

Der Medientyp Bild

Paul Ferd. Siegert

Pixel- vs. Objektorientierung

1. Die Anfänge der automatischen Bildbearbeitung

Historische diskrete Bilder

Das Bilder immer schon analog erstellt wurden scheint uns selbstverständlich. Das es aber ebenso eine lange Tradition gibt, Bilder aus diskreten Elementen zusammzusetzen vielleicht nicht. Die Repräsentation von Bildern durch diskrete Einheiten finden sich in klassischen Mosaiken ebenso, wie in den Glasfenstern des Mittelalters.

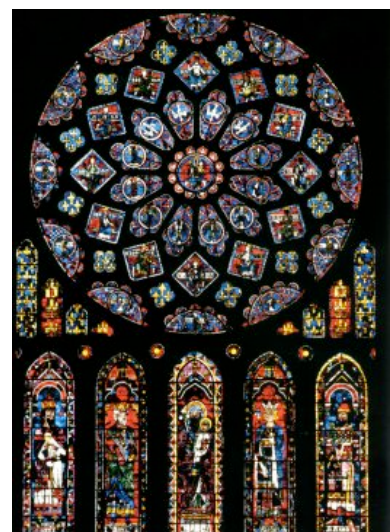


Die Mosaiksteine oder Glasstücke sind diskrete abzählbare Einheiten. Das Bild wird aus einzelnen Elementen Generiert, wie auf dem Computerbildschirm.

Selbst die Anzahl der Farben ist endlich. Vielfach ergeben sich Mischfarben durch nah beieinander liegende Elemente. Die Mischung beim Mosaik geschieht im subtraktiven Farbsystem, beim Glasfenster im additiven Farbsystem statt (dazu später mehr).

Was unterscheidet diese Bilde nun von einem digitalen Bild aus dem Computer?


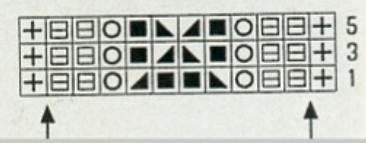

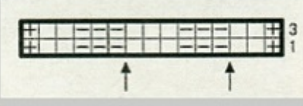
- die Formation der Elemente ist unregelmäßig, kann somit selbst als Stilmittel eingesetzt werden
- was hier von menschlicher Intelligenz generiert wird, muss der Computer vorher erst durch automatische Verfahren zergliedert werden



¹ Eigene Aufnahme, 2002

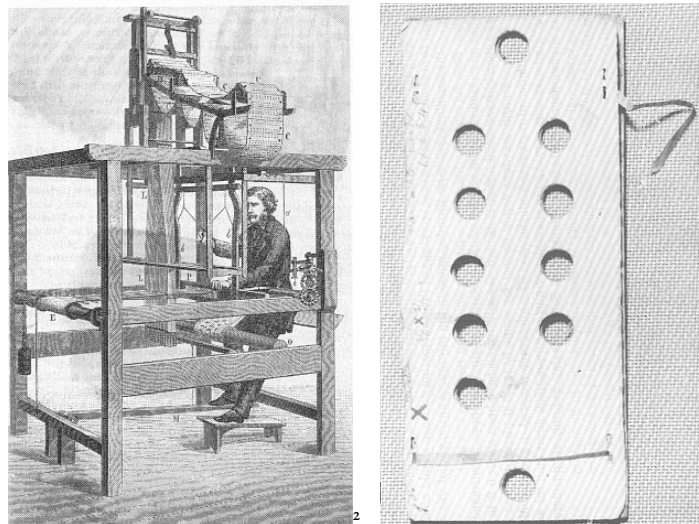
Bildalgorithmen aus dem Alltag

Auch diese algorithmischen Verfahren zur Erstellung von Bildern sind aus dem Alltag bekannt. Der einfachste Algorithmus ist der für ein einfaches Gewebe. Hier besteht die Anweisung nur aus dem wechselseitigen Heben und Senken des Kett- bzw. Schussfadens. Sollen Bilder entstehen kommen Anweisungen hinzu welches Zeichen (welcher Kett- bzw. Schussfaden) verwendet werden soll. Die Stoffdesigner haben dazu ein eigenes Aufschreibesystem.

		<ul style="list-style-type: none"> + Randmasche - linke Masche o 1 Umschlag <p>Dreieck Spitze rechts 2 M rechts zusammenstricken</p> <p>Dreieck Spitze links 2M überzogen zusammenstricken</p> <p>gefülltes Kästchen 1M</p> <p>rechts Rückrunden stricken wie sie erscheinen.</p>
		<ul style="list-style-type: none"> + Randmasche leeres Kästchen rechte Masche - linke Masche <p>Rückrunden links stricken</p>

Schwieriger sind schon die Anweisungen für Strickmuster. Auch hier sind die Einheiten diskret (rechte Masche, linke Masche etc.). Zusätzlich gibt es hier „Programmanweisungen“, wie diese Strickmuster (Bilder) zu erstellen sind. Dort, wo sich die Bilder als regelmäßige Matrix aufbauen, können Algorithmen angewendet werden,

Jacquardsche Webstuhl



² http://kaluza.physik.uni-konstanz.de/a/gesch/1_16a.jpg

Jaquard's programmierbarer Webstuhl. Oben das Band mit Lochkarten. Aus Scientific American, Ada and the First Computer, May 1999, p. 71

³ Babbage'sche Lochkarte mit dem Befehl das Register V6 mit dem Register V2 zu multiplizieren, aus Williams, p. 188

Der französische Seidenweber J.-M. Jacquard gelang es 1805 als erster, diese Anweisung zum Weben (Heben und Senken der Fäden) zu automatisieren. Nachdem das Verfahren – Programm und Herstellung zu trennen – einmal erfunden war, konnten man nun auch verschiedene Programme abarbeiten lassen. Die Anweisungen für die Maschine wurden dabei auf Lochkarten ausgelagert, die in mit Fäden miteinander verbunden wurden und nacheinander durch die Maschine liefen. So konnten auch sehr komplizierte Muster gewoben werden.

Die Erfindung des automatischen Webstuhl hatte gewaltige kulturelle Auswirkungen. Die Auslagerung des Programms und die maschinelle Verarbeitung garantierte

- einen schneller Produktionsprozess
- eine höhere Qualität der Stoffe
- den Einsatz ungelernter Arbeiter und damit die Senkung der Kosten

In der Folge kam es 1830 in Lyon und 1844 in Schlesien zu Weberaufständen durch die dramatische Verschlechterung ihrer der sozialen Lage. Qualifizierte Spezialisten für das Weben bestimmter Muster wurden arbeitslos, das Lohnniveau sank. Ein ganzer Berufsstand lid Hunger.

Zergliederung als Epochenphänomen

In 19. Jahrhundert ist die Zerlegung der Natur eines der großen Themen und setzt sich bis heute fort.

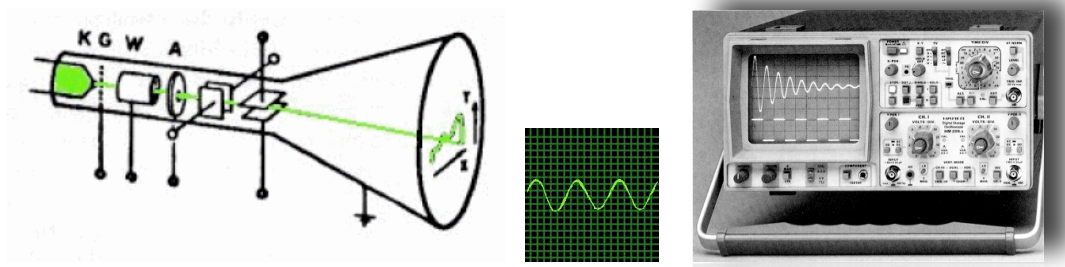
- der Bilder (Pointilisten, Nipkow)
- der Bewegung (Muybridge, Muray)
- des Schalls (Edisson)
- der Daten (Jaquard, Babbage, Hollerith)
- der Menschen (Fingerabdruck, Physionomie)
- der Arbeit (Taylor)

2. Anfänge der Computergrafik

Die Computergrafik knüpft an all das erstaunlicher Weise erst einmal nicht an (warum sehen wir später), sondern entwickelt sich aus einer ganz anderen Richtung.

Braunsche Röhre

1897 erfindet der deutsche Physiker Karl Ferdinand Braun (1850-1918) die Kathodenstrahlröhre (Braunsche Röhre). In ihr wird ein Elektronenstrahl gebündelt und durch zwei Ablenkmitter auf einen fluoreszierenden Schirm geschossen, wo er eine temporär leuchtende Spur hinterlässt. Die Brausche Röhre findet seinen Einsatz im Radar, im Oszillographen und später beim Fernsehen.



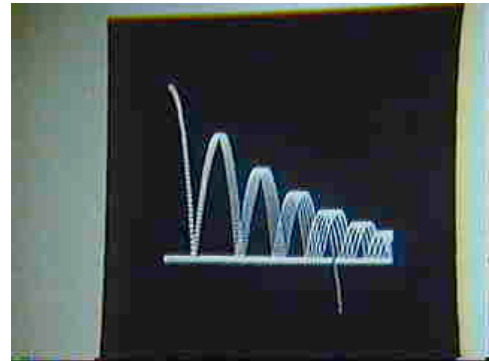
Anstatt Bilder in einer Matrix aus Bildpunkten zu repräsentieren, benutzte man hier elektrische Zustände die analog zu mathematische Funktionen erzeugt wurden. Man muss sich vor Augen halten, dass es Bildschirme, wie wir sie heute kennen, damals noch nicht gab.

Der Monitor

Die erste erhaltenen Computergrafik, die nun nicht analog, sondern mittel eines Computers mit solch einer Braunschen Röhre ausgeführt wird, stammt vom 1951.

Jay Forrester programmierte auf dem Whirlwind, (ein Vorläufer des SAGE-Projektes) diesen springenden Punkt (bouncing ball) um zu zeigen wie der Computer die Figur in Echtzeit berechnet und gleichzeitig mit dem Elektronenstrahl darstellt. Die ersten Computergrafiken auf dem Whirlwind waren Animationen.

Die diskrete und digitale Berechnung wird hier Analog präsentiert, denn noch ist eine digitale Ausgabe nicht möglich. Die Darstellung erfolgt hier nicht als Referenz auf ein reales Ereignis, sondern aufgrund eines physikalisch-mathematischen Modells eines springenden Balls.



4



5

Jay Forrester war einer der Militärplaner des SAGE-Projektes (Semi Automatic Ground Environment) und hielt die Bedienschnittstelle die noch auf Basis von Fernschreibern funktionierte für „relativ inadequate“.

Als Eingabegeräte diente der sogenannte Flexowriter (Lochkarten und Lochstreifen). Die Kathodenstrahlröhre wurde als Anzeigeeinstrument für das Radar (Radio Detection And Ranging / dt.: Funkortung / Ortung mittels Radiowellen) verwendet. Der Bildschirm wird daher im Laufe der Zeit mit alphanumerischen Zeichen zum „Typotron“ angereichert. Das SAGE-System war das erste System mit interaktiver Computergrafik

Nebenbemerkung: Auch die ersten druckgraphischen Ausgabegeräte folgten einer analogen Vektordarstellung. Bereits 1964 baute der deutsche Bauingenieur und Computerpionier Konrad Zuse den ersten Plotter „Graphomat Z64“, der Bauingenieuren die Arbeit des Zeichnens abnehmen sollte.

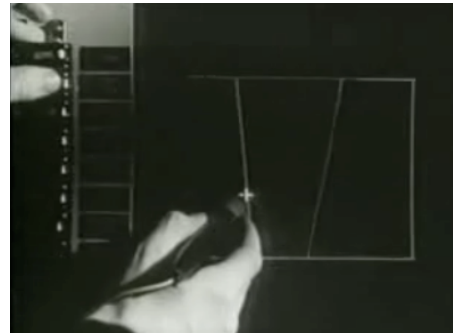
Aus diesen mit immer mehr Zeichen angereicherten Radarbildschirmen entwickelte sich schließlich der Monitor als gängiges Ausgabegerät. Zusätzlich konnten die Operateure mittels einer „light gun“ (später im zivilen Bereich „light pen“ umgetauft) Eingaben über den Bildschirm vornehmen.

⁴ Das SAGE control center 1958

⁵ Das Cover des SAGE User Manuals

Computergrafik

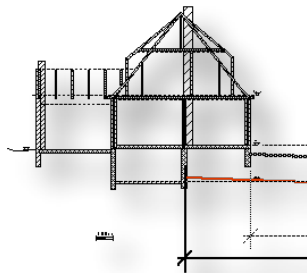
Eines der bedeutendsten Vorreiter von Computergrafik-Anwendungen war das von Ivan Sutherland entwickelte „Sketchpad“. Mittels Leuchtstift (light pen) und Tastatur konnten auf dem Monitor Grafiken gezeichnet, gelöscht und editiert werden. Sutherlands Programm konnte zunächst nur Linien zeichnen, als wenn man Streichhölzer auslegt. Versob man bei einem Quadrat eine Linie, zerstörte man das Quadrat. Deshalb führte er sogenannte Nebenbedingungen (constraints) ein, die Objekte definierten. Da die Objekte nun mit Hilfe der Nebenbedingungen (mathematisch) als etwas Ganzes definiert waren, konnten sie jetzt komplett verschoben, skaliert oder gedreht werden.



Das Sketchpad diente schnell als Vorbild für weitere Computerprogramme, vor allem für die technische Konstruktionen in der Automobil- und Luftfahrtindustrie. Für diese Grafikberechnungen waren allerdings immer noch Großrechner notwendig.

3. Objekte und Bildpunkte

Vektorgrafik



Hier zwei aktuelle Beispiele, die nach dem gleichen Paradigma wie Sutherlands Sketchpad, also als Vektor- oder objektorientierte Grafik entstanden sind.

Was bei Sutherland jedoch noch Nebenbedingungen waren, wird jetzt zur Hauptsache. Objektorientierte Programme gehen von „bekannten“ Objekten aus (z.B. Quadrat = vier rechte Winkel, vier gleiche Seiten) und sichern lediglich das

- das **Objekt** und seine konkreten Ausformungen,
- die **Attribute** (z.B. Länge einer Kante, Position der linken unteren Ecke auf dem Bild, Linienstärke, Farbe, Füllung etc.).

Die Qualität ist hier abhängig von der Komplexität und der Anzahl der Objekte und deren Attribute, die das Programm zu bieten hat. Bilder werden hier also mittels mathematischer Beschreibungen generiert. Das Ergebnis ist ein reines, sehr Speicherplatz sparendes Textdokument. Ein Beispiel eines sehr einfachen Bildes und seiner Codierung:

```

%%PS-Adobe-2.0
%%Creator: FreeHand 10.0
%%Title: (Quadrat.eps)
%%CreationDate: (03.01.2008 9:59 Uhr)
%%DocumentProcessColors: Black
%%DocumentProcSets: Adobe_Illustrator_1.1 I O
%%BoundingBox:64 724 126 786
%%TemplateBox:298 421 298 421
%%TileBox:30 31 565 811
%%PageOrigin:0 0
%%DocumentPreview: None
%%DocumentProcessColors: Cyan Magenta Yellow Black
%%EndComments
%%EndProlog
...
0.0035 0.9402 0.9265 0.0004 k
64.6568 785.1144 m
125.1144 785.1144 L
125.1144 724.6568 L
64.6568 724.6568 L
64.6568 785.1144 L
64.6568 785.1144 L
f
94.8856 754.8856 m
F
U
o XR

```



Wegen der hohen Speicherkosten bestanden die ersten graphische Experimente ausschliesslich aus Vektorgrafik. Für ein Grafik-Terminal der Fa. Evans & Sutherland mussten 250.000 USD bezahlt werden. Hinzu kamen die gleichen Kosten für die Software und den Großrechner.

Pixelgrafik

Die Anfänge der Computergrafik folgten also einem ganz anderen Paradigma, als wir es heute gewohnt sind. Unsere Monitore arbeiten heute nicht wie ein Radarbildschirm oder wie noch der herkömmliche Fernseher, sondern er stellt einzelne sehr kleine Bildpunkte dar. Dieses Paradigma kann erst mit der Entwicklung leistungsfähiger Speicher entstehen.

Ende der 40er Jahre wird der Magnetkernspeicher erfunden, der wie eine Matrix aufgebaut ist. Jede einzelne Speicherzelle (d.h. jedes Bit) bestand aus einem Ferritring. Der Strom durch zwei Drähte (aber nicht einen) bewirkte eine Magnetisierung des Ferritringes in die eine oder andere Richtung.



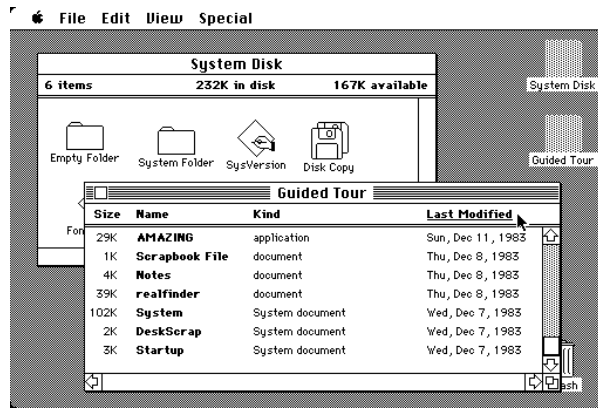
Die Ringe wurden von Hand und mit einer Lupe auf Kupferdrähte aufgezogen. Ein Bit kostete etwa 40 Ct. Die 32 GB eines iPod touch würden mit diesen Preisen mit ca. 105 Mrd. Euro zu Buche schlagen.

Auch der Magnettrommelspeicher, der zwar bereits 1965 für erste Rasterbilder verwendet wurde, bot noch nicht ausreichenden Speicherplatz um Bilder als Punktmatrix zu speichern.

Erst die Einführung des 1kB RAMs (1024 bit) 1971 brachte den Durchbruch. Dadurch wurde das sogenannte bit-mapping möglich: das simple Übertragen einer Speicherstelle auf einen Bildschirmpunkt (bei S/W-Bildern). Mit den zunehmend größer und billiger werdenden Speichern wird es möglich ein Bild als eine Matrix aus einzelnen Punkten abzulegen (bitmaps). Entsprechend zeichnen die Monitore nicht mehr mit einem Elektronenstrahl Linien auf den Schirm, sondern unterteilen den Bildschirm in viele einzeln ansprechbare Punkte.

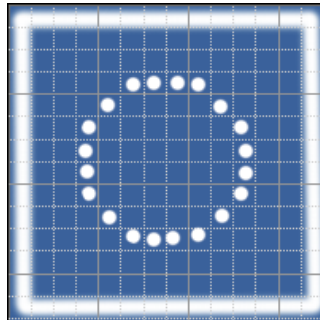
Die Grafikmöglichkeiten der PCs werden schliesslich in den 80er Jahren zu den wichtigsten Verkaufsargumenten⁶ und graphische Betriebssysteme erobern den Markt (Xerox / Apple).

⁶ 1987 Vorstellung des Amiga 2000. Ein Consumer-Produkt mit großen Grafikfähigkeiten.

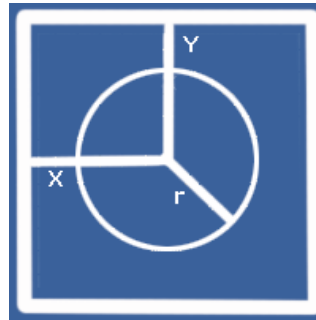


Pixelorientierte Programme die Bitmap Grafik erzeugen sichern die Bildinformation jedes einzelnen Bildpunktes. Die Qualität diese Bilder bemisst sich u.a. an der Anzahl der Punkte in die das Bild zerlegt wird, sowie die Genauigkeit, mit der jeder einzelne Bildpunkt erfasst wird.

Vergleich der Paradigmen



pixelorientierte Bitmapgrafik



objektorientierte Vektorgrafik

Beides findet auch seinen Niederschlag in den druckgrafischen Ausgabegeräten Plotter und Matrixdrucker.

Jedes dieser Paradigmen hat vor und Nachteile. Es kommt darauf an für den entsprechenden Einsatz das richtige Programm zu auswählen.

A) Wie sieht es aus, wenn man einzelne Bildpunkte manipulieren möchte, also zum Beispiel einen Punkt aus einem Rechteck entfernen möchte?

	Bitmapgrafik	Vektorgrafik
vorher	<pre> I - O - I O - I - O I - O - I </pre>	Objekt: Rechteck 3*3 Pixel Kantenlänge Muster: Grau 50%
nachher	<pre> O - O - I O - I - O I - O - I </pre>	nicht möglich

B) Was passiert, wenn das Bild skaliert wird?

	Bitmapgrafik	Vektorgrafik
vorher	<pre> 1 - 0 - 1 0 - 1 - 0 1 - 0 - 1 </pre>	Objekt: Rechteck 3*3 Pixel Kantenlänge Muster: Grau 50%
nachher		Objekt: Rechteck 3*6 Pixel Kantenlänge Muster: Grau 50%

Zusammenfassung

	Bitmapgrafik	Vektorgrafik
Vorteile	jeder Punkt editierbar Einsatz mächtiger Filter „natürliche“ Anmutung	numerisches Arbeiten (CAD, GIS...) Skalierbarkeit Objekt/Attribut Trennung Objekt bleibt ganz (hierarchische Staffelung) kleine Dateien
Nachteile	Objekte werden bei Überlappungen nicht erhalten große Datenmengen	Objekte nur bedingt editierbar Natürlich wirkende Effekte sehr schwierig

Was digital ver- und bearbeitet werden soll, muss operationalisierbar gemacht werden. Für Bilder bieten sich zwei Paradigmen an. Die Zerlegung...

...als diskrete Objekte

Operationen auf der Ebene der Objekte (z.B. Flächenberechnungen)

...als diskrete Punkte

Operationen auf der Ebene der Punkte (z.B. Farbkorrekturen)

Unseren heutigen Monitore bestehen aus einzelnen Bildpunkten, die einzeln vom Rechner angesteuert werden können. Pixelorientierte Programme können die gespeicherten Bildpunkte „1:1“ darauf übertragen. Objektorientierte Programme müssen dagegen in der Lage sein die gespeicherten Funktionen (Objekte) für die Darstellung am Monitor optimal in Bitmaps umzurechnen.

Dateiformate

Beide Paradigmen haben ihre eigenen Dateiformate.

objektorientierte Formate (DXF, EPS etc.)

Konstruktionsprogramme (CAD) und grafische Informationssysteme (GIS) legen ihre Daten oft in Datenbankformaten (z.B. DXF) ab, die die einzelnen Objekte und deren Attribute beschreiben. Das sichert einen exakten Zugriff auf die einzelnen Objekte und ermöglicht eine automatische Bearbeitung. - Layout Programme und „freie“ Grafiken bedienen sich als Formatkonvention der Seitenbeschreibungssprache PostScript. Das davon abgeleitete Dateiformat heisst EPS (Encapsulated PostScript). Viele Schriftfonts sind ebenfalls als Post-Skript-Dateien abgelegt. -

Genau genommen bestehen EPS-Dateien aus zwei Teilen: der eigentlichen PostSkript-Beschreibung und einer reduzierten PICT oder TIFF-Darstellung für die Bildschirmanzeige und können daher recht groß werden. Zusätzlich bietet das Format für den professionellen Einsatz die Möglichkeit Rastereinstellungen und Druckerkennlinien zusammen mit dem Bild zu sichern. (Die PostSkript-Beschreibung zerfällt in verschiedene Dialekte und kann als binäres EPS im 8-Bit Format oder als ASCII-EPS im 7-Bit Format vorliegen).-

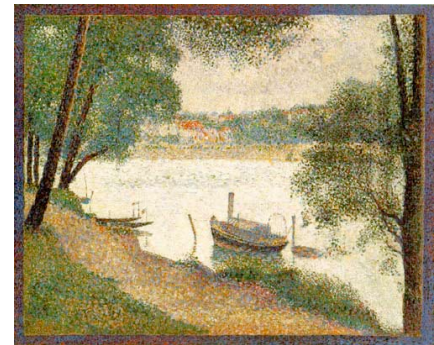
pixelorientierte Formate (TIFF, JPEG, BMP, GIF etc.)

Pixelorientierte Formate sichern eine bestimmte Informationsmenge für jeden Bildpunkt.

Die Abtastung des Realen - die Digitalisierung des Bildes

1. Das Abtasten des Realen

Das Abtasten und Speichern ausgewählter Aspekte der Wirklichkeit ist keine Erfindung der technischen Medien. Schon immer haben Maler und Bildhauer dies getan. Dass sich diese Abtastung in der Kunst auch in Bildpunkten niederschlagen kann, die erst bei einem gewissen Abstand durch ihre Mischung im Auge das Bild ergeben, zeigt das Stilmittel der Neoimpressionisten/Pointilisten. Sie reagierten damit direkt auf die wissenschaftlichen Experimente zur Psychologie und Physiologie des Sehvorgangs ihrer Zeit (vgl. 1.1.4), namentlich auf Helmholtz (1878) und Rood (1881).



Jens Schröter hat die These formuliert, dass die Medien bestimmte Aspekte des Realen in seiner kontingenten Streuung erfassen und speichern und damit der Klassifizierung, Analyse und letztlich auch der Manipulation zugänglich machen. Damit erlangen wir Macht über das Reale. So können zum Beispiel wir auf einer Photographie (chemisch abgetastet) den einen Augenblick der Aufnahme in aller Ruhe betrachten.

Nach der chemischen Abtastung der Photographie bildete vor allem der Film das Modell einer späteren Digitalisierung. Noch vor der Jahrtausendwende fragmentierte der Filmapparat die kontinuierliche Bewegung gleichmäßig in 24 diskrete Einzelbilder pro Sekunde. Zu gleicher Zeit fanden bereits die erste Experimente einer elektronischen Abtastung (Fernsehen) statt. Zentral hierbei ist – und hier unterscheidet sie sich von den Mosaiken und Pontilisten –, dass die Abtastung auf einer gleichmäßigen Frequenz beruht.

2. Auflösung (Fragmentierung)

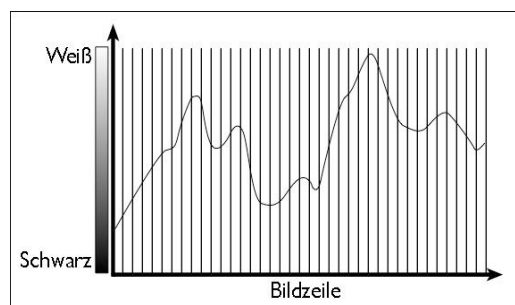
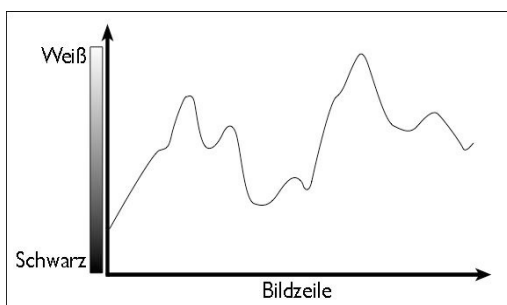
Auflösung

"Das Wort Auflösung steht für den geschichtlichen Menschen im Geruch von Dekomposition, Schwächung, 'Dekadenz' etc. Für den Techniker hingegen bedeutet hohe Auflösung: die minutiöse Dichte der Wiedergabe auf einem technischen Bildträger, die Fähigkeit eines (optischen) Geräts, sehr feine Details zu unterscheiden."

Botho Strauss "Beginnlosigkeit" (1992, S.117f)

Wie kommt nun ein Foto oder eine Ansicht aus der Realwelt in den Rechner? Egal welchem Paradigma man folgt, das Bild muss zerlegt werden. Ob in Punkte oder Objekte spielt erst einmal keine Rolle aber für beide gilt: je feiner desto besser. Diese Abbildung kann die Realität aber nie verdoppeln, ist also zwangsläufig nicht nur destruktiv sondern auch reduktiv. Die Abbildung ist immer eine geschwächte Realität, damit aber eine kontrollierbare.

Wie sieht dieser Prozess der Digitalisierung nun aus? Das vorliegende Bild, zum Beispiel ein Foto, muss zunächst in Punkte zerlegt werden, die dann als Messdaten vom Rechner verarbeitet und gespeichert werden können. Betrachtet man die Helligkeitsverteilung einer einzigen Zeile des Fotos, so könnte sie wie im ersten Bild aussehen.



Es ergibt sich ein sich stetig änderndes Signal. Misst man dieses Signal an zwei Punkten, kann es immer einen Messpunkt dazwischen geben, der die Kurve noch genauer abtasten würde. Da im Computer Bilder jedoch in diskreten digitalen Werten, also als Messwerte abgelegte einzelne Bildpunkte, repräsentiert werden müssen, wird die Bildzeile in gleichmäßige Abschnitte unterteilt und an den jeweiligen Punkten gemessen.

Diese Unterteilung nennt man **Auflösung** des Bildes. Die Auflösung eines Bildes ist immer in der X- und Y-Achse identisch, so dass das Bild dadurch in quadratische Pixel zerfällt.

Ein einzelner Bildpunkt wird **Pixel** genannt, ein Kunstwort aus picture und element.

Die Auflösung wird in Bildpunkten pro Strecke gemessen, nämlich in **dpi** (dots per inch). Eine Inch sind ca. 2,54 cm.

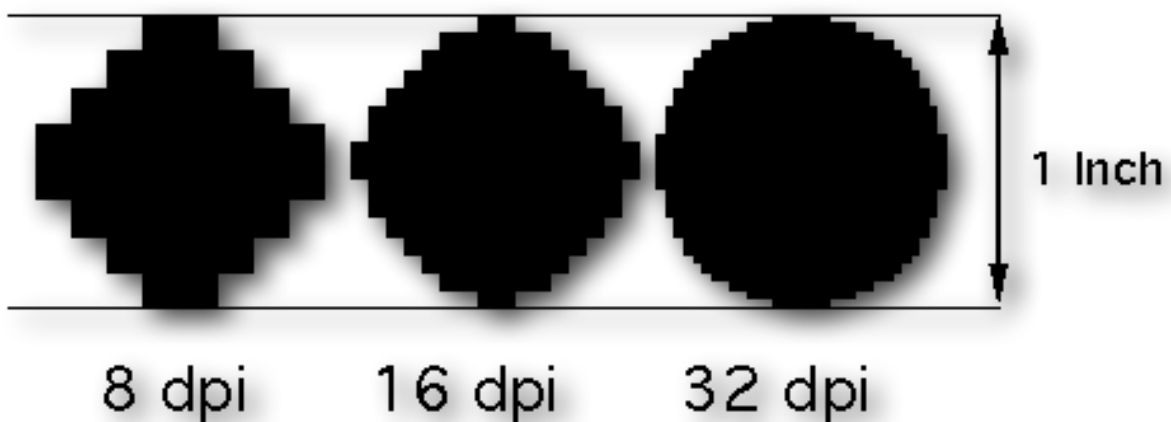
Ein 300 dpi Scanner ist also in der Lage maximal 300 Bildpunkte pro 2,54 cm von einem Bild zu erfassen.

Genau genommen wird ein Pixel als das kleinste Element das Graustufen darstellen kann bezeichnet. Das absolut kleinste Bildelement wird Dot genannt. Bei einem gescannten Bild, bei dem jeder Bildpunkt verschiedene Graustufen und Farben darstellen kann, sind alle Pixel auch Dots. Da bei Druck jedoch jeder Graustufenbildpunkt durch mehrere s/w-Punkte simuliert werden muss, besteht dort jedes Pixel aus mehreren Dots.

Die Höhe der Frequenz der Abtastung ist entscheidend für

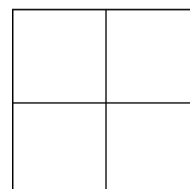
- die Qualität der Darstellung (Schärfe und Kontrastmöglichkeiten) und
- die Größe der Informationsmenge, die zu speichern ist.

Hier der Versuch eine Kreisscheibe mit verschiedenen Auflösungen darzustellen (stark vergrößert).

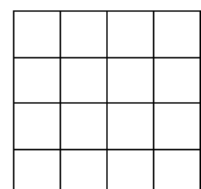


Das Beispiel zeigt auch deutlich, dass mit einer höheren Auflösung auch die Menge der Informationen (Messwerte) die gesichert werden muss erheblich steigt. Da sich dieses Problem in beiden Achsen des Bildes ergibt, es in der X- und der Y-Achse aufgelöst wird, bedeutet eine Verdopplung der Auflösung eine Vervierfachung der Informationsmenge. Damit wird die Auflösung zum entscheidenden Parameter, wenn versucht wird, die Dateigrößen von Bildern zu reduzieren.

Auflösung 2
Informationsmenge 4



Auflösung 4
Informationsmenge 16



Das stolze Huhn Lotte mit ihren Küken, gescannt in drei verschiedenen Auflösungen (72 dpi, 36 dpi und 10 dpi⁷).



Die Höhe der Auflösung bestimmt wesentlich die Schärfe des Bildes und die Kontrastmöglichkeiten beim Ausdruck. Das Nadelöhr bildet dabei meist das Ausgabegerät. Selbst eine höhere Auflösung als 72 dpi würde bei der Projektion mittels Beamer das obere Bild nicht verbessern, da das Gerät nicht in der Lage wäre mehr als 72 dpi darzustellen. Eine Reduktion eines mit 300dpi gescannten Bildes auf 72 dpi würde also eine erhebliche Verringerung der Dateigröße bewirken. Neben den Bedingungen der Ausgabe ist also zusätzlich immer ein Kompromiss zu suchen zwischen der Bildqualität (möglichst hohe Auflösung) und der Dateigröße (möglichst kleine Auflösung). Große Dateien beanspruchen nicht nur sehr viel Speicherkapazität, sondern auch Zeit bei der Bearbeitung. Beides können kostenrelevante Faktoren sein.

Die oben gezeigten Abbildungen wurden im GIF-Format gesichert. Ihre Dateigrößen sind 7,4 kB, 22,8 kB und 43,2 kB.

Übliche Auflösungen

Monitore haben üblicherweise eine Auflösung von 72 dpi. Eine höhere Auflösung ist also bei Bildern für das Electronic Publishing (WWW, CDs, Präsentationen etc.) nicht sinnvoll. Diese "krumme" Zahl von 72 dpi ist angelehnt an die angelsächsische Maßeinheit Point, die in der Drucktechnik und mittlerweile auch in Textverarbeitungsprogrammen als Schriftgrößenangabe verwendet wird. Bei dieser Auflösung hat ein Punkt die Ausdehnung von 0,353 mm.

Heutige Laser- und Tintenstrahldrucker sind in der Lage 600-1200 dpi und mehr auf ein Blatt zu bringen. Da ein Bildpunkt beim Druck immer durch mehrere dots simuliert werden muss, ist die Zahl der dargestellten Pixel, und damit die Qualität des Ausdrucks, entsprechend geringer.

Professionelle Belichter, die die Vorlagen für hochwertige Drucke herstellen sollen, haben eine Ausgabe von ca. 2400 dpi und mehr.

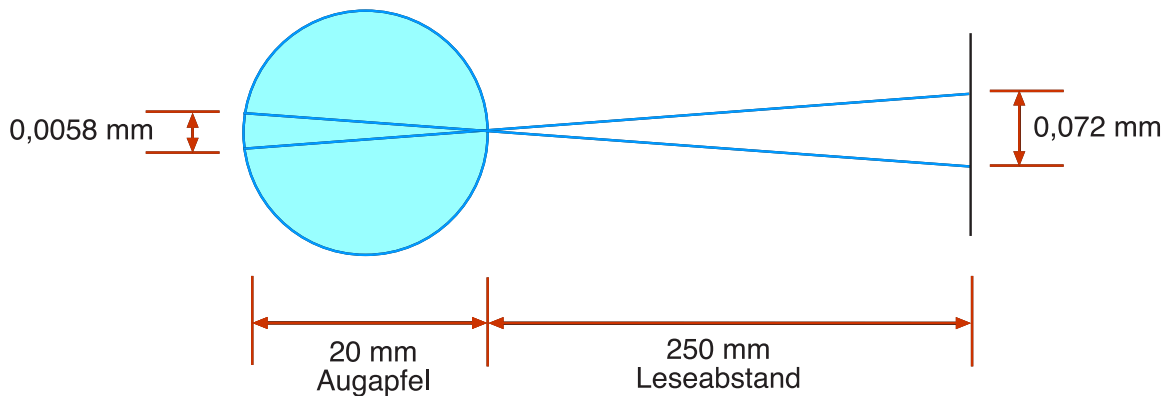
PAL hat eine Auflösung von 625 Zeilen davon 575 zur Bilddarstellung (den Rest bildet die sogenannte Austastlücke, die für den Bildschirmtext etc. verwendet wird) Da Bilder in x und y-Richtung immer die selbe Auflösung haben, ergibt sich eine Horizontalauflösung ebenfalls von 625 pro Bild. Allerdings ist das Fernsehbild breiter im Verhältnis 4:3 also ist die maximale Horizontalauflösung 833 Pixel.

⁷ Da dieses Dokument natürlich nur eine Auflösung hat, müsste das gleiche Bild, das in verschiedenen Auflösungen gescannt wurde hier verschieden groß erscheinen. Um den Effekt deutlicher zu machen, wurden die drei Bilder auf die gleiche Größe skaliert.

*Tief im dunklen Walde steht er
und auf ihm mit schwarzer Farbe,
dass des Wanderers Geist nicht darbe:
Dreiundzwanzig Kilometer.
Seltsam ist und schier zum Lachen,
dass es diesen Text nicht gibt,
wenn es keinem Blick beliebt,
ihn durch sich zum Text zu machen.
Und noch weiter Vorge stellt:
Was wohl ist er - ungesehen?
Ein uns völlig fremd Geschehen.
Erst das Auge schafft die Welt.
(Chr. Morgenstern: Der Meilenstein)*

Jeder Medientyp hat seine Wahrnehmungsschwellen, die es unterschreiten muss, damit seine Produkte nicht künstlich erscheinen. Es stellt sich also die Frage, wie gut das menschliche Auge auflösen kann. Wann sehen wir zwei Linien als getrennte Linien nebeneinander und ab wann verschwimmen sie zu einer, weil unser Auge den Zwischenraum nicht mehr wahrnehmen kann? Fragen der Wahrnehmung lassen sich generell nicht pauschal beantworten. Menschen sind keine klar definierten Maschinen, unterscheiden sich in ihren körperlichen Eigenschaften und werden auch in ihrer Wahrnehmung von Stimmungen bestimmt. Aber es lassen sich natürlich Durchschnittswerte angeben.

Die rund 120 Millionen Rezeptoren im Auge sind sehr unterschiedlich verteilt. Die Auflösung variiert also zwischen der Stelle, die fokussiert wird und dem Bild am Rand der Aufmerksamkeit. Vom Zentrum der Netzhaut, der Stelle des schärfsten Sehens (Fovea) zum Sichtrand fällt das Auflösungsvermögen auf weniger als ein Zehntel ab. Aus dem Abstand der Rezeptoren (ca. 0,0058 mm) im Fokus der Netzhaut und dem Durchmesser des Augapfels lässt sich näherungsweise das Auflösungsvermögen dort von ca. einer Bogenminute (= 1/60°) angeben.



Für einen angenommenen Leseabstand von 25 cm lassen sich von diesem "Durchschnittsauge" parallele Linien als getrennt unterscheiden, wenn Linienbreite und Abstand zur nächsten Linie mindestens 0,0727 mm beträgt.

$$\sin(1/60) * 250 \text{ mm} = 0,0727 \text{ mm}$$

Das würde einer Auflösung von fast 353 lpi entsprechen.

$$25,5 \text{ mm} (=1 \text{ Inch}) / 0,0727 = 350 \text{ lpi}$$

Da nach dem Abtasttheorem (dazu später) die abtastende Frequenz doppelt so hoch sein muss, wie die abzutastende Frequenz, halbiert sich das Auflösungsvermögen auf ca. 150 lpi.

Beim Betrachten einzelner Objekte, führen unsere Augen jedoch ständig (ca. 50-100 pro Sekunde) feinste, nicht wahrnehmbare und nicht steuerbare Zitterbewegungen aus. Dieses Verfahren löst Reize auf den Nachbarsehzellen aus, was den Abtastvorgang erheblich unterstützt.

3. Farbtiefe (Quantisierung)

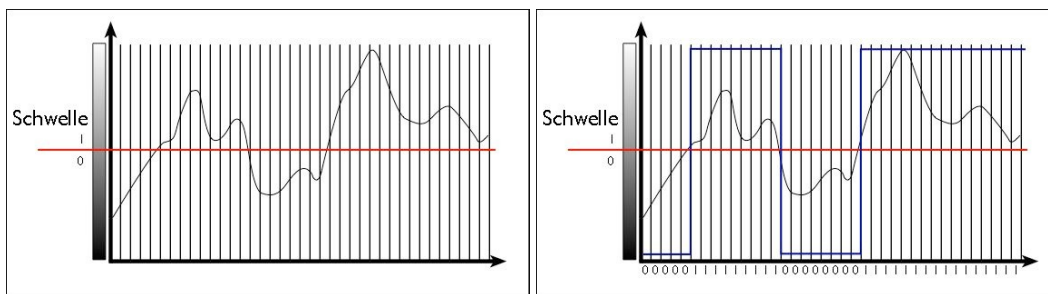
Quantisierung

Neben der Auflösung des Bildes in einzelne Bildpunkte, stellt sich nun die Frage, wie genau jeder einzelne Punkt des zerlegten Bildes gemessen wird. Auch diese Messung muss natürlich diskrete Zahlenwerte liefern. Auflösung und Quantisierung haben beide das grundlegende Problem der Abstrakte.



Um die Beispiele erst einmal einfach zu gestalten, gehen wir zunächst von Graustufenbildern aus. Oft werden Vorlagen, die den Anschein haben schwarz/weiß-Abbildungen zu sein (Bild rechts), als Graustufenbilder gesichert, um ihre künstlerische Anmutung zu erhalten oder eine möglichst quellengetreue Untersuchung zu ermöglichen.

Wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, wird ein Bild durch das punktweise Abtasten digitalisiert. Eine Bildzeile mit einem analogen Grauwertverlauf ließe sich also wie im ersten Bild unten darstellen:



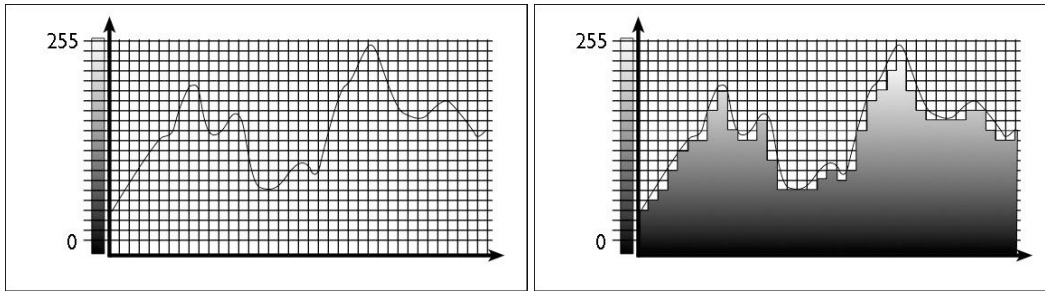
Die senkrechten Striche bezeichnen die einzelnen Punkte des Bildes, an denen der aktuelle Grauwert gemessen werden soll. Nun können die Messinstrumente von recht unterschiedlicher Qualität sein. Ein ganz einfaches Instrument arbeitet vielleicht so grob, dass es nur "Hell" oder "Dunkel" unterscheiden kann. Überschreitet der analoge Grauwert einen bestimmten Grenzwert (rote Linie) "erkennt" der Analog/Digital-Wandler auf "Weiß", sonst auf "Schwarz". Das Ergebnis dieses Digitalisierungsprozesses wäre dann ein Schwarz/Weiß-Bild (blaue Linie).

Gute A/D-Wandler in Scannern sind in der Lage das Signal sehr viel feiner zu messen als nur in zwei Stufen. Eine Differenzierung zwischen 256 unterschiedlichen Grauwerten leistet heute jeder Scanner.

Die Differenzierungsmöglichkeiten bei der Messung der einzelnen Bildpunkte nennt man in der Computergrafik **Farbtiefe**. Die Einheit für die Farbtiefe von Bildern ist **Bit**.

Graustufenbilder werden in der Regel mit **8 bit** angelegt und können so 2^8 bit, also **256** verschiedene Grautöne unterscheiden.

Um für einen Punkt zwischen diesen 256 Grauwerten unterscheiden zu können, müssen acht Informationseinheiten (8 bit) zur Verfügung gestellt werden ($2^8 = 256$). Das heißt nicht nur die Auflösung - also die Menge an Punkten - ist für die gesamte Informationsmenge eines Bildes von Bedeutung, sondern auch mit wie viel Informationen jeder Punkt beschrieben wird. In diesem Beispiel multipliziert sich die Menge der Punkte des Bildes mit 8, wenn von einer reinen schwarz/weiß- Darstellung auf ein 8 bit Graustufenbild umgestellt wird.



Viele A/D-Wandler in handelsüblichen Scannern leisten heute - zumindest intern - auch 10, 12 oder 16 bit in ihrem Differenzierungsvermögen, können also 1024, 4096 oder 65536 Graustufen unterscheiden. Die Folge ist, dass sich das Bild sehr viel näher der analogen Grauwerte anpassen kann.

Hier drei Beispiele für unterschiedliche Farbtiefen (2, 4 und 12 Graustufen)



Farbquantisierung

Typisch für Bilder, die eine zu geringe Farbtiefe haben, sind Farbkanten, die immer dort auftreten wo Farbzwischenstufen fehlen. Eigentlich müssten die Gesichter aus gleichmäßigen Übergängen bestehen (Bild rechts), da es dem Bild aber an Farben fehlt muss ab einem bestimmten Grenzwert die nächst liegende Farbe wählen.

Was die Informationsmenge angeht, verhält es sich hier umgekehrt zur Auflösung. Mit nur einem Bit mehr an Farbtiefe, verdoppelt sich die Anzahl der möglichen Farben. Ein Bit kann zwei Zustände, zwei Bit aber schon vier Zustände speichern. Die Anzahl der möglichen Graustufen wächst exponentiell mit den zur Speicherung zur Verfügung stehenden Informationseinheiten.



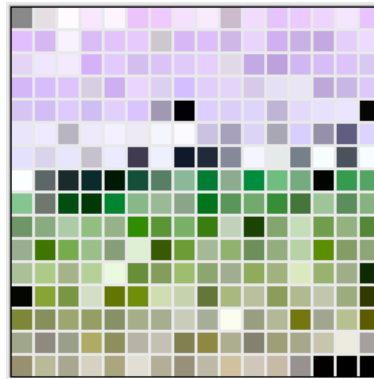
bit	darstellbare Farben	Technik
1	s/w-Darstellungen	1:1
8	256 Farben	Graustufen
24	16,78 Mio. Farben	RGB
(32)	24 + α -Kanal	RGB

Hier eine Tabelle der Farbtiefen, die in der Computergrafik anzutreffen sind. Kann bei einem reinen Schwarz/Weiss-Bild noch jeder Bildpunkt mit einem Bit gespeichert werden, muss es bei 2, 4 oder 8 bit

Farbdarstellungen eine Übereinkunft geben, welche 4, 16 bzw. 256 Farben verwendet werden sollen. Diese werden z.B. in einer Tabelle festgelegt.

Eine Ausnahme bilden hier die 8 bit-Graustufenbilder. Mit einer 8 bit-Codierung können selbst zarte Hauttöne oder Graustufenübergänge ohne Farbbrüche und -kanten dargestellt werden.

In Farbbildern bis 256 Farben werden die Farbinformationen mittels Farbtabelle gesichert. Die Farben werden in einer Liste indiziert ("indizierte Farben"), d.h. für jede Farbe wird eine Nummer und die Farbbeschreibung angelegt. Statt dann für jeden Bildpunkt erneut die gesamte Farbbeschreibung sicher zu müssen, wird für jeden Bildpunkt nur die Tabellennummer notiert. Das Dateiformat GIF verwendet dieses Verfahren. Hier die Farbtabelle, die aus dem nebenstehenden Bild erzeugt wurde:



Bilder mit indizierten Farben eignen sich kaum für den Druck. Besonders bei detailreichen "natürlichen" Bildern reichen 256 verschiedene Farben nicht aus. Um bei Bildern mit indizierten Farben einen besseren Bildeindruck zu erreichen wird das sog. Dithering eingesetzt. Dabei werden Farben, die in der Tabelle fehlen im Bild dadurch ersetzt, dass man versucht sie aus anderen, in der Tabelle enthaltenen, farbigen Pixeln zu mischen. Das Auge des Betrachters mischt die dicht nebeneinanderliegenden Punkte zu der fehlenden Farbe zusammen. Das nebenstehende Beispiel zeigt einen geditherten Farbverlauf, der tatsächlich nur aus wenigen verschiedenen Farben besteht.



Farbbilder mit mehr als 256 Farben speichern die Farbinformationen indem sie "Mischverhältnisse" verschiedener Farbkomponenten sichern. RGB-Bilder zum Beispiel sichern farbige Bildpunkte indem sie das Verhältnis der Rot-, Grün- und Blauanteile des jeweiligen Bildpunktes registrieren. Es gibt eine Reihe anderer Farbsysteme (CMYK, YCC, L*a*b etc.), die ähnlich arbeiten (dazu später).

Farbbilder mit 32 bit Farbtiefe enthalten auch nur 24 bit Farbinformationen. Der zusätzliche α -Kanal mit ebenfalls 8 bit, eröffnet die Möglichkeit, für jeden Bildpunkt zusätzlich eine Transparenz mit einer entsprechenden Abstufung von 256 Schritten festzulegen. Dies macht sich zum Beispiel bemerkbar, wenn man einen Schriftzug mit Schatten auf einen farbigen Hintergrund stellen möchte.

Die folgenden drei Beispiele zeigen:

- A. GIF-Format, das nur eine einzige Farbe (Graustufe) als transparent auszeichnen kann
- B. JPEG-Format, das keine Transparenz speichern kann
- C. PNG-Format, das einen vollen α -Kanal sichern kann



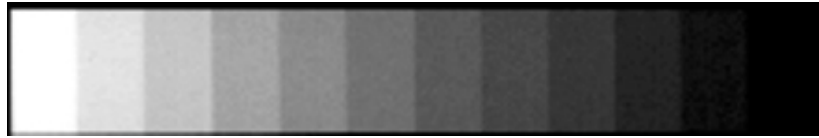
Übliche Farbtiefen sind:

Graustufenbilder:	8 bit = 256 Graustufen
Bilder mit indizierten Farben:	8 bit = 256 Farben
Farbbilder mit	24 bit = 16,78 Millionen Farben

Quantisierung des Auges

Das Graustufenbilder in der Regel nicht mit mehr als 8 bit pro Bildpunkt, also mit maximal 256 Graustufen gespeichert werden, liegt an der Wahrnehmungsschwelle des menschlichen Auges. In der Literatur wird unser Quantisierungsvermögen zwischen 64 und 150 Graustufen angegeben. „Die Fähigkeit, die Helligkeit eines Flecks zu erkennen, hängt von der Helligkeit, Größe, Dauer der Darbietung und der Helligkeit des Hintergrundes ab. Das Auge kann sich in kurzer Zeit an eine 10fache Änderung der Beleuchtungsstärke adaptieren, ohne dass sich die wahrgenommenen Hell-Dunkelwerte und die Farbe der Objekte merklich ändern.“ (Abmayr S.7)

Hinzu kommt, dass zwischen der subjektiv Wahrgenommenen Helligkeit und der technischen Intensität eine näherungsweise logarithmische Beziehung besteht. Im folgenden Graukeil scheinen und sie Graustufenabstände gleichmäßig zu sein. Misst man aber den reflektierten Lichtanteil, stellt man fest, dass der Unterschied zwischen Weiss und der ersten Graustufe 29% und zwischen der letzten Graustufe und Schwarz nur noch 2% besteht.



reflektierter Lichtanteil in %	100	71	59	35	25	18	13	9	6	4	2	0
8-bit Meßwert	255	194	139	96	66	46	33	23	15	11	6	4

Aufgrund der logarithmische Beziehung zwischen unserer Wahrnehmung und der Lichtintensität, sind wir also viel besser in der Lage dunkle Bereiche zu differenzieren als sehr helle.

4. Scannen

Scannertypen

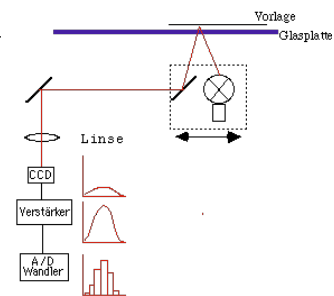
Bilder werden mittels Scannern digitalisiert. Dabei wird das Bild in Punkte aufgelöst (Kap. 2.2.) und jeder dieser Punkte in seiner Farbigkeit und Helligkeit gemessen (Kap.2.3.). Es gibt eine Reihe verschiedener Modelle, die unterschiedliche Aufgaben haben und entsprechend unterschiedliche Qualitäten liefern.

- Flachbettscanner
- Handscanner
- Diascanner
- Trommelscanner (für hohe Qualitäten)
- optische Scanner (für dreidimensionale Objekte)
- Zusätze (Durchlichteinheit / ADF für OCR)
- digitale Foto- und Filmkameras
- Scannerkassen ...

Technik des Flachbett-Scanners

Wie bei einem Kopierer legt man die Vorlage bei einem Flachbettscanner auf eine Glasscheibe, die beim Scannvorgang durch eine Lampe die darunter entlangfährt beleuchtet wird. Die Reflexion von der Vorlage wird im inneren des Scanners von einer Reihe lichtempfindlicher Elemente, den CCDs (Charged Coupled Devices) analog gemessen. Da das Signal, welches die CCDs liefern, sehr schwach ist, muss es verstärkt werden bevor es ein Analog-Digital-Wandler in numerischen Code umsetzen kann.

Das Zusammenspiel aller Komponenten bestimmt die Qualität der Digitalisierung. Da der Scanner jedoch bis zum A/D-Wandler mit analoger Technik arbeitet, machen sich hier viele Schwachstellen, die typisch für analoge Technik sind, bemerkbar. Jede der Komponenten hat kritische Eigenschaften, die im Folgenden näher betrachtet werden sollen.



A) Vorlagengröße

... muss der Aufgabenstellung entsprechen.

B) Die Lampe

..., deren Licht als Reflexionen von der Vorlage gemessen werden sollen, ist entscheidend für die Farbtreue der Digitalisierung. Ältere Scanner mit Leuchtstofflampen produzierten ein "wärmeres" Licht (das Farbspektrum des Lichts ist zu den höheren Frequenzen hin verschoben) als modernere Geräte mit Halogenlampen.

C) Das Spiegelsystem und die Linsen

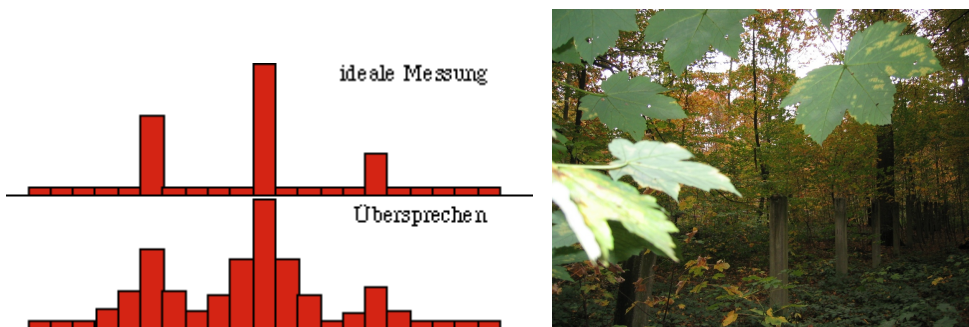
...haben großen Einfluss auf die Qualität eines Scans. Während selbst Scanner für 100 Euro nominell schon völlig ausreichende Auflösungen liefern, sind es oft die Linsen und Spiegel die den Qualitätsunterschied zu ihren teureren Kollegen ausmachen. Wie bei der Fotografie ist eine hochwertige Optik Voraussetzung für ein gestochen scharfes Bild. Billige Linsen sind aus Plastik. Spiegel die nicht hundertprozentig plan geschliffen sind, verursachen Farbsäume und Verzerrungen innerhalb des Bildes.

D) Der Schlitten und die lichtempfindlichen Elemente (CCDs)

Für die Auflösungsfähigkeit des Scanners sind in der einen Achse die Anzahl der lichtempfindlichen Elemente auf dem Schlitten, in der anderen Achse die Arbeit des Schrittmotors, der den Schlitten bewegt entscheidend. Bei den Angaben der Hersteller sollte man auf diese „technische“ oder „optische“ Auflösung achten und sie von interpolierten Auflösungen, die durch Errechnen innerhalb der Software zustande kommen, unterscheiden.

Gemessen wird lediglich die Reflexion des Lichtes von der Vorlage, also Graustufen. Farben werden gemessen, indem die Luminanzwerte von CCDs mit aufgedampften Farbfiltern (Rot, Grün, Blau) registriert werden. So kann der Farbscann in einem Durchgang geschehen (onepass). Ältere Modelle haben den Vorgang drei mal wiederholt, wobei jedesmal ein anderer Filter zum Einsatz kam. Dieses Verfahren war nicht nur zeitaufwendig, kann bei betagten Geräten auch zu Problemen führen, wenn die drei Farbschichten wieder zu einem Bild zusammengesetzt werden müssen.

Übersprechen / Blooming



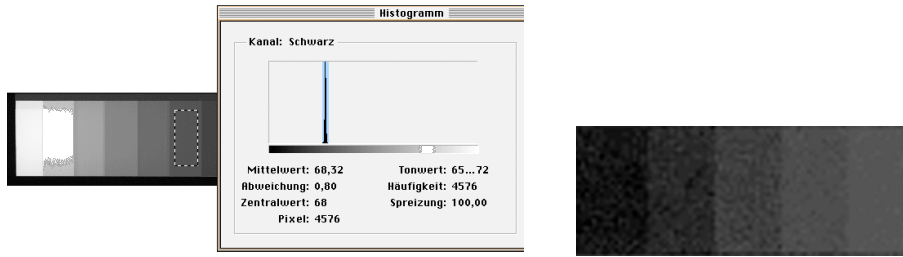
Die recht enge Packungsdichte der CCDs auf dem Schlitten (immerhin hat ein CCD schon bei einem 300 dpi Scanner nur einen Platz von 0,085 mm) führt zu einem Phänomen das technisch als Übersprechen bezeichnet wird. Da keine Isolation unendlich groß sein kann, schon gar nicht bei solch kleinen Abmessungen, kann es zu einem abfließen der Elektronen von einem besonders stark angesprochenem CCD auf seine Nachbarzellen kommen. Die Folge ist ein Signal, das nicht mehr trennscharf ist (s.o.).

In der Digitalfotografie tritt dieses Phänomen ebenfalls auf und wird dort Blooming genannt. Besonders helle Stellen im Bild überstrahlen ihre Radbereiche.

Beim Scannen wie auch bei der Digitalphotographie sollte man die Empfindlichkeit mit bedacht wählen (wenn es die Software überhaupt zulässt). Ist sie zu hoch eingestellt, kann es besonders bei Strichgrafiken oder feinen Details durch das Übersprechen zum Ausbrechen von Linien kommen, oder umgekehrt durch eine zu niedrige Empfindlichkeit zu einem Zulaufen von benachbarten Linien.

Quantisierungsrauschen

Da das Signal welches die CCDs liefern sehr schwach ist, muss es für die Weiterverarbeitung verstärkt werden. Die Verstärkung eines analogen Signals erhöht bzw. erzeugt jedoch auch immer Störsignale. Dieses Rauschen, dass jeder aus dem Audibereich kennt, existiert auch in der Bildverarbeitung.



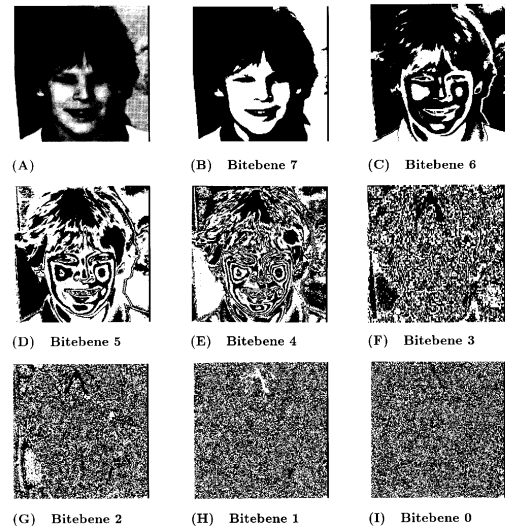
Die Folge ist, dass die Signale (Tonwerte) nicht mehr „sauber“ sind, sondern um den eigentlichen Wert herum streuen. Oben wurde ein Graukeil gescannt und anschließend eine einzige Graustufe ausgewählt. Das Histogramm (Messwerkzeug für Tonwerte) zeigt deutlich das Ergebnis der Digitalisierung um den Wert 68 herum streut.

Da unsere Wahrnehmung Lichter (helle Bereiche) sehr viel sensibler wahrnimmt als Schatten (Kap. 2.3.3), kann dieser Effekt sogar sichtbar werden. Die dunklen Bereiche des Bildes erscheinen dann deutlich „verrauscht“.

Streuung der Bitebenen

Durch das Auftreten von Mess- und Umrechnungsungenauigkeiten beim Digitalisierungsprozess (z.B. Rauschen) enthalten die letzten Bitstellen oft keine sinnvolle Information mehr. Die Relevanz der Information ist daher in jedem Bit eines z.B. 8 bit kodierten Bildes verschieden. Ändert sich der Wert des ersten Bits (2^7), so nimmt der Grauwert um 128 zu bzw. ab, also eine sehr erhebliche Veränderung. Dieses Bit nennt man das „most significant bit“. Ändert sich der Wert des letzten Bits (2^0) so ändert sich der Grauwert lediglich um 1. Entsprechend ist es das „last significant bit“.

Stellt man einmal jede Bitebene eines Bildes einzeln als schwarz/weiß-Bild dar, kann man das gut erkennen. (Abmayr)

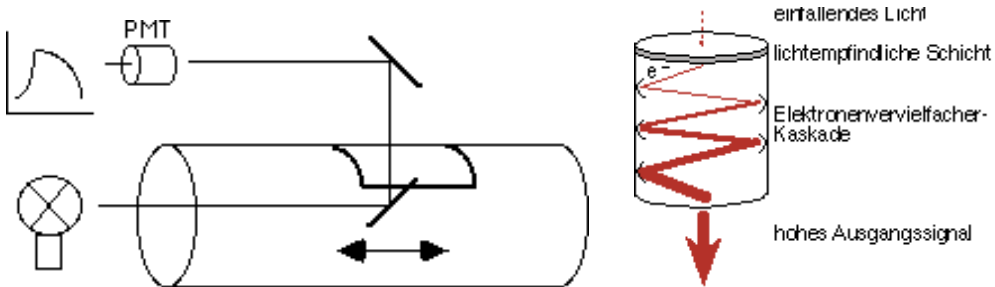


	dezimal	Bitfolge	Aussehen
Original	128	10000000	
Fehler im 1. Bit	129	10000001	
Fehler im 4. Bit	136	10001000	
Fehler im 6. Bit	160	10100000	
Fehler im 8. Bit	0	00000000	

Die last significant bits können ein Ansatzpunkt sein für Datenreduzierung oder Steganographie (das Verstecken verdeckter Botschaften im Bild).

Technik des Trommelscanners

Anders als beim Flachbettscanner wird bei Trommelscannern die Vorlage auf einer Glastrommel fixiert, die während des Digitalisierungsprozesses rotiert. Auch hier wird das Original mit einer Lampe beleuchtet und die Reflexion des Lichtes gemessen.



Der erste Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die gesamte Vorlage durch ein einziges Element abgetastet, das heißt jeder Bildpunkt gleich behandelt wird. Können auf dem CCD-Schlitten des Flachbettscanners einzelne Elemente ausfallen oder durch Alterung stark abweichende Messwerte liefern, werden hier die Daten einheitlich generiert. Sollten dabei Farbverfälschungen auftreten können diese sehr viel leichter durch globale Methoden bereinigt werden, als wenn sich der Fehler nur auf ein CCD und damit auf einzelne Pixelspalten bezieht.

Der zweite Vorteil von Trommelscannern ist das das lichtempfindliche Element kein CCD, sondern ein Sekundärelektronenvervielfacher oder auch Photomultiplier (PMT) ist. Diese Bauteile liefern eine relativ hohe Ausgangsspannung die nicht verstärkt werden muss. Damit entfällt hier das durch den Verstärker verursachte Grundrauschen.

Nachteilig ist das Trommelscanner im Vergleich mit Flachbettscannern relativ teuer sind, der Digitalisierungsvorgang länger dauert und nur flache Vorlagen aufnehmen kann (z.B. keine Bücher).

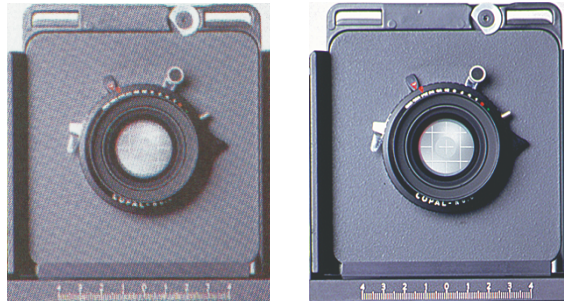
Moire und das Abtasttheorem

Besonders beim Scannen gedruckter Vorlagen kommt es häufig zu unerwünschten Phänomenen in den Ergebnissen. Es erscheinen regelmäßige Artefakte, die das Bild überlagern. Seltener kommt dieser Effekt beim Scannen von Fotos vor und betrifft dann auch immer nur Teile des Bildes. Diese Artefakte werden Moiré ([moare; arab.-it.-engl.-fz.] Stoff mit Wasserlinienmusterung hervorgerufen durch Lichterflexe) genannt.



Das erste Beispiel zeigt ein Moiré, das beim Scannen eines gedruckten Zeitungsbildes entstand, das zweite ein Moiré das bei Digitalisieren eines Fotos entstand und nur die Dächer auf der Abbildung betrifft.

Hier ein weiteres Beispiel eines Bildes, diesmal mit und ohne Moiré.

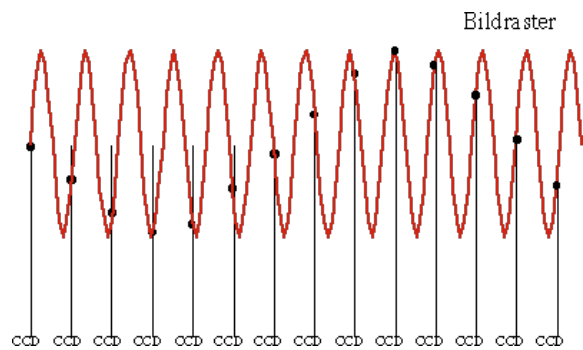


Moirés entstehen immer dann, wenn sich zwei gleichmäßige (amplitudenmodulierte) Raster überlagern und nicht vollkommen deckungsgleich sind. Eine leichte Verdrehung, Verschiebung oder Ungleichheit in der Frequenz eines der beiden reicht aus um sichtbare Interferenzen auszulösen.

Dies kann in verschiedenen Situationen der Fall sein:

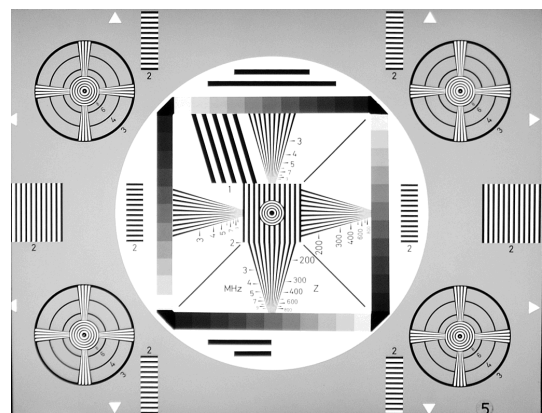
- Beim Scannen eines gedruckten Bildes überlagert sich das Druckraster mit dem Raster das der Scanner über das Bild legt, wenn er das Bild in einzelne Bildpunkte auflöst.
- Bei der Darstellung eines bereits digitalen und gerasterten Bildes auf dem Monitor wird das Raster des Bildes mit der Matrix des Bildschirms überlagert, wenn das Bild nicht in einer 100% Ansicht präsentiert werden soll.
- Beim Einlesen von Fotos trifft man auf diesen Effekt wenn sich das Raster des Scanners mit einem inhaltlichen Raster (karierte Jacketts, Backsteinwände, Ziegeldächer...) überlagern.

Stellt man sich einmal eine einzelne Rasterzeile als Welle vor, in der jeder Wellenberg einen schwarzen Druckpunkt und jedes Wellental einen weißen Zwischenraum darstellt, würde sich ein Bild wie die rote Linie unten ergeben. Wird diese Zeile nun vom Scanner in Bildpunkte aufgelöst entsteht ein zweites Raster. Haben die CCDs nun einen geringfügig größeren oder kleineren Abstand als die Frequenz des Rasters entstehen bei der Messung der Tonwerte (schwarze Punkte) Interferenzen. Achtet man einmal nur auf die Messpunkte sieht man schon eine große gestreckte Welle, die im Bild wieder als stärkere bzw. geringere Schwärzungen in Erscheinung treten würden. Wie bei der Auflösung ist auch dieses Phänomen nicht auf eine Zeile beschränkt, sondern wirkt in beiden Achsen gleichzeitig.



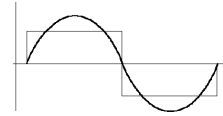
Die Auflösung von Ausgabegeräten wird oft mit sogenannten Siemenssternen getestet, wie bei den bekannten Testbildern. Einen solcher Stern besteht aus kreisförmig angeordneten, ständig dünner werdenden Linien. Wird die Linienbreite kleiner als das Auflösungsvermögen des Ausgabegeräts entstehen Moirés. Ist der Siemensstern mit einer Skala versehen kann dann die Auflösung des Geräts dort abgelesen werden.

Das dies anhand einer Welle erklärt wird lässt vermuten das diese Effekte auch im Audibereich auftreten. Über die Frage welches die Minimalbedingungen sind, um ein Signal vollständig zu erfassen, hat sich u.a. 1928 bei der amerikanischen Telefongesellschaft



AT&T Harry Nyquist Gedanken gemacht und das nach ihm benannte Abtasttheorem (Nyquist-Theorem) aufgestellt.⁸

Betrachtet man einmal eine Schwingung der Welle (in unserem Beispiel einen Druckpunkt und einen Zwischenraum) so stellt man fest, dass die Frequenz der Abtastung (bzw. die Auflösung oder das Sampling) doppelt so hoch sein muss, wie die (höchste vorkommende) Frequenz des Bildrasters um alle Informationen zu erwischen. Denn auch die Lücke zwischen zwei Punkten ist eine Information.



Träfen beim Abtastprozess die CCDs immer nur auf die Druckpunkte so würde ein schwarzes Bild entstehen. Also muss mindestens zweimal gemessen werden um immer Lücke und Druckpunkt abzutasten. Selbstverständlich kann die Abtastrate auch höher liegen.

Das Abtasttheorem besagt also, dass ein Scanner mit einem optischen Auflösungsvermögen von 400 dpi in der Lage ist Bilder bis zu einem Druckraster von 200 lpi sauber zu digitalisieren. Besonders beim Scannen von Strichzeichnungen ist das zu beachten.

Scannaufösung > 2 * max. Bildfrequenz

5. Digitale Photographie

analoge Photographie

Ein photochemischer Kleinbildfilm (24*36 mm) ist in der Lage ca. 100 Linienpaare pro Millimeter zu differenzieren, also ca. 34 Megapixel.

$$(24*200)*(36*200) = 34,56 \text{ MPixel}$$

Die Grenzen setzt hier allerdings die Optik. Ein gut justierter Linsensatz fester Brennweite liefert maximal 50 Linienpaare/mm also 9 MPixel. Eine Zoomoptik für gängige Sucherkameras nur 30 L/mm und damit 3 MPixel.

digitale Photographie

1995 kamen die ersten digitalen Kompaktkameras auf den Markt. 1998 wurden bereits 2 MPixel Kameras zu Standard. 2004 erreichen die 6 MPixel Kameras die Kompaktklasse. Anfang 2005 erscheinen die ersten 8 MPixel Modelle, die zunehmend Bildstörungen zeigen.

Eine digitale 3 MPixel Kamera könnte aber, da sie ihre Sensoren für die drei Farbanteile aufteilen muss, maximal ein 1 MPixel Bild liefern. Durch interpolierende Tricks der Hersteller, kann man aber von einem Wert der ca. 30% unter dem Nominalwert liegt annehmen, also ca. 2,1 MPixel.

Eine 4 MPixel Kamera liefert dann schon 2,8 MPixel effektiv, was beinahe schon an die Leitungsfähigkeit der Zoomoptiken heranreicht.

Für Laborabzüge von Digitalbildern, die mit 300 dpi ausbelichtet werden sollen ergeben sich folgende Auflösungen:

- 9*13 1,6 MPixel Daten
- 10*15 2,1 MPixel Daten
- 13*18 3,3 MPixel Daten
- 20*30 8,4 MPixel Daten

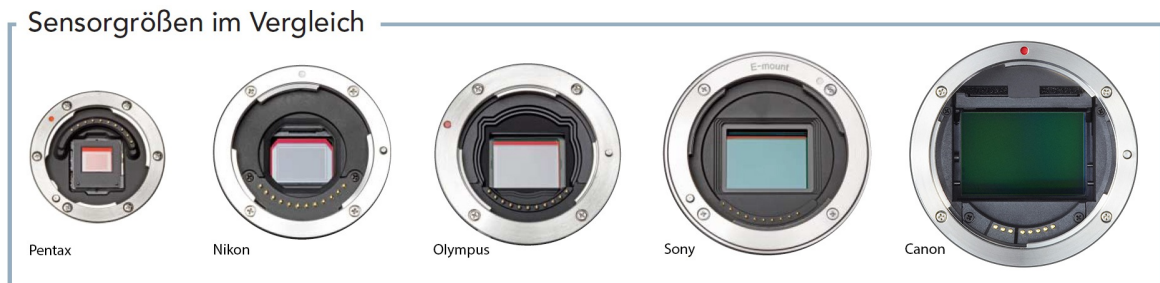
⁸ Für das Abtasttheorem wurden viele Wissenschaftler (auch Kotelnikov, der es 1933 als erster mathematisch definierte oder Shannon, der es 1948 bekannt machte) geehrt, so dass man sich über seine Entdeckung streiten kann, was der Gesetzmäßigkeit aber keinen Abbruch tut.

Wider der Pixeleuphorie

Es ist zu beobachten, dass Kompaktkameras (!) mit 6 MPixeln die besten Bilder liefern. Die Kameras, die sich gegenseitig mit immer größeren Auflösungen überbieten wollen, bleiben in ihrer Bildqualität oft erheblich hinter den 6 MPixel Modellen zurück. Woran liegt das?

Damit die Kameras immer mehr Pixel liefern können, müssen ihre Sensoren immer feiner unterteilt werden. Das hat Auswirkungen auf die Qualität der digitalisierten Daten. Die Folge davon, dass auf die kleineren Sensoren weniger Licht fällt, führt dazu,

- dass die Lichtempfindlichkeit abnimmt
- dass der Dynamikbereich abnimmt
- dass Signal mehr verstärkt werden muss und damit das Rauschen zunimmt
- dass Übersprechen zunimmt (Blooming)
- dass die Optik für die feine Auflösung oft nicht mehr ausreicht
- dass die Dateigrößen enorm zunehmen was nicht nur den Speicherbedarf, sondern auch die Bearbeitungszeiten erhöht.

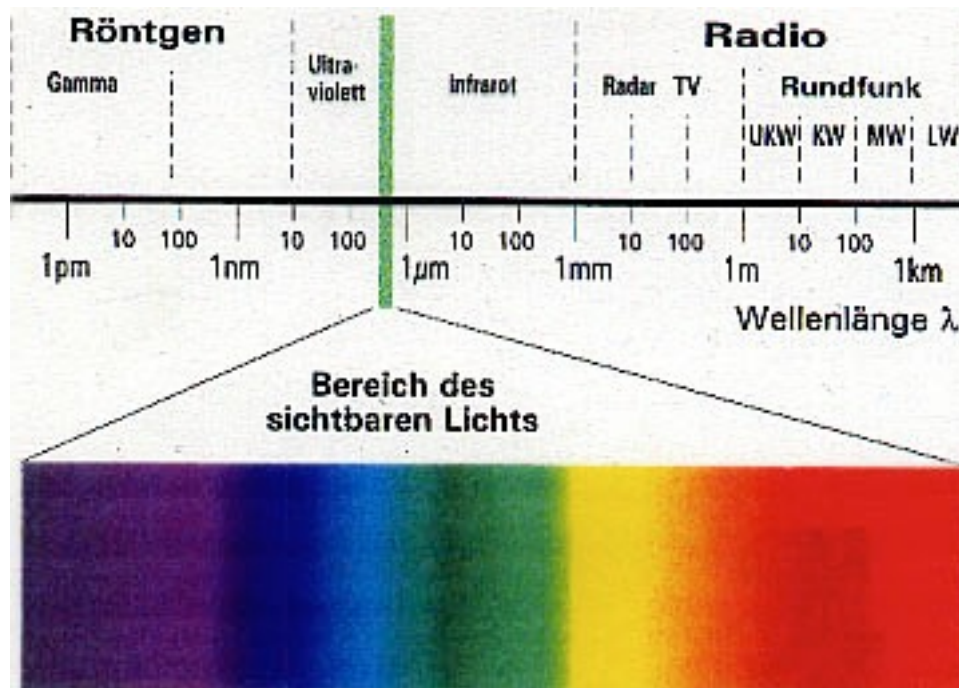


Farbe

1. Farbsehen

Das was wir als Farben bezeichnen lässt sich physikalisch als ein Komplex elektromagnetischer Wellen mit unterschiedlichen Intensitäten beschreiben. Dabei ist das Frequenzband das wir sehen können nur sehr schmal. Es liegt zwischen ca. 380 und 780 nm. Die natürlichen Spektralfarben beginnen im kurzwelligen Bereich mit Blautönen und enden mit den Rottönen.

Entwicklungsgeschichtlich ist das Farbsehen Luxus. Die wenigsten höher entwickelten Tierarten sehen bunt. Für Hunde und Katzen ist die Welt schwarzweiß. Wo das Farbsehen auftaucht ist es überlebensorientiert. Manche Tiere reagieren nur auf bestimmte Farben (Farbe der Beute).



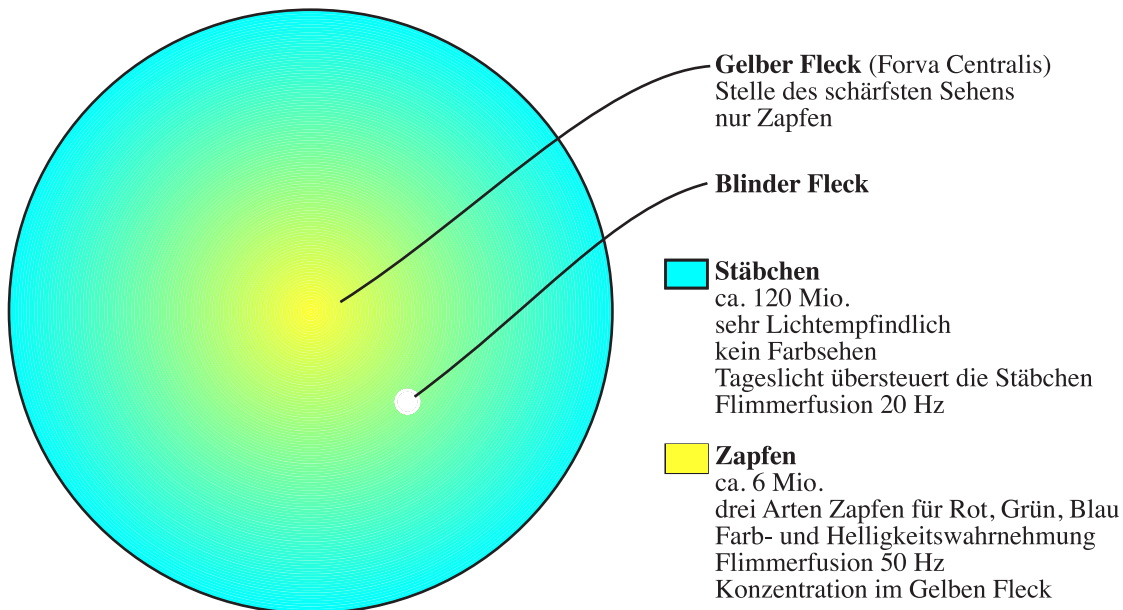
Monochromatische Farben (Farben mit einer reinen Frequenz) tauchen in der Natur so gut wie nie auf. In der Regel hat man es mit Spektren unterschiedlicher Frequenzen in verschiedenen Anteilen zu tun.

Zapfen und Stäbchen

Streng genommen existieren Farben in der physikalischen Welt nicht. Sie sind Interpretationen unseres Sinnesapparates. Farbwahrnehmung ist dabei ein hochgradig subjektiver Vorgang, der von einer Vielzahl von Faktoren abhängt. In unserem Sehsinn sind zwei Arten von Rezeptoren dafür zuständig elektromagnetische Schwingungen eines bestimmten Wellenspektrums wahrzunehmen.

Die **Zapfen** sind verantwortlich für das farbige „Tagsehen“ (photoptisches Sehen) und sind sensibel für das Frequenzspektrum (Farbe) und dessen Intensität (Helligkeit). Die ca. 6 Millionen Zapfen nehmen zum Zentrum des Auges (fovea centralis oder „gelber Fleck“) hin zu. Drei Arten von Zapfen – für rotes, blaues und grünes Licht – teilen sich untereinander die Arbeit der Farbwahrnehmung auf.

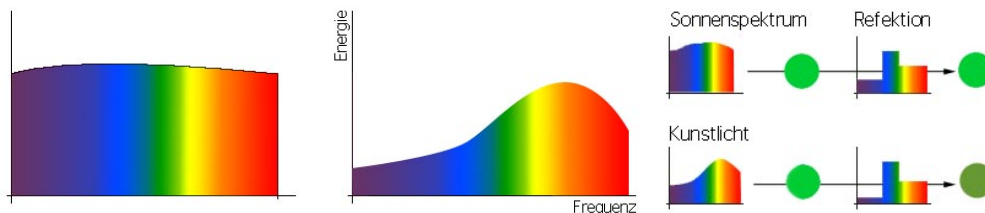
Die **Stäbchen**, die zweite Art der Rezeptoren im Auge sind gegenüber den Zapfen in der Helligkeitswahrnehmung um den Faktor 1000 empfindlicher. Da es nur eine Art von Stäbchen gibt, sind sie nicht in der Lage Farben differenzieren zu können. Da sie aber viel sensibel gegenüber Helligkeiten sind, können sie auch bei Dämmerung noch sehen, was zur Folge hat, das „Nachts alle Katzen grau sind“ („Nachtsehen“ oder skotoptisches Sehen). Die ca. 120 Millionen Stäbchen nehmen zum Rand des Auges hin zu. Sie ermöglichen vor allem das schnelle Erkennen von Bewegungen (Helligkeitsänderungen) an den Rändern des Sehfeldes. Die Stimulation dieser Randbereiche macht z.B. viel von dem Reiz von Großbildprojektionen (Kino) aus.



Beeinflussende Faktoren und Subjektivität

Hier eine Auswahl der Faktoren, die das Farbsehen beeinflussen:

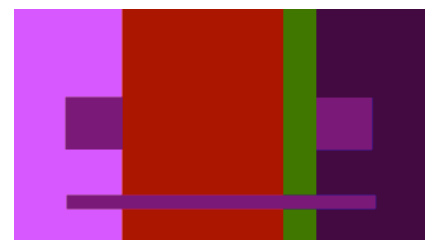
a) Die **Beleuchtungssituation** ist für die Farbwarnnehmung entscheidend. Gegenstände können nur die Spektralanteile reflektieren, mit denen sie beleuchtet werden. So ist das Spektrum von Sonnenlicht viel ausgewogener als das von Kunstlicht (Glühbirne).



b) Das Auge passt sich dem Frequenzspektrum in dem es sich bewegt an. Das nennt man **Umstimmung**. Wenn wir uns in einem künstlich beleuchteten Raum aufhalten, sehen wir die Dinge eben nicht mit einem Gelbstich, wie es der unbestechliche Fotofilm tut, der auf Tageslicht eingestellt ist. Um Farbverfälschungen zu vermeiden wird beim Videofilm ein so genannter „Weissabgleich“ gemacht: Die Kamera wird auf eine Fläche gerichtet, die dem Menschen in der Situation als neutral Grau erscheint. Die Farben werden dann relativ zu dieser Spektralverteilung umgerechnet. Einen „Farbstich“ kann man beim Menschen erzeugen, wenn z.B. zunächst einige Zeit eine grüne Fläche betrachtet wird und dann eine graue. Sie erscheint dann kurze Zeit Lila bis sich das Auge umstimmt.

c) **Adaption** nennt man die Fähigkeit des Auges sich den Helligkeitsverhältnissen anzupassen indem die Iris geöffnet bzw. geschlossen wird. So erscheint ein grauer Punkt auf einem schwarzen Untergrund heller als der selbe Punkt auf einem weißen Untergrund.

Ein Lichtreiz auf das Zentrum der Retina bewirkt eine Umkehrung der Umgebung. Wird das Zentrum durch Licht angeregt, so wird das Umfeld blockiert und umgekehrt. In die Bewertung des Bildpunktes geht die Umgebung mit ein.



d) Auch umgekehrt werden wir vom Farbsehen beeinflusst.

„Die erste Tasse war vielen der Testtrinker zu stark und bitter. Die zweite hingegen schmeckte zu schwach. Erst mit der dritten Tasse war die Mehrheit zufrieden: 200 Personen hatten an einem Experiment amerikanischer Marktforscher teilgenommen. 84 Prozent von ihnen empfanden die dritte Tasse Kaffee als aromatisch und kräftig, nicht zu stark, nicht zu schwach.

Was die Teilnehmer des Versuchs nicht wussten: Ihnen wurde stets der gleiche Kaffee serviert – zunächst aus einer braunen Kanne, dann aus einer gelben und schließlich aus einer roten. Die Forscher mussten noch nicht einmal den Kaffee selbst unterschiedlich färben. Es genügte die Farbe der 'Verpackung' ...“

(aus: Klaus von Seckendorff: "Magie der Farben" in: Print Process 7/1999)

Farben sind in der Lage Puls und Atmung sowie das Wärmeempfinden zu beeinflussen. Zudem sind sie kulturell determiniert. Im Mittelalter galt einen strenger Farbkanon: Weiß für Reinheit, Rot für Barmherzigkeit, Schwarz für Demut etc.. Saure Drops in Braun oder Schwarz wären wohl ein kommerzieller Flop.

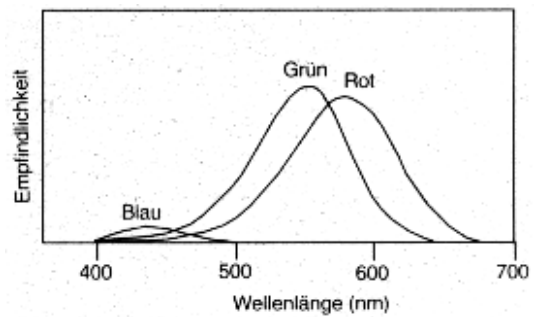
Als Lieblingsfarbe wird an erster Stelle Blau genannt (40% Frauen, 36% Männer), an zweiter Stelle folgt die Farbe der intensiven Gefühle: Rot (20%).

Helligkeitseindruck

Mit abnehmender Wellenlänge nimmt die Energie einer Welle zu. Die Gesamtzahl aller Lichtwellen in einem Lichtstrahl, also seine Gesamtenergie, bestimmt den Helligkeitseindruck einer Farbe. Durch unterschiedlich hohe Anteile von Photopigmenten in den Zapfen werden die Intensitäten der Frequenzen jedoch unterschiedlich gut wahrgenommen. Durch Experimente wurden für den Helligkeitseindruck folgende Durchschnittswerte ermittelt.

$$1 \text{ Helligkeit} = 0,59 \text{ Grün} + 0,3 \text{ Rot} + 0,11 \text{ Blau}$$

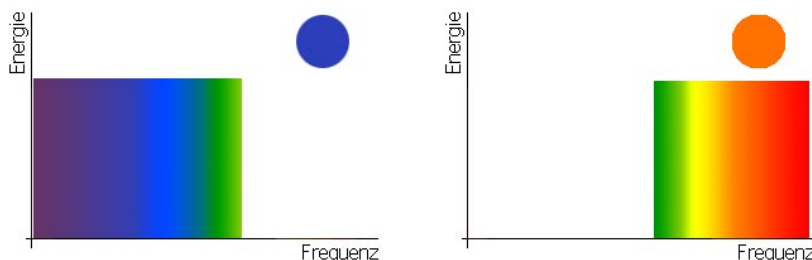
Aus diesem Grund wird Blau gerne als Hintergrundfarbe verwendet (Fernsehen).



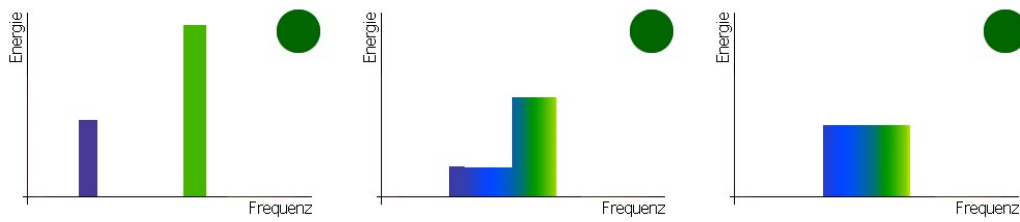
Farbigkeit

Das Verhältnis der verschiedenen Lichtwellen zueinander, besonders die dominanten Frequenzen, bestimmen die Farbigkeit des Lichtstrahls. Werden alle drei Zapfenpopulationen gleichmäßig erregt empfinden wir das Licht als farblos. Sonnenlicht wird so wahrgenommen. Bei Kunstlicht können bestimmte, meist langwelligere Farben überrepräsentiert sein. Das führt zu dem bereits angesprochenen Gelbstich auf dem Fotofilm.

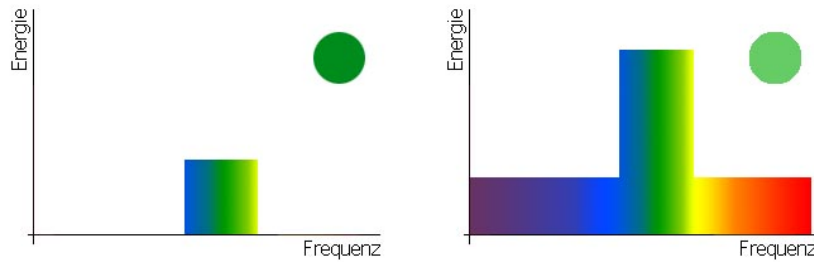
Unterschiedliche Farbigkeit durch unterschiedliche Spektren:



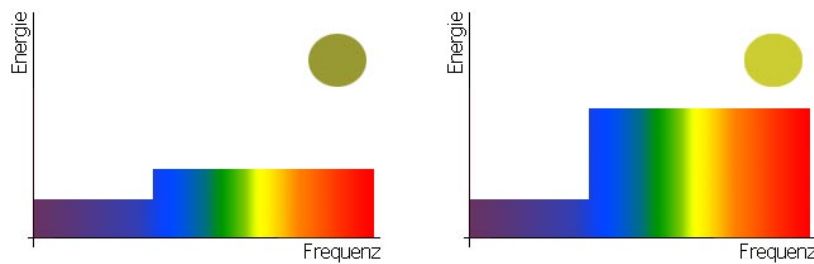
Gleiche Farbigkeit durch unterschiedliche Spektren:



Unterschiedliche Helligkeit:



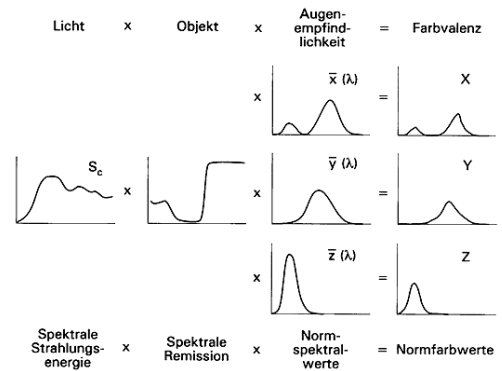
Unterschiedliche Sättigung



Ganz verschiedene Spektren können den gleichen Farbindruck vermitteln. Da die Zapfen die Energie über einen ganzen Bereich des Spektrums sammeln, kann ein breites energiearmes Spektrum den Zapfen auf gleiche Art reizen, wie ein schmales Spektrum mit viel Strahlungsenergie.

Die Rechte Grafik zeigt den Weg des Lichts auf ein Objekt und dessen Reiz im Schapparat. Für die Farbwahrnehmung kommen die Faktoren wie Umdeutung, Umstimmung, Adaption und die persönliche Gefühlslage dazu.

Die meisten Menschen können ungefähr 128 unterschiedliche Farbtöne mit jeweils 30 Sättigungswerten und 50 Helligkeitsstufen unterscheiden (ca. 192.000 Farben). Anders verhält es sich mit der Beschreibung von Farben. Eine Untersuchung über den Zusammenhang von Farbe und Sprache hat ergeben, dass Menschen – unabhängig von der Landessprache – maximal elf grundsätzlich verschiedene Farbbegriffe haben. Davon ausgehend werden dann Differenzen gebildet (Dunkelgrün oder Grasgrün etc.).⁹



2. Farbmodelle

Die ausgesprochene Subjektivität unserer Farbwahrnehmung erschwert das Beschreiben oder Normieren von Farben sehr. Wir wissen nicht wie unsere Mitmenschen im Vergleich zu uns eine Farbe wahr-

⁹ B. Berlin, P. Kay: „Basic Colour Terms: Their Universality and Evolution“ University of California, 1969

nehmen. Je nach Situation, Stimmungslage und Kontext ist der Farbeindruck ein anderer. In der Computergrafik sind jedoch verlässliche und eindeutige Beschreibungssysteme für Farben notwendig um die Farbwiedergabe im Druck und auf Monitoren verschiedener Hersteller oder bei der Verarbeitung in Softwaresystemen nicht der Beliebigkeit preiszugeben. Allein die Farbauswahlpalette in Photoshop zeigt vier verschiedene Farbsysteme (RGB in zwei Kodierungsformen).

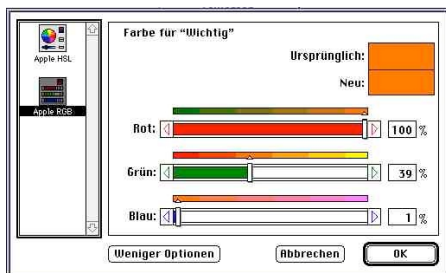
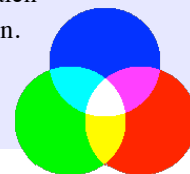


Zwei Grundtypen von Farbmodellen werden dafür verwendet. Relative Modelle beschreiben die Farbe in Relation zu verschiedenen Farbachsen definierter Grundfarben (RGB, CMYK), absolute Modelle versuchen dagegen Farben durch drei absolute Koordinaten in einem Farbsystem anzugeben (CIE- L^*a^*b , HSI).

relative Modelle

RGB-Modell

Aus den drei Komponenten Rot, Grün und Blau lassen sich fast alle spektralen Farben mischen. Das Modell eignet sich für alle Geräte die Licht aussenden. Stellt man sich drei Strahler in den jeweiligen Farben vor und richtet sie alle auf einen Punkt, so erscheint der Lichtpunkt weiß. Dies nennt man **additive Farbmischung**, alle Farben zu gleichen Teilen ergeben Weiss .



Auch wenn dieses Modell in der Praxis häufig eingesetzt wird, bringt es doch einige Probleme mit sich:

- Ein großes Problem bei der RGB-Beschreibung ist, dass eine Farbänderung auch immer gleichzeitig eine Sättigungs- und Helligkeitsänderung bewirkt.

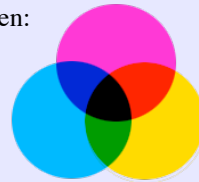
Möchte man zum Beispiel einen Farbstich in einem Bild korrigieren, so möchte man Sättigung und Helligkeit des Bildes unangetastet lassen, die Farbe dagegen ändern. Steht nur das RGB-Tripplet zur Verfügung, bereitet das erhebliche Probleme.

- Das RGB-Modell ist ein relatives Modell. Es beschreibt die Farben immer in Abhängigkeit von drei Mischfarben die ihrerseits von Gerät zu Gerät sehr unterschiedlich ausfallen können. Jede Farbe auf einem Monitor ist abhängig von den Phosphoren des Bildschirms. 100% Rot bedeutet nicht ein maximales Rot, sondern das Maximum des entsprechenden Gerätes.
- Nicht alle Farben sind im RGB-System mischbar. Bestimmte blaugrün und gelbgrün Bereiche der Spektralfarben (zwischen 450 und 550 nm) können durch additive Farbmischung nur erzeugt werden, wenn ein negativer Rotanteil hinzugemischt wird. Diese mathematische Überlegung ist jedoch bei existierenden Strahlern schlechterdings nicht möglich. Das ist keine technische Unzulänglichkeit, sondern es ist prinzipiell nicht möglich das eine Lichtquelle negatives rotes Licht emittiert.

CMYK-Modell

Der CMYK-Farbmodell, das besonders für den Druck verwendet wird, definiert ebenso wie das RGB-Modell jede Farbe durch Mischung aus drei Grundfarben: Cyan, Magenta und Yellow. Je mehr dieser Farben übereinander gedruckt werden, desto dunkler wird die Farbe. Hier besteht also eine subtraktive Farbmischung. Je größer die Anteile für C, M und Y werden, desto dunkler wird die Farbe.

Das K steht für Key und bezeichnet die schwarze Farbe, die zur Kontrasterhöhung mitgedruckt wird.



Mit diesem Modell können Farben gemischt werden, die durch eine additive Farbmischung nicht erzeugbar sind. Dadurch, dass Gegenstände in der Lage sind bestimmte Farbanteile zu absorbieren, können Farben entstehen die im RGB-Spektrum nicht vorkommen, sogenannte Körperfarben. Reines Cyan entsteht, wenn Grün und Blau von einem Körper reflektiert und Rot absorbiert wird. Die Absorption entspricht dem negativen Farbanteil, der im RGB-Modell nicht möglich war.

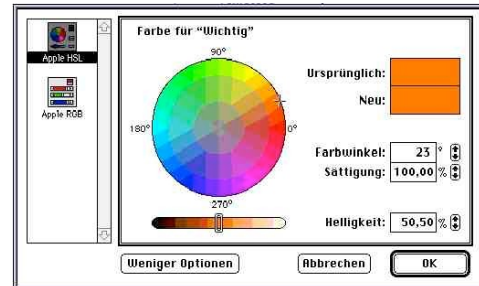
Auch das CMYK-Modell ist ein relatives Modell, das immer in Relation zu den eingesetzten Druckfarben, zur Beleuchtung und dem Druckuntergrund steht. Die Druckfarben werden in Europa durch die Euroskala, in den USA durch die SWOP-Scala standardisiert. Hier schlägt sich die Relativität des Systems nieder. Die beiden Skalen unterscheiden sich besonders im Magenta Bereich, sind also nicht deckungsgleich.

absolute Modelle

Um zu einer geräteunabhängigen und praktikablen Beschreibung von Farbe zu gelangen trennen die absoluten Farbmodelle die Eigenschaft der Farbigkeit von der Helligkeit. Prototyp dieser Farbsysteme ist das HSI-Modell.

HSI

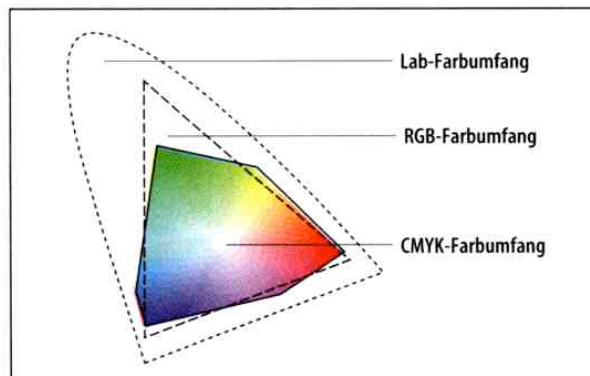
HSI steht für Hue (Farbton), Saturation (Sättigung) und Intensity (Helligkeit). Statt eines Mischverhältnisses werden hier auf einem Farbkreis die Farben des Spektrums angeordnet und in Gradschritten bezeichnet. Die Sättigung der Farbe ergibt sich aus der Entfernung zum Mittelpunkt in einem Einheitskreis zwischen 0 und 1, oder 0 und 100%. Die dritte Achse, durch die man sich das Modell als Zylinder vorstellen kann, zeigt den Helligkeitswert an. Dieses Modell ist in der Praxis sehr gut handhabbar da es Helligkeit, Sättigung und Farbe voneinander trennt.



Es ist jedoch nicht möglich Farbton und Sättigung einer Farbe unmittelbar zu messen. Farbmessungen geschehen technisch immer durch die Bestimmung des Rot-, Grün- und Blauanteils. Somit baut das System auf reiner Definitionsarbeit auf. Mit der Umrechnung vom RGB in das HSI-Modell unter Berücksichtigung der Geräteeigenschaften, kann aber eine geräteunabhängige Beschreibung möglich gemacht werden.

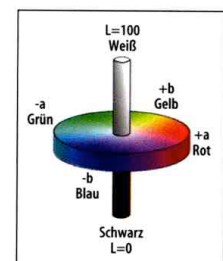
L*a*b-Modell

Das L*a*b-Modell wurde bereits 1931 durch die Commission Internationale d'Éclairage weltweit mit der Einführung des Standardbeobachters mit Normalempfindlichkeit standardisiert und 1976 erneut verbessert. Diese Farbbeschreibung umfasst alle vom menschlichen Auge sichtbaren Farben. Daher sind alle anderen Farbmodelle in diesem Farbraum enthalten.



Ähnlich dem RGB-Modell wird auch hier von drei Strahlern ausgegangen, deren Mischverhältnis für einen Farbton angegeben wird. Allerdings sind dies drei ideale Strahler, die technisch nicht realisiert werden können. Der Vorteil dabei liegt darin, dass bei der (additiven) Farbmischung alle Farben des natürlichen Spektrums erzeugt werden können, ohne mit negativen Werten operieren zu müssen.

Statt ein dreidimensionales Modell für die Farbigkeit zu entwickeln wurde durch ein mathematisches Verfahren auf nur zwei Achsen zurückgegriffen, deren eine die Farben von Grün bis Rot (**a**-Achse) und die andere von Blau bis Gelb (**b**-Achse) aufnimmt. Neben der Buntheit (Chrominanzkomponenten) wird die (Luminanzkomponente, **L**) jetzt auf der dritten Achse abgetragen. Daher der Name: L*a*b.



Probleme entstehen besonders dann, wenn von einem Farbraum, zum Beispiel einer RGB-Darstellung am Monitor in eine CMYK-Darstellung der Farbe für den Druck umgerechnet werden muss. Professionelle Bildbearbeitungsprogramme zeigen die im Bild enthaltenen Farben an (unten mit Rot gekennzeichnet), die zwar im RGB-Farbraum auf dem Monitor angezeigt werden können, jedoch nicht druckbar sind (CMYK-Farbraum).



Wie wird Farbe gemessen? Ähnlich dem Verfahren in Scannern messen Colorimeter mit Hilfe von Normlicht und drei Farbfiltern, die den Zapfen im Auge entsprechen, die Farbe. Die genauere aber auch teurere Variante ist das Spektralverfahren. Das Spektrum wird dabei durch Prismen zerlegt (Auflösung über das Spektrum ca. 5 nm) und die Messwerte werden dann in einen Farbwert umgesetzt.

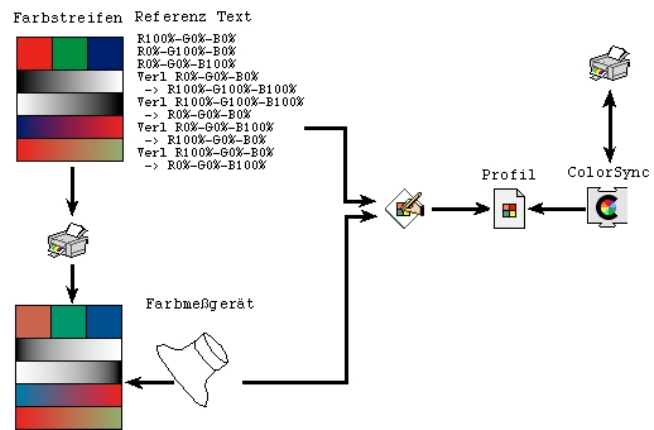
In der Druckpraxis bestehen zudem eine Reihe weiterer Farbsysteme, die aus normierten Farben bestehen. Das Pantone- oder HKS-Farbsystem sind große Farbtabelle für die es sowohl Module in Bildbearbeitungsprogrammen als auch Mischanweisungen für die Druckindustrie gibt.

Probleme mit der Farbechtheit

Aufgrund der gerätespezifisch unterschiedlichen Darstellung von Farben kann das Ergebnis beim Druck erheblich von der gescannten Vorlage oder dem Bild auf dem Monitor abweichen. Daher sollte man jedes Gerät auf seine Farbechtheit hin eichen. Diesen Vorgang nennt man **Kalibrieren**.

Um dieses Problem zu bewältigen wurde von der "European Color Initiative" (ECI) ein Farbmanagement System entwickelt. Dieses beschreibt mittels der CMM (Color Matching Method) zunächst einmal die Umrechnungsmethoden zwischen den gerätespezifischen RGB oder CMYK-Werten und dem CIE-L*a*b Farbraum und ist mittlerweile Bestandteil der wichtigsten Betriebssysteme (ColorSync bei Apple, ICM bei Windows).

Neben den Umrechnungsmethoden werden durch die ICC (International Color Consortium) die Geräteprofile festgelegt. Sie beschreiben das Farbverhalten des Gerätes bezogen auf den Lab-Farbraum. Die Farbprofile werden im Internet veröffentlicht. Zusätzlich gibt es Software, sogenannte Profilerer die es erlauben individuelle Profile zu erstellen.



3. Datenkompression und Datenreduktion

Da beim pixelorientierten Verfahren sehr schnell sehr große Datenmengen entstehen, verwenden viele Formate Kompressionsmethoden bei der Speicherung. Dabei unterscheidet man zwischen verlustfreier Kodierung, auch **Datenkompression** genannt, und der **Datenreduktion**, die eine verlustbehaftete Kodierung darstellt.

Die Datenkompression fasst die Redundanzen eines Bildes zusammen und erlaubt beim Dekodieren eine vollständige Wiederherstellung des Bildes. Bei der Datenreduktion werden irrelevante Informationen aus dem Bild getilgt. Je nach Stärke der Reduktion kann die Qualität des Bildes leiden. Eine vollständige Wiederherstellung des Ursprungsbildes ist hier nicht mehr möglich.

Das einfache Apple Macintosh eigene PICT-Format verwendet für diese Aufgabe (wie auch FAX-Geräte) die **Laufängenkodierung (RLE / Runlength Encoding)** als Kompressionsmethode. Diese Methode ist verlustfrei. Hierbei werden identische Bildpunktfolgen oder wiederkehrende Muster zusammengefaßt indem nur einmal deren Aussehen und die Positionen ihres Auftretens gespeichert werden. Deshalb ist diese Methode auch bei Strichzeichnungen (Kompression ca. 1:10) effektiver als bei detailreichen Fotos (1:2).

TIFF (Tag Image File Format), als pixelorientiertes Speicherformat für den professionellen Einsatz, verwendet die **LZW** Kompressionsmethode (nach ihren Entwicklern Limple, Ziv und Welch). Auch diese Methode arbeitet verlustfrei mit Mustertabellen. Hier wurde versucht ein Kompromiss zwischen Effizienz der Kompression und Geschwindigkeit beim Komprimierens/Dekomprimieren zu finden.

Für den Einsatz in elektronischen Medien, z.B. im WWW und damit als Austauschformate zwischen den unterschiedlichsten Computersystemen eignen sich die Formate GIF und JPEG. Da Datenübertragung langsam und teuer ist konzentrieren sich diese Formate besonders darauf, die entstehenden Dateigrößen klein zu halten.

GIF (Graphics Interchange Format) wurde von CompuServe entwickelt um die Datenraten im eigenen Onlie-Dienst gering zu halten. Dieses Format verzichtet auf eine Echtfarbenspeicherung und reduziert die Farbinformationen stattdessen auf eine Farbtabelle von maximal 256 Farben (**indizierte Farben**). Dies ist bei Bildern mit mehr als 256 Farben im Original eine Methode der Datenreduktion. Daneben wirkt bei GIF zusätzlich die LZW Komprimierung.

PNG (Portable Network Graphics, gesprochen:"ping") wurde als Nachfolger von GIF vom WWW-Konsortium als Antwort auf die Lizenzstrategie von CompuServe etabliert. Es unterstützt Farbtiefen von 1 bis 48 bit (wahlweise auch indizierte Farben), neben Transparenz auch einen echten α -Kanal und speichert auch Metainformationen zu den Bildern (Autor, Titel, Stichwörter etc.).

JPEG, benannt nach der von der internationalen Standardisierungsorganisation ISO eingesetzten Joint Pictures Expert Group, ist in der Lage Millionen von Farben zu sichern und verwendet ein ausgesprochen elaboriertes Reduktionsverfahren mit dem selben Namen.

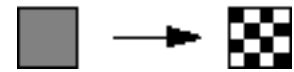
Dies Verfahren kann zwischen verlustfreier Kompression und verschiedenen Qualitäten verlustbehafteter Datenreduktion variieren, schadet der Qualität des Bildes jedoch kaum, da sie auf die menschliche Wahrnehmung eingestellt ist. Da sich zwei nebeneinanderliegende Pixel mit gleicher Helligkeit (Luminanz) aber unterschiedlicher Farbe (Chrominanz) kaum voneinander unterscheiden lassen, können die Farbinformationen stärker (um $1/4$) als die Helligkeitsinformationen (um $1/8$) reduziert werden.

Danach wird das Bild in Kacheln von 8 mal 8 Pixeln unterteilt. Das (Rechteck-)Signal der Helligkeits- und Farbverteilung einer Kachel wird mit Hilfe der Fourier-Transformation als Summe sich überlagernder Sinuswellen verschiedener Frequenz und Amplitude umgerechnet. Je genauer das Original nachgebildet wird desto mehr Sinuswellen müssen erreicht werden. Umgekehrt besteht die Möglichkeit irrelevante Frequenzen (feine Details, Rauschen) wegzulassen (Datenreduktion). Dies wird dann als mathematische Funktion gesichert (DCT / Diskrete Cosinustransformation).

Rastern

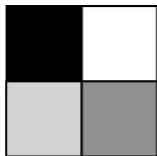
1. Graustufe und Rasterzelle

Warum wird gerastert? Würde der Drucker echte Farben und Graustufen drucken, so müsste er 256 graue und fast 17 Millionen Farbeimer ständig bereithalten. Beim Druck muss daher jeder Bildpunkt der eine Graustufe darstellt (Pixel) durch eine Anzahl kleinerer Druckpunkte (Dots) simuliert werden. Für die Darstellung auf dem Monitor ist das nicht notwendig, da der Bildschirm in der Lage ist einen Bildpunkt mehr oder weniger hell aufscheinen zu lassen.



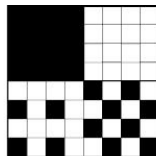
Den Vorgang des Umsetzens echter Graustufen (Pixel) in mehrere schwarze Druckpunkte (Dots) nennt man Rastern. Aus einem Pixel wird eine Rasterzelle. Damit steigt die Auflösung (dpi) des Bildes beim Rastern. Die Rasterzellen werden in lpi (lines per inch) gezählt.

Auf einer bestimmten Fläche, der Rasterzelle, werden je nach Tonwert ein oder mehrere Dots gedruckt.



gescanntes Bild im Rechner

4 Bildpunkte
2 dpi



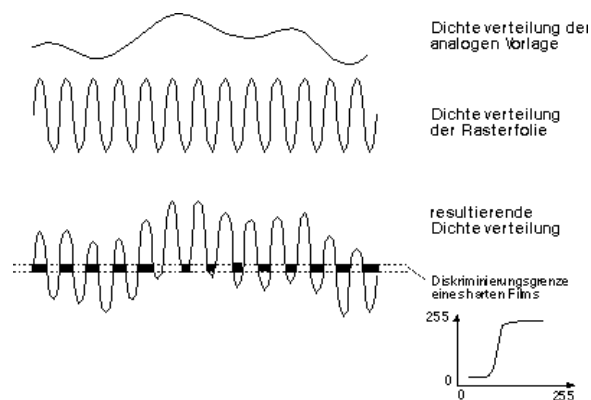
durch den Drucker gerastertes Bild
Jeder Bildpunkt wurde in eine Rasterzelle umgesetzt.

Für das gleiche Bild sind nun
8 dpi notwendig, bei
16 möglichen Graustufen

Wer rastert? Mit der traditionellen Technik, die unten beschrieben ist, wird heute kaum noch gearbeitet. Heute übernimmt das Rastern der RIP (Raster Image Prozessor), der Bestandteil jedes Druckers und Belichters ist. Einige Bildbearbeitungsprogramme erlauben auch das „manuelle“ Rastern, in dem man verschiedene Parameter des Vorgangs selbst beeinflussen kann. Dadurch erhält man dann ein reines Schwarz/Weiss-Bild.

2. traditionelle Rasterung (Technik)

Bei der traditionellen Rasterungstechnik wurde die Vorlage mit einer Rasterfolie übereinander kopiert und das Ergebnis dann erneut auf einen Reprofilm, der eine nahezu binäre Charakteristik hat, umkopiert. Ergebnis war ein Bild aus je nach Tonwert - verschieden großen schwarzen Punkten.



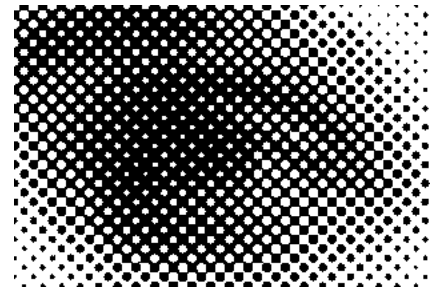
Beim elektronischen Rastern lassen sich zwei Typen grundsätzlich unterscheiden. Die frequenzmodulierenden (FM) Raster und die amplitudenmodulierenden (AM) Raster.

3. elektronische Raster

AM-Raster

Das was heute unter Rastern üblicherweise bezeichnet wird, ist die Umsetzung eines Graustufenbildes in ein AM-Raster.

Kennzeichnend für diesen Typ ist, dass die Abstände zwischen den einzelnen Bildpunkten (Frequenz) gleichbleibend ist, während sich ihre Größe (Amplitude) je nach Tonwert ändert (moduliert wird).



FM-Rastern

Bei FM-Rastern, verhält es sich umgekehrt. Hier werden die Abstände der Bildpunkte variiert, während die Punktgröße gleichbleibend ist.

Der Vorteil von FM-Rastern ist, dass sie keine Moirés hervorbringen können, da sie immer ein Phänomen von überlagerten gleichmäßigen Rastern sind.

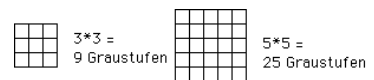


4. AM-Raster

Da ganz überwiegend amplitudenmodulierte Raster beim Druck eingesetzt werden, soll diese Rasterform im Folgenden noch genauer beschrieben werden.

Rasterweite

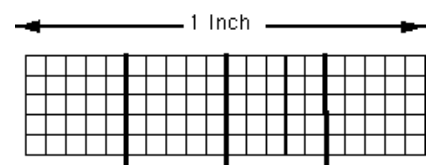
Für das Rastern ist entscheidend wie groß die Rasterzelle, in die ein Bildpunkt übersetzt werden soll, gewählt wird. Eine Rasterzelle von drei mal drei Dots ist in der Lage neun Graustufen darzustellen, je nachdem wie viel Dots davon schwarz gedruckt werden. Erhöht man die Kantenlänge der Rasterzelle, so können entsprechend mehr Graustufen dargestellt werden. Für die volle Farbtiefe eines Graustufenbildes, benötigt man theoretisch Rasterzellen von 16 * 16 Dots (256 Graustufen).



Dies bedeutet aber auch, dass beim Rastern die Auflösung des Bildes um den Faktor der Kantenlänge der Rasterzellen steigt. Wird ein Graustufenbild von 10 dpi aufgerastert und jeder Bildpunkt in eine Zelle von 3*3 Punkten übersetzt, so beträgt die Auflösung danach 30 dpi.

Es ist sinnvoll nicht nur eine Einheit für die Druckpunkte (dpi) sondern auch ein Maß für die Rasterzellen pro Strecke zu haben. Diese Rasterweite wird mit der Einheit lines per inch (lpi) bezeichnet.

Das folgende Beispiel zeigt den Zusammenhang zwischen dpi und lpi. Die Rasterzellen sind 5 mal 5 Pixel groß, können also 25 Graustufen darstellen. Vier Rasterzellen befinden sich dabei auf der Strecke von einem Inch, also hat das Beispiel 4 lpi. Die Auflösung lässt sich daraus berechnen: 4 Rasterzellen á 5 Dots sind 20 dpi.



Da die Auflösung des Ausgabegerätes meistens festliegt kommt es auf ein ausgewogenes Verhältnis von Rasterweite und Farbtiefe an. Erhöht man die Farbtiefe, was bedeutet die

Rasterzellen zu vergrößern, muss bei gleicher Auflösung die Rasterweite, also die Anzahl der Bildpunkte (nicht Druckpunkte!) sinken und umgekehrt. Würde man bei dem oben gezeigten Beispiel die Farbtiefe von 25 auf 16 Graustufen verringern, so wäre die Kantenlänge jeder Rasterzelle nur noch 4 Dots breit. Damit könnten aber 5 Bildpunkte auf einem Inch untergebracht werden. Die Rasterweite würde also von 4 auf 5 lpi steigen.

Rasterwinkel

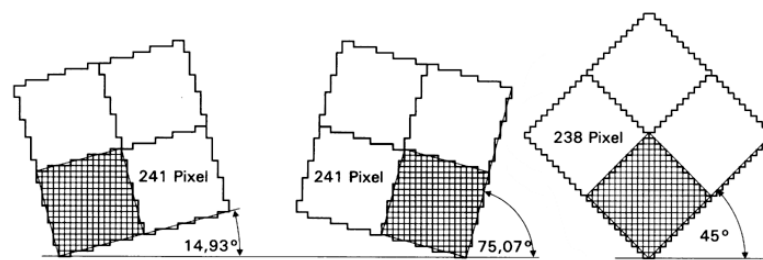
Bislang sind wir von einem horizontal verlaufendem Raster ausgegangen. Solche Raster wirken aber sehr störend für den Bildeindruck, da unsere Wahrnehmung besonders sensibel auf horizontale und vertikale Linien reagiert. Aus diesem Grund wird das Raster bei Graustufenbildern immer um 45° gekippt. Das Bild wirkt dann sehr viel angenehmer auf den Betrachter.



Auch im Vierfarbdruck wird das berücksichtigt. Hier kommt jedoch noch die Schwierigkeit hinzu, dass die vier Rasterfolien, die übereinander gedruckt werden müssen, miteinander keine Moiré bilden dürfen. Da dieses Problem bei jedem Bild das selbe ist, wurden die Rasterwinkel für den Vierfarbdruck einheitlich festgelegt:

	analog	digital	
Schwarz	45°	45°	
Cyan	105°	14,93°	
Magenta	75°	76,07°	
Yellow	90°	0°	

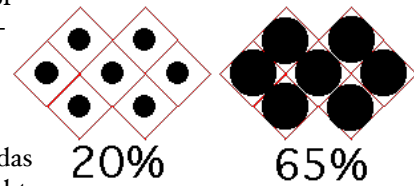
Bei elektronisch gerasterten Bildern können diese Winkel nicht ganz genau eingehalten werden da die RIPs in ihrer horizontalen Matrix die gedrehten Rasterzellen erzeugen müssen. Die leichte Verdrehung der Winkel ist nicht so gravierend wie die Tatsache, dass in diesen Rasterzellen etwas weniger Graustufen erzeugt werden können als erwünscht.



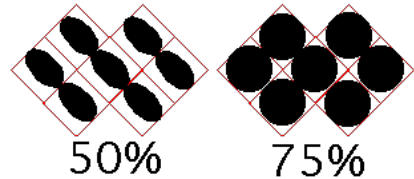
Die Grafik zeigt, dass durch die Drehung der Rasterzellen von ursprünglich 16*16 dots nur noch 241 bzw. 236 Differenzierungen möglich sind. Damit schränkt sich die Anzahl der druckbaren Farben ein ($241 * 241 * 256 = 14.868.736$).

Rasterformen

Es gibt immer mehrere Möglichkeiten in einer Rasterzelle die erforderliche Anzahl von Punkten zu schwärzen um eine Graustufe darzustellen. Eine dieser Möglichkeiten ist, von der Mitte aus möglichst immer einen runden Punkthaufen zu bilden. Diese runde Punktform hat den Nachteil, das bei einem bestimmten Tonwert der Rasterpunkt mit seinem Nachbarpunkt zusammenstößt. Und das an allen vier Seiten gleichzeitig. Bei einem sanften Farbverlauf macht sich dieser **Punktschluss** als **Tonwertsprung** bemerkbar. Das Bild scheint dann an dieser Stelle plötzlich dunkler zu werden. Bei runden Rasterpunkten tritt der Tonwertsprung bei einem Tonwert von 65%, bei quadratischen Punkten bei 50% auf.

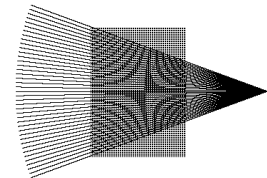


Bilder bei denen Verläufe besonders gut dargestellt werden sollen, werden mit elliptischer Punktform gerastert. Elliptische Punktformen haben den Vorteil den Tonwertsprung auf auf zwei Tonwerte (50% und 75%) aufzuteilen und damit einen sanfteren Übergang zu ermöglichen.



Rasterzähler

Um die Rasterweite zu messen, macht man sich den Moiré-Effekt zu nutze. In dem man einen Rasterkeil, der praktisch ein sich stetig änderndes Raster darstellt, auf das Bild legt, treten an einer Stelle Interferenzen zwischen dem Raster des Rasterkeils und dem des Bildes auf. Ist der Rasterkeil mit einer Skala versehen, kann daran die Rasterweite abgelesen werden.



Die zu wählende Rasterweite hängt nicht nur von der Auflösungsmöglichkeit des Ausgabegerätes ab, sondern auch von dem Papier auf das gedruckt werden soll. Nur sehr hochwertige Papiere sind auch in der Lage sehr feine Raster wiederzugeben.

65-85 lpi	maschinenglatten Papieren (z.B. Zeitung)
100-150 lpi	satinierte Papiere (z.B. üblicher Offsetdruck)
150-300 lpi	gestrichene Papiere (z.B. Kunstdrucke)

Scannauflösung

Aus den bisher gemachten Erkenntnissen lässt sich nun auch eine ‚genauere‘ Faustformel für das Scannen formulieren. Für Bilder die im Electronic Publishing verwendet werden sollen kann gelten:

Scannauflösung = 72 dpi da Pixel = Dot

Soll die Darstellung vergrößert werden, muss die Auflösung entsprechend erhöht werden.

Soll ein Bild für den Druck gescannt werden, gilt zunächst das die Scannauflösung so groß wie die Rasterweite sein muss, da jeder Bildpunkt in eine Rasterzelle aufgerastert wird. Aus der Wurzel der möglichen Graustufen lässt sich dann die Auflösungsanforderung für den Drucker bzw. Belichter errechnen.

100 dpi Scannauflösung -> 100 lpi Raster

bei 256 Graustufen: $100 * \sqrt{256} = 1600$ dpi

Nun sollte jedoch noch der Rasterwinkel berücksichtigt werden. Die oben gemachten Berechnungen gelten bislang nur für 0° Raster. Raster von Graustufenbildern sind jedoch um 45° gekippt. Um das Kippen des Rasters annähernd auszugleichen wird zusätzlich der Faktor 1,4 (Wurzel 2) berücksichtigt.

Zusammenfassend ergibt sich jetzt folgende Formel:

$$\text{Scannauflösung} = \text{Rasterweite} * 1,4 * \frac{\text{gewünschte Größe}}{\text{Originalgröße}}$$

Bildbearbeitung

1. Adressierbarkeit

Der große Vorteil der digitalen Bildverarbeitung liegt in der Adressierbarkeit jedes einzelnen Bildpunktes. Dadurch eröffnen sich alle Möglichkeiten der Manipulation: Freistellen von Bildeinheiten, Veränderungen von Größe, Helligkeitsverteilung oder Farbwerten, Retusche, Montage etc.

Bei pixelorientierten Bildern ist die Adressierung direkt aus dem Speicher übertragbar, ohne das Bild als Sequenz durchlaufen zu müssen. Bei der Objektorientierung kann jeder Wert als Funktion $f(x)$ errechnet werden.

2. Filter

Das wird besonders deutlich an den digitalen Filtern. Neben Standardfiltern wie Weich- und Scharfzeichnern bieten manche Programme die Möglichkeit eigene Filter zu entwerfen.

Jeder Punkt wird in Abhängigkeit zu seinen Nachbarpunkten verändert. Dabei soll von einem Graustufenbild (Wertebereich 0...255) ausgegangen werden. Nach der Definition eines Filterarrays (Schablone/Matrix) wird die Maske über dem Original schrittweise verschoben und neue Werte berechnet.

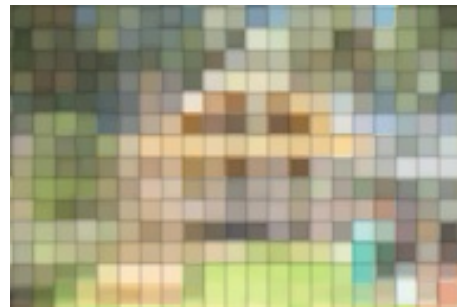
Einfacher Mosaikfilter durch Mittelwertbildung

15	80
17	85

wird zu:

49	49
49	49

Rechnung: $(15+80+17+85)/4 = 49,25 \approx 49$



Hoch- und Tiefpassfilter

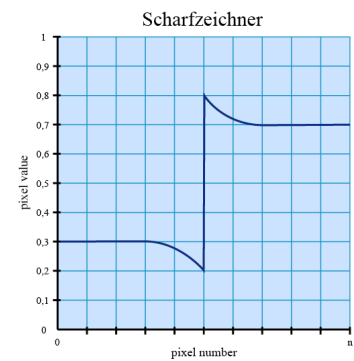
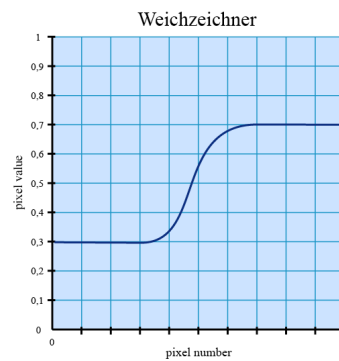
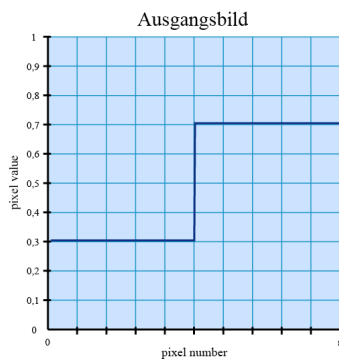
In der Regel sind Filter jedoch komplizierter aufgebaut. Faktoren, mit denen die Helligkeitswerte multipliziert werden, werden in einer Faltungsmatrix angeordnet. (In der Mathematik wird die Verknüpfung zweier Matrizen als Faltung bzw. Konvolution bezeichnet.) Die oben benutzte Maske wäre:

1	1
1	1

Jetzt muss mit den Faktoren gerechnet werden also $(1*15+1*80+1*17+1*85)/4$
Die Summe wird jeweils durch den Normierungswert (hier 4) geteilt.

Am bekanntesten sind Hoch- und Tiefpassfilter (Scharf- und Weichzeichner) die auch im Audiobereich Anwendung finden.

	Hochpassfilter	Tiefpassfilter
Lausprecherboxen	hohe Frequenzen werden durchgelassen	tiefe Frequenzen werden durchgelassen
Bildbearbeitung	Kantenschärfung	feine Details werden herausgefiltert = Glätten
Kompression		Verringern der Detailfülle



Weichzeichner (Tiefpassfilter)

Für diese Filter ist ein Detail jeweils ein Helligkeitsunterschied. Das Herausrechnen feiner Details kann, wie wir anhand der Bitebenen gesehen haben (Rauschen) sinnvoll sein. So gleicht ein Tiefpassfilter nebeneinander liegende Tonwerte einander an. Dadurch wirken Flächen dann weniger verrauscht, also glatter. Bei extremer Anwendung dieses Filters wirkt das Bild dann wie durch eine Milchglasscheibe betrachtet.



Kantenschärfung (Hochpass)

Hochpassfilter arbeiten umgekehrt. Sie suchen nach großen (je nach Schwellwert) Helligkeitssprüngen und radikalisieren diese.

Original

```
15  80  81
17  85  97
22  95  96
```

Filtermatrix

```
-1  -1  -1
-1  12  -1
-1  -1  -1
```

Hier wird jeweils nur ein Punkt (der in der Mitte) neu berechnet. α ist der Koeffizient der die Stärke der Kantenschärfung beeinflusst. (Er legt fest wie viel Prozent der zweiten Ableitung auf das Original aufaddiert wird.) Je größer α desto stärker die Schärfung.

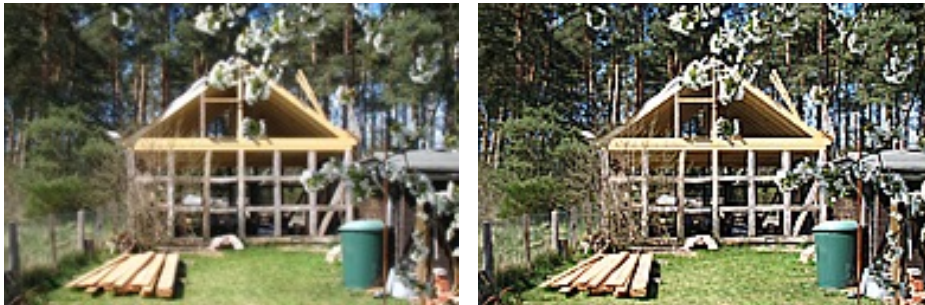
$$X = \text{int}(100/S - 1 + 8)$$

Der Skalierungsfaktor S errechnet sich aus der Summe der Koeffizienten:

$$1/(-8 + 12) = 1/4$$

Damit ergibt sich die Rechnung:

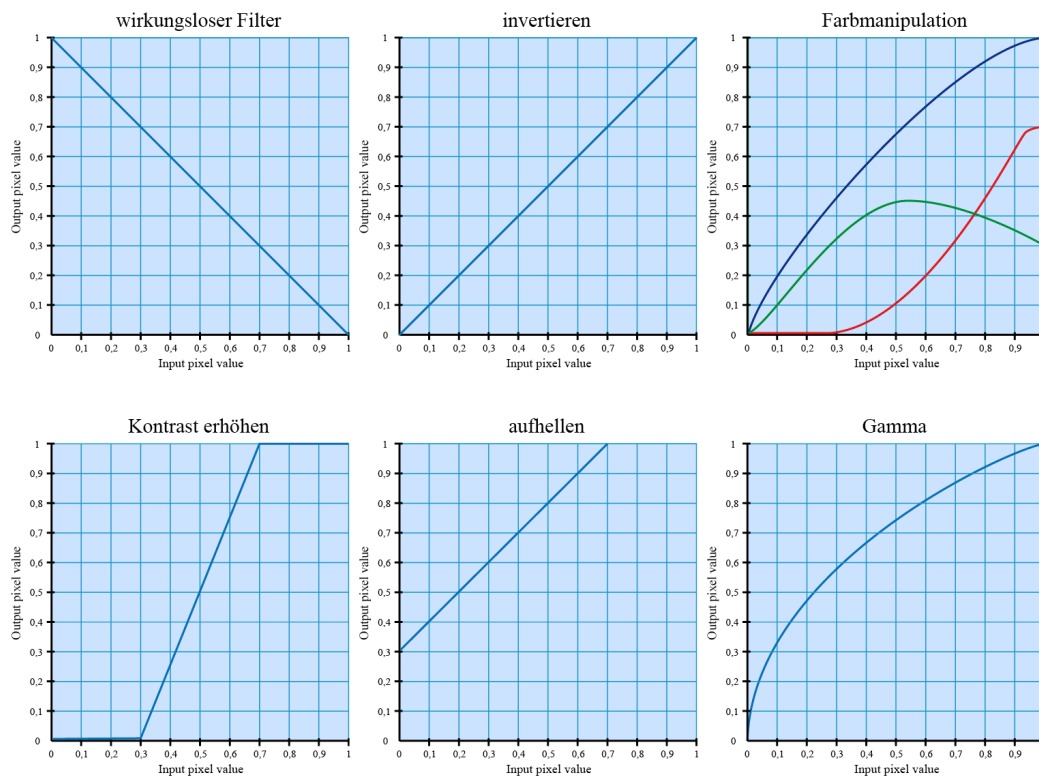
$$1/4 * ((-1 * 15) + (-1 * 80) + (-1 * 81) + (-1 * 17) + (12 * 85) + (-1 * 97) + (-1 * 22) + (-1 * 95) + (-1 * 96)) \\ = 1/4 (545) = 136$$



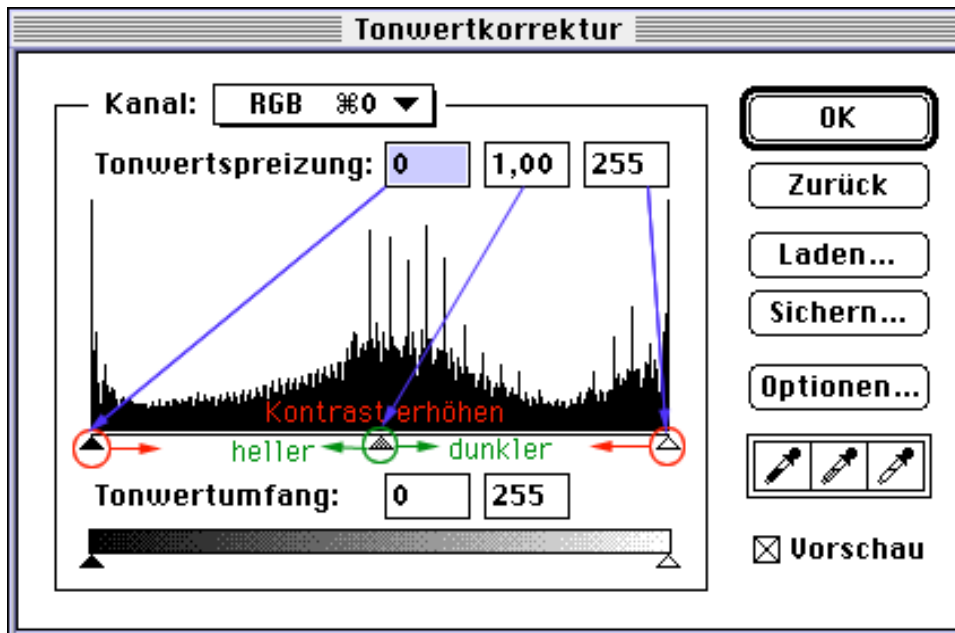
Tonwertkorrektur, Gamma etc.

Andere Filter, wie die Gradationskurve oder die Tonwertkorrektur arbeiten, indem sie die Verteilung der Tonwerte auf eine andere Skala abbilden.

Der Filter „Gradationskurve“ in Photoshop arbeitet nach einem sehr einfachen Prinzip. Auf der X-Achse sind die Ist-Werte und auf der Y-Achse die Soll-Werte aufgetragen. Die frei veränderbare Kurve in der Mitte legt die Übertragung der Ist-Tonwerte auf die Soll-Tonwerte fest.



Das gleiche mach die Tonwertkorrektur. Hier wird lediglich eine andere Darstellung gewählt. Anhand eines Histogramms (ein Diagramm, das die Verteilung der Tonwerte im Bild zeigt) können hier die Punkte manipuliert werden.



Weitere Begriffe

Tonwert

Der Tonwert bezeichnet das Verhältnis von bedruckter zu unbedruckter Fläche und wird in Prozent oder mit einem Grauwert zwischen 0 und 255 angegeben. Der hellste Wert (0% bzw. 255) ist also so hell wie das unbedruckte Papier, der dunkelste Wert (100% bzw. 0) ist so dunkel wie der maximale Farbauftrag.

Densität

Die Densität (auch als optische Dichte bezeichnet) drückt das Verhältnis von auftretender Lichtmenge zu absorbierter Lichtmenge aus. Die Dichte 0 wäre ein idealer Spiegel der alles Licht vollständig reflektiert. Eine unendliche Dichte würde das gesamte Licht vollständig absorbieren.

Dichteumfang

Die Differenz zwischen größter und kleinster Dichte. Der Dichteumfang gibt somit die Kontrastmöglichkeiten eines Bildes an.

Dichteumfang Negative	ca. 3,5
Druck auf Recycling-Papier	1,0 und geringer

Tonwertzuwachs

Bilder erscheinen nach dem Druck oft erheblich dunkler als auf dem Bildschirm. Dieser durch den Belichtungs- und Druckprozess ausgelöste Effekt nennt man Tonwertzuwachs. Der Tonwertzuwachs ist abhängig vom Papier (Saugfähigkeit) und der Rasterweite. Er verhält sich nicht linear, differiert also von Grauwert zu Grauwert. Zusätzlich bewirkt der Lichtfang-Effekt, dass Bilder dunkler erscheinen. Der Tonwertzuwachs beim Druck lässt sich mit Hilfe eines Densitometers ermitteln. Wird z.B. eine 40% Graufäche gedruckt und misst sie der Densitometer als 60% Grau, so beträgt der Tonwertzuwachs 20%. So kann eine optimale Druckkennlinie experimentell ermittelt werden.

Zeitliche Auflösung

Bislang wurde von der Auflösung im Raum (Auflösung) und in der Qualität (Farbtiefe, Quantisierung) gesprochen. In der Computergrafik gibt es jedoch wie bei der Audiobearbeitung auch eine Auflösung der Zeit. Der klassische Kinofilm löst heute die Zeitachse in 24 Bilder/Sekunde (oder frames per second / fps) auf.

Die Wahrnehmungsschwelle unterhalb der man Einzelbilder als Bewegung wahrnimmt liegt bei ca. 20 Bildern/Sekunde (20Hz). Dies ist die **Flimmerfusion** der Stäbchen. Bei den Zapfen liegt sie bei 50 Hz. Da für den Eindruck einer flüssigen Bewegung die Helligkeitsänderungen viel wichtiger sind als Farbänderungen, reicht eine Zeitauflösung von 20 Hz.

Die 24 fps sind ein Kompromiss aus den Wahrnehmungsbedingungen und ökonomischer Überlegungen. Fernsehbilder haben wegen der 50 Hz Wechselspannung in unserem Stromnetz 25 fps. Um Bandbreite zu sparen sendet der PAL Standard allerdings 2*25 Halbbilder. Der US-amerikanische NTSC-Fernsehstandard hat entsprechend seinem 60 Hz Stromnetz 30 fps (genau 29,97 fps).

Literatur

- Abmayr, Wolfgang: "Einführung in die digitale Bildverarbeitung" [B.G. Teubner] Stuttgart, 1994
- Deussen, Oliver: „Bildmainpulation. Wie Computer unsere Wirklichkeit verzerren“ [Springer] Berlin, 2007
- Bach, Michael: "Räumlich durchs Auge. Wie kommt die greifbare Welt in den Kopf?" in: C't [Heise] 1999 Heft 7 S.158-162.
- Encarnaçao, J.; W. Starßer; R. Klein: "Graphische Datenverarbeitung" 4. Aufl. [Oldenbourg] München, 1996
- Homann, Jan-Peter: "Digitales Color-Management" [Springer] Berlin, 1998
- Jähne, Bernd: "Digitale Bildverarbeitung" [Springer] Berlin, 1991
- Kraus, Helmut: "Scannen. Mit Desktop-Scannern zum perfekten Bild" [Addison-Wesley] Bonn, 1996
- Schlicht, Hans-Jürgen: "Bildverarbeitung digital" 2.Aufl. [Addison-Wesley] Bonn, 1995
- Schröter, Jens: „Kraft der Abtastung“ http://www.theorie-der-medien.de/JS/texte/KRAFT_DER_ABTASTUNG/kraft_der_abtastung.html 15.11.2001
- Stefan Zingg: "Praxis digitale Bildverarbeitung Schwarzweiß-Techniken" [Thomson] Bonn, 1996