

ANGEWANDTE CHEMIE

101. Jahrgang 1989

Heft 12

Seite 1633–1806

Bildverbesserung – chemisch, digital, visuell

Von Joachim Lohmann *

Die digitale Bildverarbeitung ist durch die hohe Qualität mancher spektakulärer Satellitenaufnahmen sehr bekannt geworden. Sie ist heute zu einer eigenständigen Disziplin innerhalb der Informationswissenschaften gereift und hat breite technische Anwendung gefunden, außer in der Raumfahrt unter anderem auch in der Robotik, in der Medizin und in der Fernsehtechnik. Bildverarbeitung findet auch im photographischen Film und im biologischen Sehapparat statt; auch in diesen Systemen werden primär registrierte Bilder im Hinblick auf eine bessere Erkennbarkeit verändert. Es stellt sich die Frage, inwieweit in diesen so verschiedenen bildmanipulierenden Systemen ähnliche Prinzipien für die Bildverbesserung angewendet werden.

1. Einleitung

Als digitale Bildverarbeitung (digital image processing) wird die rechnergestützte Veränderung eines Bildes bezeichnet. Der Begriff umfaßt die Bildverbesserung (image enhancement), bei der als Ergebnis ein visuell leichter erkennbares Bild angestrebt wird, die Bildrestaurierung (image restoration), bei der eine bekannte systematische Störung (z. B. Verwackelung) herausgerechnet wird, und die Bildanalyse (image analysis), deren Ergebnis letztlich eine Erkenntnis ist (Abb. 1). Die digitale Bildverarbeitung ist in mehreren Monographien beschrieben^[1–5].

Der photographische Film ist allgemein nur als Mittel der Bildaufzeichnung bekannt. Bei der chemischen Entwicklung des Primärbildes, des latenten Bildes, wird das Bild aber nicht nur sichtbar gemacht, sondern auch in manchen Eigenschaften verbessert. Dies ist die Basis für moderne Colornegativfilme mit guter Detailwiedergabe und hoher Farbsättigung.

Das große Vorbild für die digitale Bildverarbeitung und in vielerlei Hinsicht auch für den photographischen Film ist das visuelle System. Es leistet alle Schritte von der Bildaufzeich-

nung in der Retina über die neuronale Bildverarbeitung bis hin zur Bildinterpretation.

Diese drei Systeme – der chemische Film, die digitale Bildverarbeitung, der biologische Sehapparat – umfassen also jeweils verschiedene Schritte der Bildmanipulation. Hier sol-

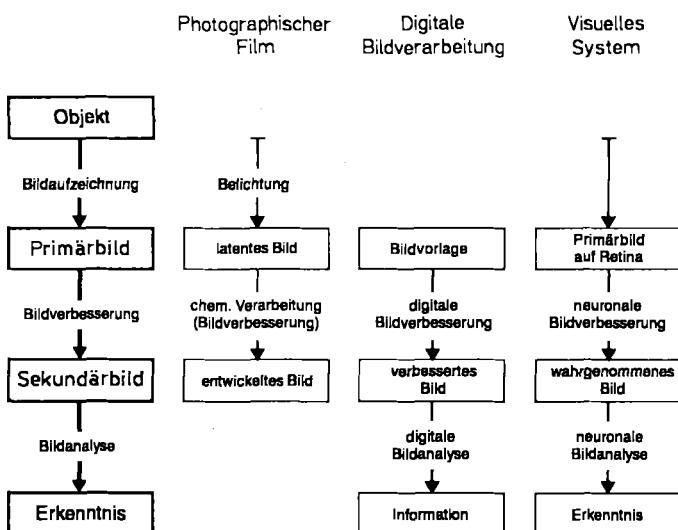


Abb. 1. Schritte der Bildmanipulation im photographischen Film, in der digitalen Bildverarbeitung und im visuellen System.

[*] Dr. J. Lohmann
Agfa-Gevaert AG
5090 Leverkusen 1

len die Systeme nur unter dem Gesichtspunkt der Bildverbesserung verglichen werden. Natürlich laufen in den drei Systemen sehr unterschiedliche physikalisch-chemische Vorgänge ab, d. h. die Bildsignale sind in unterschiedlichen Sprachen codiert; der Vergleich bezieht sich hier auf die Strukturen der Sprachen, auf die Algorithmen der Bildverbesserung. Die Diskussion ist dabei auf die Verbesserung von drei zentralen Bildeigenschaften eingeschränkt, nämlich der Körnigkeit (Abschnitt 3), der Schärfe (Abschnitt 4) und der Farbwiedergabe (Abschnitt 5). Zunächst soll aber der Aufbau der bildmanipulierenden Systeme erläutert werden.

2. Aufbau der Systeme

Die für die Bildverbesserung wesentlichen Elemente der drei Systeme seien im folgenden kurz beschrieben.

2.1. Film

Der Aufbau eines Colornegativfilms ist in Abbildung 2 schematisch wiedergegeben. Der Film besteht aus drei lichtempfindlichen Schichten. Jede dieser Schichten enthält Silberhalogenidkristalle, die blauempfindlich sind oder mit geeigneten Farbstoffen für grünes oder rotes Licht sensibilisiert wurden. Außerdem enthalten die Schichten Farbstoffvorläufer, die Kuppler. Bei Belichtung entstehen auf den Kristallen Silbercluster Ag_n als Latentbildkeime (Abb. 3). Diese Keime katalysieren in der photographischen Entwicklung eine Redoxreaktion zwischen dem Silberhalogenid und dem Farbentwickler. Der oxidierte Entwickler reagiert mit dem Kuppler zum Farbstoff.

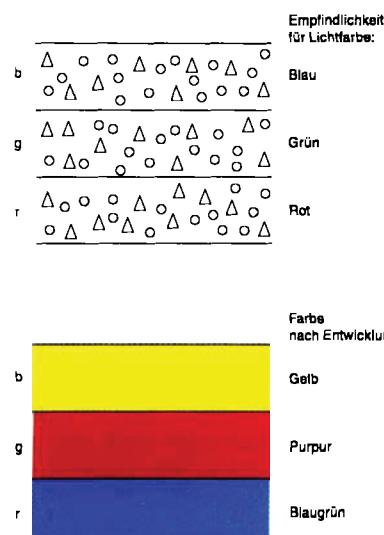
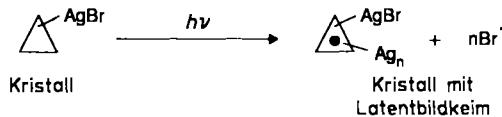


Abb. 2. Schematischer Aufbau eines Colornegativfilms (Δ Silberhalogenidkristalle, \circ Farbkuppler; b: blauempfindliche, g: grünempfindliche und r: rotempfindliche Schicht); oben: vor Entwicklung, unten: nach Entwicklung.

berhalogenidkristalle, die blauempfindlich sind oder mit geeigneten Farbstoffen für grünes oder rotes Licht sensibilisiert wurden. Außerdem enthalten die Schichten Farbstoffvorläufer, die Kuppler. Bei Belichtung entstehen auf den Kristallen Silbercluster Ag_n als Latentbildkeime (Abb. 3). Diese Keime katalysieren in der photographischen Entwicklung eine Redoxreaktion zwischen dem Silberhalogenid und dem Farbentwickler. Der oxidierte Entwickler reagiert mit dem Kuppler zum Farbstoff.

Belichtung



Entwicklung

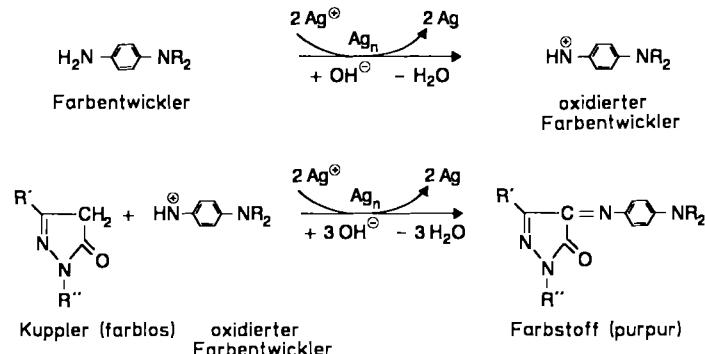


Abb. 3. Reaktionen bei Belichtung und Entwicklung eines Colornegativfilms (Beispiel: grünempfindliche Schicht).

In modernen Colornegativfilmen werden neben diesen klassischen Kupplern spezielle Kupplern eingesetzt, die bildverarbeitende Funktionen erfüllen: Maskenkuppler und Development-Inhibitor-Releasing(DIR)-Kuppler (Abb. 4). Hier sei zunächst nur die Chemie dieser Kuppler erklärt, auf ihre photographische Wirkung wird weiter unten eingegangen.

Die Maskenkuppler sind farbige Verbindungen, die ihre Farbe bei der Reaktion mit dem oxidierten Entwickler ändern^[6]. Dagegen wird bei der Reaktion eines DIR-Kupplers mit oxidiertem Farbentwickler ein Inhibitor frei, der im Film in alle Richtungen diffundieren kann^[7]. Bei Adsorption vergiftet der Inhibitor Latentbildkeime Ag_n sowie teilentwickelte Silberpartikel, wodurch deren katalytische Wirk-



Joachim Lohmann wurde 1939 in Hamburg geboren, studierte von 1959 bis 1966 in Hamburg und Berlin und promovierte 1969 bei H.-F. Grützmacher in Hamburg. Anschließend war er als Postdoktorand ein Jahr bei G. Porter in London. Seit 1971 ist er bei Agfa-Gevaert in der Forschung tätig: Zunächst beschäftigte er sich in Mortsel (Belgien) mit silberfreien photographischen Systemen, seit 1974 arbeitet er in Leverkusen über photographische Filme und Papiere, seit 1981 als Forschungsleiter.

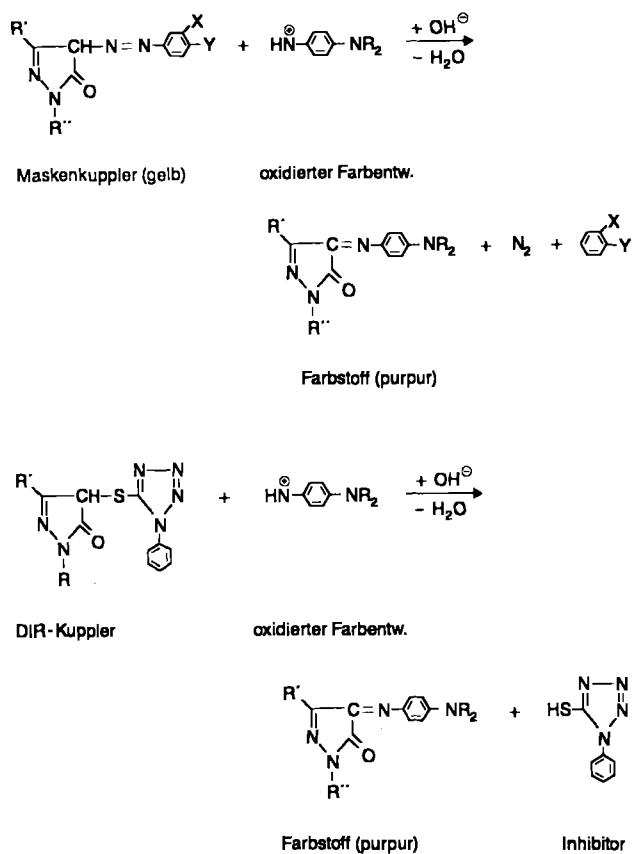


Abb. 4. Reaktionen des oxidierten Farbentwicklers mit Maskenkuppler und DIR-Kuppler im Colornegativfilm.

samkeit herabgesetzt wird; an dieser Stelle wird die Entwicklung verzögert. Die verschiedenen Reaktionen bei der chemischen Entwicklung eines Films sind in Abbildung 5 noch einmal im Zusammenhang dargestellt.

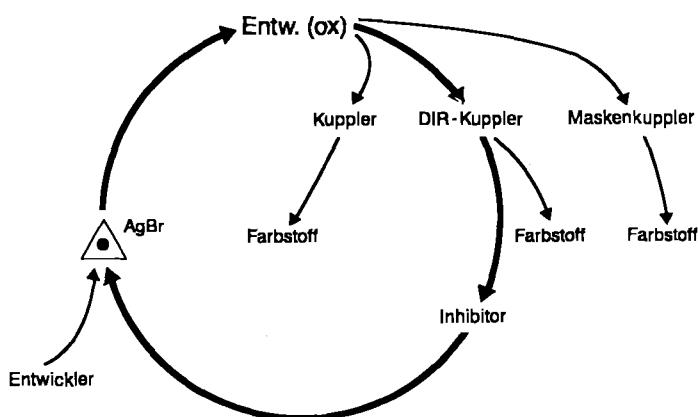


Abb. 5. Chemische Entwicklung eines Colornegativfilms.

2.2. Digitale Bildverarbeitung

Für die digitale Bildverarbeitung ist ein analog aufgezeichnetes Bild zunächst einmal zu digitalisieren, um es der Rechnung zugänglich zu machen (Abb. 6). Das Bild wird mit einem Scanner gelesen. Die Bildfläche wird rechnerisch in diskrete Bildelemente (picture elements = pixels) unterteilt,

und jedem Element mit den Ortskoordinaten x, y wird ein quantisierter Grauwert $f(x, y)$ zugeordnet (bei einem Farbbild drei quantisierte Farbdichten). Je kleiner die Bildelemente und je feiner die Unterteilung der Grauwerte bzw. der Farbdichten, desto genauer kann ein Bild digital beschrieben werden. Die Bildfunktion $f(x, y)$ entspricht einem Zahlenfeld; durch Rechnung entsteht ein modifiziertes Zahlenfeld $g(x, y)$, dessen Aufzeichnung (z. B. mit einem Laser auf Photopapier) das verbesserte Bild ergibt^[8].

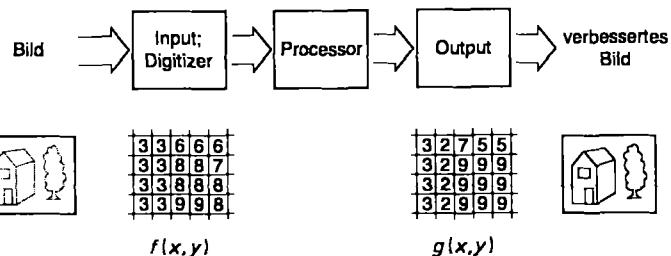


Abb. 6. Digitale Bildverbesserung.

Es gibt zwei Modi der Rechnungen bei der digitalen Bildverbesserung (Abb. 7): Bei Rechnungen im Ortsraum werden die Zahlen des Feldes $f(x, y)$ direkt verändert, entweder individuell (entsprechend den look up tables) oder in Abhän-

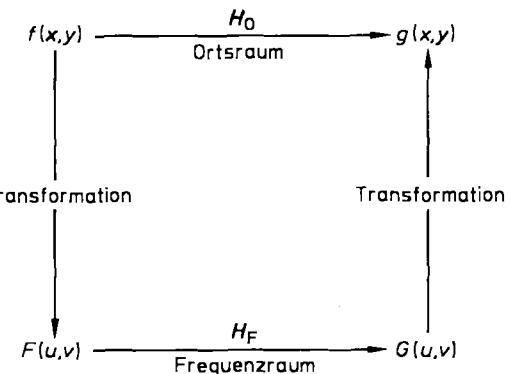


Abb. 7. Rechenweisen bei der digitalen Bildverarbeitung. x, y : Ortskoordinaten; u, v : Ortsfrequenzkoordinaten; $f(x, y)$, $g(x, y)$: primäre bzw. verbesserte Bildfunktion im Ortsraum; $F(u, v)$, $G(u, v)$: primäre bzw. verbesserte Bildfunktion im Frequenzraum; H_0 , H_F : Operatoren im Ortsraum bzw. im Frequenzraum.

gigkeit von den benachbarten Zahlen. Die Rechnungen können aber auch im Frequenzraum durchgeführt werden. Dazu wird die zweidimensionale Ortsfunktion $f(x, y)$ durch Fourier-Transformation in eine zweidimensionale Frequenzfunktion $F(u, v)$ mit den Ortsfrequenzkoordinaten u, v umgeformt. Die niedrigen Ortsfrequenzen enthalten Information über Beleuchtungsstärke und grobe Bildstruktur, die hohen Ortsfrequenzen Information über Reflexionsgrad, Kanten und Körnigkeit.

Durch Verstärkung oder Unterdrückung bestimmter Frequenzbereiche können die entsprechenden Bildeigenschaften betont oder zurückgedrängt werden. Systematische Bildstörungen bei der Aufnahme wie Verwacklung oder Unschärfe durch ein defokussiertes Objektiv (Störfunktion H) lassen sich ebenfalls durch Berechnungen im Frequenzraum

(Anwendung der inversen Funktion H^*) eliminieren^[3b]. Die Frequenzdarstellung ermöglicht also spezifische Ansätze zur Bildverbesserung; sie vereinfacht darüber hinaus bestimmte mathematische Operationen – z. B. entspricht der Faltung zweier Funktionen im Ortsraum eine einfache Multiplikation dieser Funktionen im Frequenzraum.

Die Rechnungen im Frequenzraum sind für die digitale Bildverarbeitung von großer Bedeutung; auch im visuellen System findet man frequenzabhängige Algorithmen der Bildverarbeitung (siehe Abschnitt 4.3), nicht aber im photographischen Film. Deswegen werden die Algorithmen im Frequenzraum hier nur am Rande gestreift.

2.3. Visuelles System

Zum visuellen System des Menschen sind das Auge mit der lichtempfindlichen Retina und bestimmte Bereiche des Gehirns zu rechnen (Abb. 8). In den Rezeptorzellen der Retina

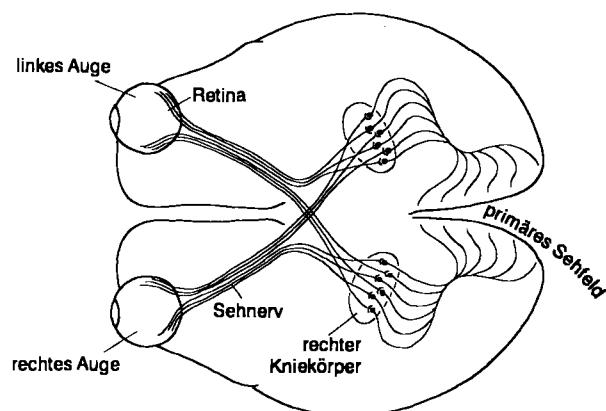


Abb. 8. Visuelles System des Menschen: Blick von unten ins menschliche Gehirn (aus [9]).

(Abb. 9) werden die einfallenden Lichtimpulse in elektrische Nervenimpulse umgewandelt^[11, 12]. Die Rezeptorzellen bestehen aus ca. 120 Millionen nur Helligkeitsempfindlichen Stäbchen und ca. sechs Millionen farbtüchtigen Zäpfchen (drei Sorten mit unterschiedlicher Empfindlich-

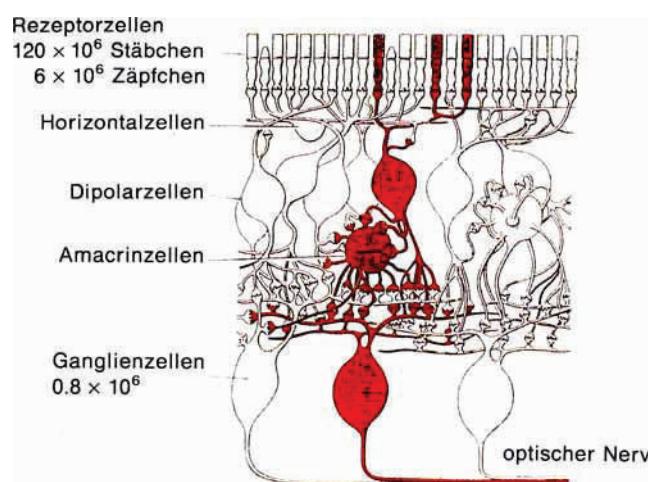


Abb. 9. Aufbau der Retina (aus [10]).

keit; Absorptionsmaxima bei etwa 440, 545 und 580 nm^[6]). Die Signale laufen über verschiedene Zwischenzellen, die auch quer verbunden sind, zu den ca. eine Million Ganglienzellen und von da zum Gehirn^[13]. Die komplizierte Verdrahtung zeigt, daß nicht nur im Gehirn, sondern auch in der Retina Funktionen der Bildverarbeitung wahrgenommen werden.

3. Rauschen (Körnigkeit)

Als Rauschen wird die statistische Schwankung eines an sich konstanten Signals bezeichnet. Mit zunehmender Verstärkung tritt das Rauschen mehr in den Vordergrund.

3.1. Film

Bei Photographien ist das Phänomen des Rauschens als Körnigkeit bekannt, als Schwankung der optischen Dichte im Mikrobereich einer gleichmäßig belichteten Bildfläche. Der Zusammenhang von Verstärkung und Rauschen zeigt sich darin, daß allgemein empfindlichere Filme die höhere Körnigkeit aufweisen und daß eine verstärkende Entwicklung (push processing) immer auch die Körnigkeit steigert. Das Rauschen (die Körnigkeit) in einem Film beruht auf den statistischen Positions- und Empfindlichkeitsverteilungen der Silberhalogenidkristalle. Bei der Entwicklung wird die Körnigkeit des Silberbildes in eine Körnigkeit des Farbbildes umgesetzt. Diese Umsetzung in Farbe bietet allerdings auch die Chance zur Verringerung der Körnigkeit.

In Gegenwart von DIR-Kupplern werden bei der Entwicklung Inhibitoren freigesetzt, die diffundieren und die Entwicklung der Kristalle in der Umgebung behindern; kleinere Farbwolken und damit geringere Farbkörnigkeit sind das Resultat (Abb. 10). Entscheidend dabei ist, daß die Emp-

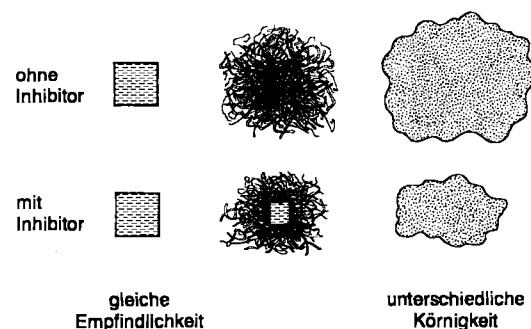


Abb. 10. Verringerung der Körnigkeit eines Colornegativfilms durch Inhibitoren, die aus DIR-Kupplern freigesetzt werden.

findlichkeit nicht beeinträchtigt wird, denn diese wird durch die – unveränderte – Kristallgröße bei der Belichtung bestimmt.

Diese Körnigkeitsverringerung mit DIR-Kupplern ist an die chromogene Entwicklung gebunden. Wenn dieser Effekt für einen Schwarzweißfilm ausgenutzt werden soll, muß die „Farbe“ Schwarz als Mischung von Farbstoffen (oder mit Schwarzkupplern) erzeugt werden (Konzept chromogener Schwarzweißfilme^[14]).

Eine körnigkeitsmindernde, unvollständige Umsetzung des Silberbildes in Farbe wird auch erreicht, wenn der oxidierte Farbentwickler (siehe Abb. 5) durch nicht-chromogene Konkurrenzreaktionen teilweise der Farbkupplung entzogen wird. Als Konkurrenzreaktionen kommen in Betracht die alkalische Hydrolyse des oxidierten Entwicklers^[15] (die um so mehr zum Zuge kommt, je langsamer die Farbkupplung stattfindet), Reaktionen mit eingelagerten Reduktionsmitteln (z. B. Dioctylhydrochinon) oder mit eingelagerten farblos kuppelnden Verbindungen, den Weißkupplern^[16].

In allen diesen Fällen ist die Farbausbeute bezogen auf die eingesetzte Silberhalogenidmenge verringert. Um die ursprüngliche Farbdichte zu erreichen, muß die geringere Farbausbeute durch Erhöhung der Silberhalogenidmenge kompensiert werden; die Verringerung der Körnigkeit hat also ihren Preis.

Ein ganz anderer Weg, die Körnigkeit zu vermindern, besteht darin, die Farbstoffe so zu schneidern, daß diese bei der Entwicklung im alkalischen Milieu eine begrenzte Strecke diffundieren^[17]. Eine solche kontrollierte Diffusion bewirkt, daß Dichteunterschiede im Mikrobereich verschmieren; bildwirksam wird ein lokaler Mittelwert der Farbstoffdichte. Am Beispiel in Abbildung 11 ist die Verringerung der Körnigkeit zu erkennen, aber ebenso der Nachteil dieser Methode, der Schärfeverlust bei zuviel Diffusion.

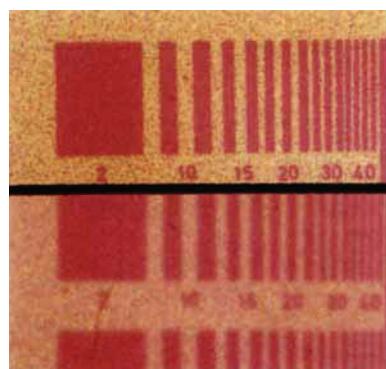


Abb. 11. Verringerung der Körnigkeit eines Colorfilms durch kontrollierte Diffusion der Bildfarbstoffe.

Ähnlich wie die lokale Mittelwertbildung in einem Bild verringert auch die Mittelwertbildung über mehrere gleiche Bilder die Körnigkeit. Hierzu kopiert man mehrere gleiche, aber unabhängig aufgenommene Negative zusammen; dabei nimmt die Körnigkeit wegen ihrer statistischen Natur ab, während die Bildinformation erhalten bleibt.

3.2. Digitale Bildverarbeitung

In einem digitalisierten Bild zeigt sich das Rauschen (die Körnigkeit) als statistische Abweichung einzelner Pixelwerte in einem homogenen Zahlenfeld. Dieses Rauschen kann sehr einfach beseitigt werden, indem jede einzelne Zahl durch den gerundeten Mittelwert ihrer Umgebung ersetzt wird (neighborhood averaging; spatial domain low pass filter), etwa durch das algebraische Mittel aus Ursprungszahl und den acht nächsten Nachbarn (Abb. 12).

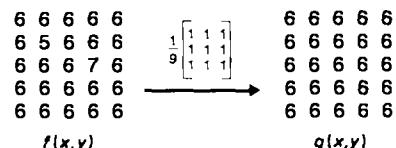


Abb. 12. Digitale Rauschverminderung durch lokale Mittelwertbildung.

Die lokale numerische Mittelwertbildung ist das Analogon zur Mittelwertbildung durch Diffusion beim Film. Hier wie dort leidet die Schärfe. Deshalb werden in praxi kompliziertere Operatoren angewendet, in denen die benachbarten Pixelwerte mit geringerem Gewicht eingehen oder die Wichtung sogar in Abhängigkeit vom lokalen Gradienten variiert ist^[5]. Wenn das Rauschen durch eine besonders niedrige oder besonders hohe Abweichung des Signals zur lokalen Umgebung gekennzeichnet ist, lassen sich die verrauschten Pixel gezielt verbessern, indem nur solche Pixelwerte durch den lokalen Mittelwert ersetzt werden (d.h. die Differenz zur lokalen Umgebung wird gleich Null gesetzt), deren Unterschiede zur Umgebung kleiner oder größer sind als vorgegebene Schwellen (Abb. 13)^[18]. Auf diese Weise sind in der

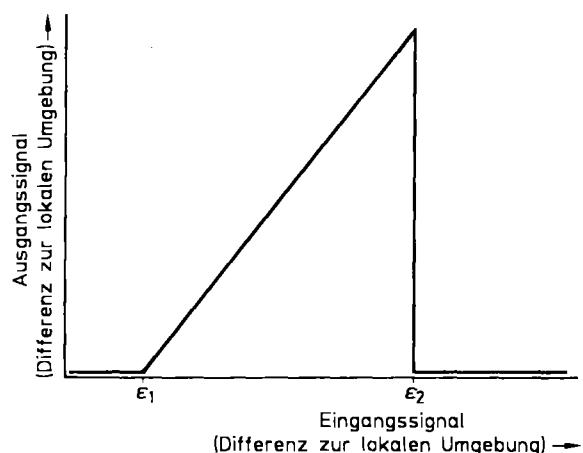


Abb. 13. Digitale Rauschverminderung; Beschränkung der lokalen Mittelwertbildung auf Eingangssignale mit besonders kleinen ($<\varepsilon_1$) oder besonders großen ($>\varepsilon_2$) Abweichungen zur Umgebung.

Mondaufnahme von Abbildung 14 die störenden weißen Punkte eliminiert worden.

In manchen Fällen ist es günstiger, statt des algebraischen Mittels den Median (mittlere Zahl in einer nach Werten geordneten Zahlenfolge) der Umgebung zu verwenden^[2].

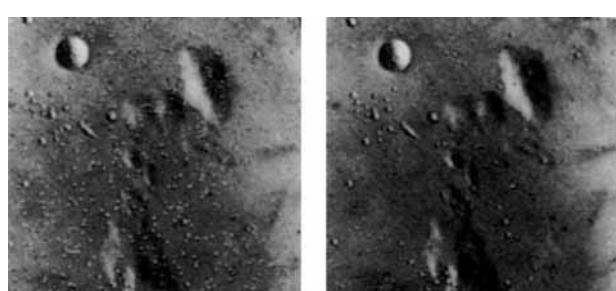


Abb. 14. Digitale Rauschverminderung durch lokale Mittelwertbildung (aus [2b]).

Ebenso wie beim Film vermindert natürlich auch die Mittelwertbildung über mehrere unabhängige Aufnahmen des gleichen Objektes das Rauschen. Eine andere Methode, die keine Entsprechung beim Film hat, wird im Frequenzraum angewendet. Das Rauschen hat typischerweise hohe Ortsfrequenzen, so daß nach Transformation der Bildfunktion in eine Frequenzdarstellung ein Herausfiltern der hohen Ortsfrequenzen vorzugsweise das Rauschen unterdrückt (Abb. 15). Aber auch bei dieser Methode kann die Schärfe beeinträchtigt werden, was man durch spezielle Filter zu minimieren versucht^[3c].

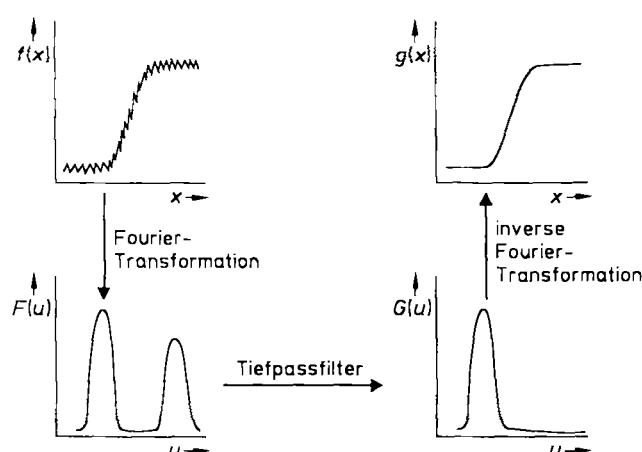


Abb. 15. Beispiel für die digitale Rauschverminderung durch Anwendung eines Tiefpassfilters im Frequenzraum (Erklärung der Symbole siehe Abb. 7.)

3.3. Visuelles System

Beim Sehen kennen wir unter normalen Bedingungen das Phänomen des Rauschens nicht; nur bei fast totaler Dunkelheit nehmen wir schon einmal so etwas wie Rauschen wahr^[11, 19]. Offensichtlich bewältigt das visuelle System dieses Problem sehr wirkungsvoll.

Visuelles Rauschen könnte zwei Ursachen haben: Schwankungen des Eingangssignals (Photonenrauschen, das mit abnehmender Lichtintensität zunimmt) und räumlich-zeitliche Schwankungen in der Signalaufzeichnung (Systemrauschen). Das visuelle System bewältigt Intensitätsunterschiede von $1:10^{10}$, dabei werden dem Gehirn maximal Signalunterschiede von $1:10^2$ zugeleitet^[20]. Der Sehapparat regelt also sehr effektiv die Verstärkung und minimiert auf diese Weise das Rauschproblem.

Das Rauschen wird beim Sehen nach dem nun schon vom Film und von der digitalen Bildverarbeitung her bekannten Mechanismus vermindert: durch Mittelwertbildung – und zwar sowohl räumlich als auch zeitlich.

- Räumlich: In der Retina sind viel mehr Rezeptorzellen als Ganglienzellen; jede Ganglienzelle mittelt etwa über 100 Rezeptorzellen.
- Zeitlich: Die Zeitauflösung beim Sehen ist relativ schlecht; dies ist ja die Basis für die Kinematographie und das Fernsehen. Unser Auge kann bei einer Frequenz von etwa 20 Bildern s^{-1} die Einzelbilder nicht mehr auflösen^[11, 21], es mittelt also die optischen Signale über eine gewisse Zeitspanne. Wie sehr dies das Rauschen vermindert, wird un-

mittelbar deutlich, wenn etwa ein Einzelbild eines Schmalfilms in Standposition betrachtet wird. Dann ist die zeitliche Mittelwertbildung aufgehoben, und die starke Körnigkeit des Einzelbildes kommt zum Tragen.

Eine zusätzliche Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses wird im visuellen System dadurch erreicht, daß nur Signale an das Gehirn weitergeleitet werden, die eine bestimmte (möglicherweise regelbare) Schwellenhöhe überschreiten^[22].

4. Schärfe

Die Schärfeleistung eines bildaufzeichnenden Systems wird an der Wiedergabe einer Kante deutlich (Abb. 16). Je steiler eine Kante wiedergegeben wird, desto besser ist die

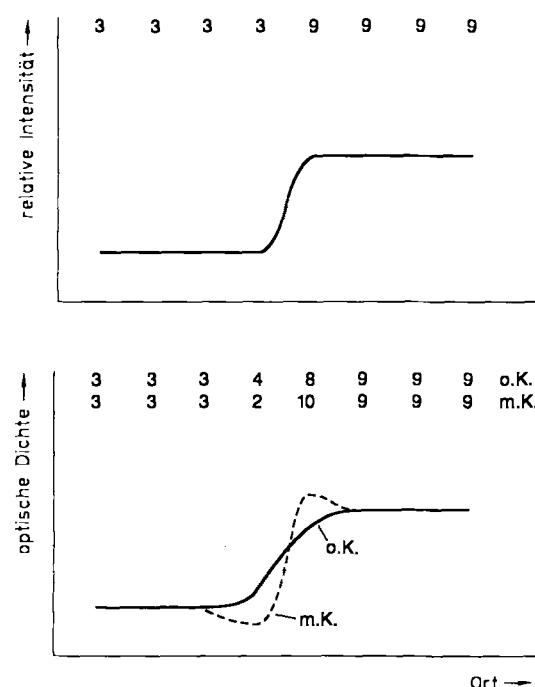


Abb. 16. Kantenwiedergabe, jeweils in analoger und digitaler Schreibweise; oben: ursprüngliches Signal, unten: aufgezeichnetes Signal ohne Kanteneffekt (o.K.) und mit Kanteneffekt (m.K.).

Schärfe des Systems. Schärfeverbesserung heißt, eine Kante aufzusteilen und möglichst noch auf beiden Seiten zu überzeichnen. Ein solcher Kanteneffekt erhöht den Schärfeindruck.

4.1. Film

Die Schärfe eines photographischen Bildes (Negativ) kann nach zwei Methoden verbessert werden. Die wichtigste Methode ist die der „lateralen Inhibition“ mit Entwicklungsinhibitoren aus DIR-Kupplern. In Abbildung 17 sind die Verhältnisse an einer Kante bei der Entwicklung in Gegenwart von DIR-Kupplern dargestellt. Im Laufe der Entwicklung wird Inhibitor produziert (siehe Abschnitt 2.1), und zwar auf der hochdichten Seite der Kante mehr als auf

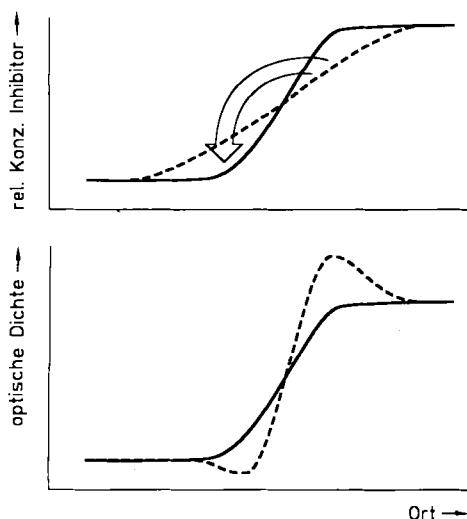


Abb. 17. Chemische Erzeugung eines Kanten effektes im Film durch laterale Inhibition bei der Entwicklung (schematisch); oben: Konzentration an Inhibitor ohne Diffusion (—) und mit Diffusion (---), unten: entsprechende optische Dichten.

der niedrigdichten Seite. Wegen des Konzentrationsunterschiedes diffundiert der Inhibitor in die angedeutete Richtung. In unmittelbarer Nähe der Kante vermindert sich also die Inhibitorkonzentration auf der hochdichten Seite und erhöht sich auf der niedrigdichten Seite. Diese Konzentrationsänderungen des Inhibitors bewirken entsprechende Änderungen der Entwicklung, so daß Kanten effekte der gezeigten Art entstehen. Diese chemischen Kanten effekte lassen sich quantitativ beschreiben^[2,3].

Die andere Methode zur Schärfeverbesserung ist die den Dunkelkammerspezialisten wohlbekannte Methode der „unscharfen Maske“^[6]. Hier wird ein positives, unscharfes Bild in Kombination mit dem negativen, scharfen Originalbild kopiert, wobei in der Kopie Kanten effekte entstehen. Dieses Prinzip kann auch in den Film eingebaut werden (Abb. 18). Dabei wird in einer oberen Schicht ein negatives, scharfes Teilstück und in einer unteren Schicht ein positives,

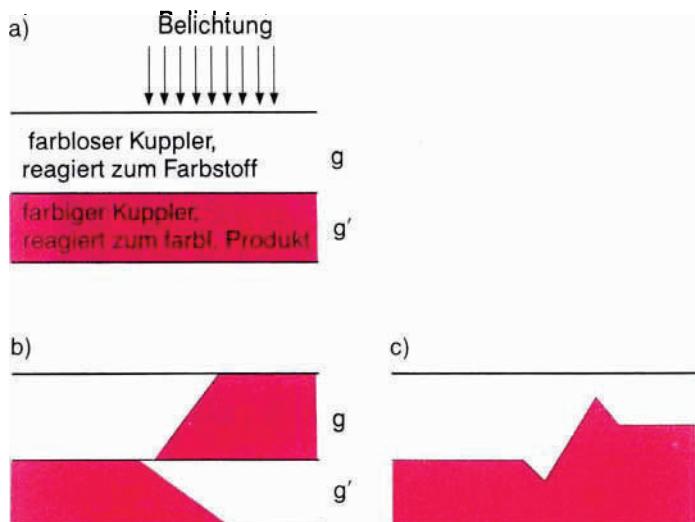


Abb. 18. Erzeugung eines Kanten effektes nach dem Prinzip der unscharfen Maske im grünempfindlichen Schichtpaket eines Colornegativfilms (g, g' : grünempfindliche Teilschichten); a) vor der Entwicklung, b) nach der Entwicklung, c) optische Dichte über beide Teilschichten aufsummiert.

unscharfes Teilstück erzeugt. Das Gesamtbild aus beiden Teilstücken zeigt einen Kanten effekt^[24].

4.2. Digitale Bildverarbeitung

Beide chemischen Methoden zur Schärfeverbesserung eines Films haben numerische Entsprechungen bei der digitalen Bildverarbeitung.

Bei der digitalen „lateralen Inhibition“ (center surround filter; high pass convolution mask^[2]) wird jeder Pixelwert durch einen Wert ersetzt, in den die Differenz zur lokalen Umgebung eingeht. In Abbildung 19 ist ein einfaches Beispiel angeführt. Der Operator hat hier die Form

$$\begin{matrix} & -1 & 3 & -1 \\ \cdots & 5 & 5 & 6 & 6 & 6 & \cdots & \rightarrow & \cdots & 5 & 5 & 4 & 7 & 6 & 6 & \cdots \\ & f(x) & & & & & & & & g(x) \end{matrix}$$

Abb. 19. Digitale Erzeugung eines Kanten effektes durch laterale Inhibition.

$[-1 \ 3 \ -1]$, d. h. daß vom dreifachen Wert einer bestimmten Zahl die einfachen Werte ihrer beiden benachbarten Zahlen zu subtrahieren sind. Der Operator führt die Zahlenreihe $f(x)$ in die Zahlenreihe $g(x)$ über, die einen deutlichen Kanten effekt aufweist. Bei der digitalen lateralen Inhibition wird – in Analogie zur chemischen Methode – jeder Bildpunkt also in inhibierender Weise von seiner Umgebung beeinflußt.

Je nach Form des Operators werden die Differenzen zur Umgebung verschieden stark betont. Beispielsweise zeichnet der Operator $[-1 \ 2 \ -1]$ nur noch Differenzwerte auf; dies entspricht der (negativen) zweiten Ableitung der Bildfunktion und führt zu einer Konturdarstellung.

Die Berechnung lokaler Differenzwerte ist die Grundlage einer ganzen Klasse von Algorithmen zur digitalen Schärfeverbesserung. Hierzu zählen die Gradiententechnik^[3d], die statistische Differenzbildung^[2c, 5] und die Verwendung der zweiten Ableitung der Bildfunktion^[5]. In Abbildung 20 ist oben graphisch dargestellt, daß die Kombination von ursprünglicher Bildfunktion mit deren zweiter Ableitung zu einem Kanten effekt führt.

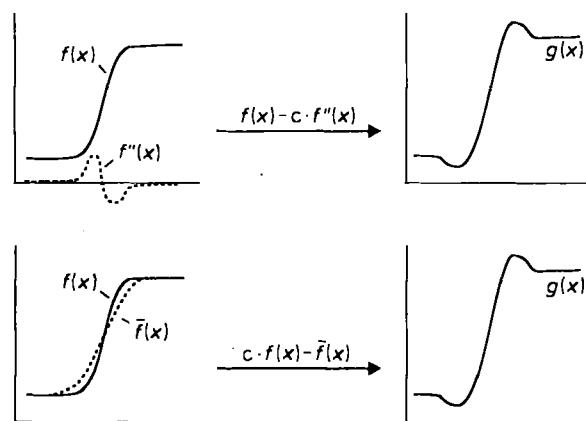


Abb. 20. Digitale Erzeugung eines Kanten effektes durch Kombination der ursprünglichen Bildfunktion $f(x)$ – oben: mit deren zweiter Ableitung $f''(x)$, unten: mit einer verunscharfsten Funktion $\bar{f}(x)$ (Prinzip der unscharfen Maske).

Die laterale Inhibierung (die lokale Differenzbildung) verstört Signalunterschiede und ist damit das Gegenstück zur lokalen Mittelwertbildung. Kanten werden also betont, ebenso aber auch statistische Signalschwankungen, d. h. das Rauschen. Durch komplizierte Operatoren oder durch Vorgeben von Grenzwerten (siehe hierzu auch Abschnitt 3.2) kann dieses Dilemma gemildert werden. So kann etwa der Operator in der Weise modifiziert werden, daß nur Signalunterschiede zur lokalen Umgebung zwischen zwei Grenzwerten ε_1 und ε_2 (siehe Abb. 13) verstört werden, wärend kleinere bzw. grere Signalunterschiede als diese Grenzwerte als Rauschen interpretiert und unterdrükt werden^[5, 18].

Bei der digitalen Methode der „unscharfen Maske“ wird in volliger Analogie zur entsprechenden photographischen Methode die ursprüngliche Bildfunktion $f(x)$ mit einer unscharfen Bildfunktion $\tilde{f}(x)$ kombiniert. In Abbildung 20 (unten) wird deutlich, daß auf diese Weise Kanteneffekte entstehen^[2, 4].

Die im Frequenzraum angewendeten digitalen Methoden zur Schfeverbesserung haben – wie schon erwähnt – keine Entsprechung in der photographischen Chemie. Die Information über Kanten ist vorwiegend in den höheren Ortsfrequenzen codiert; durch Verstärkung der höheren Ortsfrequenzen (high frequency emphasize filter) kann also die Kanteninformation betont werden^[2, 3, 5].

4.3. Visuelles System

Auch das Auge bedient sich des Kanteneffektes, um die Erkennbarkeit von Details zu erhöhen. In Abbildung 21 sind aneinandergrenzende Felder verschiedener Graustufen wiedergegeben. Die Felder erwecken den Eindruck, daß die Dichte an den Kanten zu- oder abnimmt. Tatsächlich sind die Flächen vollig gleichmäßig, die wahrgenommenen Kan-

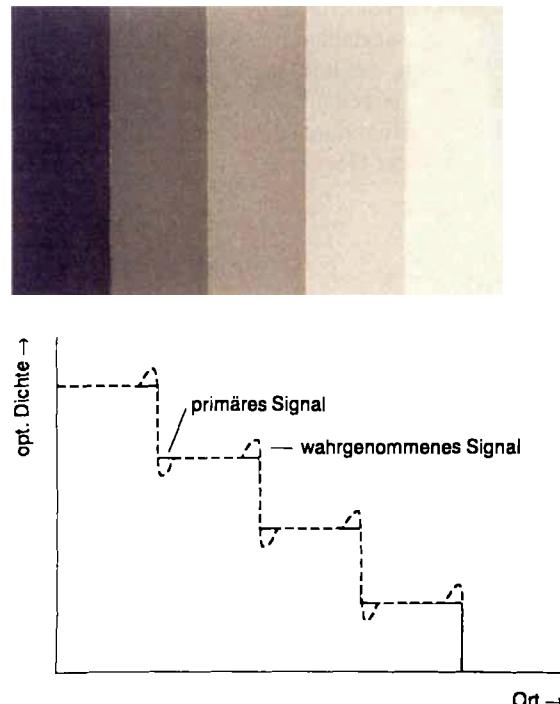


Abb. 21. Kanteneffekt als visuelles Phänomen (Machsche Streifen).

teneffekte sind ein rein visuelles Phänomen (Machsche Streifen^[25]).

Die Kanteneffekte werden auch im visuellen System durch laterale Inhibierung erzeugt (Abb. 22). Die Rezeptorzellen senden aktivierende Signale (rot) zu der jeweils nchstliegen-

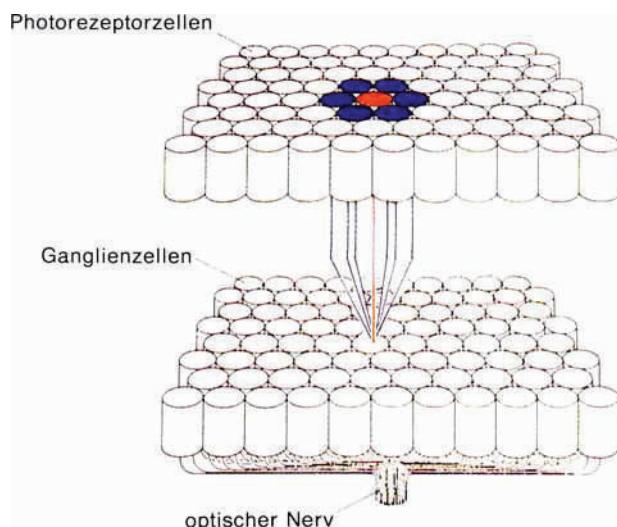


Abb. 22. Erzeugung von Kanteneffekten im visuellen System durch laterale Inhibierung in der Retina (aus [26]).

den Ganglienzelle, aber inhibierende Signale (blau) zu entfernter liegenden Ganglienzellen. Auf jede Ganglienzelle wirkt also eine Summe von aktivierenden und inhibierenden Signalen. In volliger Analogie zur lateralen Inhibierung beim Film oder bei der digitalen Bildverarbeitung führt dies zu einem Kanteneffekt.

Die Wirkung der lateralen Inhibierung wird auch im Hermann-Effekt deutlich: Beim Betrachten des Feldes von schwarzen Quadranten in Abbildung 23 oben werden an den Kreuzungspunkten der weißen Balken fiktive graue Punkte wahrgenommen. An diesen Kreuzungspunkten besteht eine vergleichsweise hohe laterale Inhibierung. Hier wirken vier inhibierende Signale der Umgebung auf ein aktivierendes Signal, wärend auf die weißen Bereiche außerhalb der

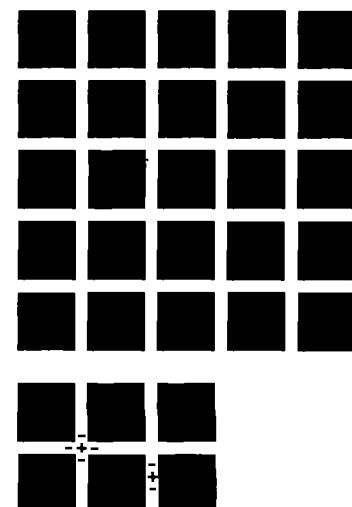


Abb. 23. Hermann-Effekt; oben: visuelles Phänomen, unten: Erklärung.

Kreuzungspunkte nur zwei inhibierende Signale wirken (Abb. 23 unten). Die stärkere laterale Inhibition an den Kreuzungspunkten führt zum Eindruck geringerer Helligkeit^[27].

Ferner ist beim visuellen System die Wahrnehmung der Schärfe ortsfrequenzabhängig: Die visuelle Auflösung eines Strichmusters ist bei mittleren Ortsfrequenzen besser als bei niedrigen oder hohen Ortsfrequenzen^[11, 25, 28].

5. Farbwiedergabe

Farbprobleme entstehen in einem registrierenden System, z. B. einem Film, sowohl bei der Aufnahme als auch beim Auslesen, weil die eingesetzten realen Farbstoffe unerwünschte Nebenabsorptionen aufweisen (Abb. 24). Bei der

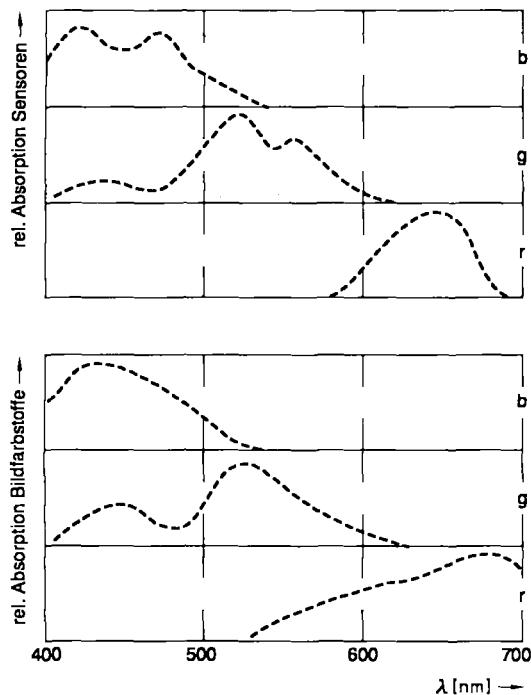


Abb. 24. Fehler bei der Farbaufzeichnung auf einem Film durch nichtideale Absorption der verwendeten Farbstoffe; oben: Belichtung, unten: Auslesen (Kopieren).

Aufnahme bewirkt die nichtideale Absorption der Sensibilisatoren, daß in den verschiedenen Filmschichten jeweils auch falsches Licht registriert wird, z. B. wird blaues Licht nicht nur in der blauempfindlichen Schicht b, sondern zu einem gewissen Anteil auch in der grünempfindlichen Schicht g aufgezeichnet. Beim Auslesen der Negative, d. h. beim Kopieren, wird die Information noch einmal durch die Nebenabsorption der Bildfarbstoffe verfälscht, z. B. wird der blaue Anteil des Kopierlichtes nicht nur durch den Gelbfarbstoff in b, sondern auch durch den Purpurfarbstoff in g moduliert.

Die Verhältnisse lassen sich quantitativ durch die Gleichungen in Abbildung 25 beschreiben^[29]. Die Gleichungen weisen insgesamt sechs mögliche Störterme bzw. Korrekturterme auf, die im realen Fall unterschiedliches Gewicht haben. Die Farbverfälschungen bewirken neben einer Veränderung des Farbtöns eine Verminderung der Farbsättigung.

$$\begin{aligned} B' &= +k_1 B - k_2 G - k_3 R \\ G' &= -k_4 B + k_5 G - k_6 R \\ R' &= -k_7 B - k_8 G + k_9 R \end{aligned}$$

Abb. 25. Berechnung der ursprünglichen Farbsignale B' , G' , R' aus den verfälschten Farbsignalen B, G, R ; k_i sind Konstanten für ein bestimmtes farbaufzeichnendes System.

5.1. Film

Beim Film entsprechen die Farbsignale B, G und R den hinter Blau-, Grün- bzw. Rotfilter gemessenen optischen Dichten (die ihrerseits durch die Konzentration der entsprechenden Farbstoffe bestimmt sind).

Dem Chemiker stehen zwei Methoden zur Verfügung, um die Farbwiedergabe durch Wechselwirkung der Farbsignale untereinander während der Entwicklung entsprechend den Gleichungen in Abbildung 25 zu verbessern (Matrizierung)^[16, 29].

Zum einen ist die Verwendung von farbigen Maskenkupplern möglich (Abb. 26). In die Purpurschicht wird beispiels-

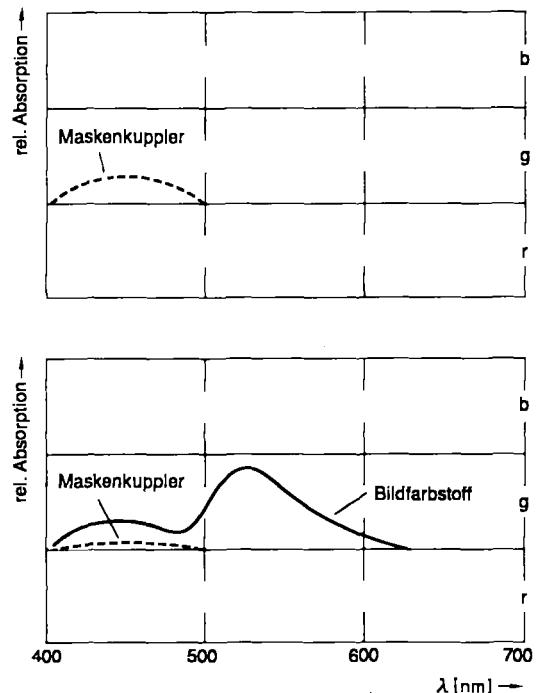


Abb. 26. Verbesserung der Farbwiedergabe im Colornegativfilm durch Verwendung von farbigen Maskenkupplern; oben: Absorption der grünempfindlichen Teilschicht g vor Entwicklung, unten: Absorption von g nach Belichtung und Entwicklung.

weise zusätzlich zum Stammkuppler ein gelber Kuppler eingelagert; dieser kuppelt unter Verlust seiner Farbe. Beim richtigen Mischungsverhältnis kompensiert der Abbau durch Reaktion des gelben Kupplers gerade den Aufbau der Gelbdichte durch die Nebendichte des Purpurfarbstoffs aus dem Stammkuppler. Der Film weist vor und nach Entwicklung eine gleichmäßige geringe Gelbdichte auf, die im Kopierprozeß leicht weggefiltert werden kann. Theoretisch können mit geeigneten Maskenkupplern alle sechs Störterme beseitigt werden. In der Praxis werden neben gelben Mas-

kenkupplern für die grünempfindliche Schicht auch rote Maskenkuppler für die rotempfindliche Schicht eingesetzt. Beide Maskenkuppler zusammen bewirken, daß der Colornegativfilm an unbelichteten Stellen orange ist.

Die andere Methode, die „vertikale Inhibition“, gründet sich wieder auf die Verwendung von DIR-Kupplern und auf die Wirkung der freigesetzten Inhibitoren. Wird z. B. im Film viel Purpurfarbstoff neben wenig Gelb- und wenig Blaugrünfarbstoff erzeugt (Abb. 27), so wird in der Schicht g am mei-

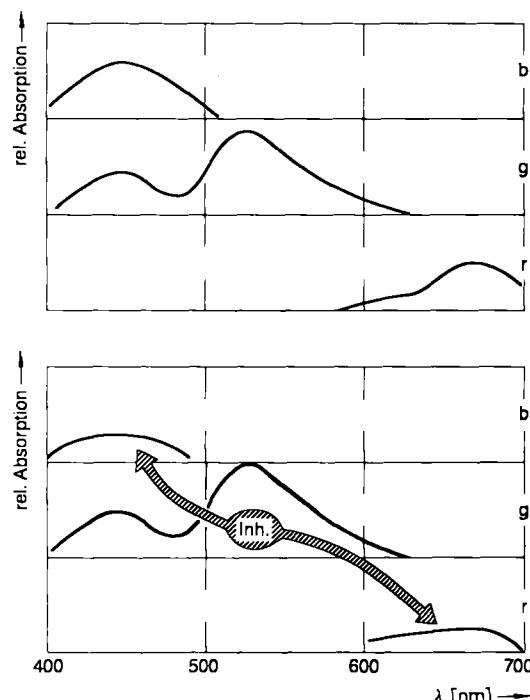


Abb. 27. Verbesserung der Farbwiedergabe im Colornegativfilm durch vertikale Inhibition; oben: Absorption in den drei Teilschichten eines Films ohne vertikale Inhibition. unten: Absorption mit vertikaler Inhibition.

sten Inhibitor freigesetzt, d. h. es liegt ein vertikales Konzentrationsgefälle vor. Der Inhibitor diffundiert deshalb aus der Schicht g in die benachbarten Schichten und hemmt dort die Entwicklung. Die Verhältnisse können so gestaltet werden, daß die Entwicklung des Gelbfarbstoffs in b gerade so stark zurückgedrängt wird, daß damit die unerwünschte Gelbnebendichte des Purpurfarbstoffs in g kompensiert wird.

Das Abwandern des Inhibitors aus der Schicht g bewirkt zugleich eine verstärkte Entwicklung in dieser Schicht (höherer Kontrast). Beide Effekte – die Hemmung in den Nachbarschichten und die verstärkte Entwicklung in der dominierenden Schicht – tragen zu einer höheren Farbsättigung bei. Der Inhibitor aus einer Schicht wirkt auf zwei Nachbarschichten (Abb. 27); bei Einbau von DIR-Kupplern in alle drei Farbschichten werden also insgesamt sechs „Inter-Image-Effekte“ wirksam, die den sechs Korrekturtermen im Gleichungssystem der Abbildung 25 entsprechen.

5.2. Digitale Bildverarbeitung

Bei der digitalen Bildverarbeitung können die gegenseitigen Verfälschungen der Farbsignale R, G und B einfach eliminiert werden. Dabei werden von jedem Eingangssignal

Korrekturwerte für die Beeinflussung durch die jeweils anderen Signale abgezogen, und zwar gemäß den Gleichungen in Abbildung 25 (Matrizierung^[21b]). Die Korrekturwerte sind für ein bestimmtes Farbsystem (z. B. für eine Filmsorte) spezifisch, das die Eingangsdaten für die digitale Bildverarbeitung liefert. Nach der digitalen Matrizierung sind die Fehler des Primärbildes hinsichtlich Farbton und Farbsättigung korrigiert.

Daneben gibt es einen anderen Weg, um die Farbqualität zu beeinflussen. Dabei werden die Eingangssignale R, G, B zunächst rechnerisch in ein Luminanzsignal y und zwei Chrominanzsignale u und v umgewandelt (Abb. 28)^[21c].

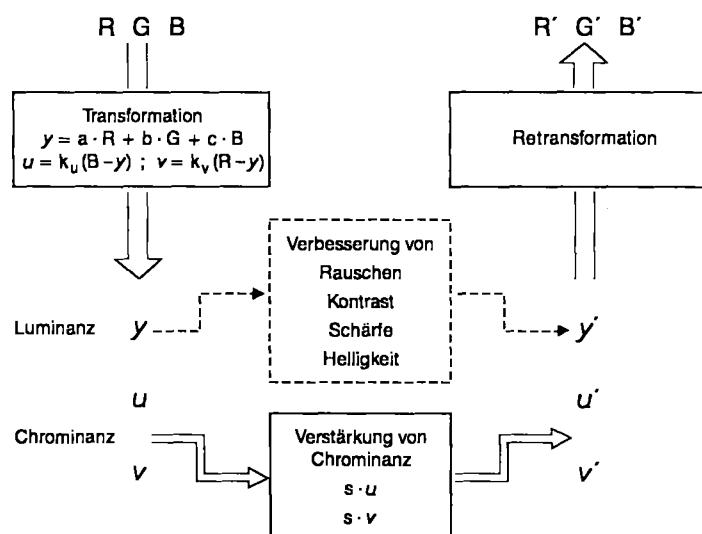


Abb. 28. Digitale Verbesserung der Farbsättigung durch Verstärkung der Chrominanz sowie der Bildqualität durch Modifizierung der Luminanz.



Abb. 29. Oben: konventionelle Kopie eines Diapositivs, unten: Kopie mit digitaler Verbesserung der Farbsättigung, (digitale Bildverbesserung mit CRT-Printer der Firma Agfa-Gevaert).

Durch gleichmäßige Verstärkung der Chrominanzsignale kann die Sättigung der Farben erhöht werden. Das Luminanzsignal kann Rechenoperationen für Rauschen, Kontrast, Schärfe und Helligkeit unterworfen werden (anders als beim Film sind hier Farbsättigung und Kontrast unabhängig voneinander beeinflußbar). Für die Ausgabe werden die verbesserten Signale y' , u' , v' in verbesserte Signale R', G', B' umgerechnet. Abbildung 29 zeigt, in welchem Maß auf diese Weise die Farbsättigung erhöht werden kann.

5.3. Visuelles System

Die Empfindung Farbe ist die Folge einer ungleichmäßigen Reizung der drei Sorten farbtüchtiger Rezeptorzellen.

Der Sehapparat hat die Eigenschaft, die Farbe eines Objektes weitgehend unabhängig von der Lichtfärbung als konstant wahrzunehmen. Dies hat *Land*^[30] in einem entscheidenden Experiment demonstriert (Abb. 30): Eine Farbtafel

auf, da hier wie dort ein aktivierendes Zentrum von einem inhibierenden Bereich umgeben ist.

6. Zusammenfassung und Ausblick

In Tabelle 1 sind die oben diskutierten Methoden der Bildverbesserung in den drei bildmanipulierenden Systemen vergleichend gegenübergestellt. Neben einigen systemspezifischen Methoden werden die Entsprechungen deutlich.

Das Rauschen wird in allen drei Systemen durch örtliche oder zeitliche Mittelwertbildung vermindert. Durch Einführung einer Schwelle wird bei der digitalen Bildverarbeitung und beim visuellen System der ungünstige Einfluß dieser Methode auf die Schärfe minimiert.

Die Schärfe wird in allen drei Systemen durch Kantereffekte verbessert, die durch laterale Inhibition erzeugt werden. Das Prinzip der unscharfen Maske wird sowohl bei der chemischen als auch bei der digitalen Bildverarbeitung

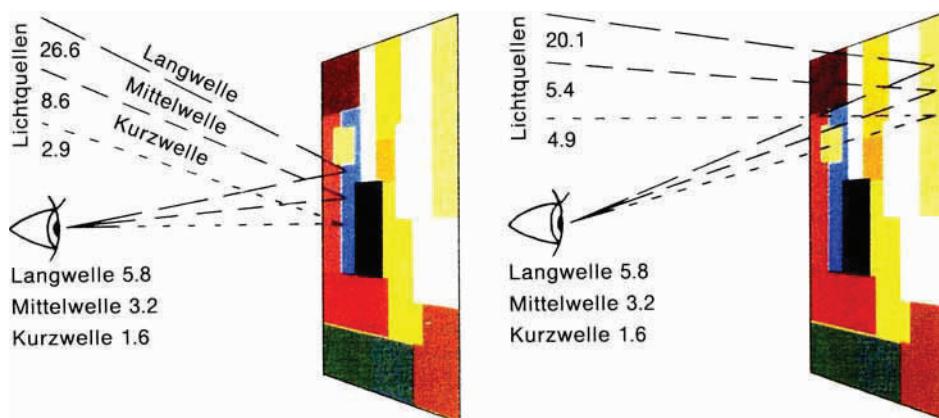


Abb. 30. Experiment zur Demonstration der Konstanz der visuellen Farbempfindung. Die angegebenen Werte sind Emisionsdichten [$\text{mW sr}^{-1} \text{m}^{-2}$] (aus [30]).

wird mit drei Lichtquellen (blau, grün, rot) bestrahlt und die auf das Auge fallende Remission wird gemessen. Im ersten Fall trifft eine bestimmte Remission R_1, G_1, B_1 vom blauen Feld auf das Auge. Im zweiten Fall werden die Lichtquellen so eingestellt, daß die gleiche Remission R_1, G_1, B_1 jetzt vom ehemals gelbgrünen Feld ausgehend das Auge trifft. Wir sollten erwarten, daß dieses Feld jetzt als blau wahrgenommen wird. Dies ist aber nicht der Fall, sondern das gelbgrüne Feld aus Fall 1 wird auch in Fall 2 als gelbgrün empfunden, ebenso werden die anderen Felder hinsichtlich ihrer Farbe als konstant wahrgenommen. Offensichtlich relativiert das Auge die Farbsignale eines bestimmten Feldes zur Umgebung. Das Tripel der relativierten Signale bestimmt die Farbempfindung.

Für eine vergleichende Betrachtung ist es ferner bemerkenswert, daß auch im visuellen System die Signale R, G, B aus den Zäpfchen noch in der Retina in aktivierender (+) oder inhibierender (-) Weise lokal kombiniert werden; dabei entstehen zwei Chrominanzsignale ($R - G$; $B - R - G$) und ein Luminanzsignal ($R + G + B$ -Stäbchensignal).

Dieses Gegenfarbmodell^[31, 32] kann viele Phänomene des Farbensehens erklären; das Modell weist zum Kantereffekt (des Auges) durch laterale Inhibition gewisse Parallelen

genutzt. Frequenzfilter sind bei der digitalen Bildverarbeitung und auch beim visuellen System bekannt.

Die Farbkorrektur über Matrizierung beim Film (durch Maskenkuppler oder vertikale Inhibition) hat ihre numerische Entsprechung bei der digitalen Bildverarbeitung. In

Tabelle 1. Gegenüberstellung der bildverbessernden Methoden.

Bildeigenschaft	Film Chemische Verarbeitung	Computer Digitale Verarbeitung	Visuelles System Neuronale Verarbeitung
Rauschen (Körnigkeit)	<ul style="list-style-type: none"> • Mittelwertbildung • Unvollst. Transformation Ag → Farbstoff 	<ul style="list-style-type: none"> • Mittelwertbildung • Schwelle • Frequenzfilter 	<ul style="list-style-type: none"> • Mittelwertbildung • Schwelle
Schärfe	<ul style="list-style-type: none"> • Laterale Inhibition • Unscharfe Maske 	<ul style="list-style-type: none"> • Laterale Inhibition • Unscharfe Maske • Frequenzfilter 	<ul style="list-style-type: none"> • Laterale Inhibition • Frequenzfilter
Farbe	<ul style="list-style-type: none"> • Matrizierung - Maskenkuppler - Vertikale Inhibition 	<ul style="list-style-type: none"> • Matrizierung • Transformation RGB → Lum./ Chrom. (Verstärkt. Chrom. Chrominanz) 	<ul style="list-style-type: none"> • Farbkonstanz • Transformation RGB → Lum./ Chrom. Chrominanz)

beiden Fällen werden Farbverfälschungen durch die Einwirkung der Signale R, G, B aufeinander korrigiert. Die Transformation dieser Signale in Luminanz- und Chrominanzsignale findet sich sowohl bei der digitalen Bildverarbeitung als auch im visuellen System.

Bei aller Unterschiedlichkeit der Systeme – chemischer Film, elektronischer Computer, biologischer Sehapparat – existieren also erstaunliche Analogien in den Algorithmen der Bildverbesserung, geschrieben jeweils in den systemeigenen Sprachen; das sind chemische Reaktionen und Diffusionsvorgänge beim Film, elektronische Datenverarbeitung beim Computer, neuronale Schaltvorgänge im Sehapparat.

Diese hier beschriebenen Entsprechungen bei der Bildverbesserung sind in zweifacher Weise relevant für die Zukunft der Photographie. Zum einen geben diese Ähnlichkeiten Anlaß zu der Spekulation, daß das Studium digitaler oder biologischer Mechanismen der Bildverarbeitung Anregungen für die weitere Verbesserung photographischer Filme liefern könnte, zum anderen wird hier eine Konkurrenz der Technologien sichtbar. Ein photographisches Bild kann sowohl durch eingebaute chemische Mechanismen als auch nachträglich durch digitale Bildverarbeitung in der Kopieranstalt verbessert werden. Es ist noch völlig offen, ob zukünftige Filme einfacher konstruiert werden können, weil der Computer in der Kopieranstalt einen Teil ihrer Funktionen übernimmt, ob die chemische, parallele Bildverarbeitung in mancher Hinsicht nicht doch der digitalen Bildverarbeitung überlegen ist oder ob vielleicht die Kombination beider Technologien zu den besten Resultaten führt.

Meinem Kollegen Dipl.-Ing. E. Wagensonner danke ich herzlich für die geduldige Einweisung in das Gebiet der digitalen Bildverarbeitung.

Eingegangen am 28. Februar 1989 [A 741]

- [1] P. Haberäcker: *Digitale Bildverarbeitung*, Hanser, München 1987.
- [2] a) W. K. Pratt: *Digital Image Processing*, Wiley, New York 1978; b)[2 a], S. 320; c)[2 a], S. 323.
- [3] a) R. C. Gonzalez, P. Wintz: *Digital Image Processing*, Addison-Wesley, London 1977; b)[3 a], S. 199 ff; c)[3 a], S. 139; d)[3 a], S. 153.
- [4] E. L. Hall: *Computer Image Processing and Recognition*, Academic Press, New York 1979.
- [5] D. C. C. Wang, A. H. Vagnucci, C. C. Li, *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 24 (1983) 363.
- [6] R. W. G. Hunt: *The Reproduction of Colour*, Fountain Press, Tolworth 1987.
- [7] G. Haist: *Modern Photographic Processing*, Vol. 2, Wiley, New York 1979, S. 501.
- [8] T. M. Cannon, B. R. Hunt, *Sci. Am.* 245 (1981) Nr. 4, S. 136.
- [9] D. H. Hubel, T. N. Wiesel, *Sci. Am.* 241 (1979) Nr. 3, S. 130; *Spektrum Wiss.* 1979, Nr. 11, S. 106.
- [10] T. Poggio, C. Koch, *Sci. Am.* 256 (1987) Nr. 5, S. 42; *Spektrum Wiss.* 1987, Nr. 7, S. 78.
- [11] T. N. Cornsweet: *Visual Perception*, Academic Press, New York 1970.
- [12] J. L. Schnepf, D. A. Baylor, *Sci. Am.* 256 (4) (1987) 32.
- [13] R. H. Masland, *Sci. Am.* 255 (6) (1986) 90.
- [14] R. Scheerer, E. Ranz, J. Lohmann, EP 0 045 427 (1981), Agfa-Gevaert.
- [15] a) T. H. James (Hrsg.): *The Theory of the Photographic Process*, Macmillan, New York 1977; b)[15 a], S. 343.
- [16] W. Püschel, DBP 1 099 350 (1959), Agfa-Gevaert.
- [17] a)[15 a], S. 621; b) R. E. Booms, US-Pat. 4 420 556 (1981), Eastman Kodak.
- [18] R. W. G. Hunt, *Phys. Technol.* 16 (1985) 12.
- [19] A. Rose: *Vision*, Plenum Press, New York 1973, S. 45.
- [20] F. S. Werblin, *Sci. Am.* 228 (1973) Nr. 1, S. 71.
- [21] a) H. Lang: *Farbmehr und Farbensehen*, R. Oldenbourg, München 1978; b)[21 a] S. 284; c)[21 a] S. 329.
- [22] H. B. Barlow, T. P. Kaushal, M. Hawken, A. J. Parker, *J. Opt. Soc. Am.* A 4 (1987) 2366.
- [23] J. R. Jarvis, *J. Photogr. Sci.* 33 (1985) 212.
- [24] M. Fujiwara, EP 0 174 873 (1984), Konishiroku.
- [25] F. Ratliff, *Sci. Am.* 226 (1972) Nr. 6, S. 90.
- [26] T. Poggio, *Sci. Am.* 250 (1984) Nr. 4, S. 68; *Spektrum Wiss.* 1984, Nr. 6, S. 114.
- [27] J. P. Frisby: *Schen*, Heinz Moos Verlagsges., Gütersloh, S. 156.
- [28] F. W. Campbell, L. Maffei, *Sci. Am.* 231 (1974) Nr. 5, S. 106.
- [29] P. Kowalski: *Applied Photographic Theory*, Wiley, London 1972, S. 258.
- [30] E. H. Land, *Sci. Am.* 237 (1977) Nr. 12, S. 108.
- [31] M. S. Livingstone, D. H. Hubel, *J. Neurosci.* 4 (1984) 309.
- [32] D. H. Hubel: *Auge und Gehirn*, Spektrum der Wissenschaft Verlagsges., Heidelberg 1989.