

# Entstehung des photographischen Bildes

## Silberbildträger

Das Licht transportiert die visuellen Informationen über die Objekte und „mit Licht zeichnen“ ist die Bedeutung des griechischen Wortes *Photographie*. Um ein unserer Wahrnehmung entsprechendes Bild zu zeichnen, muss der photographische Prozess die im Licht enthaltenen Informationspotentiale so sichtbar machen und speichern, wie es unser visuelles System tut. Er muss sich also auf denselben Bereich des Spektrums beschränken, für den auch wir empfindlich sind, und in ihm zunächst einmal Schwarz und Weiß und alle Stufen dazwischen zuverlässig voneinander trennen.

Zu diesem Zweck stützen wir uns in der analogen Photographie bis heute auf die Fähigkeiten bestimmter Verbindungen zwischen Silber und Halogen, Fluor, Chlor, Brom oder Jod (Silberhalogenid, Silberfluorid, Silberchlorid, Silberbromid und Silberiodid), die gemeinschaftlich als **Silberhalogenide** bezeichnet werden. Silber ist zwar ein kostbarer Rohstoff, konnte aber aufgrund seiner Lichtempfindlichkeit als direkter Träger der Bildinformation in der analogen Photographie bislang nicht ersetzt werden.

Auf chemischer Ebene machen wir uns die Eigenschaft der Silberhalogenide zunutze, unter dem Einfluss von

Lichtenergie in ihre Bestandteile (z.B. Silber und Brom) zu zerfallen. In diesem Prozess wird das metallische Silber schwarz und, voilà, Licht ist in etwas konservierbares, die **Schwärzung**, überführt worden. Da die Silberhalogenide in ihrer ursprünglichen Form nur auf kurzwelliges (blaues- und UV-) Licht reagieren, müssen sie zur Abbildung des für uns sichtbaren Spektrums mit weiteren Stoffen gemischt werden. Farbstoffe, wie das Eosin, das Fuchsin und das Cyanin nehmen die Lichtenergie im langwelligen Bereich des Spektrums auf und geben sie an die Silberhalogenide weiter. Erst mit ihrer Verwendung konnten Filmmaterialien hergestellt werden, die zunächst für alle Regionen des Spektrums außer Rot (**orthochromatisch**) und später für das für uns sichtbare Gesamtspektrum der elektromagnetischen Strahlung (**panchromatisch**) empfindlich waren. Damit war der Grundstein für die unserer Wahrnehmung entsprechende Helligkeitsrichtige Abbildung der Tonwerte in der Schwarzweißphotographie und die darauf basierende Farbphotographie gelegt.

Basierend auf dieser Grundlage läuft die **Bildentstehung** beim Negativ- und Umkehrfilm identisch ab. Die Silberhalogenidkristalle bilden, in eine Gelatinehülle gebettet, die den Stäbchen- und Zapfenzellen der Retina ver-

gleichbare lichtempfindliche Schicht des Films. Da die Größe der Kristalle über die Empfindlichkeit und Körnigkeit des Filmmaterials bestimmt (größere Kristalle benötigen zwar weniger Licht zur Reaktion, sind aber im fertigen Bild leichter zu erkennen), sind die Hersteller bestrebt sie möglichst klein zu halten. Ihr Durchmesser liegt heute zwischen 0,0002 und 0,002 mm. Ein Silberhalogenidkristall besteht aus jeweils rund 20 Milliarden Silber- und Halogenidionen. Ein Ion ist ein Atom, bei dem sich die positive Ladung des Kerns und die negative Ladung der Hülle nicht neutralisieren. Durch die fehlenden oder überzähligen Elektronen entsteht eine positive oder negative Überschussladung. Durch die im Moment der **Belichtung** einwirkende elektromagnetische Energie ändern die Kristalle ihre Ladung: ein negativ geladenes Halogenion gibt ein Elektron ab, welches von einem positiv geladenen Silberion aufgenommen wird. Es werden also einige Silberionen von den Halogenidionen getrennt und es entstehen elementare Halogene und metallisches Silber. Da bei der Belichtung pro Kristall nur wenige Silberatome, die sogenannten Entwicklungs- oder Belichtungskeime, gebildet werden (ihre Zahl liegt normalerweise im zweistelligen Bereich), ist das entstandene Bild viel zu schwach, als das wir es sehen könn-

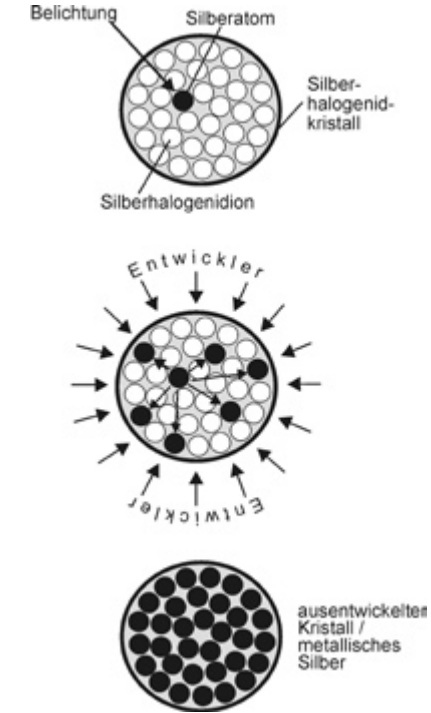


Abb. 17: Belichtungs- und Entwicklungsvorgang eines Silberhalogenidkristalls

ten. Wir nennen es das **latente Bild**. Es ist sehr haltbar und umso deutlicher je stärker die Belichtung war. Hier ist festzuhalten, daß sich nur zwei verschiedene Zustände unterscheiden lassen – belichtet oder unbelichtet – und das macht Silberfilme im Grunde zu digitalen Bildträgern!

Sichtbar machen wir das latente Bild, indem wir die Emulsion mit

## Entstehung des photographischen Bildes

einem Stoff in Kontakt bringen, der alle Silberhalogenidkristalle in die Bestandteile Silber und Halogen zerlegt, dies aber bei den belichteten schneller tut als bei den unbelichteten. Gewisse vom Benzolring  $C_6 H_6$  abgeleiteten organischen Substanzen werden dieser Forderung in Verbindung mit speziellen Bremsmitteln gerecht. Wir nennen sie **Entwickler**. Sie geben Elektronen ab, die von den Silberionen aufgenommen werden, und oxidieren dabei selbst, während sie die Halogenide Brom, Jod oder Chlor aufnehmen. Wird der Film genau für die vom Hersteller vorgegebene Zeit entwickelt, ist aufgrund der speziellen Wirkungsweise sichergestellt, daß nur der gewünschte Teil der Silberhalogenidkristalle reduziert wird. Interessanter Weise werden die Grenzflächen zwischen stark und schwach belichteten Filmstellen beim Entwickeln besonders geschwärzt, da sich der Entwickler an den stärker belichteten Stellen schneller verbraucht und die angrenzenden, weniger stark belichteten Stellen nicht mehr gleichmäßig entwickeln kann. Dieser als **Kanteneffekt** bezeichnete Vorgang führt, da er die Kontraste verstärkt, zur Erhöhung der Bildschärfe. – Eine spannende Parallele zu unserer visuellen Wahrnehmung, die sich ja ebenfalls stark an Kanten und Grenzflächen orientiert und den Kontrast durch die Rivalität benachbarter Center/Surround

Zellen erhöht. Um die Entwicklung sicher zu beenden, wird der Film in ein säurehaltiges **Stoppbad** gegeben, das den Entwickler neutralisiert.

Nach dieser Prozedur liegen natürlich immer noch unbelichtete und unentwickelte Silberhalogenidkristalle in der Emulsion vor. Beließen wir sie dort, würden sie nach ausreichend langem Kontakt mit Licht von allein in metallisch dunkles Silber zerfallen und das Bild ruinieren. Um das zu verhindern, waschen wir die unerwünschten Kristalle mit einem Salzbad aus Natriumthiosulphat aus. Diesen Vorgang nennen wir das **Fixieren**. Danach sind die unbelichteten Filmstellen nahezu durchsichtig.

Wäre die Belichtung lange und kräftig genug würde mit der Zeit alles Silberhalogenid in seine Bestandteile zerlegt, wodurch ohne Entwicklung eine direkte Schwärzung der Schicht entstünde. Das läßt sich verfolgen, wenn wir den Film bei Tageslicht nach und nach aus der Patrone ziehen. Und auch eine direkte Bildentstehung ist ohne Entwicklung möglich, wenn ein panchromatischer Schwarzweißfilm sechs bis acht Stunden bei offener Blende mit einem scharf fokussierten Motiv belichtet wird. Der Film braucht anschließend nur fixiert und gewässert zu werden und wird ein annähernd normales Negativ zeigen.

## Der Negativfilm

Der SW-Negativfilm folgt exakt dem zuvor beschriebenen Verarbeitungsvorgang. Wie wir im vorangehenden Abschnitt gesehen haben, spiegelt er das Helligkeitsmuster des Motivs entgegengesetzt wider. Besonders helle Stellen reflektieren besonders viel Licht. Viel Licht dringt tief in die Schicht ein, wird auf angrenzende Silberhalogenidkristalle reflektiert und erzeugt deshalb viele Entwicklungskeime. Dort ist der Film dann relativ undurchsichtig, weil der hohe Anteil an metallischem Silber wenig Licht durchläßt. Diese verdrehte Welt stellt der Positivprozeß wieder richtig, denn die dunkle Filmstelle läßt nur wenig Licht durch und das Photopapier wird beim Kopieren entsprechend wenig



Abb. 18: Schematischer Aufbau eines typischen SW-Negativfilms

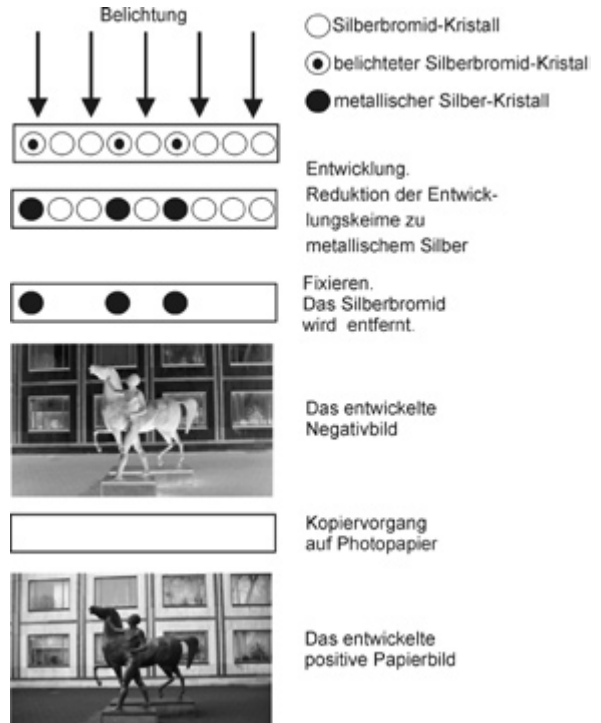


Abb. 19: Ablauf des Belichtungs- und Entwicklungsvorgangs beim SW-Negativfilm

geschwärzt (bleibt also weiß). Im Gegensatz dazu erzeugt das wenige, von dunklen Motivteilen ausgehende, Licht nur wenige Entwicklungskeime und der Film ist an diesen Stellen beinahe durchsichtig. Solch ein Negativbereich läßt beim Kopieren beinahe alles Licht durch und belichtet das Photopapier entsprechend stark.

## Entstehung des photographischen Bildes

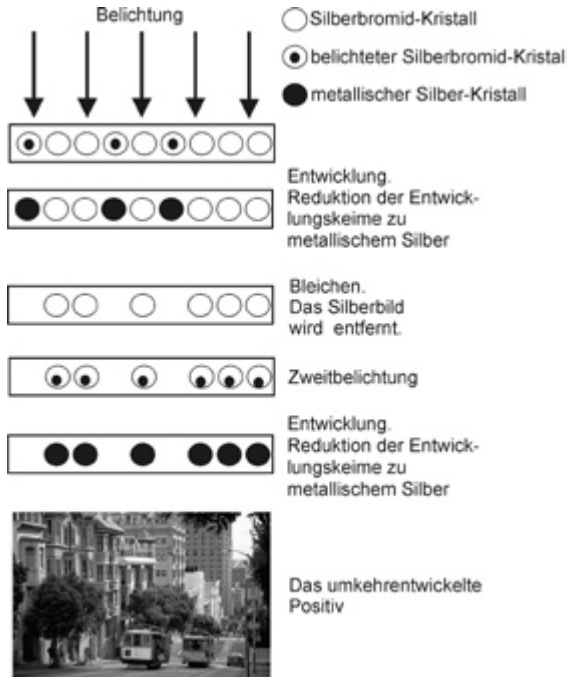


Abb. 20: Ablauf des Belichtungs- und Entwicklungsvorgangs beim SW-Umkehrfilm

### Der Umkehrfilm

Im Gegensatz zum Negativfilm, dessen Helligkeits- und Farbwerte nach der Entwicklung entgegengesetzt zum aufgenommenen Motiv sind und erst durch den Positivprozess wieder richtig gestellt werden, liefert der Umkehrfilm durch seine spezielle Entwicklung sofort ein helligkeits- und farbrichtiges positives Bild. Damit

ist er der analoge Bildträger, welcher uns ohne den mit der Möglichkeit der Verfälschungen behafteten Kopierprozeß direkt zeigt, was wir wie belichtet haben.

Der Umkehrfilm wird zuerst normal entwickelt, aber nicht fixiert. Statt dessen wird das Silberbild durch den Prozess der Bleichung entfernt, so daß nur die bislang unbelichteten Silberhalogenide in der Schicht verbleiben. Diese werden dann mittels einer Zweitbelichtung, die auch chemisch ausgeführt werden kann, in Entwicklungskeime verwandelt und wiederum durch ein Entwicklungsbad in metallisches Silber überführt. Nun sind die ursprünglich belichteten Bereiche klar und durchsichtig während die eigentlich nicht belichteten Bereiche dunkel sind und das Muster der Helligkeitswerte positiv und richtig wiedergeben.

Der Trick beim Umkehrfilm liegt also nicht irgendwo in der Emulsion verborgen, sondern wird durch die besondere Entwicklung befördert. Mit ihr kann praktisch jeder Schwarzweißnegativfilm zum Umkehrfilm werden. Um das zu ermöglichen, wird er zuerst normal entwickelt und das entstandene Silberbild durch Bleichen entfernt. Im nächsten Schritt werden die noch unentwickelten Silberhalogenidkristalle zweitbelichtet und ent-

wickelt. Das so entstandene Silberbild ist ein Positiv. Normale Farbnegativfilme eignen sich dagegen nicht, da der Umkehrfilm Farbstoffe mit speziellen spektralen Eigenschaften benötigt, die dort nicht enthalten sind.

## Elektronische Bildträger

Die digitale Aufnahmetechnik lebt von der technischen Möglichkeit, Licht unter Ausnutzung des **Sperrschicht-Photoeffekts** einer Photodiode in Strom zu verwandeln. Komplizierter Begriff, was? Ist aber halb so schlimm! Grundlage der Technik sind **Halbleiter-Bauelemente**, die als eigentlich bildgebende Quelle dienen. Die Charakteristik von Halbleitern (Silizium, Germanium, Selenium) fällt zwischen die der leitenden Metalle (Silber, Kupfer, Aluminium, Gold) und die nicht leitenden Isolatoren (Keramik, Glas, Nichtmetalle). Im Gegensatz zu den Metallen leiten sie den Strom besser, je wärmer es ist. Hauptbestandteil der meisten Halbleiter ist das Silizium, welches vier Elektronen in seiner äußeren Hülle besitzt, die sogenannten Valenzelektronen. Da Silizium das Bestreben zu acht Valenzelektronen

hat, ordnet es sich in Form eines regelmäßigen Kristallgitters an, in dem sich die vier Valenzelektronen eines Atoms mit den entsprechenden Elektronen eines Nachbaratoms verbinden.

Aber in dieser Form ist das Silizium Kristallgitter noch nicht elektrisch leitfähig. Um dies zu erreichen, wird das Gitter gezielt mit Fremdatomen verunreinigt, man sagt es wird **dotiert**. Da Leitfähigkeit einen Potentialunterschied voraussetzt, müssen dazu Stoffe abweichender Wertigkeit (mit unterschiedlicher Anzahl Valenzelektronen) verwendet werden. In der Praxis sind dies das Phosphor (Wertigkeitsstufe fünf, **n-Dotierung**) und das Bor (Wertigkeitsstufe drei, **p-Dotierung**).

Wird der Silizium Kristall **n-dotiert**, fügt sich das Phosphor-Atom mit seinen fünf Valenzelektronen zwar problemlos in das Gitter ein, bindet sich jedoch nur mit den vier benachbarten Silizium-Elektronen, so daß eins

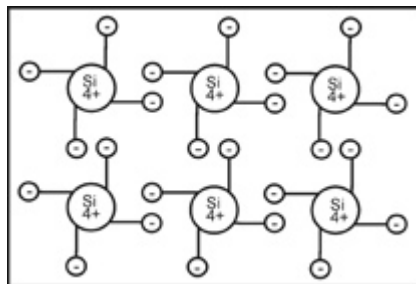


Abb. 21: Gitterstruktur des Siliziums



## Entstehung des photographischen Bildes

seiner Valenzelektronen als frei übrig bleibt. Bei der **p-Dotierung**, Sie ahnen es bestimmt schon, entsteht die umgekehrte Situation. Ein Bor -Atom besitzt drei Valenzelektronen, braucht aber deren vier, um mit den benachbarten Silizium-Atomen eine beständige Elektronenpaarbindung einzugehen. Hier bleibt also an einer Stelle ein Loch übrig in dem ein Elektron fehlt. In der Praxis sind die Verunreinigungen zahlenmäßig gering, denn auf eine Million Silizium-Atome kommen je ein Phosphor- oder Bor-Atom. So viel

als Grundlage. Zur praktischen Anwendung dotieren wir die eine Hälfte eines Silizium-Kristalls mit Phosphor und die andere mit Bor und stellen auf diese Art einen p/n-Übergang her. Der n-dotierte Teil ist aufgrund überzähliger Elektronen negativ geladen, der p-dotierte Teil weist zu wenige Elektronen (Löcher) auf und ist positiv geladen. Da die Atome stets das Bestreben haben ihre Außenschalen regelmäßig mit vier Valenzelektronen zu füllen, wandern die überschüssigen Elektronen der n-Schicht in die Löcher der p-Schicht und sorgen damit für einen geringen Stromfluss. Da sie sich auf kürzestem Weg aus der Mitte heraus bewegen, entsteht dort schon nach kurzer Zeit ein Ladungsgleichgewicht, das wir als Sperrschicht bezeichnen. Hat diese eine bestimmte Breite erreicht, schaffen die Elektronen den Sprung auf die andere Seite nicht mehr und der Stromfluss bricht zusammen. Die n-Schicht ist nun aufgrund der abgegebenen Elektronen positiv, die p-Schicht aufgrund der aufgefüllten Löcher negativ geladen.

Legen wir an das so strukturierte Kristallgitter von außen eine Spannung an, ergibt sich, abhängig von ihrer Polarität, folgendes Verhalten: Legen wir den Pluspol der Stromquelle an die positiv geladene n-Schicht und den Minuspol an die negativ geladene

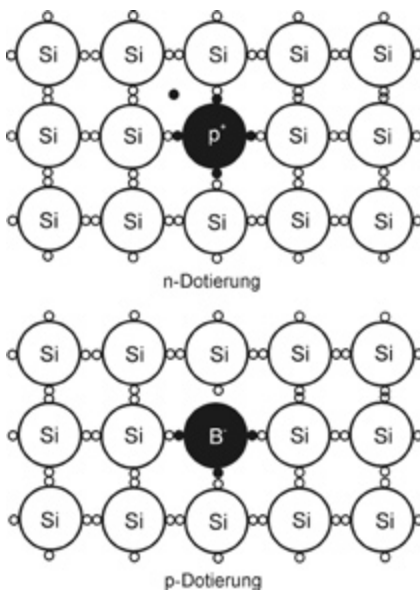


Abb. 22: Silizium n-/p-Dotiert

ne p-Schicht, bewegen sich die überzähligen Elektronen von n durch die Stromquelle nach p. Dadurch verbreitert sich die Sperrschicht und es fließt kein Strom mehr durch den Silizium-Kristall. Kehren wir die Polarität aber um, erhält die positiv geladene n-Schicht reichlich Elektronen von der Stromquelle, so daß auf dieser Seite noch mehr überzählige Elektronen vorhanden sind. Gleichzeitig werden der p-Schicht Elektronen entzogen, was dazu führt das sich die Anzahl der Löcher auf dieser Seite noch vergrößert. Am Ende löst sich die Sperrschicht auf und es fließt ein Strom im Kristallgitter. Der von uns hergestellte p-/n-Übergang läßt den Strom also in einer Richtung fließen, während er ihn in der anderen blockiert. Dies Verhalten bezeichnen wir als **Gleichrichten** und den p-/n-Übergang als **Diode**.

Zur digitalen Bildgewinnung fertigen wir **Photodioden** an, deren dem Licht zugewandte n-Schicht so dünn ist, daß das Licht direkt auf die darunter liegende Sperrschicht fällt und durch die ihm innewohnende Energie einzelne Elektronen aus dieser heraus schlagen kann. Je mehr Licht auf die Grenzschicht fällt, umso mehr Elektronen werden aus ihr gelöst und wandern in die positiv geladene n-Schicht. Das durchschnittliche Ver-

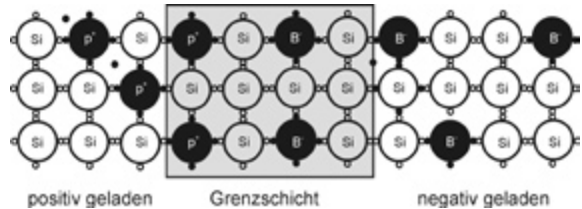


Abb. 23: Sperrschicht

hältnis liegt bei einem Elektron zu je zwei Photonen. Verbinden wir n- und p-Schicht über einen Stromkreis, fließen die Elektronen über diesen von der n- zur p-Schicht und aus Licht ist elektrischer Strom geworden. Mit einem angehängten Messwerk können wir auf diese Art leicht den Stromfluss messen und dies machen wir uns mit dem Belichtungsmesser auch zunutze. Zur Erzeugung eines Bildes müssen wir den Stromfluss dagegen noch über eine bestimmte Zeit integrieren. Diese Integration wird mittels eines angehängten Kondensators realisiert und der ganze Vorgang läuft wie folgt ab: An der Photodiode wird vor der Belichtung in sperrender Richtung eine Spannung angelegt, damit sich der Kondensator aufladen kann. Im Zuge der Belichtung erfolgt dann gemäß dem Arbeitsprinzip der Photodiode eine Entladung des Kondensators, die proportional zur einfallenden Lichtmenge ist. Der resultierende Stromfluss wird dann im nachgeschalteten Analog/Digital-Wandler di-



## Entstehung des photographischen Bildes

gitalisiert. – Auch eine Digitalkamera arbeitet intern also zunächst einmal mit analogen Daten! In großer Anzahl zu regelmäßigen Reihen und Spalten organisiert, stellen diese Photodioden die Sensorzellen der digitalen Bildträger dar, im Englischen als „Photosites“ bezeichnet. In der Regel sind sie quadratisch ausgeführt, nur die *Nikon D1x* teilt dieses Quadrat in zwei Rechtecke und verdoppelt so die horizontale Anzahl der lichtempfindlichen Stellen. Die zweite Ausnahme ist das *Fuji Super CCD*, auf dem die *Fuji S1* und die *S2* basieren. Dort kommen fünfeckige Sensorzellen zum Einsatz, die im Winkel zueinander angeordnet sind. Die Seitenlängen der quadratischen Photosites liegen zwischen 2 und 4  $\mu\text{m}$  bei digitalen Sucherkameras und 6 bis 9  $\mu\text{m}$  bei digitalen Spiegelreflexkameras. Das ergibt Flächen zwischen 4-16  $\mu\text{m}^2$  und 36-81  $\mu\text{m}^2$ . Diese Größenverhältnisse werden wichtig, wenn man sich mit der Kontrastfähigkeit der Sensoren auseinandersetzt, wie es Band 3 dieser Reihe zum Thema Kontrast tut. Grundsätzlich unterscheiden wir die digitalen Aufnahmemedien nach **CCD-Sensoren** (Charge Coupled Device) und **CMOS-Elementen** (Complementary Metal Oxide Semiconductor).