

16 Optische Eigenschaften des Papiers und der Faserstoffe

Die optischen Eigenschaften des Papiers ergeben sich daraus, wie stark es Licht reflektiert und absorbiert. Die entscheidenden Teil - Eigenschaften sind:

- Helligkeit (Menge des rückgestrahlten Lichts)
- Weiße (Farbigkeit)
- Opazität (Deckvermögen)

Häufig wird der Begriff „Weiße“ auch für den Weißgrad benutzt, der eine definierte Messgröße ist, die aber die Helligkeit und nicht den Farbeindruck misst.

16.1 Beschreibung der optischen Eigenschaften

Seit die Menschen Farbmittel benutzen, haben sie gelernt, dass man die verschiedenen Farben durch Mischen anderer Farben gewinnen kann. Sehr schnell wurde beispielsweise gefunden, dass man ein grünes Pulver erhält, wenn man ein blaues und ein gelbes mischt. Das Auge unterscheidet die einzelnen feinen Farbkörper nicht, sondern empfindet die Mischung als gleichmäßig gefärbt. So haben die Pariser Pointillisten ihre Bilder nur aus einzelnen Farbflecken zusammengesetzt und dabei einen einheitlichen Bildeindruck erzeugt. Auf Farbfernsehen funktioniert nach diesem Prinzip.

Verfolgt man dieses Farb-Mischprinzip weiter, stellt sich heraus, dass man eigentlich nur drei bestimmte Grundfarben braucht, um jeden beliebigen Farbeindruck erzeugen zu können. Diese **Grundfarben sind rot, grün und blau**, genauer gesagt, ganz bestimmte Töne von rot, grün und blau. Diese drei Farben sind insgesamt komplementär, d.h. sie ergeben im rechten Mengenverhältnis eine farblose Mischung. In jedem anderen Mischungsverhältnis erscheint die Mischung in einem bestimmten Farbton. Man kann dabei jeden gewünschten Farbton erzeugen und diesen einfach durch das dazu benötigte Mischungsverhältnis der Grundfarben beschreiben.

Die für das Dreifarbensystem geeigneten Grundfarben werden so ausgewählt, dass sie bei Mischung zu gleichen Anteilen keinen Farbstich mehr erkennen lassen. Diese Mischung sieht, je nach Helligkeit, schwarz, grau oder weiß aus. Damit der optische Eindruck stimmt, müssen die Normfarben eine ganz bestimmte spektrale Wellenlängenverteilung aufweisen.

In Abbildung 16-1 sieht man diese spektrale Energieverteilung der genormten Grundfarben.

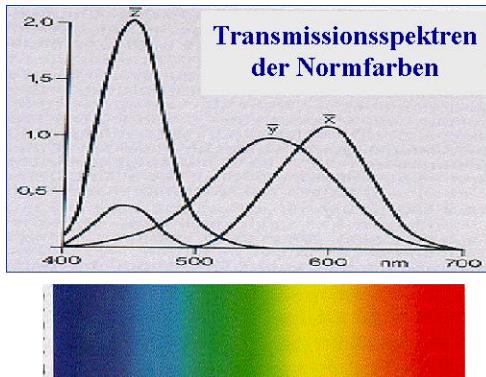


Abbildung 16-1: Transmissionsspektren der Normfarben X (rot); Y (grün); Z (blau)

Zur Kennzeichnung des **Farbeindrucks** genügen dabei schon zwei Parameter (z.B. x und y), die die relative Intensität der Farbkomponenten angeben und sich auf die Gesamtsumme beziehen. Der dritte Parameter z ergibt sich dann aus der Differenz zu 1 (siehe Gleichung 1). Daher kann jede Farbe in einer zweidimensionalen Figur dargestellt werden. Abbildung 16- 2 zeigt. Die Fläche wird durch spektral reine Farben begrenzt, am Rand ist die jeweilige Wellenlänge der entsprechenden Spektrallinie angegeben.

Dieses Farbbeschreibungssystem wurde von einer „commission internationale d'éclairage (CIE)“ entwickelt und wird daher CIE-System genannt.

Gleichung 1: Farbkoordinaten im CIE -System

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

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

Jede Farbe entspricht nach diesem System einem Punkt in einer x-y-Ebene (Farbebene siehe Abbildung 16- 2). Der Unbuntpunkt (Sättigung 0) liegt in diesem System bei $x = y = z = 1/3$. Die Intensität des Farbeindrucks (Sättigung) nimmt von der Mitte der Fläche nach außen zu und erreicht schließlich den Maximalwert von 1, was einem spektral reinen Licht entspricht (das nur eine einzige Wellenlänge bestimmter Farbe enthält). Da es kein Licht gibt, das eine noch reinere Farbe hat als das spektral reine Licht kann es auch keinen stärkeren Eindruck von Farbigkeit geben. Die Farbfläche wird dadurch begrenzt, woraus sich ihre typische Form einer Schuhsohle ergibt. An der Peripherie dieser Sohle kann man die Wellenlängen des sichtbaren Lichtspektrums in nm ablesen. Die gerade Verbindung zwischen 700 und 400 nm begrenzt die Fläche willkürlich, weil das Auge in den außerhalb liegenden Wellenlängenbereichen nichts mehr sieht.

Neben dem Farbeindruck wird noch die **Helligkeit** angegeben. Dies muss so geschehen, dass der Helligkeitswert den subjektiven Eindruck des Auges wiedergibt. Die Helligkeit wird im ursprünglichen CIE - System durch den Wert Y beschrieben.



Die Farben werden entsprechend dem physiologischen Eindruck definiert.

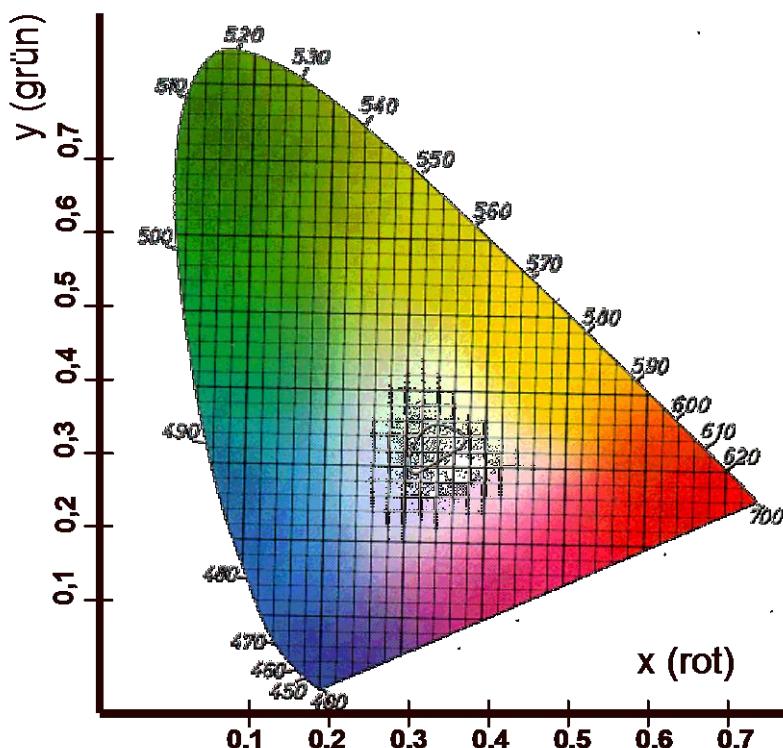


Abbildung 16- 2: Farbebene entsprechend CIE ($x,y,-$ Koordinaten: $z = 1 - x - y$)

Ein Nachteil dieses ursprünglichen CIE – Systems liegt darin, dass die physiologische Empfindlichkeit des Auges nicht mit den Abständen in der Farbfläche übereinstimmt. Im blauen Bereich werden schon ganz nahe nebeneinander liegende Punkte als verschiedenfarbig empfunden, während im grünen Bereich Punkte, die viel weiter voneinander entfernt sind noch als gleich gefärbt empfunden werden.

Dieser Nachteil kann in einer moderneren Anordnung der Farben nach dem sogenannten CIELAB – System weitgehend vermieden werden. Dabei wird durch eine geeignete Umrechnung der Koordinaten die Farbebene sehr anschaulich so gegliedert, dass die Komplementärfarben in einem rechtwinkeligen Koordinatensystem (mit den Koordinaten „a“ und „b“) jeweils symmetrisch zum Nullpunkt („Unbuntpunkt“) angeordnet sind. Es

ergibt sich so ein Farbkreisel mit einer Blau-Gelb- und einer Rot-Grün-Achse. (siehe Abbildung 16- 3).

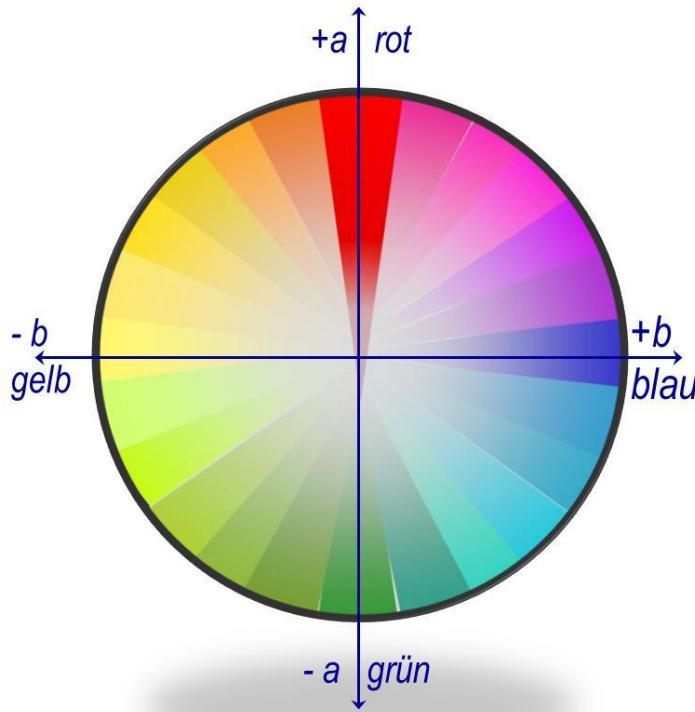


Abbildung 16- 3: Farbkreisel entsprechend dem CIELAB – System (die Farbflächen entsprechen jeweils nur einer Farbsättigungsstufe)

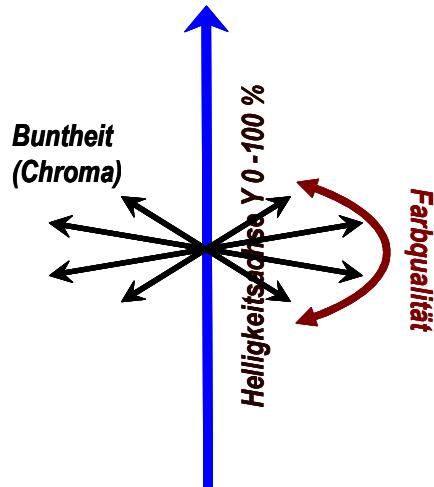
11.1.1 Helligkeit

Die physiologisch empfundene Weiße hängt sowohl von der Intensität des reflektierten Lichts (gekennzeichnet durch den Y -Wert) als auch vom Farbwert (Abstand zum Unbuntpunkt) ab. Häufig wird aber für eine Charakterisierung von Zellstoffen direkt die Helligkeit verwendet.

Die Helligkeitsachse wird im modifizierten System mit L bezeichnet. Nach den Koordinaten heißt dieses Bezeichnungssystem (Lab -System) (siehe Abbildung 16- 4).

11.1.2 Farbigkeit

Die Farbigkeit wird durch die zwei Größen „Farbe“ und „Sättigung“ beschrieben. Dabei gibt der Abstand des Farborts von der Unbuntachse die „Buntheit (Chroma) wieder. Die Sättigung bezeichnet das Verhältnis zwischen Buntheit und Helligkeit, was dem physiologischen Eindruck der Farbintensität am nächsten kommt.



Sättigung: Verhältnis der Buntheit zur Helligkeit

Abbildung 16- 4: Kennzeichnung des Farbeindrucks im Farbraum

Die Farbe wird durch das Wellenlängen - Spektrum oder den Anteil der drei Grundfarben der Trichromie (X, Y, Z) im reflektierten Licht charakterisiert (Tabelle 16- 1).

Tabelle 16- 1: Grundfarben der Trichromie

Farbkomponente			
Additive Mischung vor schwarzem Hintergrund	rot (X)	grün (Y)	blau (Z)
Subtraktive Mischung vor weißem Hintergrund	purpur (magenta)	gelb	blaugrün (cyan)

Die Druckfarben filtern das vom Papier zurückgestrahlte weiße Licht, wie es in Abbildung 16- 5 gezeigt wird. Man kann auch alle Farben erzeugen, indem man verschieden gefärbtes Licht (z.B. aus farbigen Scheinwerfern) kombiniert. Diese additive Mischung wird in Abbildung 16- 6 illustriert. Die drei für die additive Mischung erforderlichen Farben nennt man die Grundfarben der Trichromie. Diese Grundfarben leiten sich von praktischen Farbstoffen ab und besitzen nicht nur eine Lichtwellenlänge sondern entsprechende Spektren (Lichtintensität als Funktion der Wellenlänge), die in Abbildung 16- 6 eingezeichnet sind.

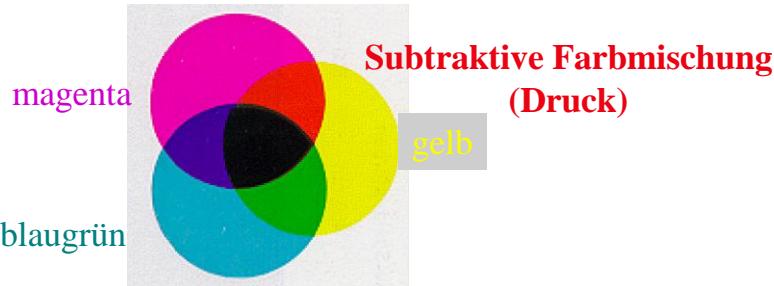


Abbildung 16- 5: Zusammensetzung der Farben durch Subtraktion aus dem weißen Licht



Durch Kombination der drei Normfarben kann jeder beliebige Farbeindruck erzeugt werden.

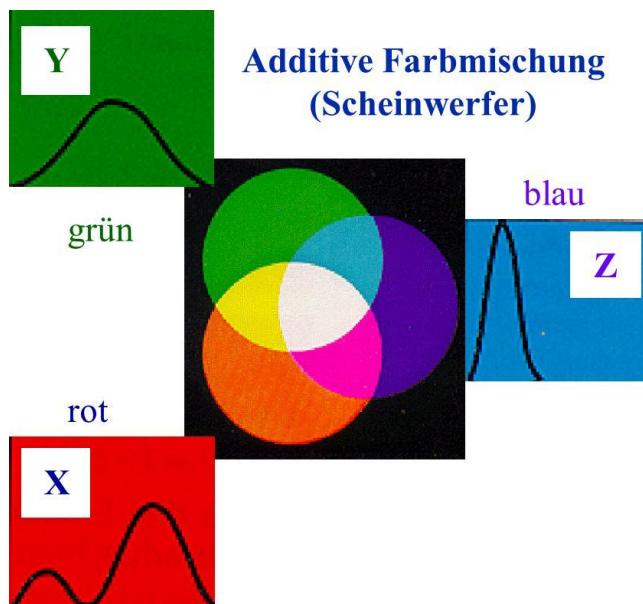


Abbildung 16- 6: Addition von verschieden farbigem Licht

Die Buntheit gibt an, wie spektral rein das betrachtete Licht ist. Licht einer einzigen Wellenlänge hat die Buntheit 1, rein weißes Licht dagegen die Sättigung 0 (auch die „Farbtöne“ grau und schwarz haben die Buntheit null). Abbildung 16- 7 zeigt, dass das Transmissionsspektrum einer Farbe umso flacher wird, je geringer die Sättigung ist. Der Grauwert gibt dagegen an, wie viel Licht insgesamt durchgelassen oder remittiert wird.

Die stoffliche Grundlage für ein Spektrum ist die Wechselwirkung des Lichts mit gefärbten Verbindungen.

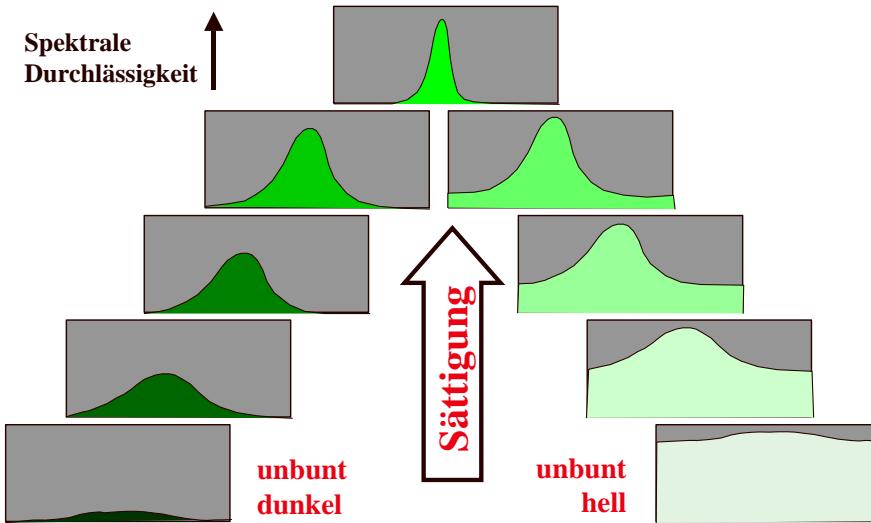


Abbildung 16-7: Veränderung des Spektrums der grünen Farbe in Abhängigkeit von der Sättigung



Der Farbeindruck entsteht durch Intensität und Selektivität der Lichtabsorption.

16.2 Ursachen für die optischen Papiereigenschaften

11.1.3 Physikalische Ursachen für die optischen Papiereigenschaften

Aus der Wechselwirkung des Lichts mit dem Faservlies des Papiers ergeben sich die optischen Eigenschaften. Besonders wichtig sind das Rückstreu- und das Deckvermögen und die daraus abgeleiteten Größen Helligkeit und Opazität. Diese hängen vor allem von der Lichtbrechung und der unspezifischen Absorption des Lichts ab.

Abbildung 16-8 zeigt schematisch, dass Licht, das auf ein Teilchen (z.B. Faser oder Füllstoff) trifft, teilweise an diesem gestreut wird und zum Teil absorbiert (geschluckt) wird. Im gestreuten (diffus reflektierten) und im durch das Teilchen hindurch scheinende Licht fehlen die Wellenlängen die im Teilchen adsorbiert werden. Wird z.B. blaues Licht absorbiert, erscheinen durchtretendes und gestreutes Licht gelblich (gelb ist die Komplementärfarbe von blau).

Im Papier tritt Streuung an den inneren Grenzflächen (d.h. praktisch an den Oberflächen der Fasern und Mineralien, die an Luft (Poren) grenzen auf.

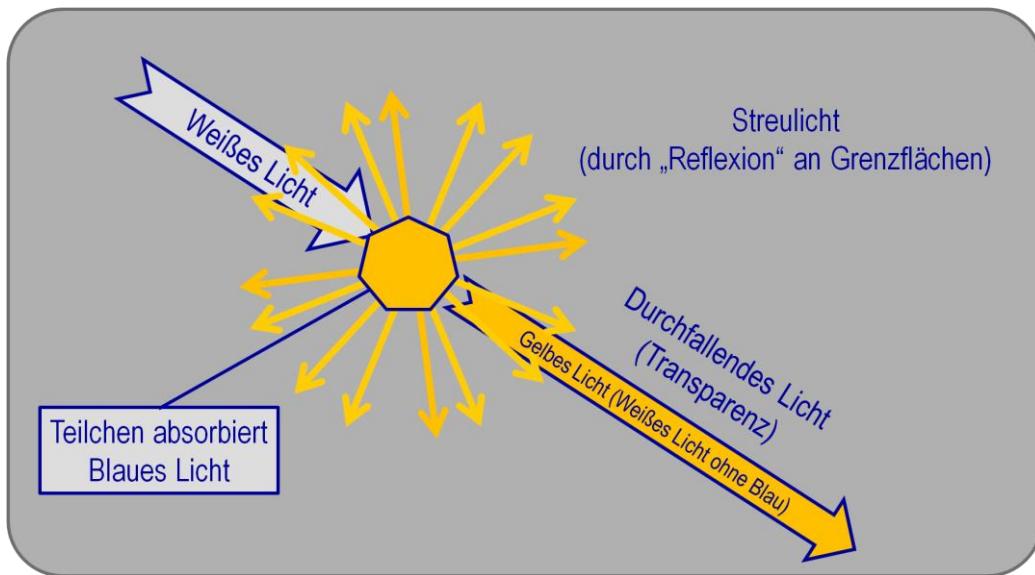


Abbildung 16-8: Wechselwirkung von Licht mit einem (gelben) Teilchen

Die optischen Eigenschaften (z.B. Opazität und Remission) eines Blattes ergeben sich aus der Aufsummierung aller mikroskopischen Wechselwirkungs-Vorgänge.

Die Opazität gibt das optische Deckvermögen eines Blattes an und ist das Gegenteil der Transparenz. Die Theorie von Kubelka - Munk benutzt zwei spezifische Materialkonstanten, die Streukonstante (S) und den Absorptionsfaktor (K) zur Beschreibung des Deck- und des Remissionsvermögens. Der Remissionsfaktor R_{∞} ist ein Maß für die Helligkeit eines Blattstapels. Er ist naturgemäß umso größer, je stärker die Lichtstreuung und je geringer die Absorption ist (siehe Gleichung 2 und Abbildung 16- 9).

Gleichung 2: Remissionsfaktor nach Kubelka-Munk
(K = Absorptionsfaktor, S = Streukonstante)

$$R_{\infty} = 1 + \frac{K}{S} - \sqrt{K^2/S^2 + 2K/S}$$

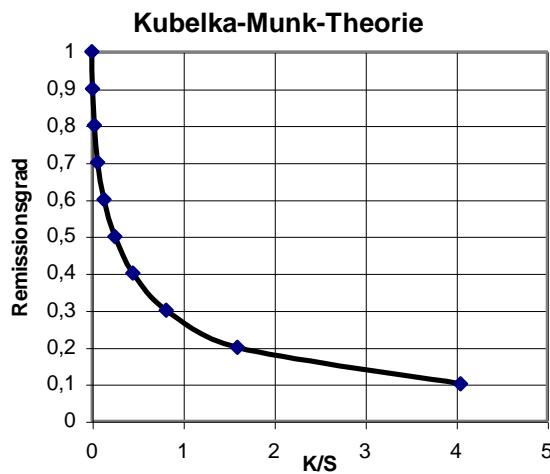


Abbildung 16- 9: Abhängigkeit des Remissionsfaktors von Streu- und Absorptionskoeffizienten

Die Opazität hängt gleichsinnig positiv von Streu- und Absorptionsfaktor ab. Nimmt die Lichtstreuung ab, wird das Papier stärker durchscheinend, aber auch eine Abnahme der Lichtabsorption erhöht die Transparenz. Bei Zellstoffen hängen die einzelnen Faktoren von der Morphologie und der chemischen Zusammensetzung der Fasern ab (Tabelle 16-2).

Tabelle 16- 2: Ursachen für Lichtstreuung und -absorption von Zellstoffen

Optischer Faktor	Mechanismus	Verantwortliche Komponenten im Zellstoff
Streufaktor	Streuung an inneren Grenzflächen (Bereiche mit unterschiedlichen Brechungsindices)	α -Cellulose, rekristallisierte Hemicellulosen, innere Streuflächen
Absorptionsfaktor	Chromophore	Lignin oder Ligninprodukte



Die Lichtabsorption hängt besonders stark von der chemischen Zusammensetzung ab.

Die Größe des Streufaktors wird von der Art des Rohstoffs und der chemischen und mechanischen Behandlung beeinflusst.

Tabelle 16- 3: Einfluss von Verfahrensparametern auf den Streukoeffizienten

Verfahrensparameter	Einfluss auf den Streukoeffizienten	Erklärung
Aufschlussgrad	S steigt mit steigendem Aufschlussgrad	höherer α -Gehalt, mehr Hohlräume
Verfahren	S liegt bei Sulfat höher als bei Sulfit	mehr rekristallisierte Anteile
Holzart	Laubholz hat höheres S	höhere spezifische Oberfläche
Mahlung	S sinkt mit steigendem Mahlgrad	streuende freie Oberfläche verklebt bei Blattbildung
Trocknung	S steigt	Bildung von streuenden Mikrorissen in im glasartig verhornten Kohlenhydrat - Gel

Die Streuung hängt vorwiegend von Brechungsindex und Feinheit der Partikel ab, die Absorption von gefärbten Fremdstandteilen oder Farbstoffen.

Zusammenhang zwischen optischen Kenngrößen (Optische Zustandsebene)

Die wichtigsten optischen Eigenschaften eines Papiers sind Opazität und Lichtremission. Letztere wird durch den Reflexionsfaktor (besser „Remissionsfaktor“) beschrieben, der angibt, wie viel Licht von einer Probe insgesamt zurückgestrahlt wird, bezogen auf die Beleuchtungsintensität. Er ist maximal eins, wird jedoch nicht absolut gemessen, sondern auf einen Weißpulver-Eichstandard bezogen. Wenn nicht anders angegeben, bezieht sich der Wert auf Normlicht. Man unterscheidet zwischen R_0 und R_∞ aus deren Verhältnis sich die Opazität errechnet.

R_0	Reflexionsgrad über Schwarz	Gemessen an einer Probe (Blatt) über schwarzem Hintergrund
R_∞	Reflexionsgrad einer (unendlich) dicken Schicht	Gemessen an einer Probe die so dick ist, dass kein Licht mehr durchscheint (genügend dicker Blattstapel)
$O = \frac{R_0}{R_\infty}$	Opazität	Deckkraft einer Probe

Sowohl die Opazität als auch der Remissionsgrad R_∞ hängen direkt sowohl von Absorptions- wie auch vom Streukoeffizienten ab. Die Zusammenhänge kann man in einer „optischen Zustandsebene“ darstellen:

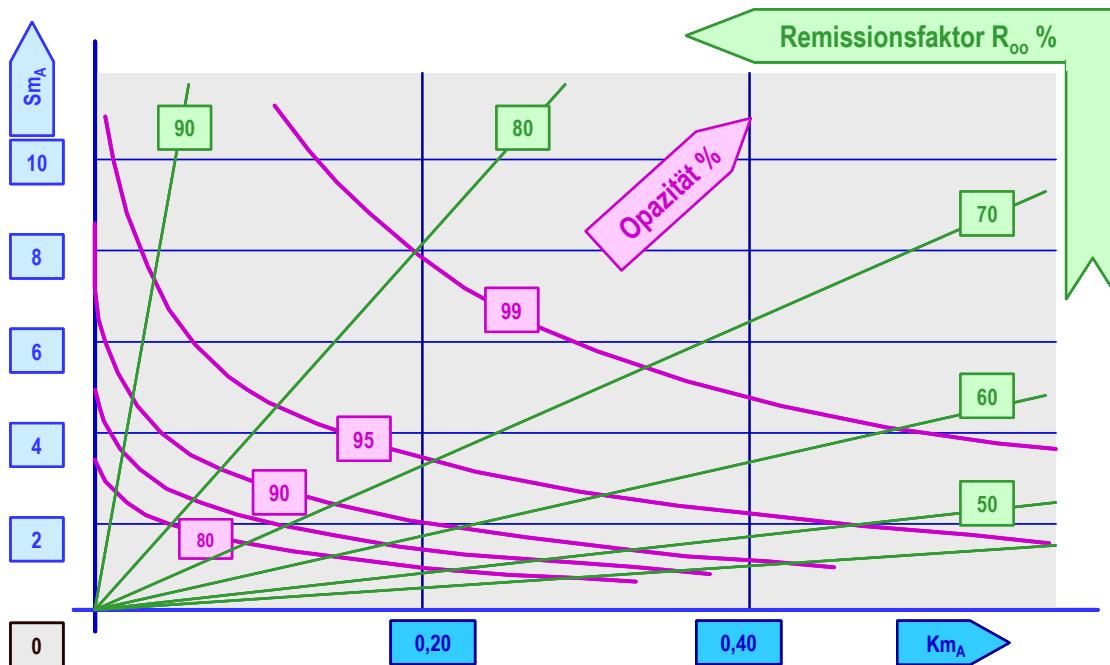


Abbildung 10: Optische Zustandsebene

Es handelt sich eigentlich um eine dreidimensionale Darstellung der Opazität bzw. des Remissionsfaktors als Funktion der jeweils mit der Flächenmasse multiplizierten optischen Faktoren. (Die Faktoren K und S sind massebezogen, d.h. sie gelten formal für ein Blatt mit dem Flächengewicht von $1\text{g}/\text{m}^2$. Um die Wirkung eines Blatts mit der Flächenmasse m_A zu beschreiben, muss man den Faktor mit m_A multiplizieren. Die Funktionen der Opazität und der Remission werden durch Höhenschichtlinien in der zweidimensionalen Darstellung angegeben (wie die Höhe von Bergen in einer Landkarte).

11.1.5 Chemische Ursachen der Farbigkeit

Ein Stoff erscheint dadurch farbig, dass er Chromophore enthält. Dies sind chemische Verbindungen, die Licht im sichtbaren Bereich des Spektrums absorbieren. Die Farbigkeit von Naturstoffen beruht auf derartigen organischen Verbindungen. Bei der Absorption von Licht wird von einem Chromophor jeweils ein Lichtquant einer bestimmten Wellenlänge eingefangen und dadurch werden Bindungselektronen auf ein höheres Energieniveau gehoben (elektronische Anregung). Liegt dieses mögliche Anregungsniveau sehr hoch, muss viel Energie aufgenommen werden. Die aufgenommenen Lichtquanten haben eine um so kürzere Wellenlänge, je höher ihr Energieinhalt ist.

Die meisten organischen Verbindungen brauchen eine hohe Anregungsenergie und absorbieren daher Licht nur im UV-Bereich des Spektrums und sind also farblos. Die π -Elektronen der Doppelbindungen können leichter auf ein höheres Energieniveau gehoben werden und absorbieren oft schon Licht im kurzwelligsten d.h. blauen Spektralbereich (daher erscheinen sie gelb). Konjugierte Doppelbindungen können noch leichter angeregt werden und zwar umso leichter, je mehr Doppelbindungen sich in Konjugation befinden. Je größer also ein solches chromophores System wird, desto mehr verschiebt sich die Lichtabsorption vom blauen über den grünen in den roten Bereich des Spektrums (entsprechend verschiebt sich der Farbeindruck von gelb → rot → grün → blau). Ein Chromophor zeichnet sich durch ein Absorptionsspektrum mit einem oder mehreren deutlichen Maxima aus.

Abbildung 16- 11 zeigt an einem Beispiel von verschiedenen Verbindungen mit konjugierten Doppelbindungen, wie sich die Absorptionswellenlänge des Chromophors mit steigender Anzahl von anregbaren π -Elektronen verschiebt. Der kleinste Chromophor (oberste Formel in der Abbildung 16-) absorbiert im blauen Bereich und erscheint daher gelb, der längste im roten und erscheint daher blauviolett.



Je größer die Chromophore sind, desto langwelliger absorbieren sie.

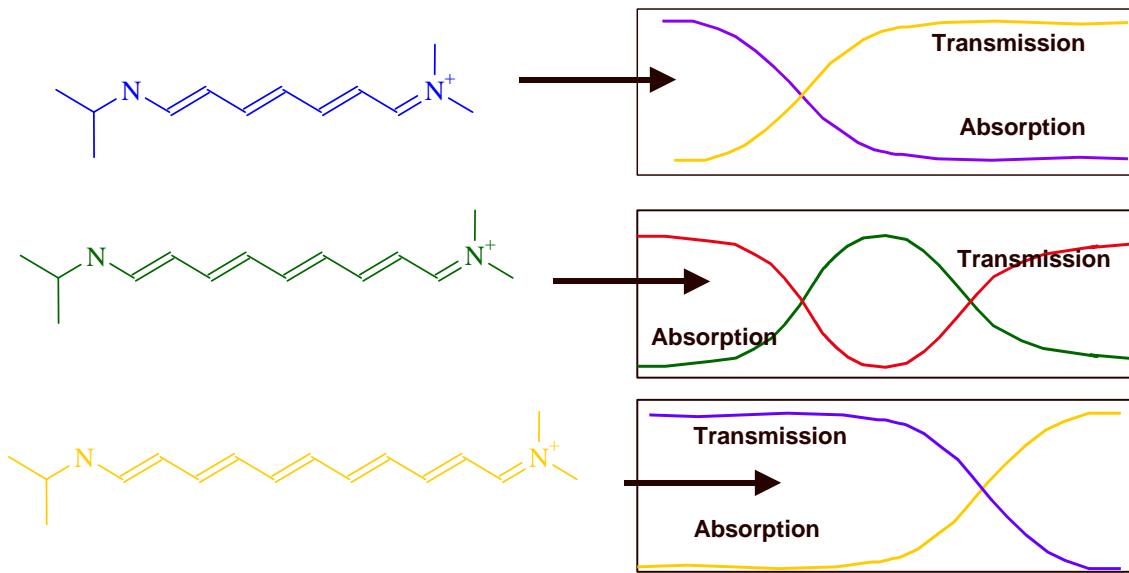


Abbildung 16-11: Absorptions- und Transmissionsspektren verschiedener großer Chromophore

Sind verschiedene Chromophore vorhanden, entstehen Mischfarben mit geringer Brillanz. Im Spektrum werden die Maxima immer mehr verwischt. Bei gleichmäßiger Absorption im gesamten sichtbaren Spektralbereich verschwindet der Farbeindruck, es entsteht eine graue oder schwarze „Färbung“. Für den visuellen Eindruck sind die Transmissions- bzw. Remissionsspektren verantwortlich, die den Absorptionsspektren komplementär sind.

Das native Lignin besitzt verschiedene Chromophore, die schwerpunktmäßig im blauen Spektralbereich absorbieren, es erscheint daher rotbraun. Das Restlignin des Sulfataufschlusses enthält noch mehr chromophore Gruppen als das native Lignin und ist daher dunkler gefärbt. Die anderen Hauptbestandteile der nicht gealterten Zellstoffe sind farblos.

16.3 Wirkungen der Bleiche

Zellstoffe für die Papierherstellung sollen möglichst hell und weiß sein und diese Eigenschaften auch im Gebrauch behalten. Die Komponente im Holz, die in dieser Hinsicht am meisten stört, ist das Lignin, das auch unmittelbar den Absorptionsfaktor bestimmt.

Ein wesentliches Ziel des Holzaufschlusses ist es, das Lignin möglichst vollständig zu entfernen und dabei die Cellulose weitgehend zu erhalten, bei Papierzellstoffen möchte man daneben auch noch die Hemicellulosen schonen. Aber kein bekanntes Aufschlussverfahren arbeitet so selektiv, dass man nicht doch auf einen großen Teil der Polysaccharide verzichten muss und der verbleibende Anteil davon stark geschädigt ist, wenn man den Aufschluss so weit treibt, dass das Lignin vollständig herausgelöst wurde.

Man geht daher immer einen Kompromiss ein und lässt noch einen mehr oder großen Prozentsatz des Lignins im Zellstoff.

Je nach Rohstoff und Aufschlussverfahren finden wir im Zellstoff verschiedene Mengen von Restlignin, die sich auch in ihrer chemischen Zusammensetzung und in ihrer Weißheit unterscheiden. Allgemein gilt:

- Nadelholzzellstoffe enthalten mehr Lignin als Laubholzzellstoffe
- Sulfatzellstoffe enthalten mehr Lignin als Sulfitzellstoffe
- Sulfatrestlignin ist dunkler als Sulfitrestlignin

Dies ist in Abbildung 16- 12 zu erkennen.

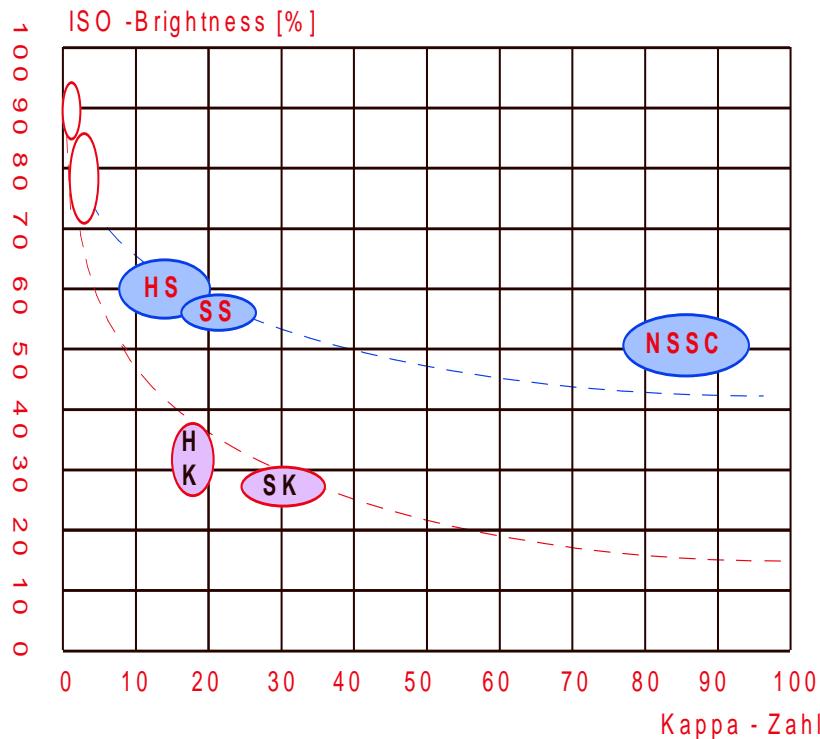


Abbildung 16- 12: Helligkeit und Ligningehalt von Zellstoffen
(links: gebleicht; H: Hochausbeutezellstoff; S: Normal-Papierzellstoff; K: Kraft; S: Sulfit; NSSC: Neutralsulfithalbzellstoff)

Um die gewünschte Weißheit und Helligkeit (ausgedrückt durch die Messwerte „Farbort“ und „Weißgrad“) zu erhalten, muss der Zellstoff noch einer Bleiche unterzogen werden. Dabei werden entweder nur die Chromophore des Lignins zerstört, oder das Lignin löslich gemacht und entfernt (siehe Abbildung 16- 12). Weist der gebleichte Zellstoff eine

Weiße über 90 % ISO aus, spricht man von einem voll - gebleichten Stoff. Semi - gebleichte Zellstoffe haben Weißgrade von 60 - 70%.

Nicht nur der Weißgrad*, sondern die spektrale Abhängigkeit der Lichtreflexion und -absorption hängen vom Rohmaterial und dem Aufschlussverfahren ab (siehe Abbildung 16- 13.)

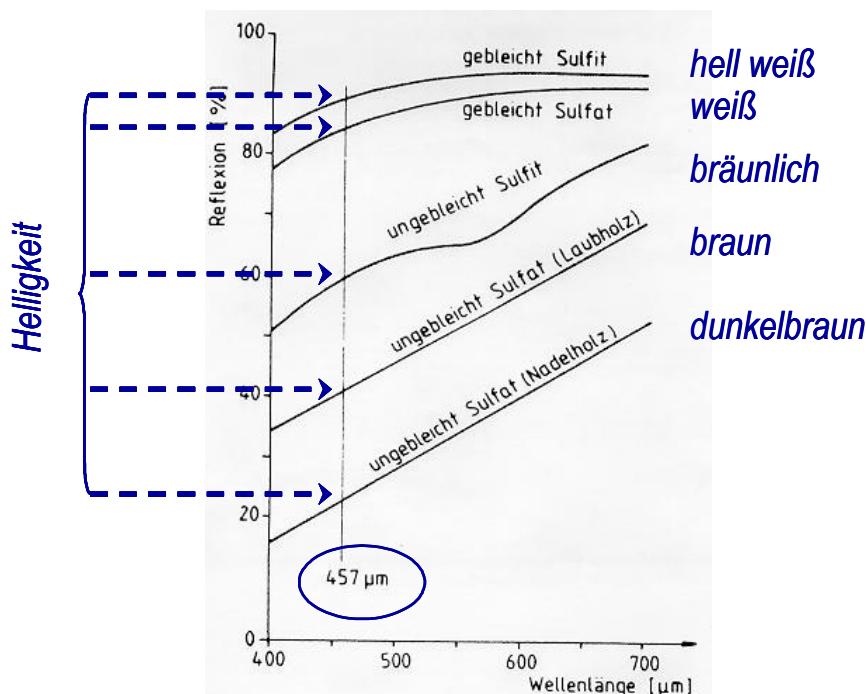


Abbildung 16- 13: Abhängigkeit der Reflexionskurven gebleichter Zellstoffe vom Rohmaterial und dem Aufschlussverfahren

16.4 Beschreibung der optischen Wirkungen von prozesstechnischen Maßnahmen auf die optischen Eigenschaften

Die optische Zustandsebene eignet sich sehr gut dazu, aufzuzeigen, wie sich die optischen Eigenschaften eines Papiers ändern, wenn die Parameter der Papierherstellung modifiziert werden.

Man schätzt zunächst ab, wie sich die Faktoren S und K ändern werden und zeichnet die Verschiebung durch einen Pfeil in der optischen Zustandsebene ein. Man kann dann unmittelbar ablesen, wie sich Opazität und Remission verändern werden.

* Der Weißgrad wird unterschiedlich definiert. Am einfachsten wird der spektrale Remissionsfaktor R_{457} genommen, der mit spektral reinem Licht einer Wellenlänge von 475 bestimmt wird.

Dies ist in Abbildung 14 schematisch für einige Prozessschritte gezeigt.

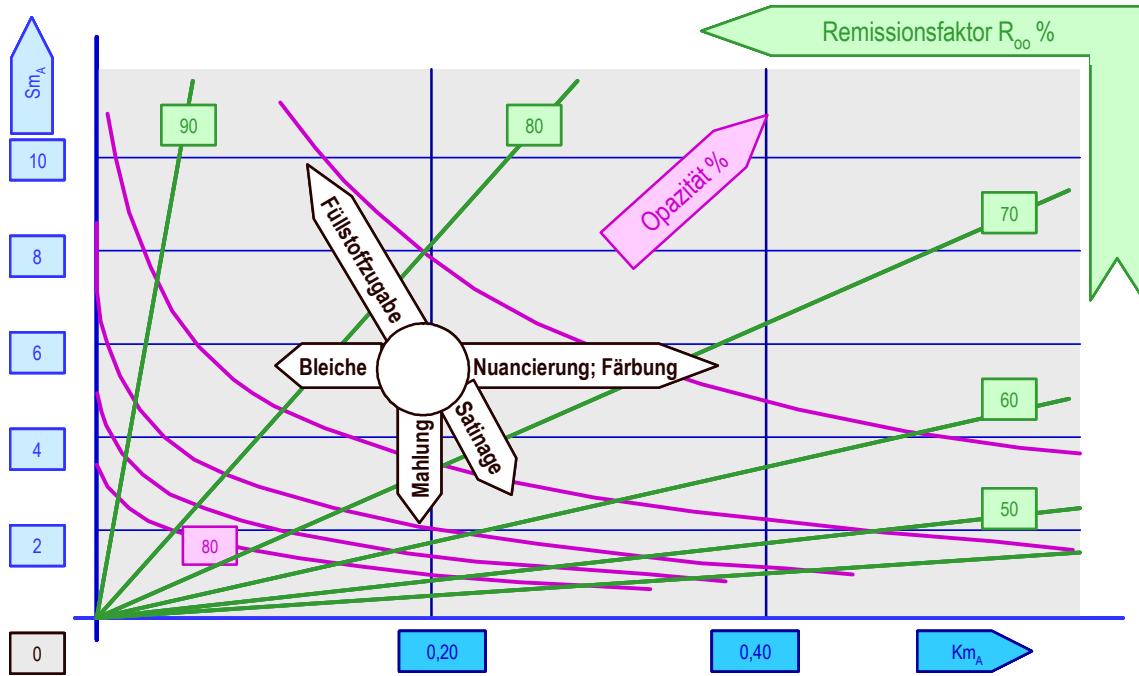


Abbildung 14: Beschreibung der Wirkungen von technischen Maßnahmen auf die optischen Eigenschaften anhand der optischen Zustandsebene

z.B. sinkt durch die Bleiche der Absorptionskoeffizient K , wir bewegen uns in der Zustandsebene nach links, was anzeigt, dass sowohl Remission als auf Opazität ansteigen. Mahlung verringert den Streufaktor und bewirkt daher eine Abnahme von Opazität und Remission.