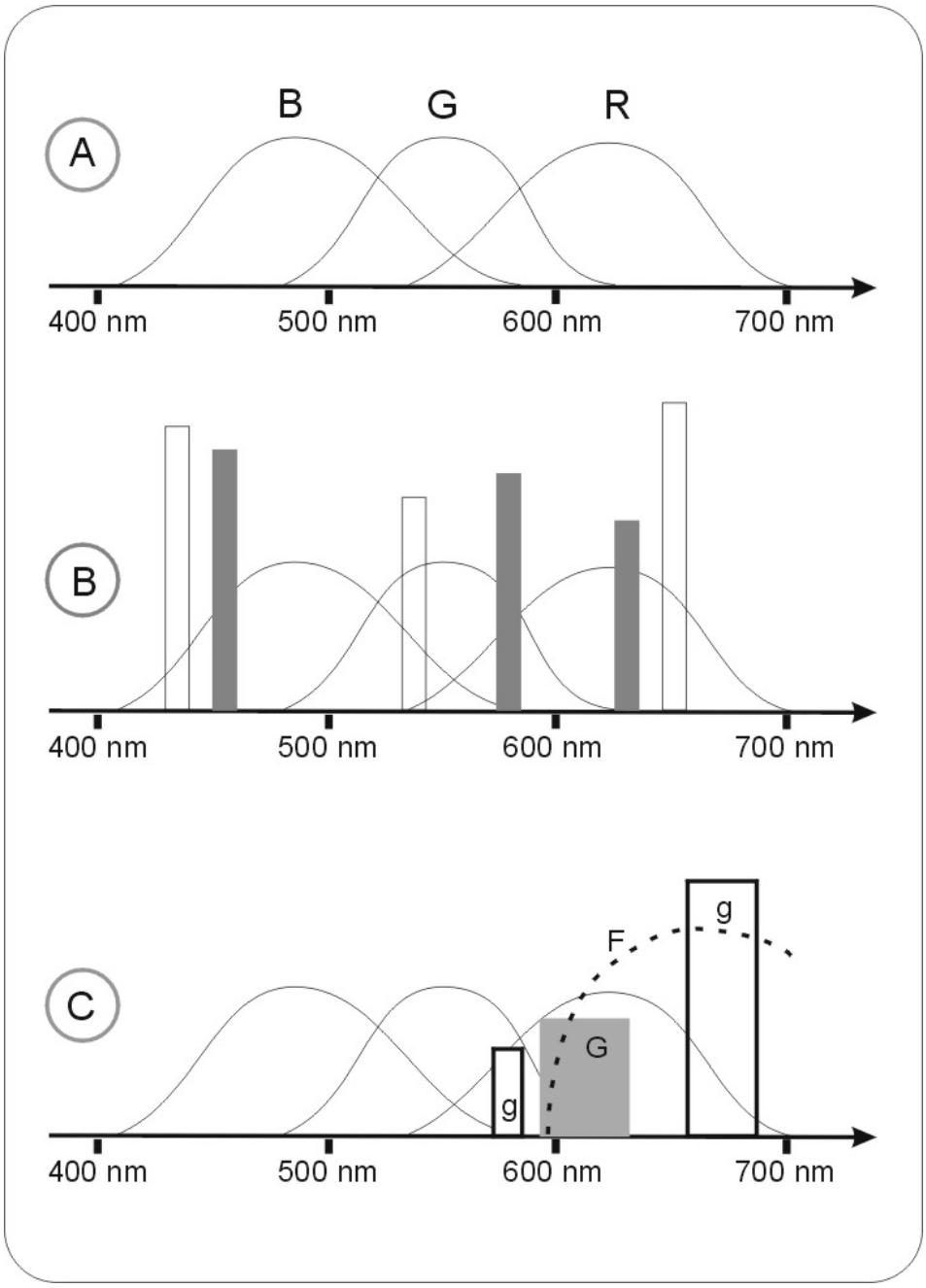
Die Farbe

Das Wesen der Farbe

Das sichtbare Tageslicht ist aus den elektromagnetischen Strahlen mit den Wellenlängen zwischen etwa 400 und 700 nm (1 nm = 1 Nanometer = 0,000001 mm) zusammengesetzt. Andere Strahlen sind für das menschliche Auge unsichtbar. Das weisse Tageslicht ist eine von vielen möglichen Mischungen von Wellenlängen. Schon Isaac Newton (1642-1727) zerlegte einen Sonnenstrahl mittels eines Prismas in seine Komponenten, die Regenbogenfarben. Da sich der Brechungskoeffizient mit der Wellenlänge stetig verändert, projizierte Newtons Prisma ein kontinuierliches Sonnenspektrum, wie wir es vom Regenbogen her kennen, das die Strahlungen vom violetten (400 nm) über den blauen, grünen, gelben, orangen und roten (700 nm) Bereich trennte. Newton bewies damals auch, dass die Oberfläche einer schnell rotierenden Scheibe, die sektorweise blau, grün und rot gefärbt war, grau erschien, sobald die Rotationsgeschwindigkeit gross genug war.

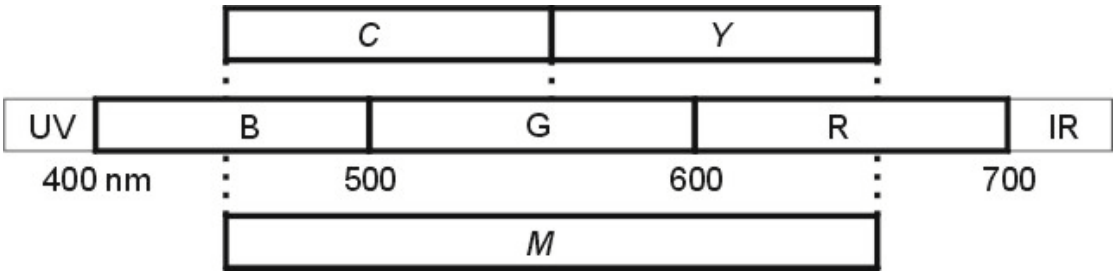
Welcher ist der Mechanismus des Farbensehens? Die Lösung zu diesem Rätsel verdanken wir Thomas Young (1773-1829), Helmholtz (1821-94) und Maxwell (1831-1879), welche die **Dreifarbentheorie** begründeten und bewiesen. Wie Young schon vermutete, besitzt die menschliche Netzhaut (Retina), die gewissermassen den Bildschirm darstellt, auf den die Augenlinse ihre Bilder projiziert, zwei Klassen von lichtempfindlichen Sinneszellen, die **Stäbchen** und die **Zäpfchen**. Die Stäbchen beschränken ihre Tätigkeit auf die Wahrnehmung von Licht, ohne farbliche Unterscheidung, während die Zäpfchen in drei Gruppen aufgeteilt sind: die einen weisen die höchste Empfindlichkeit im blauen Spektralbereich auf, andere im grünen und die letzten im roten. Die Abbildung 'Farbsensibilität des Auges' stellt diese Empfindlichkeitsverteilung der drei Zapfentypen graphisch dar. Es sei darauf hingewiesen, dass dieses Schema, genau gleich wie alle anderen Schemata dieses Buches keine Quantitative, sondern ausschliesslich qualitative Information vermittelt.



Farbsensibilität des Auges

Wir werden hier für die Bezeichnung der drei Spektralregionen höchster Empfindlichkeit der drei Zapfentypen die Bezeichnungen **Blau, Grün** und **Rot** verwenden, was nicht in allen Büchern gleich gehalten

wird. Vielfach werden die Namen Violett, Grün und Orangerot im gleichen Sinne angewandt. Wieder andere, vor allem ältere Texte unterscheiden zwischen additivem und subtraktivem Blau (die wir hier Blau und Cyan nennen), und analog zwischen additivem und subtraktivem Rot (Rot und Magenta). Die Farbe Cyan wird manchmal als Blaugrün bezeichnet, Magenta als Purpur.



Die Farben im Spektrum

Die Stäbchen unserer Netzhaut sind stärker lichtempfindlich als die Zapfen. Im Bezirk des schärfsten Sehens unserer Netzhaut, der Macula, kommen überhaupt keine Stäbchen, sondern nur noch Zapfen vor. Jeder normal sehende Mensch kann die beiden letzteren Tatsachen an sich selbst beobachten. Erstens wird er nämlich feststellen, dass bei extrem schwacher Beleuchtung zwar noch Formen wahrgenommen werden, nicht aber Farbtöne. Zweitens folgt aus dem Fehlen der Stäbchen im Gebiete der Macula (dem Bereich des schärfsten Sehens) die Tatsache, dass bei schwacher Beleuchtung die Objekte nicht mehr 'fixiert' werden können. Schwache Lichtpunkte in der Nacht sieht man also nur, wenn man knapp an ihnen vorbeisieht.

Farbe ist also eine physiologische, nicht physikalische Erscheinung. Wenn wir von der **Farbe eines Gegenstandes** sprechen, meinen wir damit die physiologische Farbempfindung, die uns dieser Gegenstand übermittelt, wenn wir ihn bei einem Licht betrachten, dessen spektrale Zusammensetzung ähnlich der des weissen Tageslichtes ist. Eine bestimmte Farbe ist also durch die Reizung der drei Zapfentypen vollständig bestimmt. Es gibt verschiedene spektrale Zusammensetzungen eines Lichtstrahles, die uns die gleiche Farbempfindung übermitteln. Der Bereich B der Abbildung 'Farbsensibilität des Auges' ist ein Beispiel, das die Möglichkeit zeigt, mit zwei verschiedenen Gruppen von drei fast monochromatischen (aus einer einzigen Wellenlänge bestehenden) Lichtstrahlen den gleichen Farbeindruck zu erzeugen. Da nun jede (physiologische) Farbe durch die drei Lichtmengen, die jeder der drei Zapfentypen registriert, vollständig bestimmt ist, kann jede Farbe durch ein geordnetes Zahlentrippel ausgedrückt werden. Die erste Komponente dieses Zahlen-

trippels bezieht sich auf die von den blauempfindlichen Zapfentypen registrierte Lichtmenge, die zweite Komponente bezieht sich analog auf die grünempfindlichen, die dritte Komponente auf die rotempfindlichen Zapfen.

Beispiel: reines Blau: (1/0/0), Weiss (1/1/1), Schwarz (0/0/0).

Die drei Farben Blau, Grün und Rot heissen die drei **Urfarben**.

Ein durchsichtiges Material, das die Strahlungen der verschiedenen Wellenlängen nicht in gleichem Masse hindurch lässt, heisst ein **Filter**. Zwei Strahlungen heissen **komplementär**, wenn sie zusammen weisses Licht bilden. Wird also ein weisser Lichtstrahl gefiltert, ist das absorbierte Licht komplementär zum durchgelassenen.

Es gibt zwei grundsätzliche Arten der Farbmischung, die **additive** und die **subtraktive**. Die additive Mischung zweier Filter kann beispielsweise erhalten werden, indem man die beiden mit zwei Projektoren aufeinanderprojiziert. Die subtraktive Mischung der beiden Filter erhält man analog, indem man die beiden aufeinanderlegt und zusammen mittels eines Projektors projiziert. Bei der additiven Farbmischung werden hellere, bei der subtraktiven, dunklere Farben erreicht. Sind die beiden Farbfilter, die gemischt werden sollen komplementär, so erhält man bei der additiven Farbmischung Weiss, bei der subtraktiven Schwarz.

Der Aspekt der additiven Mischfarbe zweier Farben hängt nur vom Aspekt, nicht von der spektralen Zusammensetzung der beteiligten Farben ab (Gesetz von Grassmann). Andererseits ist die subtraktive Farbmischung zweier Farben stark von deren spektralen Zusammensetzung abhängig. Der Bereich C unserer Abbildung soll diesen Sachverhalt anhand eines künstlich konstruierten Beispiels erklären. G und g seien zwei gelbe Filter mit annähernd gleichem Aspekt, aber mit vollständig verschiedener spektraler Durchlässigkeit. Werden die beiden Gelbfilter nacheinander durch ein gleiches oranges Filter mit der Durchlässigkeitsverteilung F betrachtet, so ist das Resultat im ersten Fall eine gelb-orange Farbe, im zweiten Fall ein dunkles Rot. Die subtraktive Mischung von g und G ist Schwarz. Obwohl dieses Beispiel künstlich konstruiert wurde und sich physikalisch kaum verwirklichen lässt, zeigt es doch deutlich einen Effekt, dem alle Farbstoffe mehr oder weniger ausgesetzt sind. Hier liegt auch der Grund für die Tatsache, dass Farbstoffe, die bei Kunstlicht untereinander gleich erscheinen, bei Tageslicht plötzlich stark voneinander abweichen. Im Farbendruck wirken die durchsichtigen (auch lasieren-

den) Farbschichten als Farbfilter und daher ist es nicht erstaunlich, dass die Farben eines Mehrfarbendruckes von der spektralen Qualität der verwendeten Farbstoffe und nicht nur von deren Aspekt abhängig sind. Beim Übereinanderdrucken lasierender Farben (bei deckenden Farben natürlich erst recht) ist die Farbe auch von der Reihenfolge der einzelnen Farbplatten anhängig. Das kommt daher, dass die Farbstoffe nie vollständig durchsichtig sind und somit ein Teil des Lichtes von der obersten Schicht zurückgeworfen (reflektiert) wird.

Es leuchtet ein, dass anhand der drei Urfarben Blau, Grün und Rot durch Addition alle existierenden Farben erhalten werden können. Entsprechend können auf subtraktive Art alle Farben anhand der drei paarweise additiven Kombinationen der drei Urfarben wiedergegeben werden. Cyan ist die additive Mischung von Blau und Grün, Gelb ist die Summe von Grün und Rot, Magenta ist die Summe von Blau und Rot. Diese letzte Farbe kommt im Spektrum nicht vor!

Blau, Grün und Rot, die drei Urfarben, werden manchmal als **additive Grundfarben**, Cyan, Gelb und Magenta als **subtraktive Grundfarben** bezeichnet. Alle diese Farben, zusammen mit Schwarz und Weiss[1] werden manchmal als die **acht Grundfarben** bezeichnet.

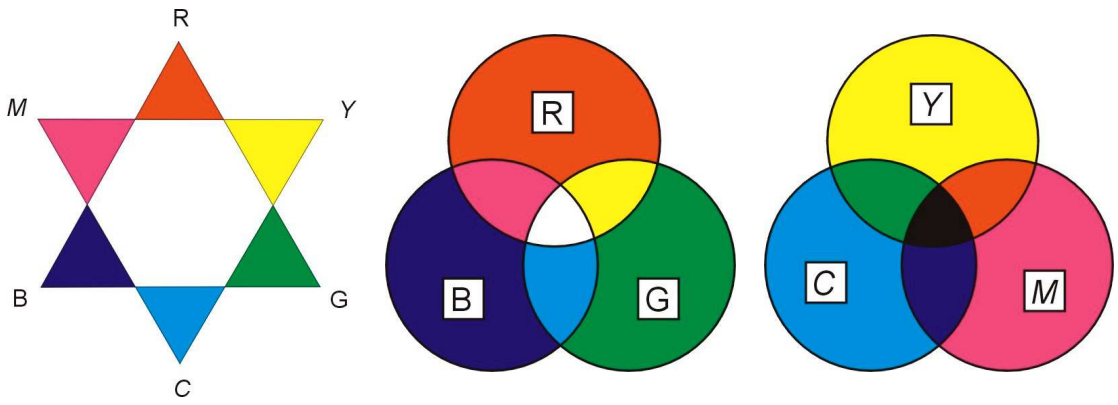
Wir werden im folgenden für die Grundfarben folgende aus dem Englischen hergeleitete Kürzel verwenden: B für Blau, G für Grün, R für Rot, C für Cyan, M für Magenta und Y für Gelb (Yellow).

Die folgende Tafel möge zum besseren Verständnis der Zusammenhänge zwischen Urfarben und Grundfarben beitragen:

Symbol	Farbe	Charakteristik			
B	Blau	(1/0/0)		Urfarben Additive Grundfarben	**Grundfarben**
G	Grün	(0/1/0)			
R	Rot	(0/0/1)			
C	Cyan	(1/1/0)		Subtraktive Grundfarben	
M	Magenta	(1/0/1)			
Y	Gelb	(0/1/1)			
	Weiss	(1/1/1)			
	Schwarz	(0/0/0)			

[1] Ob man Schwarz und Weiss als Farben bezeichnet ist reine Definitionsfrage.

Die Abbildungen 'Die Farben im Spektrum' und 'Das Farbendreieck' sind drei Möglichkeiten der graphischen Darstellung der zwischen den Grundfarben existierenden Verhältnisse.



Das Farbendreieck Additive Farbmischung Subtraktive Farbmischung

Es gibt eine ganze Reihe Farberscheinungen, die sich mit der klassischen Dreifarbentheorie nicht ausreichend erklären lassen. Schon Grassmann bemerkte, dass zur Darstellung gewisser Farben negative Komponenten eingesetzt werden müssten, was der Physik widerspricht. Die Kombination mehrerer Tatsachen vermag die meisten Abweichungen von der Theorie zu begründen. Die Empfindlichkeitskurven unserer Zäpfchen sind nicht so schön schematisch angeordnet, wie die in der Abbildung *Farbsensibilität des Auges* idealisiert dargestellt ist. Die verschiedenen Zäpfchen sprechen auf einen Reiz nicht gleich schnell an, und die Dauer des Reizes ist auch nicht gleich gross. Im Gehirn könnte die starke Reizung eines Zäpfchens die Empfindlichkeit eines anderen Zäpfchens maskieren, ähnlich wie in unserem Gehör die Wahrnehmung eines Tons durch andere Töne maskiert werden kann. Und schliesslich ist zu bemerken, dass wir die Rolle der Stäbchen in der Dreifarbentheorie nicht beachtet haben.

Die Reproduktion der Farben

Die meisten Farbreproduktionssysteme basieren auf der Dreifarbentheorie. Vorweg soll eine Ausnahme von dieser Regel besprochen werden, nämlich das Verfahren von Lippmann[1].

Das Verfahren von Lippmann

Dieses Verfahren bildet eine der wichtigsten Ausnahmen im Bereich der farbenphotographischen Aufnahmeverfahren, indem durch diese Methode die genaue spektrale Zusammensetzung der reproduzierten Farben wiedergegeben wird. Das Verfahren, für dessen Erfindung um 1891 Gabriel Lippmann (1845-1921) im Jahre 1908 den Nobelpreis erhielt, ist das erste **direkte Verfahren** in der Geschichte der Farbenphotographie.

Lippmann belichtete seine Platten durch den Glasträger hindurch, wobei die panchromatische Emulsion auf einer Quecksilberschicht lag. So durchdrangen die Lichtstrahlen die lichtempfindliche Emulsion, wurden anschliessend am Quecksilber reflektiert und durchdrangen die Emulsion ein zweites Mal in umgekehrter Richtung. Die Strahlen und ihr Spiegelbild belichteten die Platte in Form von hauchdünnen **Interferenzlamellen**, deren Abstand mit der Wellenlänge des Lichtes variieren. Nach der Entwicklung wurde die Platte wieder auf Quecksilber gelegt, wobei die Farben des Originals wieder in Erscheinung treten. Die Interferenzlamellen der Schicht haben nämlich die Eigenschaft, das Licht derselben Wellenlänge, das sie erzeugte, bevorzugt passieren zu lassen. Die so entstehenden Farben kommen also auf ähnliche Weise zustande, wie diejenigen der Seifenblasen, der Ölflecken auf nasser Strasse, der Newtonschen Ringe oder der dünnen Oxidschicht auf erhitzten Kupferplatten. Theoretisch ist das Lippmansche Verfahren perfekt, werden doch die Farben in ihrer originalen spektralen Zusammensetzung wiedergegeben. Trotzdem kam das Verfahren nie über das Stadium des Laborexperiments hinaus.

[1] Gabriel Lippmann (1845-1921), Physiknobelpreis 1908.

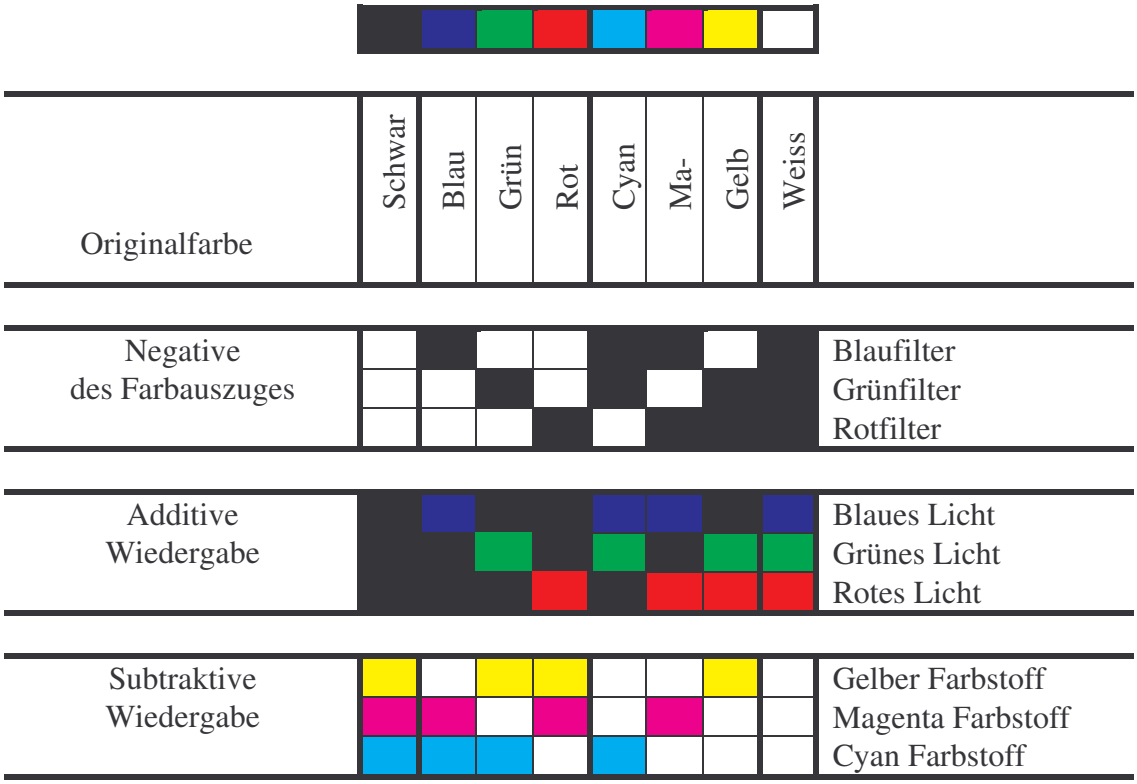
Die Dreifarbenphotographie

Alle auf der Dreifarbentheorie beruhenden farbenphotographischen Verfahren bestehen aus zwei Teilen, dem **Auszug** (Separation, Analyse) und der **Wiedergabe** (Restitution, Synthese). Beim Ausziehen oder Trennen einer Farbe werden die quantitativen Anteile dreier fester Grundfarben so bestimmt, dass diese, additiv oder subtraktiv vermischt wieder eine Farbe des gleichen Aspekts wie die Originalfarbe erzeugen. Die Wiedergabe ist der Teil der Reproduktion, bei der die drei Farbauszüge in ihren Grundfarben so eingefärbt werden, dass deren (additive oder subtraktive) Überlagerung wieder die Farben des Originals erzeugt. Wir wollen hier drei Persönlichkeiten erwähnen, die einen entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung der Dreifarbentheorie und der Farbenphotographie ausübten. Der erste war der Physiker Maxwell (1831-1879), der im Jahre 1861 als erster die additive Synthese der drei Grundfarben Blau, Grün und Rot demonstrierte. Charles Cros (1842-1888) und Louis Ducos du Hauron (1837-1920) publizierten unabhängig voneinander und fast gleichzeitig ihre Gedanken über die Farbenphotographie im Jahre 1869.

Die auf der Dreifarbentheorie beruhenden Reproduktionsverfahren werden in **additive und subtraktive Verfahren** eingeteilt. Wird eine Farbreproduktion mit einer einzigen photographischen Aufname erreicht, spricht man von einem **direkten** Verfahren.

Der indirekte Dreifarbenauszug wird sowohl bei den additiven wie bei den subtraktiven Verfahren wie folgt durchgeführt:

Vom Objekt werden unter den genau gleichen Bedingungen drei Aufnahmen hergestellt, die erste durch ein **Blaufilter**, die zweite durch ein **Grünfilter** und die dritte durch ein **Rotfilter**. Das Aufnahmematerial muss panchromatisch, also für alle Wellenlängen des sichtbaren Lichtes empfindlich sein. Lasset uns die Wirkung der Filter anhand des Beispiels des Rotfilters betrachten. Das Rotfilter lässt nur die von den Farben Rot, Magenta, Gelb und Weiss reflektierten Strahlungen passieren. Diese Farben werden also im Rotfilterauszug das Negativ mehr oder weniger schwärzen. Die folgende Tafel stellt die Schwärzung der drei Farbenauszugsnegative im Gebiete der acht Grundfarben schematisch dar.

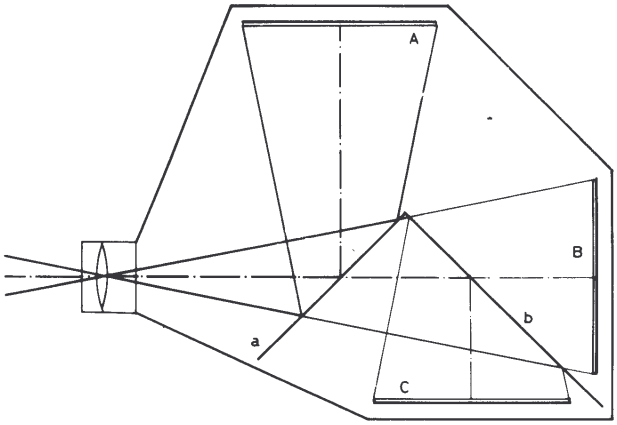


Dreifarbenphotographie

Die **indirekte Farbseparation**, die bis heute im Gebiete der Druckformenherstellung praktiziert wird, ist für die Reproduktion bewegter Gegenstände nicht geeignet. Zu Beginn des XX Jahrhunderts boten verschiedene Kamerafabrikanten speziell auf die Farbseparation ausgerichtete Kameras an. Die drei Plattenkassetten waren auf einer Schiene so angebracht, dass der Wechsel von einer zur anderen fast augenblicklich vorgenommen werden konnte. Die drei Filter waren meist im Inneren der Kamera (hinter dem Objektiv) auf einer Drehscheibe angebracht, so dass sie nach jeder Belichtung augenblicklich gewechselt werden konnten. Sogar vollständig automatische Maschinen wurden gebaut, die vom Augenblick des Abdrückens an alle weiteren Operationen übernahmen, vom Wechsel der Plattenkassetten über den Filterwechsel bis hin zur Anpassung der Belichtungszeit an den jeweils eingesetzten Farbfilter. Obwohl solche Kameras die drei Belichtungen in verhältnismässig kurzer Zeit vornahmen, konnten damit keine bewegten Gegenstände photographiert werden. Die ersten Kameras, welche die gleichzeitige Belichtung der drei Platten unter drei Filtern erlaubten, waren die nach einer Idee Ducos du Hauron's von 1860 gebauten.

Die Wiedergabe der Farben anhand der drei Auszüge kann auf additivem oder auf subtraktivem Wege geschehen. Im ersten Fall wird blaues,

grünes und rotes Licht gemischt. Im zweiten Fall werden als Filter wirkende, durchsichtige Farbstoffe in den Farben Cyan, Magenta und Gelb gemischt oder übereinandergedruckt.



Dreifarbenkamera

Beim additiven Verfahren erfolgt die klassische Wiedergabe durch Übereinander projizieren der drei Positive, die anhand der Auszugsnegative erhalten wurden. Dabei wird vor jedem Projektor ein Filter derselben Farbe angebracht, die bei der Aufnahme des betreffenden Auszugs verwendet wurde. Auf dem Bildschirm entsteht eine perfekte Reproduktion der natürlichen Farben. Dies war die von Maxwell im Jahre 1861 gezeigte Tatsache. Lasst uns den Mechanismus dieser Erscheinung anhand einer gelben Zone des Originals verfolgen: Bei der ersten Aufnahme wird die Platte in den gelben Zonen nicht belichtet, da das Blaufilter das gelbe Licht absorbiert. Die beiden anderen Aufnahmen jedoch werden im gelben gebiete belichtet, da sowohl das Grünfilter wie das Rotfilter gelbes Licht durchlassen. Unsere Zone wird also im ersten Negativ weiss, in den anderen beiden Negativen je schwarz erscheinen. Das Diapositiv, das durch das Blaufilter projiziert wird erscheint in der gelben Zone schwarz, die beiden anderen weiss. Auf dem Bildschirm werden also in der gelben Zone grünes und rotes Licht aufeinandertreffen. Die additive Mischung von Grün und Rot ergibt in der Tat Gelb. Die Tafel 'Dreifarbenphotographie' stellt dieses Prinzip anhand der Grundfarben dar.

F. E. Ives (1856-1937) erfand um 1892 ein Betrachtungsgerät zur additiven Betrachtung von Farbauszügen, das **Chromoskop**, das wie die Kamera zur gleichzeitigen Anfertigung von Farbauszügen nach Ducos du Hauron, auf einem System von halbdurchlässigen Spiegeln beruhte. Die Abbildung 'Dreifarbenkamera', in der a und b die beiden halbdurchlässigen Spiegel symbolisieren, stellt dieses Prinzip schematisch dar.

Bei der subtraktiven Farbsynthese werden die Schwärzen der Auszugsdiapositive durch die zum jeweiligen Filter komplementären Farbstoffe ersetzt. Das heisst, dass das schwarze Silberbild des *Blau*filterauszugs durch ein *gelbes* Farbstoffbild ersetzt wird. Analog entspricht dem *grünen* Filter die Farbe *Magenta* und dem *roten* Filter die Farbe *Cyan*. Die Farbe kann auf zwei Arten erhalten werden. Man kann chemisch das Silber der photographischen Emulsionen durch die entsprechenden Farbstoffe ersetzen (Tonung, Virage) und anschliessend die drei Farbauszugspositive übereinanderlegen, oder es können anhand der drei Diapositive drei Druckformen hergestellt werden, mit denen dann lasierende Druckfarben in den Farben Magenta, Gelb und Cyan in genauem Passer übereinander gedruckt werden.

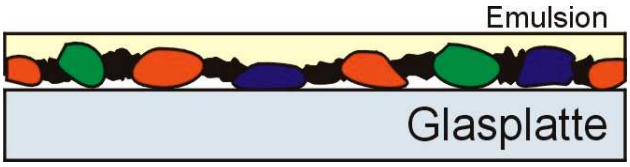
Lasst uns auch in diesem Fall den Mechanismus der Farbreproduktion anhand einer gelben Zone des Originals betrachten. Der Blaufilterauszug wird als einziger in dieser Zone nicht belichtet und infolgedessen wird sein Positiv als einziges in der gelben Region schwarz sein. Das Blaufilterpositiv wird in der Farbe Gelb abgedruckt.

Leider erfüllen die in der Praxis verwendeten Farbstoffe nicht die strengen Anforderungen, die bei der Dreifarbenreproduktion gestellt werden. Man bedenke in diesem Zusammenhang, dass zwei spektral verschieden zusammengesetzte Farbstoffe den gleichen Farbeindruck vermitteln können. Die photographische Industrie hat **Maskiersysteme** entwickelt, welche die Mängel, die aus der Beschaffenheit der Farbstoffe hergeleitet sind, fast vollständig zu korrigieren vermögen. Bei der Herstellung von Farbauszügen muss auch die Reihenfolge der Farben beim Druck berücksichtigt werden, da wie schon erwähnt, die Farbstoffe nie absolut transparent sind und daher etwa der Druck von Magenta auf Gelb von demjenigen in der umgekehrten Reihenfolge abweicht.

In den meisten Druckverfahren wird üblicherweise noch ein vierter Auszug hergestellt, der dazu dient, die dunklen Zonen zu verstärken. Der Dreifarbendruck wird durch diesen zusätzlichen Schwarzauszug zum **Vierfarbendruck**.

Alle gängigen Druckverfahren sind für den Abdruck von Drei- und Vierfarbendrucken geeignet, aber die am weitest verbreiteten sind das Offsetverfahren und der Rakeltiefdruck, sowie auch der Buchdruck. Beim Einsatz von autotypischen Rastern muss zum Vermeiden des Moiré-Effekte eine möglichst moiréfreie Rasterwinkelung eingehalten werden. Früher wurde der Blaufilterauszug (Gelb) mitunter mit einem unregelmässigen Kornraster abgedruckt. Beim herkömmlichen Rastertiefdruck müssen alle vier Rasterrichtungen genau parallel zueinander verlaufen, was einen äusserst genauen Passer voraussetzt.

Im Gebiete der Farbenphotographie wurden schon früh Systeme gesucht, welche die direkte Farbreproduktion mit einer einzigen Platte ermöglichen sollte. Der erste Erfolg in diesem Gebiet war der von Joly, der sein Verfahren 1894 in Dublin veröffentlichte. Joly belichtete seine panchromatischen Platten durch einen dreifarbigen **Linienraster**, der aus blauen, grünen und roten durchsichtigen Streifen aufgebaut war. Das von einem solchen Negativ erhaltene Diapositiv wurde in genauem Passer auf den bei der Aufnahme verwendeten Linienraster aufgelegt und in der Durchsicht betrachtet oder projiziert, wobei die Originalfarben wieder in Erscheinung traten. Nach welchem Prinzip arbeitet dieses Verfahren? Wenn wir unser Beispiel mit der gelben Bildzone an diese Technik anpassen, gelangen wir zu folgendem Resultat: Beim Aufnehmen der Photographie wird in der gelben Zone die Platte hinter den grünen und den roten, nicht aber hinter den blauen Streifen, belichtet. Im Diapositiv werden wir also hinter diesen Zonen grüne und rote Linien sehen. Das Auge, das ihrer Kleinheit wegen die roten und grünen Linien nicht als solche zu erkennen vermag, sieht gelbes Licht, da ja die Addition von Rot und Grün Gelb ist. Diese Art der additiven Mischung wird mitunter auch als optische Mischung bezeichnet. Die Bilder von Joly wiesen eine unruhige Linienstruktur auf, die feinen Linienraster, die etwa 80 Linien pro cm aufwiesen, waren schwer herstellbar und daher entsprechend teuer. Das Übereinanderlegen der Linienraster und der Diapositive in genauem Passer war problematisch. Aus all diesen Gründen konnte sich das Verfahren nicht durchsetzen und es wurde nach einfacheren und billigeren Systemen gesucht.



Plaque Autochrome

Ein wichtiger Schritt im Gebiete der Farbenphotographie wurde durch die Brüder Auguste und Louis Lumière[1] mit der Entwicklung ihrer berühmten *Plaques Autochromes* begangen. Die Plaques Autochromes wurden um 1903 erfunden und um 1907 auf den Markt gebracht. Es handelte sich um panchromatische Platten mit eingebautem **Dreifarbenraster**. Sie wurden folgendermassen hergestellt: Die saubere Glasplatte wurde vorerst mit einer sauberen Leimschicht überzogen, auf die eine Mischung von blau, grün und rot eingefärbten Kartoffelstärkekörnchen so verteilt wurde, dass sich die einzelnen Körnchen möglichst nicht überlappten.

[1] Auguste Lumière (1862-1954), Louis Lumière (1864-1948).

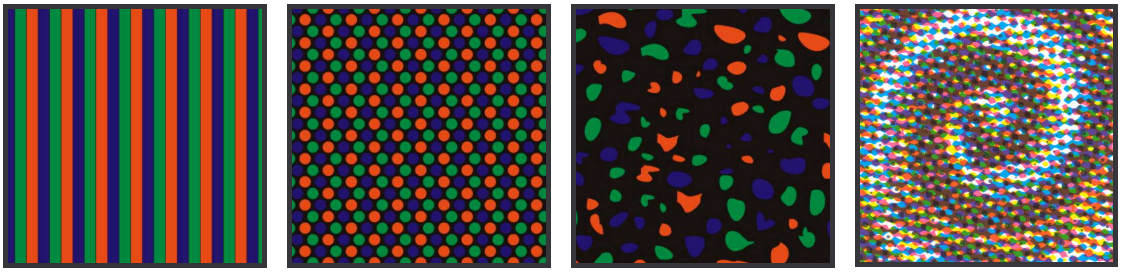
Das Gemisch wurde so ausgeglichen, dass sein Farbton Neutralgrau war. Die Lücken zwischen den Stärkekörnchen wurden mit feinstem Kohlenpulver ausgefüllt. Die empfindliche Schicht wurde direkt auf diese Struktur gegossen. Die Abbildung 'Plaque Autochrome' stellt einen Querschnitt durch eine solche Platte schematisch dar.

Die Photographie wurde durch den Glasträger hindurch aufgenommen und so verarbeitet, dass ein direktes Positiv entstand. Letzteres wurde folgendermassen erreicht: Die Platte wurde vorerst in einem normalen Entwicklungsbade verarbeitet. Wäre die Platte in diesem Stadium fixiert worden, wäre das Resultat ein Negativ gewesen, bei dem jede Farbe durch ihre Komplementärfarbe vertreten gewesen wäre. Die Platte wurde statt dessen in einem Kaliumpermanganatabschwächer ausgebleicht bis zur restlosen Entfernung des Silberbildes.

Aufnahme nach dem Verfahren der Gebr. Lumière

Nun wurde die Platte hellem Tageslicht ausgesetzt und anschliessend von neuem entwickelt. Die bei der Aufnahme nicht belichteten Teile wurden nun schwarz, während die Teile, die bei der Aufnahme belichtet wurden von der zweiten Entwicklung desto weniger betroffen wurden, je schwärzer das Silberbild vor der Abschwächung war. Auf diese Art wurde ein Farbdiapositiv erreicht, das auf dem gleichen Prinzip, wie das Verfahren von Joly beruht, mit dem unterschied, dass hier das Dreifarbenraster der Schicht fest einverleibt wurde. Dieses Verfahren wurde noch bis Ende der dreissiger Jahre des XX Jahrhunderts angewandt, als die weiter unten besprochenen chromogenen Farbfilme es ablösten.

Mit Ausnahme des Farbfernsehens (und des PC-Monitors) haben die additiven Verfahren den subtraktiven weichen müssen, die der modernen Farbenphotographie und dem Farbendruck zugrunde liegen.



Linienraster Punktraster Kornraster Dreifarbendruck

Betrachten wir mit einem Fadenzähler die Struktur eines herkömmlichen Farb-Offsetdrucks (Vierfarbendruck), können wir leicht feststellen, dass die Mehrfarbenautotypie strenggenommen eine gemischte Form zwischen additiver und subtraktiver Synthese darstellt, die vor allem in den dunklen Zonen eine gute Annäherung an die reine subtraktive Farbmischung bildet, da die Farbpunkte teilweise aufeinander, teilweise nebeneinander liegen. Im herkömmlichen Tiefdruckverfahren liegt eine (fast) reine subtraktive Farbmischung vor, da alle Punkte dieselbe Ausdehnung, nicht aber (wie beim Offset- oder beim Buchdruckverfahren) dieselbe Deckung aufweisen. In diesem Sinne ist der Lichtdruck ein ideales Verfahren, da er rasterfrei arbeitet.

Der Mehrschichtenfarbfilm

Die Geschichte der Mehrschichtenfarbfilme, die einen direkten Dreifarbenauszug liefern und heute den Markt beherrschen, begann im Anfang des XX. Jahrhunderts, als einzelne Pioniere der Farbenphotographie Aufnahmen auf Pakete von zwei oder drei überlagerten, verschieden sen-

sibilisierte Platten oder Filmen anfertigten, wodurch das Spektrum in zwei oder drei Teilregionen aufgeteilt wurde. Einer der frühesten Pioniere dieser Technik war Gurtner[1] in Bern, der im Jahre 1901 eine panchromatische Platte durch eine mit Naphtolorange gefärbte Platte so belichtete, dass die Schichten der beiden Platten aufeinander lagen. Die vordere, gefärbte und unsensibilisierte Platte war für den blauen Bereich des Spektrums empfindlich und wirkte gleichzeitig als Lichtfilter, das die blauen Strahlungen von der panchromatischen Platte abhielt, auf die somit auch nur ein Teil des Spektrums wirkte. Die Kopie (Diapositiv) der mit Naphtolorange gefärbten Platte (die übrigens während der Verarbeitung ihre Färbung verlor) wurde blau getont (Virage), die andere Kopie gelb. Legte man die beiden Platten in genauem Passer übereinander, entstand ein Farbbild, das mit Ausnahme der roten Töne, die mit diesem System nicht wiedergegeben werden konnten, einen recht natürlichen Farbeindruck verlieh.

Es wurden übrigens noch gegen Ende des XX Jahrhunderts Fernsehbild-Projektoren eingesetzt, die nur die beiden Farben Grün und Magenta aufeinander projizierten, was eine ähnliche Zweifarbenannäherung bewirkte, wie das System von Gurtner.

Bereits im ersten Jahrzehnt des XX Jahrhunderts wurden in der Fabrik von Dr. J. H. Smith[2] in Zürich Platten hergestellt, die drei lichtempfindliche Schichten auf einem einzigen Schichtträger vereinigten. Vor der Entwicklung wurden die drei Schichten durch Abziehen voneinander getrennt, um sie einzeln verarbeiten zu können.

Das Problem der Vereinigung dreier Schichten auf einem Träger, so dass diese nicht mehr voneinander getrennt werden müssen, wurde im Laufe der Geschichte vor allem auf zwei Arten gelöst, nämlich durch das Silberfarbbleichverfahren und vor allem durch die chromogene Entwicklung.

Das **Silberfarbbleichverfahren**, das sich heute weitgehend auf die Herstellung von Laborkopien beschränkt, wird vor allem durch das *Gasparcolorverfahren* (ab 1932) und das *Cilchrome-Verfahren* vertreten, mit welchem direkt Papiervergrösserungen ab Diapositiven hergestellt werden können. Das Prinzip dieses Verfahrens ist die teilweise Zerstörung der in den drei Schichten enthaltenen Farbstoffe, wobei diese Zerstörung proportional ist zu dem bei der Entwicklung gebildeten metallischen Silber. Nach dem Ausbleichen des Silberbildes mit einem Bleichbad und einem Fixierbad, erhält man ein positives Farbbild. Man spricht auch von chromolytischer Entwicklung.

---

[1] Adolf Alfred Gurtner (1869-1948).
[2] John Henry Smith (?-1917).

Die zweite Lösung des Problems, die in Hinsicht auf ihre Verbreitung wesentlich wichtiger ist, ist die **chromogene Entwicklung** (farbaufbauende Entwicklung). Die chemische Lösung des Problems verdanken wir vor allem den Anstrengungen von Homolka[1], Fischer[2] und Siegrist. Die Technische Lösung ist der Ausdauer zweier Musiker, Mannes[3] und Godowsky[4] zu verdanken. Letzterer ist der Sohn des berühmten Pianisten.

Die Bildung der Farbstoffe bei der chromogenen Entwicklung beruht auf der chemischen Reaktion der bei der Reduktion der belichteten Silberhalogene oxidierten Entwicklersubstanzen mit den sogenannten **Farbkupplern**. Diese Farbkuppler können im Entwicklungsbad enthalten sein, wie dies beim 1935 von Mannes und Godowsky entwickelten *Kodachrome*-Verfahren der Fall war, oder aber sie können bereits bei der Herstellung des Filmes den drei Schichten beigegeben werden, wie beim *Ektachrome*-Material. Während die Materialien mit eingebauten Farbkupplern wahlweise zu positiven oder negativen Bildern entwickelt werden können, produzieren die Materialien ohne eingebaute Farbkuppler stets Positive.

Die Entwicklung der Materialien ohne eingebaute Farbkuppler geht folgendermassen vor sich: Zuerst werden die drei Schichten in einem nicht chromogenen Entwickler entwickelt. Anschliessend wird der Film einer ganz bestimmten Menge roten Lichtes ausgesetzt, die nur auf den komplementären Teil der rotempfindlichen Schicht wirkt (die spätere Cyanschicht), da die anderen Schichten rotunempfindlich sind. Der Film wird jetzt mit dem farbstoffbildenden (chromogenen) Entwickler entwikkelt, der den Farbkuppler für Cyan enthält. In der Cyanschicht entsteht also ein cyanfarbenes Farbstoffbild, das zu den beiden Silberbildern, dem positiven und dem negativen, hinzukommt. Die beiden anderen Schichten werden analog behandelt. Zuletzt wird das Silber ausgebleicht, so dass ein positives Farbstoffbild zurückbleibt.

Die Materialien, bei denen die entsprechenden Farbkuppler in den drei Schichten eingelagert sind, werden mit einem chromogenen Entwickler entwickelt, der die drei Silberbilder und die drei Farbstoffbilder gleichzeitig entstehen lässt. Das Bildsilber wird auch hier in einem Bleich- und einem Fixierbad restlos entfernt. Das Resultat ist ein Farbnegativ, bei dem die einzelnen Farben den Komplementärfarben des Originals entsprechen. Soll direkt ein Diapositiv entstehen, wird das Material vorerst in einem nicht chromogenen Entwickler behandelt. Dann wird die Entwicklung unterbrochen und der Film dem hellen Tageslicht ausgesetzt. Die chro-

---

[1] Benno Homolka (1860-1925).
[2] Rudolf Fischer (1881-1957).
[3] Leopold Mannes (1899-1964).
[4] Leopold Godowsky (1900-1983), Sohn von Leopold Godowsky (1870-1938).

mogene Entwicklung, die gleichzeitig mit dem Nachbelichten erfolgen kann, bildet gleichzeitig die drei Silberbilder und die drei Farbstoffbilder. Nach dem Bleichbad erhält man ein Farbdiapositiv.

Die meisten photographischen Farbmaterialien sind folgendermassen aufgebaut. Eine erste Schicht ist ausschliesslich blauempfindlich (Gelbschicht). Die zweite Schicht ist grünempfindlich (Magentaschicht) und die dritte ist rotempfindlich (Cyanschicht). Zwischen der blauempfindlichen und der grünempfindlichen Schicht ist meist eine gelbe Filterschicht eingelagert, welche die blauen Strahlungen von den darunterliegenden Schichten abhält. Der gelbe Farbstoff wird während der Entwicklung aufgelöst.

Diesen Schichtaufbau eines entwickelten Dreischichtenfarbfilms kann der Leser durch vorsichtiges Kratzen in den schwarzen Zonen eines unbrauchbaren entwickelten Farbfilmes feststellen.

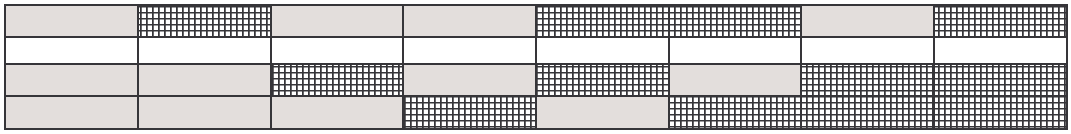
Die beiden Tafeln 'Die negative chromogene Entwicklung' und 'Die positive chromogene Entwicklung' schematisieren die Verarbeitung eines dreischichtigen Farbfilms zu einem Negativ (a) und zu einem Diapositiv (b). Die vier in der Abbildung dargestellten Schichten sind von oben nach unten:

1) Blauempfindliche Schicht
2) Gelbfilter
3) Grünempfindliche Schicht
4) Rotempfindliche Schicht

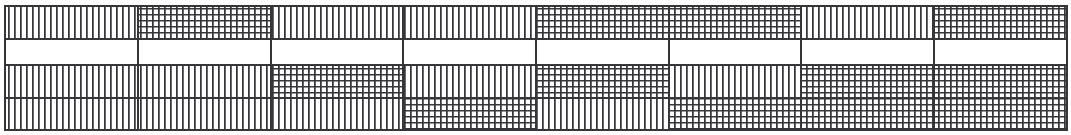
Anhand eines Farbnegativs kann durch Projektion (mit einem Vergrösserungsgerät) auf ein ähnlich aufgebautes photographisches Farbpapier ein positives Bild erhalten werden. Dabei müssen die Farben fast immer korrigiert werden, da sowohl das Negativ, wie auch die Lichtquelle des Vergrösserungsgerätes einen sogenannten **Farbstich** aufweist (Vorherrschen eines bestimmten Farbtons). Diese Korrektur wird mit Filtern entweder auf additive oder auf subtraktive Art ausgeführt. Im ersten Fall wird die Belichtung in drei Teilbelichtungen durch ein blaues, ein grünes und ein rotes Filter zerlegt. Im subtraktiven Fall wird eine einzige Belichtung durch ein Filterpaket durchgeführt, das aus verschieden dichten Filtern der Farben Cyan, Magenta und Gelb besteht. Diese Filtersätze können durch einen Farbmischkopf ersetzt werden, in dem meist blaues, grünes und rotes Licht im geeigneten Verhältnis gemischt werden.

Die negative chromogene Entwicklung

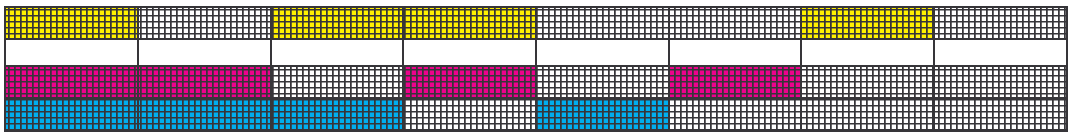
Originalfarben



Erste Belichtung und erste, nicht chromogene Entwicklung



Zweite Belichtung, mit weissem Licht



Chromogene Entwicklung

Bleichung und Fixierung

Endresultat

Bedeutung der Schraffuren

Silberhalogen
Latentes Bild
Metallisches Silber

Die positive chromogene Entwicklung

Die Sofortbildphotographie

1947 erfand Edwin Land ein Verfahren, das es erstmals möglich machen sollte, innerhalb von wenigen Minuten zu einer photographischen Aufnahme zu gelangen, und dies ohne komplizierte Einrichtungen und ohne Fachkenntnisse. 1963 brachte die Firma Polaroid ein entsprechendes System für farbige Aufnahmen auf den Markt. Anschliessend sei das Prinzip, auf dem diese Technik aufgebaut ist, kurz erläutert. Da sich die verschiedenen konsultierten Quellen bei der Beschreibung der Einzelheiten widersprechen, ist die Beschreibung mit Vorsicht zu geniessen.

Wie beim Kodachrome haben wir es auch hier mit einem Mehrschichtenverfahren zu tun. Das Verfahren von Polaroid und Land arbeitet mit einem Paket aus zwei überlagerten Filmen, dem Negativfilm und dem Positivfilm. Zwischen den beiden Filmen befindet sich parallel zum Bildrand ein Wulst mit einer gallertartigen Paste, die einen Aktivator, ein weisses Pigment und einen schwarzen Farbstoff enthält. Nach der Belichtung wird die Filmpackung zwischen zwei Stahlwalzen hindurchgezogen, welche die Paste gleichmässig zwischen die beiden Filme verteilt, wobei die für die Entwicklung nötigen chemischen Reaktionen gestartet werden.

Das bei der Belichtung eintreffende Licht durchdringt zuerst den Positivfilm und anschliessend nacheinander die verschiedenen Schichten des Negativfilms. Wie beim Kodachrome Verfahren haben wir auch hier je eine blauempfindliche, grünempfindliche und rotempfindliche Schicht. Auf die jeweiligen lichtempfindlichen Schichten folgt je eine Entwicklerschicht. Die den drei verschiedenen Urfarben entsprechenden Schichtpaare werden durch Zwischenschichten voneinander getrennt.

	Schichtträger des Positives (durchsichtig)
	Säureschicht
	Verzögerungsschicht
	Bildschicht
► **Aktivierungspaste** ►	
	Blauempfindliche Schicht
	Entwickler
	Zwischenschicht
	Grünempfindliche Schicht
	Entwickler
	Zwischenschicht
	Rotempfindliche Schicht
	Entwickler
	Schichtträger des Negatives (Schwarz)

Die Entwicklersubstanz der einzelnen Entwicklerschichten sind mit den entsprechenden subtraktiven Farbstoffen (Gelb in der blauempfindlichen Schicht, Magenta in der grünempfindlichen Schicht und schliesslich Cyan in der rotempfindlichen Schicht) entsprechenden Substanzen in einem Molekül vereinigt. Der Katalysator der Paste, welche jetzt die beiden Filme vereinigt, diffundiert bis in die Entwicklerschichten und befreit die dort gebundenen "Mischmoleküle". Der schwarze Farbstoff in der Paste ermöglicht es, den Film gedämpftem Tageslicht auszusetzen.

Die belichteten Silberhalogene reagieren nun mit dem Entwickler, so dass das entstehende metallische Silber mit dem farbstoffspezifischen Molekül eine Verbindung entsteht, welche die Eigenschaft hat, den entsprechenden Farbstoff zu binden. Diejenigen Farbstoffmoleküle aber, die von keiner dieser Silberverbindungen festgehalten werden, können sich ungehemmt durch alle Schichten bis zum Positivfilm verbreiten, wo sie sich an jeder Stelle der Bildschicht im richtigen Verhältnis vermischen, um die Originalfarbe wiederzugeben.

Die aus der Säureschicht allmählich durch die Verzögerungsschicht dringende Säure neutralisiert die stark alkalischen Entwickleranteile in der Bildschicht, wodurch die Haltbarkeit des Bildes gesteigert wird. Andererseits wird der schwarze Farbstoff in der Zwischenschicht unter der Wirkung der Säure durchsichtig, so dass jetzt das in der Aktivierungspaste enthaltene weisse Pigment zum Zuge kommt. Seine Aufgabe besteht darin, das auffallende Licht zu reflektieren und es von den unteren Schichten abzuhalten.

Das Schnellbildverfahren hat heute verschiedene Anwendungsbereiche. Es ist vor allem dann wichtig, wenn eine bestimmte Aufnahme nicht wiederholt werden kann, und man sicher sein muss, dass diese gelungen ist. Aber auch für Kunden, die nicht warten wollen, wird das Verfahren oft eingesetzt, wie etwa bei der Anfertigung von Passphotos.

Aber auch in der industriellen Photographie leistet das Verfahren wertvolle Dienste: im Profistudio wird vielfach der Rückteil der Studiokamera mit einer speziellen Kassette ausgerüstet, die Sofortfilme aufnehmen kann. Entspricht das Resultat den Erwartungen des Photographen, wird die Aufnahme auf den definitiven Planfilm wiederholt, welcher die für anspruchsvolle Arbeiten erforderliche Qualität liefert, aber erst Stunden oder Tage später in entwickelter Form vorliegt.

Die von Land gegründete Firma Polaroid liefert auch spezielle Materialien, etwa für Schwarzweissaufnahmen. Das Funktionsprinzip entspricht grundsätzlich dem oben beschriebenen Verfahren.

In letzter Zeit wird die Sofortbildphotographie immer mehr duch die digitale Photographie ersetzt. Persönlich glaube ich, dass die Tage der Sofortbildphotographie gezählt sind.

Der autotypische Vierfarbendruck

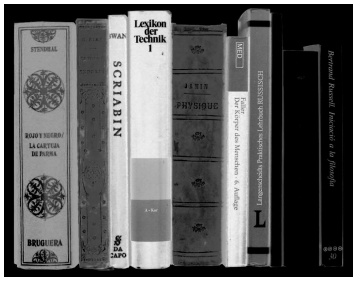
Bei der herkömmlichen Herstellung eines Vierfarbenauszugs zur autotypischen Druckformenherstellung gibt es zwei mögliche Wege: die direkte und die indirekte Rasterung. Bei der direkten Rasterung werden die Farbauszugsnegative durch den blauen, den grünen und den roten Filter direkt auf panchromatisches Lith-Material gerastert. Normalerweise werden dazu aus vier Rastern bestehende Sätze verwendet, welche die folgenden Winkelungen aufweisen:

15º Cyan
45º Schwarz
75º Magenta
90º Gelb

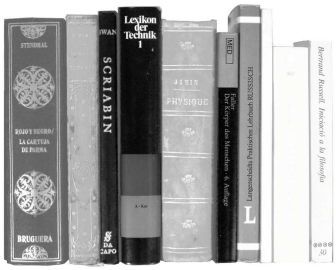
Beim indirekten System werden die Auszüge durch die gleichen Filter auf panchromatisches Halbtonmaterial aufgenommen. Diese Ne-gative werden dann im Kontakt durch das Kontaktraster auf orthochromatisches Lith-Material kopiert, wobei der Raster normalerweise mit der Schichtseite die Schichtseite des zu belichtenden Materials berührt. Auch hier muss natürlich die Rasterwinkelung eingehalten werden. Die nächste Abbildung zeigt am praktischen Beispiel das Zustandekommen der einzelnen Farben beim autotypischen Dreifarbendruck.

Ausser der Verstärkung der dunklen Teile des Bildes kann der Vierfarbendruck gegenüber dem Dreifarbendruck noch einen anderen Vorteil aufweisen: Es können Auszüge hergestellt werden, welche in den Zonen, in denen alle drei Grundfarben gleichzeitig vorkommen, den gemeinsamen Anteil ganz oder teilweise durch die entsprechende Menge Schwarz ersetzen. Diese Technik wir UCR (Under Colour Removal) genannt und bietet den Vorteil einer rascheren Trocknung der Drucke, dank den dünneren Farbschichten, und zudem wird dabei der Farbverbrauch herabgesetzt. Genau gleich, wie man sagen kann, dass sich jede Farbe aus den Drei Farben Cyan, Magenta und Gelb auf subtraktivem Wege mischen lässt, kann man auch sagen, dass sich jede Farbe aus je zwei der Grundfarben (die entsprechenden Grundfarben ergeben sich je nach der zu mischenden Farbe) und Schwarz mischen lässt. Wird das UCR so weit getrieben, dass die dritte Farbe ganz verschwindet, spricht man von GCR (Grey Component Replacement).

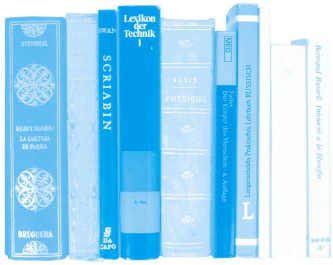
Ansicht des Originals durch das Rotfiler



Rotfilternegativ



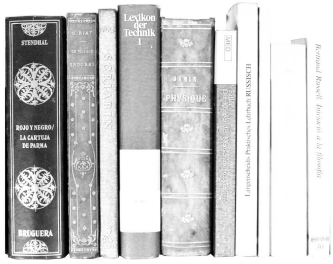
Positiv des Rotfilterauszugs oder Cyanauszug



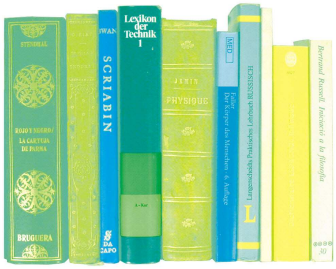
Cyan-Auszug

Gelb-Auszug

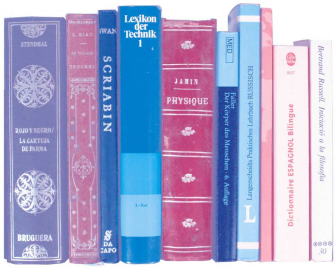
Magenta-Auszug



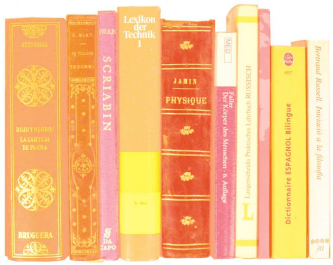
Schwarz-Auszug



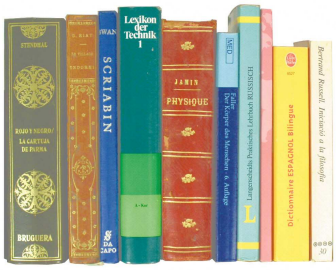
Cyan und Gelb übereinandergedruckt



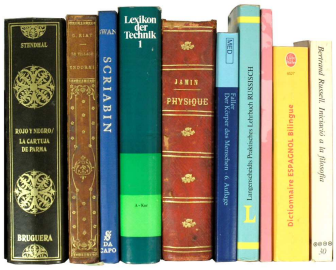
Cyan und Magenta übereinandergedruckt



Gelb und Magenta übereinandergedruckt



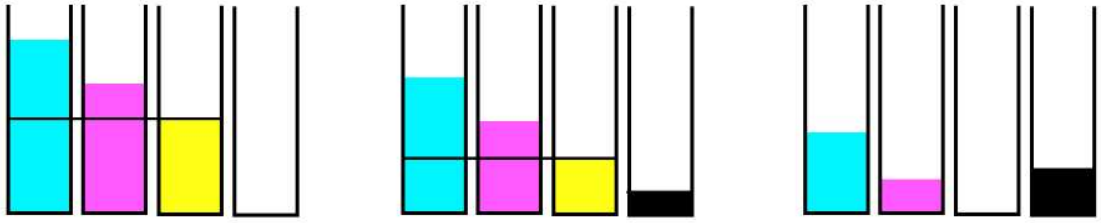
Dreifarbendruck



Vierfarbendruck

Die Entstehung eines Vierfarbendrucks

Die Abbildung 'UCR' symbolisiert drei Arten, um eine gleiche Farbe subtraktiv zu mischen. Die erste Version entspricht der herkömmlichen Farbmischung, die mittlere einem gemässigten UCR und die dritte dem GCR.



UCR: Die drei Farbmischungen ergeben den gleichen Farbton

Im letzten Viertel des XX Jahrhunderts wurden die herkömmlichen photomechanischen Techniken zur Herstellung von Vierfarbendrucken immer mehr von den elektromechanischen **Scannern** verdrängt.

Bei diesen Maschinen wird das zu reproduzierende Original (meist handelt es sich dabei um Farbdiapositive, aber auch flexible Vorlagen können eingesetzt werden) über den Mantel der Abtastwalze[1] gespannt. Auf die Schreibwalze wird der zu belichtende Film aufgespannt, Halbtonfilm, wenn Halbtonfarbauszüge angefertigt werden sollen, Lith-Film, wenn Rasterfarbauszüge erwünscht sind. Es braucht kein panchromatisches Material eingesetzt zu werden, da ja das Material bei allen vier Auszügen mit derselben Lichtquelle belichtet wird. Nach dem Programmieren des gewünschten Vergrösserungs- oder Verkleinerungsmassstabes, der Farbkorrekturen und anderer Daten, werden die Schutzdeckel über die beiden Zylinder geschlossen, um das Eindringen von Fremdlicht zu verhindern. Die beiden Zylinder beginnen sich nun mit grosser Geschwindigkeit zu drehen (bis zu 10 m/sec Umlaufgeschwindigkeit). Beim Abtastzylinder wird der jeweils kolorimetrisch zu erfassende Teil mit einer Speziallichtquelle beleuchtet, und ein optisches System überträgt das vom Originals abgestrahlte Licht auf ein elektronisches Messsystem. Während des Abtastvorgangs bewegt sich der Abtastkopf allmählich in Richtung der Zylinderachse, so dass die Abtastlinie einer Schraubenlinie folgt. Inzwischen bewegt sich der Schreibkopf auf dem Schreibzylinder in gleicher Weise und belichtet den Film mit einer speziellen Belichtungseinheit, deren Lichtintensität je nach der vom Rechenzentrum erhaltenen Information variiert. Die graphischen Scanner mit herkömmlichen Belichtungseinheit erlauben es, Halbton- oder Lithfilme durch einen Kontaktraster hindurch zu belichten.

[1] Heute werden vor allem Flachbettscanner einegsetzt.