISO 10977, Photography - Processed photographic colour films and paper prints -Methods for measuring image stability, 1993
9 H. Wilhelm, the Permanence and Care of Color Photographs, Preservation Publishing Company, Grinell, Iowa, USA, 1993

15. Empfindlichkeit, Belichtung und latentes Bild beim Farbfilm:

Die genaue Empfindlichkeitsbestimmung der Filmmaterialien, resp. deren Emulsionen, erfolgt nach den ISO–Normen. Früher wurde die Empfindlichkeit in ASA (American Standard Organization) und DIN (Deutsches Institut für Normung) angegeben.

DIN (ISO° = ISO–Grade) ist eine logarithmische Skala. ASA (ISO) basiert auf einer arithmetischen Skala. Eine Verdoppelung der ASA–Zahl kommt einer Verdoppelung der Empfindlichkeit gleich und entspricht einer Zunahme um 3 DIN.
Anfang der 80er Jahre wurden ASA und DIN zur heute üblichen **ISO–Norm** (International Standard Organization) zusammengefasst (z.B. ISO 100/21°).

Umrechnungen: $\text{ISO}^\circ / \text{DIN} = 1 + 10 \times \log(\text{ISO}/\text{ASA})$

$$\text{ISO}/\text{ASA} = 10^{\frac{(\text{ISO}^\circ / \text{DIN}) - 1}{10}}$$

Es muss jedoch erwähnt werden, dass kein System in allen Bereichen der Photographie voll und ganz für die Messung der Empfindlichkeit befriedigt. In der Tat ist jedes Normsystem von der Beschaffenheit des Materials, von seinen Verwendungsbedingungen und hier besonders von der spektralen Energie der Lichtquelle abhängig.

Alle Systeme, welche die Empfindlichkeit charakterisieren, berufen sich auf die Schwärzungskurve und insbesondere auf einen Punkt in derselben, den **Empfindlichkeitspunkt**. Dieser entspricht der benötigten Belichtung, um einen gewissen photographischen Effekt zu erreichen. Seine Wahl wird durch die Verwendung des Filmmaterials (Dia– oder Farbnegativfilm) beeinflusst und lässt sich nicht einfach mit einem besonderen Punkt über dem Grundschleier bestimmen.

15.1. Bestimmung der Lichtempfindlichkeit bei Farb–Umkehrfilmen:

(aus: Deutsche Normen DIN 4512 Teil 4)

Diese Norm enthält eine Begriffsbestimmung der Lichtempfindlichkeit (nicht der spektralen Empfindlichkeit) von Farb–Umkehrfilmen für die bildmässige Photographie und legt ein Messverfahren zu ihrer Ermittlung sowie Bestimmungen über die Form, in der die Empfindlichkeit angegeben werden soll, fest.
Die Lichtempfindlichkeit ist eine Kennzahl für den Wert der Belichtung, welcher eine photographische Schicht bei Bildaufnahmen ausgesetzt werden

muss. Sie wird unter den in dieser Norm festgelegten Bedingungen der Belichtung, Entwicklung und Auswertung bestimmt.
Die Lichtempfindlichkeit wird durch den Kehrwert einer charakteristischen Belichtung gemessen und nach dieser Norm als **DIN–Zahl S** angegeben:

$$S = 10 \log \frac{H_O}{H_R}$$

$\mathbf{H_O}$ ist eine an das hier vorliegende sensitometrische System gebundene Konstante. Ihr Wert beträgt für Farb–Umkehrfilme 12,6 Lux sec.

$\mathbf{H_R}$ wird als geometrisches Mittel der Belichtungen H_F und H_P berechnet.

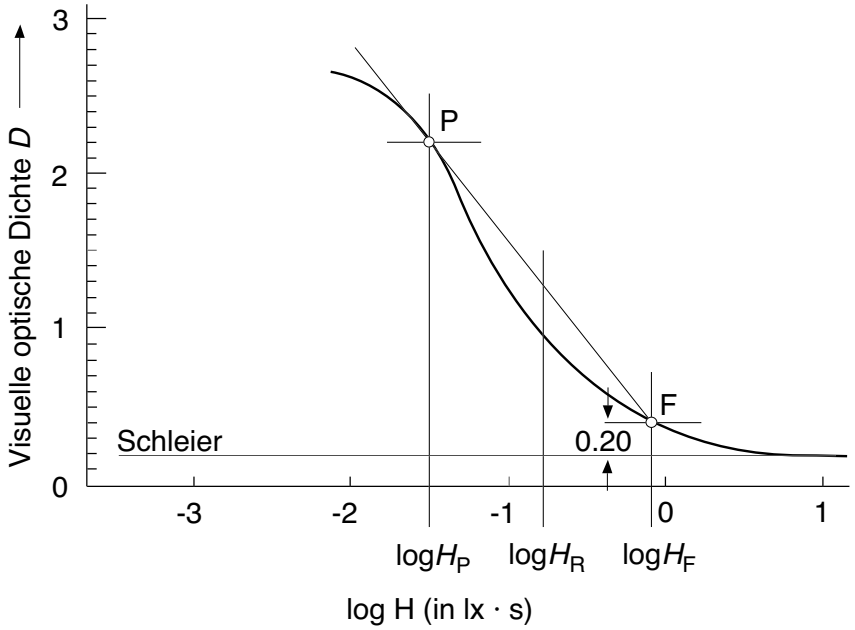
$$H_R = \sqrt{H_F \times H_P} \quad \text{oder} \quad \log H_R = \frac{1}{2} (\log H_F + \log H_P)$$

$\mathbf{H_F}$ ist die Belichtung, welche auf der sensitometrischen Probe die visuelle optische Dichte 0,2 über dem Schleier erzeugt (Punkt F siehe Bild).

$\mathbf{H_P}$ ist die dem Kurvenpunkt P (siehe Bild) zugeordnete Belichtung. P erhält man als Berührungspunkt der Tangente, die man von F aus an die Kurve legt. Besitzt der Berührungspunkt eine höhere optische Dichte als 2,0 über dem Schleier, so ist P der Kurvenpunkt mit der Dichte 2,0 über dem Schleier.

<u>DIN–Norm–Schwärzungskurve eines Farbumkehrfilms:</u>

Abb. 20:



F ist der Empfindlichkeitspunkt

15. 2. Bestimmung der Lichtempfindlichkeit bei Farb–Negativfilmen:

(aus: Deutsche Normen DIN 4512 Teil 5)

Diese Norm enthält eine Begriffsbestimmung der Lichtempfindlichkeit (nicht der spektralen Empfindlichkeit) von Farb–Negativfilmen für die bildmässige Photographie und legt ein Messverfahren zu ihrer Ermittlung sowie Bedingungen für die Angabe der Lichtempfindlichkeit mittels der DIN–Zahl fest.

Die Lichtempfindlichkeit ist eine Kennzahl für die Grösse der Belichtung, welcher eine photographisches Material bei Bildaufnahmen ausgesetzt werden muss. Sie wird unter den in dieser Norm festgelegten Bedingungen der Belichtung, Entwicklung und Auswertung bestimmt.

Die Lichtempfindlichkeit wird durch den Kehrwert einer charakteristischen Belichtung gemessen und nach dieser Norm als **DIN–Zahl S** angegeben:

$$S = 10 \log \frac{H_O}{H_{CN}}$$

$\mathbf{H_O}$ ist eine an das hier vorliegende sensitometrische System gebundene Konstante. Ihr Wert beträgt für Farb–Negativfilme 1,78 Lux sec.

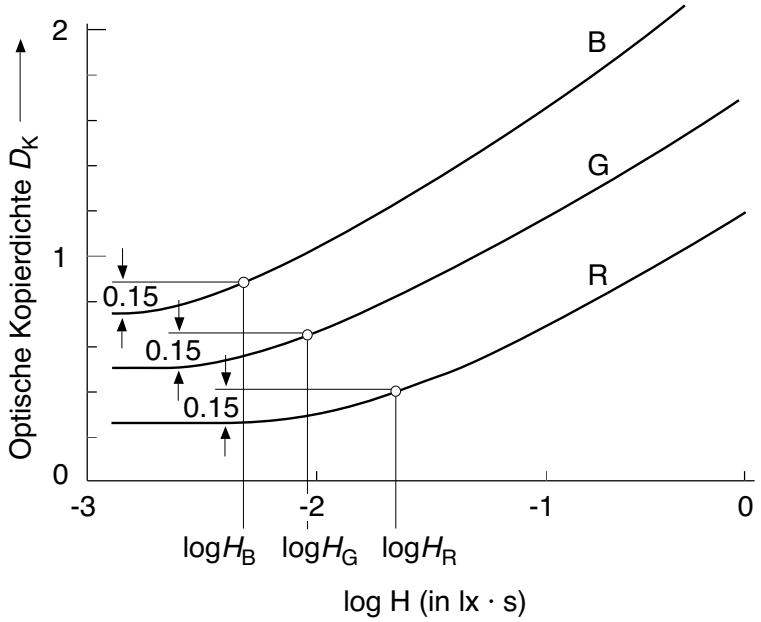
$\mathbf{H_{CN}}$ wird als geometrisches Mittel der Belichtungen H_G und H_{un} berechnet

$$\log H_{CN} = \frac{1}{2} (\log H_G + \log H_{un}) \qquad H_{CN} = \sqrt{H_G \times H_{un}}$$

H_G ist die Belichtung, welche auf der sensitometrischen Probe nach der Entwicklung die mit Grünfilter gemessene optische Kopierdichte $D_K = 0{,}15$ über dem Schleier erzeugt (siehe Zeichnung). Für H_{un} muss die grössere der Belichtungen H_B und H_R eingesetzt werden. H_B ist die Blaubelichtung und H_R die Rotbelichtung, die nach der Entwicklung die mit Blau– bzw. mit Rotfilter gemessene optische Kopierdichte $D_K = 0{,}15$ über dem Schleier erzeugt.

DIN–Norm–Schwärzungskurve eines Farbnegativfilms:

Abb. 21:



Bei der Herstellung von Farbfilmen kann es vorkommen, dass selbst Emulsionen mit gleichen Nummern nicht die genau gleiche Empfindlichkeit aufweisen, auch wenn sie sonst im Farbgleichgewicht sind. Deshalb muss stets mit einer Abweichung der **Effektivempfindlichkeit** vom Packungsaufdruck gerechnet werden. Während bei Amateurfilmen kein Hinweis auf eine Variation gegeben wird, enthalten Professionalfilme in den Gebrauchsanweisungen der Packungen Angaben über die tatsächliche Empfindlichkeit sowie über evtl. zu verwendende Farbkorrekturfilter. Diese **Effektivempfindlichkeit** kann im Durchschnitt um ± 1/2 Blende vom Packungsaufdruck abweichen.

15.3. Empfindlichkeit und Lagerung der Farbfilme:

Wenn unbelichtetes Material längere Zeit bei normalen Klimabedingungen (d.h. Raumtemperatur und normale Luftfeuchtigkeit) gelagert wird, kann es sein, dass die **Effektivempfindlichkeit** (und auch evtl. das Farbgleichgewicht) darunter leiden, und Abweichungen zeigen.
Farbfilmvorräte sollten deshalb stets **kühl und trocken** gelagert werden. Dies erfolgt am besten in feuchtigkeitsicherer Verpackung in einer Kühlbox oder im Kühlschrank. Dann kann mit folgenden Durchschnittshaltbarkeiten gerechnet werden.

bei Tiefkühlung (–10 bis –20° C):	mehrere Jahre
im Kühlschrank (um 4° C):	etwa 1 Jahr
normale Lagerung (20° C, 50% rel F.):	mehrere Monate

Wichtig ist, dass bei der Entnahme aus der Kühleinrichtung der **verpackte Film** an die Raumtemperatur angeglichen wird, da sonst Kondenswasser den Film schädigt. Die Auftauzeit hängt von der Art der Verpackung des Materials und der Kühlung ab. Aus der Tiefkühltruhe entnommen, kann dies mehrere Stunden dauern, während bei Entnahme aus dem Kühlschrank etwas über 30 Min. zu warten ist, ehe die Packung um den Film entfernt werden darf.

In tropischem Klima muss das Material auf alle Fälle in relativ trockener Luft aufbewahrt werden. Am besten in einer dicht schliessenden Büchse mit Silikagel.

Analog ist zu verfahren mit belichteten Filmen, die erst nach einiger Zeit zur Entwicklung gebracht werden.

Auf dem Farbfilmmarkt werden Professional–Filme von Amateur–Filmen unterschieden. Die Professional–Filme werden bis zum "reifen Zustand"fachgemäss gelagert (Tiefkühlung) und erst dann ausgeliefert. Gelangen die Filme dann zum Zwischenhändler, werden sie auch dort im Tiefkühler gelagert. Es ist nicht verwunderlich, dass diese Filme nach entsprechendem Mehraufwand auch mehr kosten. Amateur–Filme müssen zwar auch noch reifen, sie werden aber kurz nach deren Herstellung ausgeliefert, weil man annimmt, dass diese Filme eher noch in den Verkaufsläden herumliegen und dann noch genügend Zeit haben, um zu reifen. Andererseits werden Amateur–Filme bei Raumtemperatur gelagert.

15.4. Das latente Bild im Farbfilm:

Aus der SW–Technik ist bekannt, dass die latenten Bilder nicht haltbar sind und im Verlaufe von etwa 3 Monaten um durchschnittlich 25% abnehmen können. Diese Abnahme wird wegen der grossen Verarbeitungstoleranz in Entwicklung und Kopierprozess nur bei extrem langem herumliegenlassen des unbelichteten Films in ungeeignetem, zu warmem und zu feuchtem Klima bemerkt. Viel anfälliger für diese Regression der latenten Bilder sind entsprechend ihrer Natur Farbfilme, vor allem die Umkehrtypen. Deshalb sollten diese Typen so bald als möglich entwickelt werden, da neben einer scheinbaren Unterbelichtung durch das abgebaute latente Keimbild Farbstiche durch ungleich starke Regression auftreten. Belichtete Farbfilme sollten deshalb in solchen Fällen ebenfalls gekühlt und vor allem in trockener Atmosphäre aufbewahrt werden, wobei hochempfindliche Filme viel anfälliger sind als niederempfindliche. Wiederum soll bei Entnahme aus der Kühleinrichtung auf genügende Auftauzeit des feuchtigkeitssicher eingepackten Films geachtet werden.

Filme sollten auch nicht lange Zeit in der Kamera verbleiben und deren Lagerung darf nicht in Räumen oder Schränken erfolgen, wo Chemikalien aufbewahrt werden!

16. Der Reziprozitätsfehler: Theoretische Grundlagen

16.1. Die Reziprozität der Belichtung:

Die Belichtung setzt sich aus zwei Faktoren zusammen: Die Beleuchtungsstärke E (die auf die bestrahlte Fläche auftreffende Energie) und die Belichtungszeit t. Die Belichtung H ist das Produkt aus Beleuchtungsstärke (meist angegeben in Lux) und der Zeit (in Sekunden):

$$H = E \times t; \text{ oder } \log H = \log E + \log t.$$

Die Buchstabenbezeichnungen sind international vereinbart, obwohl man in der englischen und in der älteren photographischen Literatur die Belichtung noch etwa mit dem Buchstaben E (exposure) und die Beleuchtungsstärke mit dem Buchstaben I (intensity) angibt: also $E = I \times t$.

1862 haben R.W.Bunsen und H.E. Roscoe das **Reziprozitätsgesetz** für photochemische Prozesse definiert. Danach ergeben sich aus gleichen Produkten von Beleuchtungsstärke und Zeit (also aus gleichen Belichtungen) immer die gleichen photochemischen Wirkungen. Das würde heissen, dass die Faktoren Beleuchtungsstärke und Zeit nur für das Belichtungs**produkt** H eine Bedeutung haben. (Man erhält mit einer sehr kurzen Belichtungszeit t und einer grossen Beleuchtungsstärke E die gleiche Wirkung wie mit einer gleich grossen Belichtung H, die aus einer sehr grossen Belichtungszeit t und einer sehr kleinen Beleuchtungsstärke E resultiert). Das Bunsen Roscoe'sche Gesetz gilt auch für photographische Schichten, aber nur für den Primärprozess (elektronischer Teilschritt). Grob gesagt also dann, wenn man nur die durch die Belichtung selbst entstehende Schwärzung (Auskopierschwärzung) betrachtet.

16.2. Der Reziprozitätsfehler und der Schwarzschildeffekt:

Bereits 1844, kurz nach der Bekanntgabe der Daguerre'schen Erfindung, haben A.A.L. Fizeau und I.B.L. Foucault gefunden, dass das Reziprozitätsgesetz für die mit Quecksilber entwickelten Daguerreotyp-Platten **nicht** gelte (obschon damals das Gesetz ja noch nicht einmal formuliert worden war!). Sie stellten fest, dass bei Aufnahmen geringer Beleuchtungsstärke die Belichtungszeit überproportional vergrössert werden musste, weil in diesem Falle die Plattenempfindlichkeit geringer war als angenommen.

1874 fand W. de Abney, dass die photographische Empfindlichkeit (mit Entwicklung) keine Konstante ist, sondern bei langzeitiger und bei kurzzeitiger Belichtung **abnimmt**. In der Abbildung 22 ist die Empfindlichkeit von SW–Filmen gegen die Belichtungszeit aufgetragen. Wenn man davon ausgeht, dass mit einer Erhöhung der Belichtungszeit t die Beleuchtungsstärke E

abnimmt, sodass das Produkt E x t = H konstant bleibt, dann zeigt eine horizontale Gerade an, dass auch die Filmempfindlichkeit konstant bleibt. Diese Reziprozität ist bei normalen photographischen Schichten nur für ein kleines Zeitintervall erfüllt. Im Kurzzeitgebiet, bei Belichtungszeiten kleiner als etwa 1/1000s und daraus resultierenden grossen Beleuchtungsstärken (**H**igh **I**ntensity **R**eciprocity **F**ailure = HIRF) und im Gebiet der Langzeitbelichtungen, bei Belichtungszeiten grösser als 1 s und demnach kleinen Beleuchtungsstärken (**L**ow **I**ntensity **R**eciprocity **F**ailure = LIRF) nimmt die Empfindlichkeit ab, das Rezi prozitätsgesetz ist verletzt: wir haben einen Reziprozitäts**fehler**. Siehe Abb. 22:

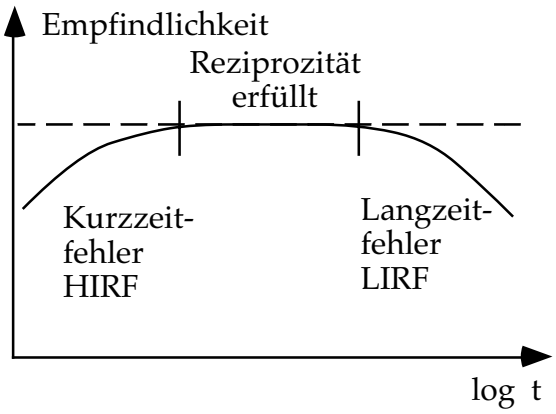


Abb. 22:

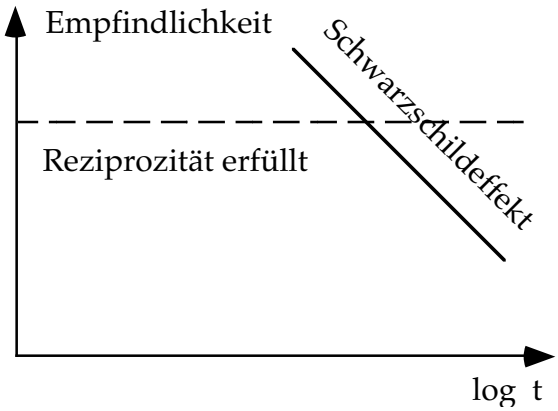


Abb. 23:

Die Kenntnisse von W.de Abney waren wenige Jahre später wieder in Vergessenheit geraten, sodass 1899 der Astronom K. Schwarzschild das Phänomen von Neuem entdecken konnte. Weil er sich von Berufes wegen nur mit geringen Beleuchtungsstärken befasste, schreibt er richtigerweise: "Je langzeitiger man belichtet, desto unempfindlicher wird die Schicht" (Langzeitfehler, LIRF). An anderer Stelle will er das Phänomen besser klären und schreibt: "Je kürzer man belichtet, um so **empfindlicher** wird die Schicht". Das ist nun aber sicher nicht der Fall. In der Abbildung 23 wird gezeigt, dass Schwarzschild vom Kurzzeitfehler nichts wusste und nur den Langzeitfehler kannte. Während der Reziprozitätsfehler das **gesamte Verhalten** einer photographischen Schicht – also von der Kurzzeit- bis zur Langzeitbelichtung – beschreibt, **versteht man unter Schwarzschild-Effekt, streng genommen, nur den Langzeitfehler**.

16.3. <u>Die Einflussfaktoren für den Reziprozitätsfehler:</u>

Der Reziprozitätsfehler wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst, zum Beispiel durch:

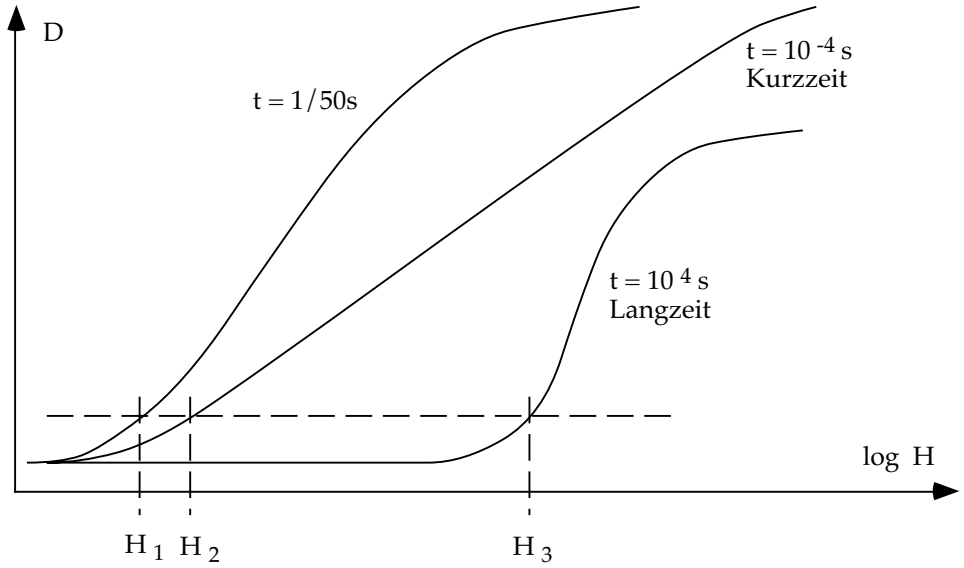
1. Die Belichtungsbedingungen (Belichtungsfaktoren)
2. Die Filmempfindlichkeit
3. Die Temperatur des Filmes bei der Belichtung

4. Die Emulsionsherstellung
5. Eine uniforme Vor- oder Nachbelichtung zur bildmässigen Belichtung.
6. Weitere Grössen, wie die Zusammensetzung des Entwicklers und die Art der Entwicklung u.s.w.

Einfluss der Belichtungsfaktoren auf die Schwärzungskurve von SW–Negativschichten:

Auf der Abbildung 24 sind schematisch drei Schwärzungskurven dargestellt. Sie stammen von einem einzigen SW–Material, das mit unterschiedlichen Belichtungszeiten, aber konstantem Belichtungsprodukt H belichtet wurde. Der Film mit den drei Belichtungen wurde in jedem Falle gleich entwickelt. Gegenüber einer mittleren Belichtungszeit (1/50s) zeigen die Kurzzeitbelichtung (1/10'000 s) und die Langzeitbelichtung (10'000s) signifikante Unterschiede:

Abb. 24:



Gegenüber einer Belichtung bei der grössten Empfindlichkeit (bei (1/50s) ist:

	bei Kurzzeitbel.	bei Langzeitbel.
- die Empfindlichkeit	geringer	geringer
- der Durchhang im Kurvenfuss	klein	gross
- die Steigung des geraden Teils	geringer	grösser
- die Kurvenschulter	wenig sichtbar	sehr ausgeprägt
- der gerade Kurventeil	erheblich grösser	kleiner

Diese Aussagen betreffen schwarz/weiss-Negativfilme. Bei Schwarz/weiss Papieren und bei Umkehrfarbfilmen stellt man meist fest, dass die Gradation bei Langzeitbelichtung flacher wird. Besonders die harten Papiergradationen

können durch eine Vergrösserung der Belichtungszeit um den Faktor 100 (also beispielsweise für den Uebergang der Belichtungszeit von 3s zu 300s) zwei bis drei Härtegrade einbüssen. Das heisst, dass sich eine Gradation 5 bei entsprechend langzeitiger Belichtung so wie eine Gradation 3 benimmt

16.4. Filmempfindlichkeit und Reziprozität:

In der Abbildung 25 wird das Reziprozitätsverhalten für eine empfindliche und eine unempfindliche photographische Schicht gezeigt. Bei der empfindlichen Schicht liegt das Empfindlichkeitsmaximum bei kurzen, bei der unempfindlichen jedoch im Bereich von längeren Belichtungszeiten. (Das Zeitintervall, in dem die Reziprozität erfüllt ist, ist bei den hochempfindlichen Schichten im allgemeinen kleiner als bei den unempfindlichen). Dies ergibt für den Verbraucher bei bildmässigen Aufnahmen eine merkwürdige Situation: Bei schlechten Lichtverhältnissen wählt man im allgemeinen intuitiv ein hochempfindliches Filmmaterial. Wenn nun aber trotzdem lange belichtet werden muss (siehe in Abb. 25 den Zeitbereich über 2s), dann liegt die Empfindlichkeit des hochempfindlichen Films unter derjenigen des niedrigempfindlichen, den man sinnvollerweise für diese Arbeit hätte wählen sollen. - Ebenso paradox sieht die Situation für die Kurzzeitbelichtung aus. Beim Arbeiten mit Blitzgeräten hat man im allgemeinen genügend "Licht", sodass man sich einen weniger empfindlichen Film (bessere Körnigkeit, Farbsättigung u.s.w.) "leisten kann". Gerade bei kurzen Belichtungszeiten aber wird der Kurzzeitfehler solcher Filme erheblich ins Gewicht fallen und unterbelichtete Bilder sind die Folge. Auch im graphischen Gewerbe werden gering empfindliche Lith-Filme in Photo- und Lichtsatzgeräten kurzzeitig belichtet, was zum eben beschriebenen Fehler führt. In diesem Falle war es die Aufgabe der Emulsionschemiker, Lösungen zu finden.

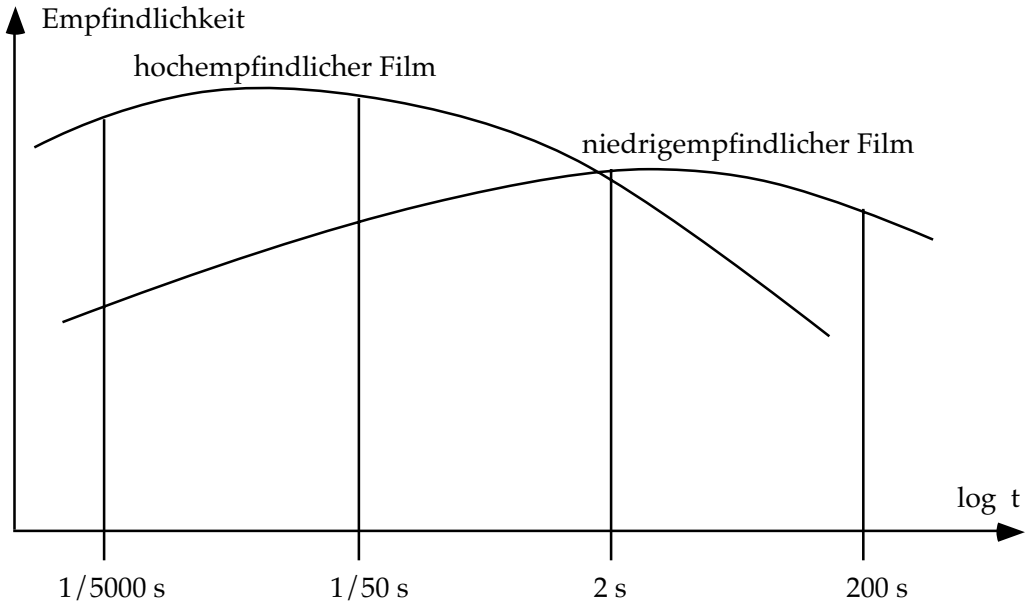


Abb. 25:

Wenn man bedenkt, dass moderne Farbfilme eine Vielzahl von übereinander gegossenen Schichten tragen, ist es klar, dass der Lichtstrom, der in ein solches Schichtpaket eindringt, erheblich geschwächt wird. Zuoberst im Schichtaufbau müssen die weniger empfindlichen, zuunterst die empfindlichsten Schichten liegen. Es ist somit verständlich, dass bei Kurz- und Langzeitbelichtungen bei diesen Filmen erhebliche Farbfehler auftreten müssen.

16.4.1 Der Reziprozitätsfehler und die Filmtemperatur bei der Belichtung:

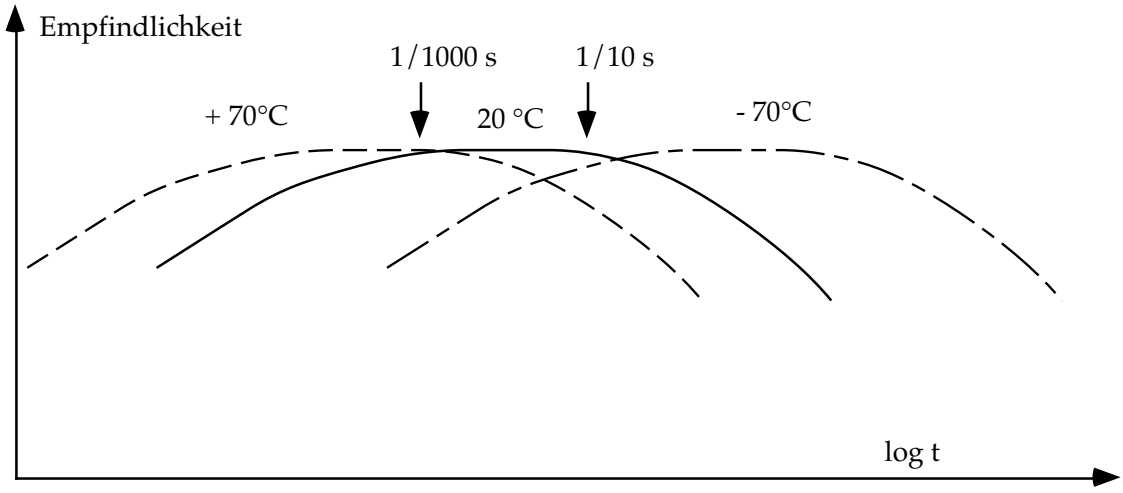


Abb. 26:

Wenn man ein absolut neutrales Objekt auf einen Farbumkehrfilm photographiert und von Aufnahme zu Aufnahme die Blende stets weiter schliesst und die Belichtungszeit dafür aber immer weiter vergrössert, stellt man fest, dass neben dem Empfindlichkeitsverlust immer stärker ausgeprägte "Farbstiche" sichtbar werden und "Farbkippen" auftritt. Man war deshalb anfangs der Sechzigerjahre über die Qualität der Farbbilder erstaunt, welche die Ansco-Techniker von Sternaufnahmen mit dem Mount-Palomar-Spiegel vorlegen konnten. Sie machten die Aufnahmen mit Kassetten, in denen die Filme auf -50° C gekühlt werden konnten und nutzten so die Eigenschaft photographischer Schichten aus, dass bei Erniedrigung der Temperatur das Optimum der Filmempfindlichkeit nach langen Belichtungszeiten verschoben wird. Ebenso wird bei Kurzzeitaufnahmen, etwa bei High-Speed-Filmaufnahmen mit bis zu 10^{12}Bildern/s, der Kurzzeitfehler eliminiert, indem man die photographische Schicht bis auf 180° C erhitzt. Dies wäre besonders bei älteren Licht- und Photosatzgeräten eine einfache technische Möglichkeit gewesen, die Schwierigkeiten mit den zu geringen Schichtempfindlichkeiten zu überwinden.

16.4.2. Die Verbesserung des Reziprozitätsfehlers durch eine entsprechende Emulsionsherstellung:

Die enorme Entwicklung der Emulsionstechnologie hat dazu beigetragen, dass die durch den Reziprozitätsfehler verursachten Schichteigenschaften die Arbeit mit photographischen Schichten selten störend beeinflussen. So hat man schon vor vielen Jahren gelernt, den Langzeitreziprozitätsfehler zu vermindern, indem man der flüssigen Emulsion für die chemische Reifung schwefelhaltige Substanzen beifügte. Damit konnte die Empfindlichkeit der Schicht ganz allgemein und der Langzeitfehler im Besonderen erheblich verbessert werden. - Ebenso lässt sich auch der Kurzzeitfehler verbessern, indem man der Emulsion z.B. Gold- und Iridiumsalze zusetzt.

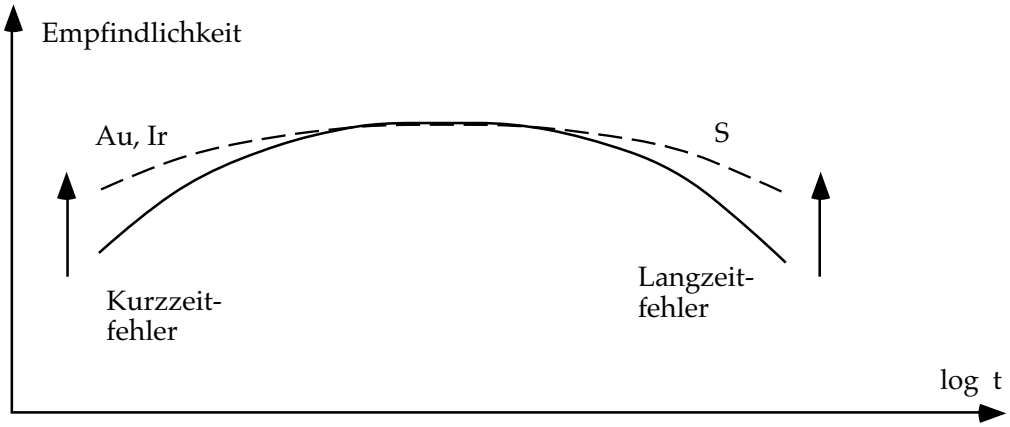


Abb. 27:

16.5. Verbesserung des Langzeitfehlers:

Wenn mit sehr geringen Beleuchtungsstärken bzw. mit sehr grossen Belichtungszeiten gearbeitet werden muss, dann ist ein erheblicher Langzeitfehler zu erwarten. Dieser kann durch die Hypersensibilisierung verbessert werden. Die heutige Technik besteht darin, das Aufnahmematerial vor der Aufnahme während einiger Zeit (1-3 Std) "auszuheizen" (baking). Die besten Resultate erhält man, wenn dies unter einer reduzierenden Atmosphäre von Wasserstoff-Gas (H_2) geschieht. Statt des explosiven Wasserstoffes kann man auch sig. Formiergas (7% Wasserstoff H_2 in Stickstoff N_2) nehmen. Diese Technik wird vor allem in der Astro-Photographie mit grossem Erfolg angewandt.

16.6. Photographische Schichten ohne Reziprozitätsfehler?

An sich zeigt jedes photographische Material den Reziprozitätsfehler, sowohl bei der Belichtung mit Licht als auch bei der Bestrahlung mit anderen möglichen Strahlenarten. Um so interessanter sind deshalb die Ausnahmen.

Bei der Bestrahlung der Schichten mit Röntgenstrahlen weiss man, dass beim Aufbau der Schwärzungskurve (Negativteil) kein Reziprozitätsfehler auftritt, während er beim Abbau (im Solarisationsgebiet) wieder erscheint. Belichtet man die gleiche Schicht mit Licht, dann ist der Reziprozitätsfehler im Negativteil der Schwärzungskurve ja bestens bekannt, er fehlt aber im Solarisationsgebiet der Schwärzungskurve.
Die Ursache des Reziprozitätsfehlers: Die Entstehung des latenten Bildes ist ein Mehrquantenprozess und der Urkeim ist nicht stabil genug.

16.6.1. Das lichtempfindliche Material:

Die lichtempfindlichen Stoffe in photographischen Schichten sind Silberhalogenide: Silberchlorid (AgCl), Silberbromid (AgBr) und Mischkristalle aus Silberchlorid mit Bromid (AgClBr) und Silberbromid mit Jodid (AgBrJ). Auch Mischkristalle der Form AgClBrJ sind bekannt. Es handelt sich dabei immer um **Ionenkristalle**. Das Silberatom hat im Gitterverband ein Elektron an das Halogenatom abgegeben. Das Silberion ist deswegen positiv, das Halogenion dagegen negativ geladen.

16.6.2. Entstehung des latenten Bildes:

Die Entstehung des latenten Bildes soll hier nur soweit behandelt werden, wie dies zum Verständnis des Reziprozitätsfehlers nötig ist.
Bei der Belichtung entsteht in einem Zweistufenprozess im Silberhalogenid elementares Silber, das wir "latentes Bild" nennen. In einem ersten Schritt, dem **elektronischen Teilprozess**, reagiert das ankommende Lichtquant mit dem Halogenion und setzt dabei ein Elektron frei. Das Halogenion wird dabei zum Halogenatom. Beispiel:

$$Br^- + h\nu \longrightarrow e^- + Br^o$$

(Bromion) (Lichtquant) (Elektron) (Bromatom, das auch Defektelektron genannt wird)

Das bei der Belichtung enstandene Elektron bewegt sich frei im Kristall, bis es an einer geeigneten Kristallstelle gefangen wird. Solche Stellen sind Elektronenfallen oder Störstellen des Kristalls. Bereits bei der Emulsionsherstellung sorgt man dafür, dass einige wenige solcher Störstellen an der Kristalloberfläche entstehen. Nachdem das Elektron gefangen ist, wandert ein nicht in den Gitterverband eingebundenes, freibewegliches Silberion (Zwischengittersilberion) relativ langsam zur negativ geladenen Störstelle und kann dort entladen werden. Aus dem Silberion entsteht jetzt ein erstes **Silberatom**. Dieses eine Silberatom nennt man **Urkeim** des latenten Bildes.

Den zweiten Schritt des Elementarprozesses, wenn ein Silberion eingefangen und zu elementarem Silber reduziert wird, nennen wir den **ionischen Teilschritt** der Latentbildentstehung.

Ag^+ (Silberion) + e^- (Elektron) ———> Ag^o (elementares Silberatom)

Nach diesem Prozess gibt es in einem Silberhalogenidkristall ein Silberion inmitten von sehr vielen Silberhalogenid-Ionenpaaren (10^8 bis 10^9). Wird die Belichtung nun weiter fortgesetzt, dann entsteht ein nächstes Elektron, das sich meist an die Stelle des bereits gebildeten ersten Silberatoms anlagert. Kommt, wie zuvor, ein freies Silberatom an die gleiche Stelle, wird es sich entladen und wir erhalten so ein Aggregat von **zwei Silberatomen**, den sogenannten **Subkeim** des latenten Bildes. Wenn der Prozess gleich weiterläuft, erhält man mit dem **Dreier-Aggregat** den **Vorkeim** und mit dem **Vierer-Aggregat** das eigentliche **latente Bild**. Es müssen - wie bekannt - vier oder mehr Silberatome im gleichen Silberaggregat vorhanden sein, damit die Entwicklung durch diesen Latentbildkeim katalysiert werden kann. Kleinere Silberaggregate haben diese katalytische Wirkung noch nicht. Würde man eine unbelichtete Schicht beliebig lange in den Entwickler legen, dann würden allerdings alle Silberionen eines Silberhalogenidkristalles zu Silber reduziert:

Ag^+ + e^- (Entwickler!) ———> Ag^o

Wenn ein latentes Bild vorhanden ist, dann läuft die Reduktion (Entwicklungsprozess) in einem Bruchteil der Zeit ab, die ohne Belichtung nötig ist.

16.6.3. <u>Die Ursache des Reziprozitätsfehlers:</u>

Wie oben beschrieben wurde, entsteht das latente Bild zuerst aus dem nicht stabilen Urkeim (Ag_1) über die stabilen Folgestufen wie Subkeim (Ag_2) und Vorkeim (Ag_3) zum Ag_4.

16.7. <u>Der Langzeitfehler:</u>

Bei Aufnahmen mit geringer Beleuchtungsstärke werden Langzeitbelichtungen nötig, damit man ein richtig belichtetes Bild erhält. Eine Belichtung bei kleiner Beleuchtungsstärke bedeutet für den einzelnen Silberhalogenidkristall, dass das Zeitintervall zwischen zwei Quanten-Treffern gross wird. Das einmal gebildete einzelne Silberatom, der Urkeim, hat bei Raumtemperatur nur eine Lebensdauer von Bruchteilen einer Sekunde, weil er thermisch zerfällt:

Ag^o (Urkeim) + Wärmeenergie ———> Ag^+ (Silberion) + e^- (Elektron)

Aus dem Urkeim, dem einen Silberatom, ist damit wieder ein Silberion und ein Elektron entstanden. Der Zerfall des Urkeims tritt ein, noch bevor ein weiteres Elektron und ein weiteres Zwischengittersilberion diesen Urkeim zum Subkeim anwachsen lassen. Wenn der Urkeim thermisch laufend zerfällt, dann kann der stabile Subkeim - und damit auch das latente Bild - nie oder nur mit einer geringen Wahrscheinlichkeit entstehen.
Das latente Bild einer Langzeitbelichtung entsteht primär auf der **Oberfläche** der Emulsionskristalle.

16.8. Der Kurzzeitfehler:

Kurzzeitaufnahmen werden nötig, wenn die Beleuchtungsstärke einer Szene gross ist. Bei Kurzzeitaufnahmen wird der einzelne Silberhalogenidkristall von vielen Lichtquanten getroffen. Fast gleichzeitig entstehen viele Elektronen, die sich an verschiedene im Kristall vorhandenen Störstellen anlagern und dann warten müssen, bis die langsam laufenden Silberionen (Zwischengittersilberionen) angekommen sind, damit sie diese entladen können. Zwei Elektronen können sich nicht in die gleiche Elektronenfalle setzen, weil ihre gleiche negative Ladung dies verbietet. Es entstehen in der Folge sehr viele Urkeime, die thermisch instabil sind und nach dem früher angegebenen Schema zerfallen. Es ist das grosse Angebot von gleichzeitig eintreffenden Lichtquanten, welches zu den vielen Urkeimen führt. Weil die Entladungszeit von der relativ grossen Wanderungszeit der Silberionen abhängt, erreichen nur wenige Urkeime in der kurzen Belichtungszeit das Latentbildstadium.
Das latente Bild einer Kurzzeitbelichtung entsteht sowohl auf der **Oberfläche** wie im **Innern der Emulsionskristalle**.

16.9. Die graphische Darstellung des Reziprozitätsfehlers:

Das Kron'sche Diagramm:

Im bisherigen Text wurde eine freie Darstellungsform für das Reziprozitätsverhalten photographischer Schichten gewählt, indem man die Empfindlichkeit der Schicht gegen die Belichtungszeit aufgetragen hat. International hat man sich aber auf das Kron'sche Diagramm geeinigt. (Abbildung 1.9). E. Kron, ein Schüler von Schwarzschild, hat 1913/14 vorgeschlagen, ein Diagramm zu wählen, in dem der Logarithmus der Belichtung H in Luxsekunden (logH lx.s) gegen den Logarithmus der Beleuchtungsstärke E in Lux (logE lx) aufgezeichnet wird. (In einzelnen Fällen wird log H auch gegen den Logarithmus der Belichtungszeit t in Sekunden (log t s) angegeben). Als Parameter wird die kritische Dichte des Materials aufgetragen, welche als Empfindlichkeitskriterium gewählt wurde. Links im Diagramm findet man üblicherweise die kleinen Beleuchtungsstärken und

damit auch die langen Belichtungszeiten, rechts die grossen Beleuchtungsstärken und die kurzen Belichtungszeiten. Man beachte, dass die Punkte konstanter Belichtungszeit in dieser Darstellung auf Geraden liegen, die unter 45° ins Diagramm eingezeichnet werden müssen. Photographische Schichten ohne Reziprozitätsfehler werden in diesem Diagramm durch eine horizontale Gerade chararakterisiert. Die Gerade hochempfindlicher Filme liegt bei geringen, jene von wenig empfindlichen Filmen bei grossen logH-Werten. Materialien mit einem Reziprozitätsfehler ergeben Darstellungen wie schematisch unten angedeutet.

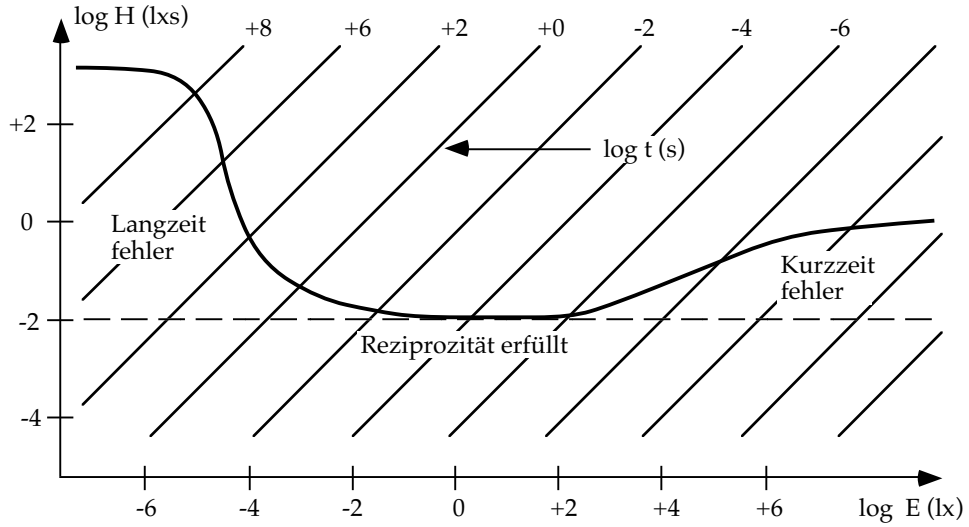


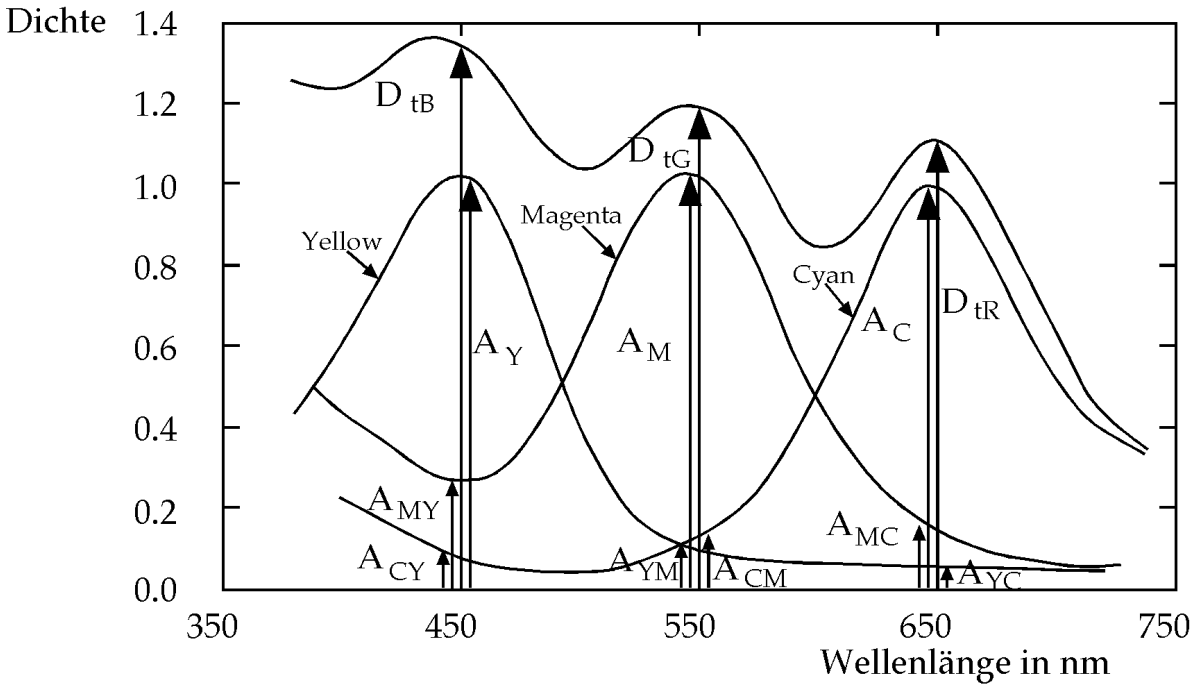
Abb. 27: Reziprozitzätsdiagramm nach KRON (schematisch)

Anhang

Ausführliches Kapitel über Farbsensitometrie:

Die Untersuchung der lichtinduzierten Reaktion von Farbmaterialien wird Farbsensitometrie genannt und befasst sich mit dem Zusammenhang zwischen der Belichtung, die auf das Material einwirkt, und den nach der Verarbeitung resultierenden Farbstoffmengen. Photographische Schichten reagieren innerhalb gewisser Grenzen proportional zur Belichtung H, dem Produkt aus der Beleuchtungsstärke E (gemessen in lux) und der Zeit t: $H=E \cdot t$.
Das Resultat einer Belichtung sind bestimmte Mengen dreier Farbstoffe, welche das fertige Bild aufbauen. Obwohl jeder Farbstoff unabhängig von den anderen Licht absorbiert, kann direkt nur die Summe der Absorption gemessen werden, da die Schichten nicht voneinander trennbar sind. Mit Hilfe von Spektraldensitometern kann an beliebigen Stellen des Bildes und bei beliebigen Wellenlängen zwischen 380 und 730 nm die Transmission oder Remission und daraus abgeleitete Grössen gemessen werden. Transmission ist definiert als $T = I_t/I_0$ und Remission entsprechend als $R= I_r/I_0$. Dabei bezeichnet I_0 die auf Film oder Papier auftreffende Lichtstärke (gemessen in candela), I_t die durchgelassene (Film) und I_r die reflektierte Lichtstärke (Papier). Die Transmissionsdichte wird definiert als $D_t = -\log(T)$ und die Remissionsdichte als $D_r = -\log(R)$. Auch als **integrale Dichte** bezeichnet, ist D_t gleich der Summe der **analytischen Dichten** A_Y, A_M, A_C, die den Dichten der einzelnen Farbstoffe entsprechen (Y=Yellow, M=Magenta, C=Cyan):
$D_t(\lambda) = A_Y(\lambda) + A_M(\lambda) + A_C(\lambda)$. Dies gilt aber nicht für D_r !
Als analytische Dichten im engeren Sinn, werden die Absorptionen im Maximum der jeweiligen analytischen Dichtekuven verstanden; beim gelben Farbstoff um 450 nm, bei Magenta um 550 nm und bei Cyan um 650 nm: $A_B = A_Y$ (~450 nm), $A_G = A_M$ (~550 nm), $A_R = A_C$ (~650 nm). Die Illustration auf der nächsten Seite möge dies verdeutlichen.
Die analytischen Transmissionsdichte $A_F(\lambda)$ (F stehe für Y,M od. C) ist im Idealfall bei allen Wellenlängen λ proportional der jeweiligen Farbstoffkonzentration (Beer-Lambert'sches-Gesetz):
$A_F(\lambda) = \varepsilon_F(\lambda) \cdot d \cdot c_F$ ($\varepsilon_F(\lambda)$ ist der Extinktionskoeffizient, d die Dicke der Schicht). Das Verhältnis der $A_F(\lambda)$ bei ver schiedenen Wellenlängen, λ_1 und λ_2, ist konstant:

$$A_F(\lambda_1)/A_F(\lambda_2) = \varepsilon_F(\lambda_1)/\varepsilon_F(\lambda_2) = a.$$



Aus obiger Illustration wird ersichtlich, dass

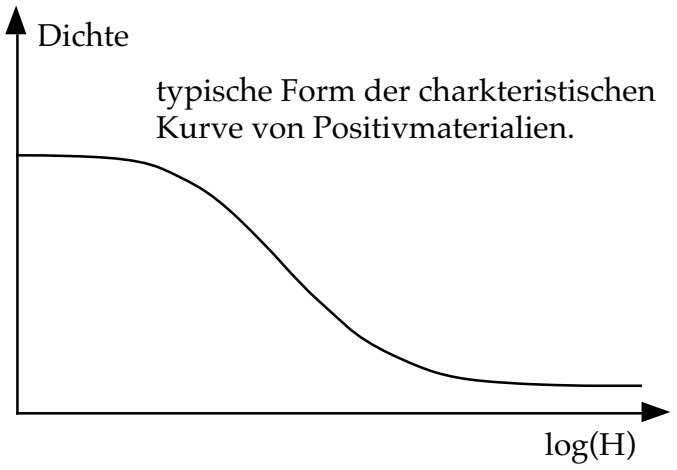
$$D_{tB} = A_B + A_{MB} + A_{CB}$$
$$D_{tG} = A_{YG} + A_G + A_{CG}$$
$$D_{tR} = A_{YR} + A_{MR} + A_R$$

weil nun gilt, dass $A_{YG} / A_B = a_{yg}$, $A_{YR} / A_B = a_{yr}$, $A_{MB} / A_G = a_{mb}$, $A_{MR} / A_G = a_{mr}$, $A_{CB} / A_R = a_{cb}$, $A_{CG} / A_R = a_{cg}$, kann man schreiben:

$$\begin{pmatrix} D_{tB} \\ D_{tG} \\ D_{tR} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & a_{my} & a_{cy} \\ a_{ym} & 1 & a_{cm} \\ a_{yc} & a_{mc} & 1 \end{pmatrix}}_{\mathbf{a}} \cdot \begin{pmatrix} A_Y \\ A_M \\ A_C \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \begin{pmatrix} A_Y \\ A_M \\ A_C \end{pmatrix} = \mathbf{a}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} D_{tB} \\ D_{tG} \\ D_{tR} \end{pmatrix}$$

Die analytischen Dichten A_B , A_G , A_R können also mit der, für ein bestimmtes Farbstoff-Tripel typischen Matrix $\mathbf{a}^{-1}$ aus den einfach messbaren Grössen D_{tB} (=D_t (450 nm)), D_{tG} (=D_t (550 nm)), D_{tR} (=D_t (650 nm)) berechnet werden.
Dieses Berechnungsverfahren wird vor allem beim Gebrauch einfacher Densitometer benötigt, welche mit Hilfe von additiven Filtern (d.h. Filtern, die jeweils nur blaues, grünes oder rotes Licht durchlassen) nur drei integrale Dichten (D_{tB} , D_{tG} , D_{tR}) messen.
Mit Hilfe der Sensitometrie soll meist der Zusammenhang zwischen dem Logarithmus der Belichtung, $\log_{10}(H)$ und den resultierenden integralen oder analytischen Dichten ermittelt werden. Die charakteristische Kurve stellt diesen Zusammenhang graphisch dar, indem die Dichte gegen $\log_{10}(H)$ aufgetragen wird. Sie hat üblicherweise eine S-Form mit einem mehr oder weniger linearen

mittleren Bereich, dessen Steigung ein Mass für die Gradation (Kontrast) des Materials ist. Die relative Verschiebung des Abfalles entlang der Abszisse ($\log_{10}(H)$) ist ein Mass für die Empfindlichkeit des Materials.



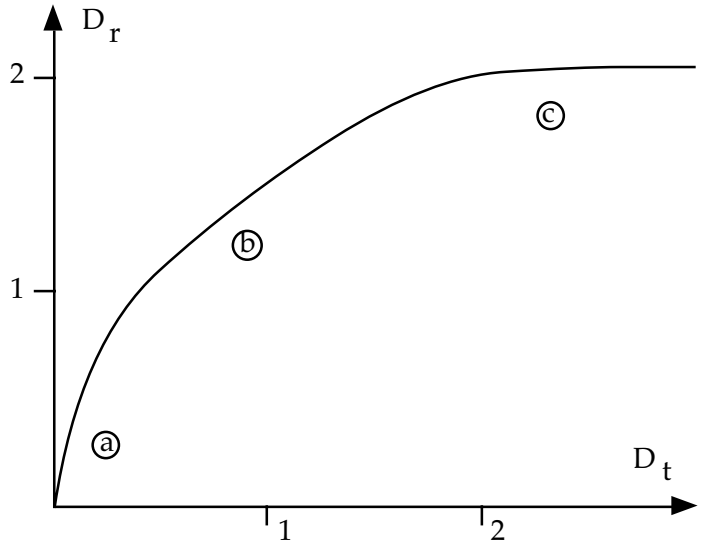
Die charakteristische Kurve einer einzelnen Schicht kann aufgenommen werden indem eine Belichtung vorgenommen wird, welche möglichst nur diese Schicht anspricht (im allgemeinen mit schmalbandigem Filter erreichbar). Die Variation der Belichtung $H=E \cdot t$ kann über die Beleuchtungsstärke E oder die Zeit t erfolgen. Meist erfolgt sie über Änderung von E (technisch einfache Abschwächung der Lichtstärke mit Graufiltern, grosse Reproduzierbarkeit). Hierzu wird häufig ein gestufter Graukeil eingesetzt, d.h. üblicherweise ein Schwarzweissfilm, der aus stufenweise dunklerwerdenden Feldern besteht, deren Transmissionsdichte linear zunimmt und deren Absorption über den ganzen Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes konstant ist (Farbneutralität). Um nicht auf eine abbildende Optik angewiesen zu sein, wird das zu testende Material in Kontakt mit dem Keil belichtet. Es kann gezeigt werden, dass die $\log_{10}(H)$-Werte unter den jeweiligen Feldern in einfacher, linearer Beziehung zu den Dichten D_t des Keils stehen:

$$\log_{10}(H) = \log_{10}(E_K \cdot t) - D = \text{const} - D$$

Dabei stellt E_K die Beleuchtungsstärke auf dem Keil dar. Die Lichtquelle und deren Filterung wird entsprechend dem Einsatzbereich des Materials gewählt. Bei Kopiermaterialien ist es meist eine Halogenlampe. Bei sensitometrischen Untersuchungen ist eine reproduzierbare und für das Material typische Entwicklung ebenfalls wichtig. Die physikalischen Parameter der Verarbeitung (Temperatur der Bäder, deren Einwirkungsdauer und Agitation) sind ebenso genau einzuhalten, wie die chemischen (Zusammensetzung der Bäder). Wenn Entwicklungsmaschinen (Prozessoren) verwendet werden, die mit regenerierten Bädern arbeiten (nach jeder verarbeiteten Aufnahme wird den Bädern automatisch eine relativ kleine Menge Regeneratorlösung zugegeben),

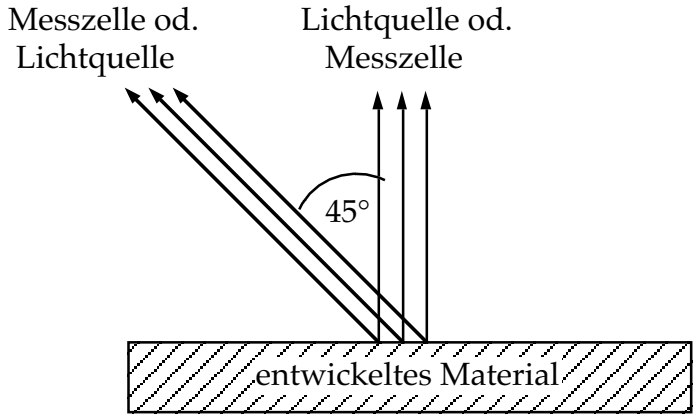
muss man sicherstellen, dass sich alle Bäder im typischen Betriebsgleichgewicht befinden. Ihre Zuammensetzung darf sich bei gleichbleibendem Durchsatz (verarbeitetes Material pro Zeiteinheit) auch langfristig nicht ändern.

Transmissionsdichten stehen als Messwerte nur bei der Untersuchung von transparenten Materialien (Filme, Folien) zur Verfügung. Wenn nur Remissionsdichten gemessen werden können (Aufsichtsprintmaterialien), kann man diese mit Hilfe der Williams-Clapper-Beziehung in Transmissionsdichten umrechnen [3]. Die Beziehung zwischen Transmission und Remission ist allerdings recht komplex, ist sie doch von der Beschaffenheit des reflektierenden Schichtträgers, von den Brechungsindizes der einzelnen Schichten, von der Oberflächenstruktur des Materials und schliesslich sehr stark vom Winkel des auftreffenden Lichtes abhängig. Die Brechungsindizes bestimmen die inneren, zwischen den Schichten auftretenden Reflexionen, die Oberflächenstruktur die Oberflächenreflexion. Die Abhängigkeit der Remissionsdichte (D_r) einer Schicht auf weiss reflektierendem Schichtträger von der Transmissionsdichte (D_t) der gleichen Schicht auf transparentem Schichtträger hat folgendes Aussehen:



Bei kleinen Werten nimmt D_r wegen zahlreichen inneren Reflexionen stärker zu als die entsprechende D_t (a). Mit zunehmender Absorption durch höhere Farbstoffmengen nehmen diese inneren Reflexionen allmählich ab, sodass die D_r proportional zur D_t zunimmt (b). Bei noch höheren Werten wird der konstante Beitrag vom direkt an der Oberfläche reflektiertem Licht immer wichtiger und limitiert die D_r schliesslich bei einem maximalen Wert, der dann unabhängig von weiter zunehmender Absorption in der Schicht konstant bleibt (c). Die höchsten Remissionsdichten erreichen Materialien mit hochglänzender Oberfläche, die deshalb bei sensitometrischen Untersuchungen nach

Möglichkeit auch eingesetzt werden. Remissionsdichten werden entsprechend ISO-Normen mit fixer Geometrie der Lichtstrahlen gemessen. Entweder steht der einfallende Strahl senkrecht zur Oberfläche, wobei der in einem 45° - Winkel von der Oberfläche reflektierte Strahl gemessen wird, oder es wird umgekehrt unter einem Winkel von 45° zur Oberfläche eingestrahlt und senkrecht dazu gemessen:



Bei der Williams-Clapper-Beziehung handelt es sich um die Abhängigkeit zwischen D_t und D_r eines Modelles (ideal transparente Schichten und Zwischenschichten), das sich nur durch die bestimmbaren Grössen der maximalen Remissionsdichte und der Dichte der unbegossenen Basis an das jeweilige Material anpassen lässt. Da sich jedes reale Material auf Grund verschiedener Zusammensetzung und Anzahl der Schichten etwas anders als dieser Modellfall verhält, sind die aus den gemessenen D_r errechneten D_t unweigerlich mit einem gewissen Fehler behaftet.
Die Voraussetzung, dass das oben beschriebene Berechnungsverfahren für analytische Dichten genaue Werte liefert, ist neben dem Gebrauch von einwandfreien Transmissionsdichten die Gültigkeit des Beer-Lambert'schen Gesetzes. Dieses stimmt bei chromogenen Materialien meist sehr gut. Bei SFB-Materialien treten aber Abweichungen wegen der Aggregation der benutzten Azo-Farbstoffe bei höheren Konzentrationen auf. Besonders Cyan ist in dieser Hinsicht empfindlich. Das Absorptionsmaximum verschiebt sich bei höher werdenen Konzentrationen in Richtung kürzerer Wellenlänge.
Es gibt verschiedene Verfahren, die beim Vorliegen von fehlerbehafteten Transmissionsdichten (sei es, weil das Beer-Lamert'sche Gesetzt nur schlecht stimmt oder weil sie aus Remissionsdichten berechnet wurden) bessere Resultate (analytische Dichten) liefern, als das oben beschriebene Vorgehen mit drei Stützstellen. Dabei genügen aber nicht nur drei Messwerte; am besten steht ein ganzes Spektrum zur Verfügung, das von einem Spektraldensitometer gemessen wird (z.B. alle 10 nm innerhalb von 380-730 nm ein Messwert).

Literaturliste:

Eynard Raymond A. (ed.): Color: Theory and Imaging Systems
Society of Photographic Scientists and Engineers 1973

Gernsheim Helmut: Geschichte der Photographie: Die ersten hundert Jahre Propyläen Verlag 1983

Hubel David H.: Eye Brain and Vision
Scientific American Library 1988

*Jacobson Ralph E, Ray Sidney F., Attridge Geoffrey G.:
The Manual of Photography
Focal Press Eighth Edition 1988

James T.H. (ed.): The Theory of the Photographic Process
Fourth edition 1977

Judd Deane B., Wyszecki Gunter: Color in Business, Science and Industry
John Wiley and Sons 1975

Koshofer Gert: Farbfotogrfie
Band 1: Alte Verfahren
Band 2: Neue Verfahren
Band 3: Lexikon der Verfahren, Geräte und Materialien
Verlag Laterna Magica 1981

Koshofer Gert: Das Filmdatenbuch
vfv-Verlag für Foto, Film und Video, 1993

Marchesi Jost J.: Farbphotographie
Verlag Photographie 1982

Schläpfer K. im Farbmetrik in der Reproduktionstechnik und Mehrfarbendruck
Herausgeber: UGRA (Verein zur Förderung wissenschaftlicher Untersuchungen in der graphischen Industrie 2. Auflage 1993

*Solf Kurt Dieter: Fotografie: Grundlagen–Technik–Praxis
Fischer Taschenbuch Verlag 1990

sehr preiswert (24.80 Fr.)

Spencer's D. A.: Colour Photography in Practice
Focal Press 1975

*Stroebel Leslie, Compton John, Current Ira, Zakia Richard:
Basic Photographic Materials and Processes
Focal Press 1990
"Studenten–Ausgabe"

*Stroebel, Compton, Current, Zakia: Photographic Materials and Processes
Focal Press 1986
"Dozenten–Ausgabe"

*Sturge John M., Walworth Vivian, Allan Shepp (eds.):
Imaging Processes and Materials
Neblette's eighth edition 1989

Tillmanns Urs: Foto Lexikon
Verlag Photographie 1991

Weber Ernst A.: Farbphotopraktikum
Walter de Gruyter 1971

Zwimpfer Moritz: Farbe, Licht, Sehen, Empfinden: Eine elementare Farbenlehre in Bildern Verlag: Paul Haupt 1985

The Focal Encyclopedia of Photography, Desk Edition, Focal Press, 1982

*** für Nebenfach–StudentInnen als Lehrbuch geeignet**

Frequently Asked Questions about Colour

Charles A. Poynton

www.inforamp.net/~poynton
poynton@inforamp.net

tel +1 416 486 3271
fax +1 416 486 3657

This FAQ is intended to clarify aspects of colour that are important to computer graphics, image processing, video, and the transfer of digital images to print.

I assume that you are familiar with intensity, luminance (CIE Y), lightness (CIE L*), and the nonlinear relationship between CRT voltage and intensity (gamma). To learn more about these topics, please read the companion *Frequently Asked Questions about Gamma* before starting this.

This document is available on the Internet from Toronto at:

<ftp://ftp.inforamp.net/pub/users/poynton/doc/colour/>

It is mirrored to space provided by Fraunhofer Computer Graphics in Rhode Island, U.S.A. at <ftp://elaine.crcg.edu/pub/doc/colour/>, and in Darmstadt, Germany at <ftp://ftp.igd.fhg.de/pub/doc/colour/>.

I retain copyright to this note. You have permission to use it, but you may not publish it.

Table of Contents

1 What is colour? 3
2 What is intensity? 3
3 What is luminance? 3
4 What is lightness? 4
5 What is hue? 4
6 What is saturation? 4
7 How is colour specified? 4
8 Should I use a colour specification system for image data? 5
9 What weighting of red, green and blue corresponds to brightness? 5
10 Can blue be assigned fewer bits than red or green? 6
11 What is “luma”? 6
12 What are CIE XYZ components? 7
13 Does my scanner use the CIE spectral curves? 7
14 What are CIE x and y chromaticity coordinates? 7

© 1995/05/28 Charles A. Poynton. All rights reserved.

15 What is white? 8
16 What is colour temperature? 8
17 How can I characterize red, green and blue? 8
18 How do I transform between CIE XYZ and a particular set of RGB primaries? 9
19 Is RGB always device-dependent? 10
20 How do I transform data from one set of RGB primaries to another? 10
21 Should I use RGB or XYZ for image synthesis? 11
22 What is subtractive colour? 11
23 Why did my grade three teacher tell me that the primaries are red, yellow and blue? 11
24 Is CMY just one-minus-RGB? 11
25 Why does offset printing use black ink in addition to CMY? 12
26 What are colour differences? 12
27 How do I obtain colour difference components from tristimulus values? 14
28 How do I encode $Y'P_BP_R$ components? 14
29 How do I encode $Y'C_BC_R$ components from R'G'B' in [0, +1]? 15
30 How do I encode $Y'C_BC_R$ components from computer R'G'B' ? 15
31 How do I encode $Y'C_BC_R$ components from studio video? 16
32 How do I decode *R'G'B'* from PhotoYCC™? 17
33 Will you tell me how to decode *Y'UV* and *Y'IQ*? 17
34 How should I test my encoders and decoders? 17
35 What is perceptual uniformity? 18
36 What are HSB and HLS? 19
37 What is true colour? 19
38 What is indexed colour? 19
39 I want to visualize a scalar function of two variables. Should I use RGB values corresponding to the colours of the rainbow? 20
40 What is dithering? 21
41 How does halftoning relate to colour? 21
42 What's a colour management system? 21
43 How does a CMS know about particular devices? 22
44 Is a colour management system useful for colour specification? 22
45 I'm not a colour expert. What parameters should I use to code my images? 23
46 References 23
47 Contributors 24

1 What is colour?

Colour is the perceptual result of light in the visible region of the spectrum, having wavelengths in the region of 400 nm to 700 nm, incident upon the retina. Physical power (or *radiance*) is expressed in a *spectral power distribution* (SPD), often in 31 components each representing a 10 nm band.

The human retina has three types of colour photoreceptor *cone* cells, which respond to incident radiation with somewhat different spectral response curves. A fourth type of photoreceptor cell, the *rod*, is also present in the retina. Rods are effective only at extremely low light levels (colloquially, *night vision*), and although important for vision play no role in image reproduction.

Because there are exactly three types of colour photoreceptor, three numerical components are necessary and sufficient to describe a colour, providing that appropriate spectral weighting functions are used. This is the concern of the science of *colorimetry*. In 1931, the Commission Internationale de L'Éclairage (CIE) adopted standard curves for a hypothetical *Standard Observer*. These curves specify how an SPD can be transformed into a set of three numbers that specifies a colour.

The CIE system is immediately and almost universally applicable to self-luminous sources and displays. However the colours produced by reflective systems such as photography, printing or paint are a function not only of the colourants but also of the SPD of the ambient illumination. If your application has a strong dependence upon the spectrum of the illuminant, you may have to resort to spectral matching.

Sir Isaac Newton said, "Indeed rays, properly expressed, are not coloured." SPDs exist in the physical world, but colour exists only in the eye and the brain.

2 What is intensity?

Intensity is a measure over some interval of the electromagnetic spectrum of the flow of power that is radiated from, or incident on, a surface. Intensity is what I call a *linear-light* measure, expressed in units such as watts per square meter.

The voltages presented to a CRT monitor control the intensities of the colour components, but in a nonlinear manner. CRT voltages are not proportional to intensity.

3 What is luminance?

Brightness is defined by the CIE as *the attribute of a visual sensation according to which an area appears to emit more or less light*. Because brightness perception is very complex, the CIE defined a more tractable quantity *luminance* which is radiant power weighted by a spectral sensitivity function that is characteristic of vision. The *luminous efficiency* of the Standard Observer is defined numerically, is everywhere positive, and peaks at about 555 nm. When an SPD is integrated using this curve as a weighting function, the result is *CIE luminance*, denoted Y.

The magnitude of luminance is proportional to physical power. In that sense it is like intensity. But the spectral composition of luminance is related to the brightness sensitivity of human vision.

Strictly speaking, luminance should be expressed in a unit such as candelas per meter squared, but in practice it is often normalized to 1 or

100 units with respect to the luminance of a specified or implied *white reference*. For example, a studio broadcast monitor has a white reference whose luminance is about 80 cd•m^{-2}, and $Y = 1$ refers to this value.

4 What is lightness?

Human vision has a nonlinear perceptual response to brightness: a source having a luminance only 18% of a reference luminance appears about half as bright. The perceptual response to luminance is called *Lightness*. It is denoted L^* and is defined by the CIE as a modified cube root of luminance:

$$L^* = 116\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - 16; \qquad 0.008856 < \frac{Y}{Y_n}$$

Y_n is the luminance of the white reference. If you normalize luminance to reference white then you need not compute the fraction. The CIE definition applies a linear segment with a slope of 903.3 near black, for $(Y/Y_n) \leq 0.008856$. The linear segment is unimportant for practical purposes but if you don't use it, make sure that you limit L^* at zero. L^* has a range of 0 to 100, and a "delta L-star" of unity is taken to be roughly the threshold of visibility.

Stated differently, lightness perception is roughly logarithmic. An observer can detect an intensity difference between two patches when their intensities differ by more than one about percent.

Video systems approximate the lightness response of vision using *R'G'B'* signals that are each subject to a 0.45 power function. This is comparable to the 1⁄3 power function defined by L^*.

5 What is hue?

According to the CIE [1], *hue is the attribute of a visual sensation according to which an area appears to be similar to one of the perceived colours, red, yellow, green and bue, or a combination of two of them*. Roughly speaking, if the dominant wavelength of an SPD shifts, the hue of the associated colour will shift.

6 What is saturation?

Again from the CIE, *saturation is the colourfulness of an area judged in proportion to its brightness*. Saturation runs from neutral gray through pastel to saturated colours. Roughly speaking, the more an SPD is concentrated at one wavelength, the more saturated will be the associated colour. You can desaturate a colour by adding light that contains power at all wavelengths.

7 How is colour specified?

The CIE system defines how to map an SPD to a *triple* of numerical components that are the mathematical coordinates of colour space. Their function is analagous to coordinates on a map. Cartographers have different map projections for different functions: some map projections preserve areas, others show latitudes and longitudes as straight lines. No single map projection fills all the needs of map users. Similarly, no single colour system fills all of the needs of colour users.

The systems useful today for colour specification include CIE XYZ, CIE xyY, CIE L*u*v* and CIE L*a*b*. Numerical values of hue and saturation are not very useful for colour specification, for reasons to be discussed in section 36.

A colour specification system needs to be able to represent any colour with high precision. Since few colours are handled at a time, a specification system can be computationally complex. Any system for colour specification must be intimately related to the CIE specifications.

You can specify a single "spot" colour using a *colour order system* such as Munsell. Systems like Munsell come with swatch books to enable visual colour matches, and have documented methods of transforming between coordinates in the system and CIE values. Systems like Munsell are not useful for image data. You can specify an ink colour by specifying the proportions of standard (or secret) inks that can be mixed to make the colour. That's how PANTONE™ works. Although widespread, it's proprietary. No translation to CIE is publicly available.

8 Should I use a colour specification system for image data?

A digitized colour image is represented as an array of pixels, where each pixel contains numerical components that define a colour. Three components are necessary and sufficient for this purpose, although in printing it is convenient to use a fourth (black) component.

In theory, the three numerical values for image coding could be provided by a colour specification system. But a practical image coding system needs to be computationally efficient, cannot afford unlimited precision, need not be intimately related to the CIE system and generally needs to cover only a reasonably wide range of colours and not all of the colours. So image coding uses different systems than colour specification.

The systems useful for image coding are linear RGB, nonlinear *R'G'B'*, nonlinear CMY, nonlinear CMYK, and derivatives of nonlinear *R'G'B'* such as $Y'C_BC_R$. Numerical values of hue and saturation are not useful in colour image coding.

If you manufacture cars, you have to match the colour of paint on the door with the colour of paint on the fender. A colour specification system will be necessary. But to convey a picture of the car, you need image coding. You can afford to do quite a bit of computation in the first case because you have only two coloured elements, the door and the fender. In the second case, the colour coding must be quite efficient because you may have a million coloured elements or more.

For a highly readable short introduction to colour image coding, see DeMarsh and Giorgianni [2]. For a terse, complete technical treatment, read Schreiber [3].

9 What weighting of red, green and blue corresponds to brightness?

Direct acquisition of luminance requires use of a very specific spectral weighting. However, luminance can also be computed as a weighted sum of red, green and blue components.

If three sources appear red, green and blue, and have the same radiance in the visible spectrum, then the green will appear the brightest of the three because the luminous efficiency function peaks in the green region of the spectrum. The red will appear less bright, and the blue will be the darkest of the three. As a consequence of the luminous efficiency function, all saturated blue colours are quite dark and all saturated yellows are quite light. If luminance is computed from red, green and blue, the coefficients will be a function of the particular red, green and blue spec-

tral weighting functions employed, but the green coefficient will be quite large, the red will have an intermediate value, and the blue coefficient will be the smallest of the three.

Contemporary CRT phosphors are standardized in Rec. 709 [8], to be described in section 17. The weights to compute true CIE luminance from linear red, green and blue (indicated without prime symbols), for the Rec. 709, are these:

$$Y_{709} = 0.2125\,R + 0.7154\,G + 0.0721\,B$$

This computation assumes that the luminance spectral weighting can be formed as a linear combination of the scanner curves, and assumes that the component signals represent linear-light. Either or both of these conditions can be relaxed to some extent depending on the application.

Some computer systems have computed brightness using (R+G+B) / 3. This is at odds with the properties of human vision, as will be discussed under *What are HSB and HLS?* in section 36.

The coefficients 0.299, 0.587 and 0.114 properly computed luminance for monitors having phosphors that were contemporary at the introduction of NTSC television in 1953. They are still appropriate for computing video *luma* to be discussed below in section 11. However, these coefficients do not accurately compute luminance for contemporary monitors.

10 Can blue be assigned fewer bits than red or green?

Blue has a small contribution to the brightness sensation. However, human vision has extraordinarily good colour discrimination capability in blue colours. So if you give blue fewer bits than red or green, you will introduce noticeable contouring in blue areas of your pictures.

11 What is “luma”?

It is useful in a video system to convey a component representative of luminance and two other components representative of colour. It is important to convey the component representative of luminance in such a way that noise (or quantization) introduced in transmission, processing and storage has a perceptually similar effect across the entire tone scale from black to white. The ideal way to accomplish these goals would be to form a luminance signal by matrixing RGB, then subjecting luminance to a nonlinear transfer function similar to the L* function.

There are practical reasons in video to perform these operations in the opposite order. First a nonlinear transfer function – *gamma correction* – is applied to each of the linear R, G and B. Then a weighted sum of the nonlinear components is computed to form a signal representative of luminance. The resulting component is related to brightness but is not CIE luminance. Many video engineers call it *luma* and give it the symbol *Y’*. It is often carelessly called *luminance* and given the symbol *Y*. You must be careful to determine whether a particular author assigns a linear or nonlinear interpretation to the term *luminance* and the symbol *Y*.

The coefficients that correspond to the “NTSC” red, green and blue CRT phosphors of 1953 are standardized in ITU-R Recommendation BT. 601-2 (formerly CCIR Rec. 601-2). I call it *Rec. 601*. To compute nonlinear video *luma* from nonlinear red, green and blue:

$$Y'_{601} = 0.299\,R' + 0.587\,G' + 0.114\,B'$$

The prime symbols in this equation, and in those to follow, denote nonlinear components.

12 What are CIE XYZ components?

The CIE system is based on the description of colour as a luminance component Y, as described above, and two additional components X and Z. The spectral weighting curves of X and Z have been standardized by the CIE based on statistics from experiments involving human observers. XYZ *tristimulus values* can describe any colour. (RGB tristimulus values will be described later.)

The magnitudes of the XYZ components are proportional to physical energy, but their spectral composition corresponds to the colour matching characteristics of human vision.

The CIE system is defined in Publication CIE No 15.2, *Colorimetry, Second Edition* (1986) [4].

13 Does my scanner use the CIE spectral curves?

Probably not. Scanners are most often used to scan images such as colour photographs and colour offset prints that are already "records" of three components of colour information. The usual task of a scanner is not spectral analysis but extraction of the values of the three components that have already been recorded. Narrowband filters are more suited to this task than filters that adhere to the principles of colorimetry.

If you place on your scanner an original coloured object that has "original" SPDs that are not already a record of three components, chances are your scanner will not very report accurate RGB values. This is because most scanners do not conform very closely to CIE standards.

14 What are CIE x and y chromaticity coordinates?

It is often convenient to discuss "pure" colour in the absence of brightness. The CIE defines a normalization process to compute "little" *x* and *y* *chromaticity coordinates:*

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \qquad y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

A colour plots as a point in an (*x*, *y*) *chromaticity diagram*. When a narrowband SPD comprising power at just one wavelength is swept across the range 400 nm to 700 nm, it traces a shark-fin shaped *spectral locus* in (*x*, *y*) coordinates. The sensation of purple cannot be produced by a single wavelength: to produce purple requires a mixture of shortwave and longwave light. The *line of purples* on a chromaticity diagram joins extreme blue to extreme red. All colours are contained in the area in (*x*, *y*) bounded by the line of purples and the spectral locus.

A colour can be specified by its chromaticity and luminance, in the form of an *xyY* triple. To recover X and Z from chromaticities and luminance, use these relations:

$$X = \frac{x}{y}Y \qquad Z = \frac{1-x-y}{y}Y$$

The bible of colour science is Wyszecki and Styles, *Color Science* [5]. But it's daunting. For Wyszecki's own condensed version, see *Color in Business, Science and Industry, Third Edition* [6]. It is directed to the colour industry: ink, paint and the like. For an approachable introduction to the

same theory, accompanied by descriptions of image reproduction, try to find a copy of R.W.G. Hunt, *The Reproduction of Colour* [7]. But sorry to report, as I write this, it's out of print.

15 What is white?

In additive image reproduction, the *white point* is the chromaticity of the colour reproduced by equal red, green and blue components. White point is a function of the ratio (or *balance*) of power among the primaries. In subtractive reproduction, white is the SPD of the illumination, multiplied by the SPD of the media. There is no unique physical or perceptual definition of white, so to achieve accurate colour interchange you must specify the characteristics of your white.

It is often convenient for purposes of calculation to define white as a uniform SPD. This white reference is known as the *equal-energy illuminant*, or *CIE Illuminant E*.

A more realistic reference that approximates daylight has been specified numerically by the CIE as Illuminant D_{65}. You should use this unless you have a good reason to use something else. The print industry commonly uses D_{50} and photography commonly uses D_{55}. These represent compromises between the conditions of indoor (tungsten) and daylight viewing.

16 What is colour temperature?

Planck determined that the SPD radiated from a hot object – a *black body radiator* – is a function of the temperature to which the object is heated. Many sources of illumination have, at their core, a heated object, so it is often useful to characterize an illuminant by specifying the temperature (in units of kelvin, K) of a black body radiator that appears to have the same hue.

Although an illuminant can be specified informally by its colour temperature, a more complete specification is provided by the chromaticity coordinates of the SPD of the source.

Modern blue CRT phosphors are more efficient with respect to human vision than red or green. In a quest for brightness at the expense of colour accuracy, it is common for a computer display to have excessive blue content, about twice as blue as daylight, with white at about 9300 K.

Human vision adapts to white in the viewing environment. An image viewed in isolation – such as a slide projected in a dark room – creates its own white reference, and a viewer will be quite tolerant of errors in the white point. But if the same image is viewed in the presence of an external white reference or a second image, then differences in white point can be objectionable.

Complete adaptation seems to be confined to the range 5000 K to 5500 K. For most people, D_{65} has a little hint of blue. Tungsten illumination, at about 3200 K, always appears somewhat yellow.

17 How can I characterize red, green and blue?

Additive reproduction is based on physical devices that produce all-positive SPDs for each primary. Physically and mathematically, the spectra add. The largest range of colours will be produced with primaries that appear red, green and blue. Human colour vision obeys the principle of superposition, so the colour produced by any additive mixture of three primary spectra can be predicted by adding the corresponding fractions of the XYZ components of the primaries: the colours that can be mixed

from a particular set of RGB primaries are completely determined by the colours of the primaries by themselves. Subtractive reproduction is much more complicated: the colours of mixtures are determined by the primaries and by the colours of their combinations.

An additive RGB system is specified by the chromaticities of its primaries and its white point. The extent (*gamut*) of the colours that can be mixed from a given set of RGB primaries is given in the (x, y) chromaticity diagram by a triangle whose vertices are the chromaticities of the primaries.

In computing there are no standard primaries or white point. If you have an RGB image but have no information about its chromaticities, you cannot accurately reproduce the image.

The NTSC in 1953 specified a set of primaries that were representative of phosphors used in colour CRTs of that era. But phosphors changed over the years, primarily in response to market pressures for brighter receivers, and by the time of the first the videotape recorder the primaries in use were quite different than those "on the books". So although you may see the NTSC primary chromaticities documented, they are of no use today.

Contemporary studio monitors have slightly different standards in North America, Europe and Japan. But international agreement has been obtained on primaries for high definition television (HDTV), and these primaries are closely representative of contemporary monitors in studio video, computing and computer graphics. The primaries and the D_{65} white point of *Rec. 709* [8] are:

	R	G	B	white
x	0.640	0.300	0.150	0.3127
y	0.330	0.600	0.060	0.3290
z	0.030	0.100	0.790	0.3582

For a discussion of nonlinear RGB in computer graphics, see Lindbloom [9]. For technical details on monitor calibration, consult Cowan [10].

18 How do I transform between CIE XYZ and a particular set of RGB primaries?

RGB values in a particular set of primaries can be transformed to and from CIE XYZ by a three-by-three matrix transform. These transforms involve *tristimulus values*, that is, sets of three linear-light components that conform to the CIE colour matching functions. CIE XYZ is a special case of tristimulus values. In XYZ, any colour is represented by a positive set of values.

Details can be found in SMPTE RP 177-1993 [11].

To transform from CIE XYZ into Rec. 709 RGB (with its D_{65} white point), use this transform:

$$\begin{bmatrix} R_{709} \\ G_{709} \\ B_{709} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.240479 & -1.537150 & -0.498535 \\ -0.969256 & 1.875992 & 0.041556 \\ 0.055648 & -0.204043 & 1.057311 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

This matrix has some negative coefficients: XYZ colours that are *out of gamut* for a particular RGB transform to RGB where one or more RGB components is negative or greater than unity.

Here's the inverse transform. Because white is normalized to unity, the middle row sums to unity:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.412453 & 0.357580 & 0.180423 \\ 0.212671 & 0.715160 & 0.072169 \\ 0.019334 & 0.119193 & 0.950227 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} R_{709} \\ G_{709} \\ B_{709} \end{bmatrix}$$

To recover primary chromaticities from such a matrix, compute little *x* and *y* for each RGB column vector. To recover the white point, transform RGB=[1, 1, 1] to XYZ, then compute *x* and *y*.

19 Is RGB always device-dependent?

Video standards specify abstract *R'G'B'* systems that are closely matched to the characteristics of real monitors. Physical devices that produce additive colour involve tolerances and uncertainties, but if you have a monitor that conforms to Rec. 709 within some tolerance, you can consider the monitor to be device-independent.

The importance of Rec. 709 as an interchange standard in studio video, broadcast television and high definition television, and the perceptual basis of the standard, assures that its parameters will be used even by devices such as flat-panel displays that do not have the same physics as CRTs.

20 How do I transform data from one set of RGB primaries to another?

RGB values in a system employing one set of primaries can be transformed into another set by a three-by-three linear-light matrix transform. Generally these matrices are normalized for a white point luminance of unity. For details, see *Television Engineering Handbook* [12].

As an example, here is the transform from SMPTE 240M (or SMPTE RP 145) RGB to Rec. 709:

$$\begin{bmatrix} R_{709} \\ G_{709} \\ B_{709} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.939555 & 0.050173 & 0.010272 \\ 0.017775 & 0.965795 & 0.016430 \\ -0.001622 & -0.004371 & 1.005993 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} R_{240M} \\ G_{240M} \\ B_{240M} \end{bmatrix}$$

All of these terms are close to either zero or one. In a case like this, if the transform is computed in the nonlinear (gamma-corrected) *R'G'B'* domain the resulting errors will be insignificant.

Here's another example. To transform EBU 3213 RGB to Rec. 709:

$$\begin{bmatrix} R_{709} \\ G_{709} \\ B_{709} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.044036 & -0.044036 & 0. \\ 0. & 1. & 0. \\ 0. & 0.011797 & 0.988203 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} R_{EBU} \\ G_{EBU} \\ B_{EBU} \end{bmatrix}$$

Transforming among RGB systems may lead to an *out of gamut* RGB result where one or more RGB components is negative or greater than unity.

21 Should I use RGB or XYZ for image synthesis?

Once light is on its way to the eye, any tristimulus-based system will work. But the interaction of light and objects involves spectra, not tristimulus values. In synthetic computer graphics, the calculations are actually simulating sampled SPDs, even if only three components are used. Details concerning the resultant errors are found in Hall [13].

22 What is subtractive colour?

Subtractive systems involve coloured dyes or filters that absorb power from selected regions of the spectrum. The three filters are placed in tandem. A dye that appears cyan absobs longwave (red) light. By controlling the amount of cyan dye (or ink), you modulate the amount of red in the image.

In physical terms the spectral transmission curves of the colourants multiply, so this method of colour reproduction should really be called "multiplicative". Photographers and printers have for decades measured transmission in base-10 logarithmic *density* units, where transmission of unity corresponds to a density of 0, transmission of 0.1 corresponds to a density of 1, transmission of 0.01 corresponds to a density of 2 and so on. When a printer or photographer computes the effect of filters in tandem, he subtracts density values instead of multiplying transmission values, so he calls the system *subtractive*.

To achieve a wide range of colours in a subtractive system requires filters that appear coloured cyan, yellow and magenta (CMY). Cyan in tandem with magenta produces blue, cyan with yellow produces green, and magenta with yellow produces red. Smadar Nehab suggests this memory aid:

R	**G**	**B**
Cy	**Mg**	**Yl**

R	**G**	**B**
Cy	**Mg**	**Yl**

Additive primaries are at the top, subtractive at the bottom. On the left, magenta and yellow filters combine to produce red. On the right, red and green sources add to produce yellow.

23 Why did my grade three teacher tell me that the primaries are red, yellow and blue?

To get a wide range of colours in an additive system, the primaries must appear red, green and blue (RGB). In a subtractive system the primaries must appear yellow, cyan and magenta (CMY). It is complicated to predict the colours produced when mixing paints, but roughly speaking, paints mix additively to the extent that they are opaque (like oil paints), and subtractively to the extent that they are transparent (like watercolours). This question also relates to colour names: your grade three "red" was probably a little on the magenta side, and "blue" was probably quite cyan. For a discussion of paint mixing from a computer graphics perspective, consult Haase [14].

24 Is CMY just one-minus-RGB?

In a theoretical subtractive system, CMY filters could have spectral absorption curves with no overlap. The colour reproduction of the system would correspond exactly to additive colour reproduction using the red, green and blue primaries that resulted from pairs of filters in combination.

Practical photographic dyes and offset printing inks have spectral absorption curves that overlap significantly. Most magenta dyes absorb mediumwave (green) light as expected, but incidentally absorb about half that

amount of shortwave (blue) light. If reproduction of a colour, say brown, requires absorption of all shortwave light then the incidental absorption from the magenta dye is not noticed. But for other colours, the "one minus RGB" formula produces mixtures with much less blue than expected, and therefore produce pictures that have a yellow cast in the mid tones. Similar but less severe interactions are evident for the other pairs of practical inks and dyes.

Due to the spectral overlap among the colourants, converting CMY using the "one-minus-RGB" method works for applications such as business graphics where accurate colour need not be preserved, but the method fails to produce acceptable colour images.

Multiplicative mixture in a CMY system is mathematically nonlinear, and the effect of the unwanted absorptions cannot be easily analyzed or compensated. The colours that can be mixed from a particular set of CMY primaries cannot be determined from the colours of the primaries themselves, but are also a function of the colours of the sets of combinations of the primaries.

Print and photographic reproduction is also complicated by nonlinearities in the response of the three (or four) channels. In offset printing, the physical and optical processes of *dot gain* introduce nonlinearity that is roughly comparable to gamma correction in video. In a typical system used for print, a black code of 128 (on a scale of 0 to 255) produces a reflectance of about 0.26, not the 0.5 that you would expect from a linear system. Computations cannot be meaningfully performed on CMY components without taking nonlinearity into account.

For a detailed discussion of transferring colorimetric image data to print media, see Stone [15].

25 Why does offset printing use black ink in addition to CMY?

Printing black by overlaying cyan, yellow and magenta ink in offset printing has three major problems. First, coloured ink is expensive. Replacing coloured ink by black ink – which is primarily carbon – makes economic sense. Second, printing three ink layers causes the printed paper to become quite wet. If three inks can be replaced by one, the ink will dry more quickly, the press can be run faster, and the job will be less expensive. Third, if black is printed by combining three inks, and mechanical tolerances cause the three inks to be printed slightly out of register, then black edges will suffer coloured tinges. Vision is most demanding of spatial detail in black and white areas. Printing black with a single ink minimizes the visibility of registration errors.

Other printing processes may or may not be subject to similar constraints.

26 What are colour differences?

This term is ambiguous. In its first sense, *colour difference* refers to numerical differences between colour specifications. The perception of colour differences in XYZ or RGB is highly nonuniform. The study of *perceptual uniformity* concerns numerical differences that correspond to colour differences at the threshold of perceptibility (*just noticeable differences*, or JNDs).

In its second sense, *colour difference* refers to colour components where brightness is "removed". Vision has poor response to spatial detail in

coloured areas of the same luminance, compared to its response to luminance spatial detail. If data capacity is at a premium it is advantageous to transmit luminance with full detail and to form two *colour difference* components each having no contribution from luminance. The two colour components can then have spatial detail removed by filtering, and can be transmitted with substantially less information capacity than luminance.

Instead of using a true luminance component to represent brightness, it is ubiquitous for practical reasons to use a *luma* signal that is computed nonlinearly as outlined above (*What is luma?*).

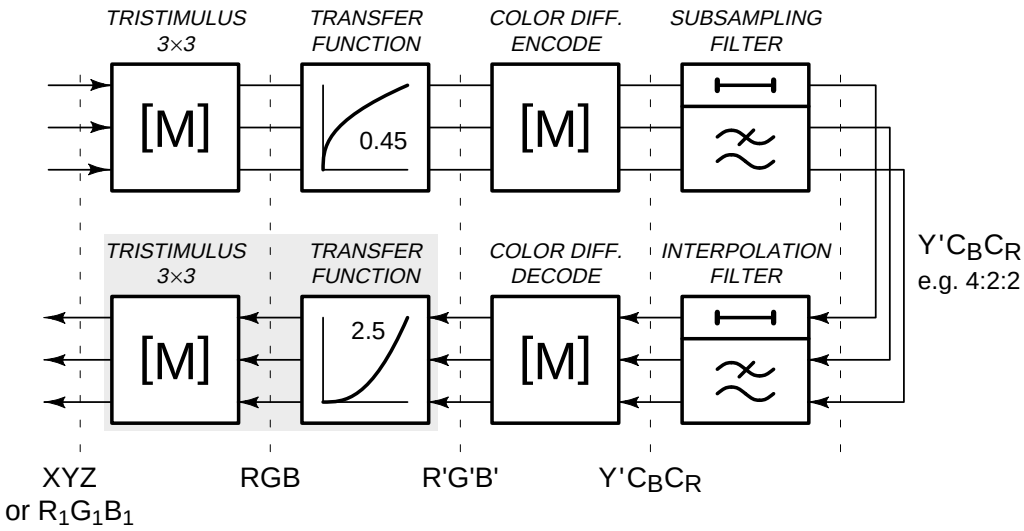
The easiest way to "remove" brightness information to form two colour channels is to subtract it. The luma component already contains a large fraction of the green information from the image, so it is standard to form the other two components by subtracting luma from nonlinear blue (to form B'-Y') and by subtracting luma from nonlinear red (to form R'-Y'). These are called *chroma*.

Various scale factors are applied to (B'-Y') and (R'-Y') for different applications. The $Y'P_BP_R$ scale factors are optimized for component analog video. The $Y'C_BC_R$ scaling is appropriate for component digital video such as studio video, JPEG and MPEG. Kodak's PhotoYCC™ uses scale factors optimized for the gamut of film colours. $Y'UV$ scaling is appropriate as an intermediate step in the formation of composite NTSC or PAL video signals, but is not appropriate when the components are kept separate. The $Y'UV$ nomenclature is now used rather loosely, and it sometimes denotes any scaling of (B'-Y') and (R'-Y'). $Y'IQ$ coding is obsolete.

The subscripts in C_BC_R and P_BP_R are often written in lower case. I find this to compromise readability, so without introducing any ambiguity I write them in uppercase. Authors with great attention to detail sometimes "prime" these quantities to indicate their nonlinear nature, but because no practical image coding system employs linear colour differences I consider it safe to omit the primes.

27 How do I obtain colour difference components from tristimulus values?

Here is the block diagram for luma/colour difference encoding and decoding:



From linear XYZ – or linear $R_1G_1B_1$ whose chromaticity coordinates are different from the interchange standard – apply a 3×3 matrix transform to obtain linear RGB according to the interchange primaries. Apply a nonlinear transfer function ("gamma correction") to each of the components to get nonlinear $R'G'B'$. Apply a 3×3 matrix to obtain colour difference components such as $Y'P_BP_R$, $Y'C_BC_R$ or PhotoYCC. If necessary, apply a colour subsampling filter to obtain subsampled colour difference components. To decode, invert the above procedure: run through the block diagram right-to-left using the inverse operations. If your monitor conforms to the interchange primaries, decoding need not explicitly use a transfer function or the tristimulus 3×3.

The block diagram emphasizes that 3×3 matrix transforms are used for two distinctly different tasks. When someone hands you a 3×3, you have to ask for which task it is intended.

28 How do I encode $Y'P_BP_R$ components?

Although the following matrices could in theory be used for tristimulus signals, it is ubiquitous to use them with gamma-corrected signals.

To encode $Y'P_BP_R$, start with the basic Y', $(B'-Y')$ and $(R'-Y')$ relationships:

Eq 1

$$\begin{bmatrix} Y'_{601} \\ B'-Y'_{601} \\ R'-Y'_{601} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.299 & -0.587 & 0.886 \\ 0.701 & -0.587 & -0.114 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix}$$

$Y'P_BP_R$ components have unity excursion, where Y' ranges [0..+1] and each of P_B and P_R ranges [-0.5..+0.5]. The $(B'-Y')$ and $(R'-Y')$ rows need to

be scaled by $\frac{0.5}{0.886}$ and $\frac{0.5}{0.701}$. To encode from *R'G'B'* where reference black is 0 and reference white is +1:

Eq 2

$$\begin{bmatrix} Y'_{601} \\ P_B \\ P_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.168736 & -0.331264 & 0.5 \\ 0.5 & -0.418688 & -0.081312 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix}$$

The first row comprises the luma coefficients; these sum to unity. The second and third rows each sum to zero, a necessity for colour difference components. The +0.5 entries reflect the maximum excursion of P_B and P_R of +0.5, for the blue and red primaries [0, 0, 1] and [1, 0, 0].

The inverse, decoding matrix is this:

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1.402 \\ 1 & -0.344136 & -0.714136 \\ 1 & 1.772 & 0 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} Y'_{601} \\ P_B \\ P_R \end{bmatrix}$$

29 How do I encode Y'$C_B C_R$ components from R'G'B' in [0, +1]?

Rec. 601 specifies eight-bit coding where *Y'* has an excursion of 219 and an offset of +16. This coding places black at code 16 and white at code 235, reserving the extremes of the range for signal processing headroom and footroom. C_B and C_R have excursions of ±112 and offset of +128, for a range of 16 through 240 inclusive.

To compute $Y'C_BC_R$ from *R'G'B'* in the range [0..+1], scale the rows of the matrix of Eq 2 by the factors 219, 224 and 224, corresponding to the excursions of each of the components:

Eq 3

$$\begin{bmatrix} Y'_{601} \\ C_B \\ C_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 65.481 & 128.553 & 24.966 \\ -37.797 & -74.203 & 112. \\ 112. & -93.786 & -18.214 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix}$$

Summing the first row of the matrix yields 219, the luma excursion from black to white. The two entries of 112 reflect the positive C_BC_R extrema of the blue and red primaries.

Clamp all three components to the range 1 through 254 inclusive, since Rec. 601 reserves codes 0 and 255 for synchronization signals.

To recover *R'G'B'* in the range [0..+1] from $Y'C_BC_R$, use the inverse of Eq 3 above:

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.00456621 & 0. & 0.00625893 \\ 0.00456621 & -0.00153632 & -0.00318811 \\ 0.00456621 & 0.00791071 & 0. \end{bmatrix} \bullet \left(\begin{bmatrix} Y'_{601} \\ C_B \\ C_R \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} \right)$$

This looks overwhelming, but the $Y'C_BC_R$ components are integers in eight bits and the reconstructed *R'G'B'* are scaled down to the range [0..+1].

30 How do I encode Y'$C_B C_R$ components from computer R'G'B'?

In computing it is conventional to use eight-bit coding with black at code 0 and white at 255. To encode $Y'C_BC_R$ from *R'G'B'* in the range [0..255],

using eight-bit binary arithmetic, scale the $Y'C_BC_R$ matrix of Eq 3 by $256/255$:

$$\begin{bmatrix} Y'_{601} \\ C_B \\ C_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} + \frac{1}{256} \begin{bmatrix} 65.738 & 129.057 & 25.064 \\ -37.945 & -74.494 & 112.439 \\ 112.439 & -94.154 & -18.285 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} R'_{255} \\ G'_{255} \\ B'_{255} \end{bmatrix}$$

To decode $R'G'B'$ in the range [0..255] from Rec. 601 $Y'C_BC_R$, using eight-bit binary arithmetic:

Eq 4

$$\begin{bmatrix} R'_{255} \\ G'_{255} \\ B'_{255} \end{bmatrix} = \frac{1}{256} \begin{bmatrix} 298.082 & 0. & 408.583 \\ 298.082 & -100.291 & -208.120 \\ 298.082 & 516.411 & 0. \end{bmatrix} \bullet \left(\begin{bmatrix} Y'_{601} \\ C_B \\ C_R \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} \right)$$

The multiplications by $1/256$ can be accomplished by shifting. Some of the coefficients, when scaled by $1/256$, are larger than unity. These coefficients will need more than eight multiplier bits.

For implementation in binary arithmetic the matrix coefficients have to be rounded. When you round, take care to preserve the row sums of [1, 0, 0].

The matrix of Eq 4 will decode standard $Y'C_BC_R$ components to RGB components in the range [0..255], subject to roundoff error. You must take care to avoid overflow due to roundoff error. But you must protect against overflow in any case, because studio video signals use the extremes of the coding range to handle signal overshoot and undershoot, and these will require clipping when decoded to an RGB range that has no headroom or footroom.

31 How do I encode $Y'C_BC_R$ components from studio video?

Studio $R'G'B'$ signals use the same 219 excursion as the luma component of $Y'C_BC_R$.To encode $Y'C_BC_R$ from $R'G'B'$ in the range [0..219], using eight-bit binary arithmetic, scale the $Y'C_BC_R$ encoding matrix of Eq 3 above by $256/219$. Here is the encoding transform for studio video:

$$\begin{bmatrix} Y'_{601} \\ C_B \\ C_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} + \frac{1}{256} \begin{bmatrix} 76.544 & 150.272 & 29.184 \\ -44.182 & -86.740 & 130.922 \\ 130.922 & -109.631 & -21.291 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} R'_{219} \\ G'_{219} \\ B'_{219} \end{bmatrix}$$

To decode $R'G'B'$ in the range [0..219] from $Y'C_BC_R$, using eight-bit binary arithmetic:

$$\begin{bmatrix} R'_{219} \\ G'_{219} \\ B'_{219} \end{bmatrix} = \frac{1}{256} \begin{bmatrix} 256. & 0. & 350.901 \\ 256. & -86.132 & -178.738 \\ 256. & 443.506 & 0. \end{bmatrix} \bullet \left(\begin{bmatrix} Y'_{601} \\ C_B \\ C_R \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} \right)$$

The entries of 256 in this matrix indicate that the corresponding component can simply be added; there is no need for a multiplication operation. This matrix contains entries larger than 256; the corresponding multipliers will need capability for nine bits.

The matrices in this section conform to Rec. 601 and apply directly to conventional 525 / 59.94 and 625 / 50 video. It is not yet decided whether emerging HDTV standards will use the same matrices, or adopt a new set of matrices having different luma coefficients. In my view it would be

unfortunate if different matrices were adopted, because then image coding and decoding would depend on whether the picture was small (conventional video) or large (HDTV).

In digital video, Rec. 601 standardizes subsampling denoted 4:2:2, where C_B and C_R components are subsampled horizontally by a factor of two with respect to luma. JPEG and MPEG conventionally subsample by a factor of two in the vertical dimension as well, denoted 4:2:0.

Colour difference coding is standardized in Rec. 601. For details on colour difference coding as used in video, consult Watkinson [16].

32 How do I decode *R'G'B'* from PhotoYCC™?

Kodak's PhotoYCC uses the Rec. 709 primaries, white point and transfer function. Reference white codes to luma 189; this preserves film highlights. The colour difference coding is asymmetrical, to encompass film gamut. You are unlikely to encounter any raw image data in PhotoYCC form because YCC is closely associated with the PhotoCD™ system whose compression methods are proprietary. But just in case, the following equation is comparable to in that it produces *R'G'B'* in the range [0..+1] from integer YCC. If you want to return *R'G'B'* in a different range, or implement the equation in eight-bit integer arithmetic, use the techniques in the section above.

$$\begin{bmatrix} R'_{709} \\ G'_{709} \\ B'_{709} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0054980 & 0. & 0.0051681 \\ 0.0054980 & -0.0015446 & -0.0026325 \\ 0.0054980 & 0.0079533 & 0. \end{bmatrix} \bullet \left(\begin{bmatrix} Y'_{601,189} \\ C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 156 \\ 137 \end{bmatrix} \right)$$

Decoded *R'G'B'* components from PhotoYCC can exceed unity or go below zero. PhotoYCC extends the Rec. 709 transfer function above unity, and reflects it around zero, to accommodate wide excursions of *R'G'B'*. To decode to CRT primaries, clip *R'G'B'* to the range zero to one.

33 Will you tell me how to decode *Y'UV* and *Y'IQ*?

No, I won't! *Y'UV* and *Y'IQ* have scale factors appropriate to composite NTSC and PAL. They have no place in component digital video! You shouldn't code into these systems, and if someone hands you an image claiming it's *Y'UV*, chances are it's actually $Y'C_BC_R$, it's got the wrong scale factors, or it's linear-light.

Well OK, just this once. To transform *Y'*, (*B'*-*Y'*) and (*R'*-*Y'*) components from Eq 1 to *Y'*UV, scale (*B'*-*Y'*) by 0.492111 to get U and scale *R'*-*Y'* by 0.877283 to get V. The factors are chosen to limit composite NTSC or PAL amplitude for all legal *R'G'B'* values:

$$-\frac{1}{3} \le \left[Y' + \sqrt{0.492111\left(B'-Y'\right) + 0.877283\left(R'-Y'\right)} \right] \le \frac{4}{3}$$

To transform to *Y'IQ* to *Y'UV*, perform a 33° rotation and an exchange of colour difference axes:

$$\begin{bmatrix} Y'_{601} \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0.544639 & 0.838671 \\ 0 & 0.838671 & 0.544639 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} Y'_{601} \\ U \\ V \end{bmatrix}$$

34 How should I test my encoders and decoders?

To test your encoding and decoding, ensure that colourbars are handled correctly. A colourbar signal comprises a binary RGB sequence ordered

for decreasing luma: white, yellow, cyan, green, magenta, red, blue and black.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

To ensure that your scale factors are correct and that clipping is not being invoked, test 75% bars, a colourbar sequence having 75%-amplitude bars instead of 100%.

35 What is perceptual uniformity?

A system is *perceptually uniform* if a small perturbation to a component value is approximately equally perceptible across the range of that value. The volume control on your radio is designed to be perceptually uniform: rotating the knob ten degrees produces approximately the same perceptual increment in volume anywhere across the range of the control. If the control were physically linear, the logarithmic nature of human loudness perception would place all of the perceptual "action" of the control at the bottom of its range.

The XYZ and RGB systems are far from exhibiting perceptual uniformity. Finding a transformation of XYZ into a reasonably perceptually-uniform space consumed a decade or more at the CIE and in the end no single system could be agreed. So the CIE standardized two systems, $L^*u^*v^*$ and $L^*a^*b^*$, sometimes written CIELUV and CIELAB. (The u and v are unrelated to video U and V.) Both $L^*u^*v^*$ and $L^*a^*b^*$ improve the 80:1 or so perceptual nonuniformity of XYZ to about 6:1. Both demand too much computation to accommodate real-time display, although both have been successfully applied to image coding for printing.

Computation of CIE $L^*u^*v^*$ involves intermediate u' and v' quantities, where the prime denotes the successor to the obsolete 1960 CIE u and v system:

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}, \qquad v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z}$$

First compute u_n' and v_n' for your reference white X_n, Y_n and Z_n. Then compute u' and v' – and L^* as discussed earlier – for your colours. Finally, compute:

$$u^* = 13L^*(u' - u_n'), \qquad v^* = 13L^*(v' - v_n')$$

$L^*a^*b^*$ is computed as follows, for $(X/X_n, Y/Y_n, Z/Z_n) > 0.01$:

$$a^* = 500\left[\left(\frac{X}{X_n}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}}\right], \qquad b^* = 200\left[\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{\frac{1}{3}}\right]$$

These equations are great for a few spot colours, but no fun for a million pixels. Although it was not specifically optimized for this purpose, the nonlinear $R'G'B'$ coding used in video is quite perceptually uniform, and has the advantage of being fast enough for interactive applications.

36 What are HSB and HLS?

HSB and HLS were developed to specify numerical Hue, Saturation and Brightness (or Hue, Lightness and Saturation) in an age when users had to specify colours numerically. The usual formulations of HSB and HLS are flawed with respect to the properties of colour vision. Now that users can choose colours visually, or choose colours related to other media (such as PANTONE), or use perceptually-based systems like L*u*v* and L*a*b*, HSB and HLS should be abandoned.

Here are some of problems of HSB and HLS. In colour selection where "lightness" runs from zero to 100, a lightness of 50 should appear to be half as bright as a lightness of 100. But the usual formulations of HSB and HLS make no reference to the linearity or nonlinearity of the underlying RGB, and make no reference to the lightness perception of human vision.

The usual formulation of HSB and HLS compute so-called "lightness" or "brightness" as (R+G+B)/3. This computation conflicts badly with the properties of colour vision, as it computes yellow to be about six times more intense than blue with the same "lightness" value (say L=50).

HSB and HSL are not useful for image computation because of the discontinuity of hue at 360°. You cannot perform arithmetic mixtures of colours expressed in polar coordinates.

Nearly all formulations of HSB and HLS involve different computations around 60° segments of the hue circle. These calculations introduce visible discontinuities in colour space.

Although the claim is made that HSB and HLS are "device independent", the ubiquitous formulations are based on RGB components whose chromaticities and white point are unspecified. Consequently, HSB and HLS are useless for conveyance of accurate colour information.

If you really need to specify hue and saturation by numerical values, rather than HSB and HSL you should use polar coordinate version of u^* and v^*: h^*_{uv} for hue angle and c^*_{uv} for chroma.

37 What is true colour?

True colour is the provision of three separate components for additive red, green and blue reproduction. True colour systems often provide eight bits for each of the three components, so true colour is sometimes referred to as *24-bit colour*.

A true colour system usually interposes a lookup table between each component of the framestore and each channel to the display. This makes it possible to use a true colour system with either linear or nonlinear coding. In the X Window System, *true colour* refers to fixed lookup tables, and *direct colour* refers to lookup tables that are under the control of application software.

38 What is indexed colour?

Indexed colour (or *pseudocolour)*, is the provision of a relatively small number, say 256, of discrete colours in a *colormap* or *palette*. The framebuffer stores, at each pixel, the index number of a colour. At the output of the framebuffer, a lookup table uses the index to retrieve red, green and blue components that are then sent to the display.

The colours in the map may be fixed systematically at the design of a system. As an example, 216 index entries an eight-bit indexed colour

system can be partitioned systematically into a 6×6×6 “cube” to implement what amounts to a direct colour system where each of red, green and blue has a value that is an integer in the range zero to five.

An RGB image can be converted to a predetermined colormap by choosing, for each pixel in the image, the colormap index corresponding to the “closest” RGB triple. With a systematic colormap such as a 6×6×6 colourcube this is straightforward. For an arbitrary colormap, the colormap has to be searched looking for entries that are “close” to the requested colour. “Closeness” should be determined according to the perceptibility of colour differences. Using colour systems such as CIE L*u*v* or L*a*b* is computationally prohibitive, but in practice it is adequate to use a Euclidean distance metric in *R’G’B’* components coded nonlinearly according to video practice.

A direct colour image can be converted to indexed colour with an image-dependent colormap by a process of colour quantization that searches through all of the triples used in the image, and chooses the palette for the image based on the colours that are in some sense most “important”. Again, the decisions should be made according to the perceptibility of colour differences. Adobe Photoshop™ can perform this conversion. UNIX™ users can employ the *pbm* package.

If your system accommodates arbitrary colormaps, when the map associated with the image in a particular window is loaded into the hardware colormap, the maps associated with other windows may be disturbed. In window system such as the X Window System™ running on a multitasking operating system such as UNIX, even moving the cursor between two windows with different maps can cause annoying *colormap flashing*.

An eight-bit indexed colour system requires less data to represent a picture than a twenty-four bit truecolour system. But this data reduction comes at a high price. The truecolour system can represent each of its three components according to the principles of sampled continuous signals. This makes it possible to accomplish, with good quality, operations such as resizing the image. In indexed colour these operations introduce severe artifacts because the underlying representation lacks the properties of a continuous representation, even if converted back to RGB.

In graphic file formats such as GIF of TIFF, an indexed colour image is accompanied by its colormap. Generally such a colormap has RGB entries that are gamma corrected: the colormap’s RGB codes are intended to be presented directly to a CRT, without further gamma correction.

39 I want to visualize a scalar function of two variables. Should I use RGB values corresponding to the colours of the rainbow?

When you look at a rainbow you do not see a smooth gradation of colours. Instead, some bands appear quite narrow, and others are quite broad. Perceptibility of hue variation near 540 nm is half that of either 500 nm or 600 nm. If you use the rainbow’s colours to represent data, the visibility of differences among your data values will depend on where they lie in the spectrum.

If you are using colour to aid in the visual detection of patterns, you should use colours chosen according to the principles of perceptual uniformity. This an open research problem, but basing your system on

CIE L*a*b* or L*u*v*, or on nonlinear video-like RGB, would be a good start.

40 What is dithering?

A display device may have only a small number of choices of greyscale values or colour values at each device pixel. However if the viewer is sufficiently distant from the display, the value of neighboring pixels can be set so that the viewer's eye integrates several pixels to achieve an apparent improvement in the number of levels or colours that can be reproduced.

Computer displays are generally viewed from distances where the device pixels subtend a rather large angle at the viewer's eye, relative to his visual acuity. Applying dither to a conventional computer display often introduces objectionable artifacts. However, careful application of dither can be effective. For example, human vision has poor acuity for blue spatial detail but good colour discrimination capability in blue. Blue can be dithered across two-by-two pixel arrays to produce four times the number of blue levels, with no perceptible penalty at normal viewing distances.

41 How does halftoning relate to colour?

The processes of offset printing and conventional laser printing are intrinsically *bilevel*: a particular location on the page is either covered with ink or not. However, each of these devices can reproduce closely-spaced dots of variable size. An array of small dots produces the perception of light gray, and an array of large dots produces dark gray. This process is called *halftoning* or *screening*. In a sense this is dithering, but with device dots so small that acceptable pictures can be produced at reasonable viewing distances.

Halftone dots are usually placed in a regular grid, although *stochastic screening* has recently been introduced that modulates the spacing of the dots rather than their size.

In colour printing it is conventional to use cyan, magenta, yellow and black grids that have exactly the same dot pitch but different carefully-chosen *screen angles*. The recently introduced technique of *Flamenco* screening uses the same screen angles for all screens, but its registration requirements are more stringent than conventional offset printing.

Agfa's booklet [17] is an excellent introduction to practical concerns of printing. And it's in colour! The standard reference to halftoning algorithms is Ulichney [18], but that work does not detail the nonlinearities found in practical printing systems. For details about screening for colour reproduction, consult Fink [19]. Consult *Frequently Asked Questions about Gamma* for an introduction to the transfer function of offset printing.

42 What's a colour management system?

Software and hardware for scanner, monitor and printer calibration have had limited success in dealing with the inaccuracies of colour handling in desktop computing. These solutions deal with specific pairs of devices but cannot address the end-to-end system. Certain application developers have added colour transformation capability to their applications, but the majority of application developers have insufficient expertise and insufficient resources to invest in accurate colour.

A *colour management system* (CMS) is a layer of software resident on a computer that negotiates colour reproduction between the application and colour devices. It cooperates with the operating system and the graphics library components of the platform software. Colour management systems perform the colour transformations necessary to exchange accurate colour between diverse devices, in various colour coding systems including RGB, CMYK and CIE L*a*b*.

The CMS makes available to the application a set of facilities whereby the application can determine what colour devices and what colour spaces are available. When the application wishes to access a particular device, it requests that the colour manager perform a mathematical *transform* from one space to another. The colour spaces involved can be device-independent *abstract* colour spaces such as CIE XYZ, CIE L*a*b* or calibrated RGB. Alternatively a colour space can be associated with a particular device. In the second case the Colour manager needs access to characterization data for the device, and perhaps also to *calibration* data that reflects the state of the particular instance of the device.

Sophisticated colour management systems are commercially available from Kodak, Electronics for Imaging (EFI) and Agfa. Apple's ColorSync™ provides an interface between a Mac application program and colour management capabilities either built-in to ColorSync or provided by a plug-in. Sun has announced that Kodak's CMS will be shipped with the next version of Solaris.

The basic CMS services provided with desktop operating systems are likely to be adequate for office users, but are unlikely to satisfy high-end users such as in prepress. All of the announced systems have provisions for plug-in *colour management modules* (CMMs) that can provide sophisticated transform machinery. Advanced colour management modules will be commercially available from third parties. For an application developer's prespective on colour management, see Aldus [20].

43 How does a CMS know about particular devices?

A CMS needs access to information that characterizes the colour reproduction capabilities of particular devices. The set of characterization data for a device is called a *device profile*. Industry agreement has been reached on the format of device profiles, although details have not yet been publicly disseminated. Apple has announced that the forthcoming ColorSync version 2.0 will adhere to this agreement. Vendors of colour peripherals will soon provide industry-standard profiles with their devices, and they will have to make, buy or rent characterization services.

If you have a device that has not been characterized by its manufacturer, Agfa's FotoTune™ software – part of Agfa's FotoFlow™ colour manager – can create device profiles.

44 Is a colour management system useful for colour specification?

Not yet. But colour management system interfaces in the future are likely to include the ability to accommodate commercial proprietary colour specification systems such as PANTONE™ and COLORCURVE™. These vendors are likely to provide their colour specification systems in shrink-wrapped form to plug into colour managers. In this way, users will have guaranteed colour accuracy among applications and peripherals, and

application vendors will no longer need to pay to license these systems individually.

45 I'm not a colour expert. What parameters should I use to code my images?

Use the CIE D_{65} white point (6504 K) if you can.

Use the Rec. 709 primary chromaticities. Your monitor is probably already quite close to this. Rec. 709 has international agreement, offers excellent performance, and is the basis for HDTV development so it's future-proof.

If you need to operate in linear light, so be it. Otherwise, for best perceptual performance and maximum ease of interchange with digital video, use the Rec. 709 transfer function, with its 0.45-power law. If you need Mac compatibility you will have to suffer a penalty in perceptual performance. Raise tristimulus values to the $1/1.8$-power before presenting them to QuickDraw.

To code luma, use the Rec. 601 luma coefficients 0.299, 0.587 and 0.114. Use Rec. 601 digital video coding with black at 16 and white at 235.

Use prime symbols (') to denote all of your nonlinear components!

PhotoCD uses all of the preceding measures. PhotoCD codes colour differences asymmetrically, according to film gamut. Unless you have a requirement for film gamut, you should code into colour differences using $Y'C_BC_R$ coding with Rec. 601 studio video (16..235 / 128±112) excursion.

Tag your image data with the primary and white chromaticity, transfer function and luma coefficients that you are using. TIFF 6.0 tags have been defined for these parameters. This will enable intelligent readers, today or in the future, to determine the parameters of your coded image and give you the best possible results.

46 References

[1] Publication CIE No 17.4, I*nternational Lighting Vocabulary*. Central Bureau of the Commission Internationale de L'Éclairage, Vienna, Austria.

[2] LeRoy E. DeMarsh and Edward J. Giorgianni, "Color Science for Imaging Systems", *Physics Today*, September 1989, 44-52.

[3] W.F. Schreiber, *Fundamentals of Electronic Imaging Systems, Second Edition* (Springer-Verlag, 1991), ISBN 0-387-53272-2.

[4] Publication CIE No 15.2, *Colorimetry, Second Edition* (1986), Central Bureau of the Commission Internationale de L'Éclairage, Vienna, Austria.

[5] Günter Wyszecki and W.S. Styles, *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, Second Edition* (John Wiley & Sons, New York, 1982), ISBN 0-471-02106-7.

[6] D.B. Judd and Günter Wyszecki, *Color in Business, Science and Industry, Third Edition* (John Wiley, New York, 1975), ISBN 0-471-45212-2.

[7] R.W.G. Hunt, *The Reproduction of Colour in Photography, Printing and Television, Fourth Edition* (Fountain Press, Tolworth, England, 1987), ISBN 0-86343-088-0.

[8] ITU-R Recommendation BT.709, *Basic Parameter Values for the HDTV Standard for the Studio and for International Programme Exchange* (1990), [formerly CCIR Rec. 709], ITU, 1211 Geneva 20, Switzerland.

[9] Bruce J. Lindbloom, "Accurate Color Reproduction for Computer Graphics Applications", *Computer Graphics*, Vol. **23**, No. 3 (July 1989), 117-126 (proceedings of SIGGRAPH '89).

[10] William B. Cowan, "An Inexpensive Scheme for Calibration of a Colour Monitor in terms of CIE Standard Coordinates", *Computer Graphics*, Vol. **17**, No. 3 (July 1983), 315-321.

[11] SMPTE RP 177-1993, *Derivation of Basic Television Color Equations*.

[12] *Television Engineering Handbook, Featuring HDTV Systems, Revised Edition* by K. Blair Benson, revised by Jerry C. Whitaker (McGraw-Hill, 1992), ISBN 0-07-004788-X. This supersedes the Second Edition.

[13] Roy Hall, *Illumination and Color in Computer Generated Imagery* (Springer-Verlag, 1989), ISBN 0-387-96774-5.

[14] Chet S. Haase and Gary W. Meyer, "Modelling Pigmented Materials for Realistic Image Synthesis", *ACM Transactions on Graphics*, Vol. **11**, No. 4, 1992, p. 305.

[15] Maureen C. Stone, William B. Cowan and John C. Beatty, "Color Gamut Mapping and the Printing of Digital Color Images", *ACM Transactions on Graphics*, Vol. **7**, No. 3, October 1988.

[16] John Watkinson, *An Introduction to Digital Video* (Focal Press, Sevenoaks, Kent, England, 1994), ISBN 0-240-51380-0.

[17] Agfa Corporation, *An introduction to Digital Color Prepress, Volumes 1 and 2 (*1990), Prepress Education Resources, P.O. Box 7917 Mt.Prospect, IL 60056-7917. 800-395-7007.

[18] Robert Ulichney, *Digital Halftoning* (MIT Press, Cambridge, MA, 1988), ISBN 0-262-21009-6.

[19] Peter Fink, *PostScript Screening: Adobe Accurate Screens* (Adobe Press, 1992), ISBN 0-672-48544-3.

[20] *Color management systems: Getting reliable color from start to finish*, Aldus Corporation, <http://www.adobe.com/PDFs/FaxYI/500301.pdf>.

[21] *Overview of color publishing*, Aldus Corporation, <http://www.adobe.com/PDFs/FaxYI/500302.pdf>. Despite appearances and title, this document is in greyscale, not colour.

47 Contributors

Thanks to Norbert Gerfelder, Alan Roberts and Fred Remley for their proofreading and editing. I learned about colour from LeRoy DeMarsh, Ed Giorgianni, Junji Kumada and Bill Cowan. Thanks!

This note contains some errors: if you find any, please let me know.

I welcome suggestions for additions and improvements.