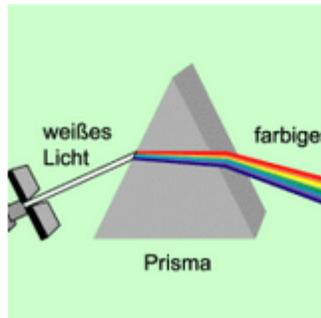


Farbzerlegung durch Prismen und Gitter

Weißes Licht besteht aus unterschiedlichen Farben. Eine Farbzerlegung oder Dispersion kann mithilfe von Prismen oder Gittern erfolgen. Die Zerlegung von weißem Licht in seine Bestandteile ergibt: Weißes Licht besteht aus den Spektralfarben Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau und Violett.

Farbzerlegung durch Prismen

Wird weißes Licht auf ein Prisma gelenkt, so entsteht hinter dem Prisma ein prächtiges Farbband mit einer Reihe charakteristischer Farben (Bild 1). Es kommt zur Auffächerung des Lichtes in seine Bestandteile, die Spektralfarben. Spektralfarben sind die Farben Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau und Violett. Die Farbzerlegung von Licht in seine Bestandteile wird auch als Dispersion bezeichnet.



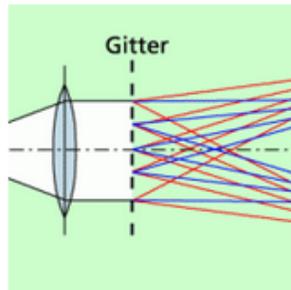
Ursache für die Farbzerlegung

Die Ursache für die Dispersion des weißen Lichtes durch ein Prisma besteht in Folgendem: Licht unterschiedlicher Farbe und damit unterschiedlicher Wellenlänge hat in einem Stoff, z. B. in Glas, eine unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit. So ist in Glas die Ausbreitungsgeschwindigkeit von blauem Licht geringer als die von rotem Licht. Demzufolge wird nach dem Brechungsgesetz blaues Licht stärker gebrochen als rotes Licht (Bild 2). Infolge der unterschiedlichen Brechung der verschiedenen Anteile des weißen Lichtes kommt es zu einer Auffächerung des Lichtes, zur Bildung eines Spektrums. Man bezeichnet es auch als Prismenspektrum. Bei Verwendung von weißem Licht entsteht ein kontinuierliches Spektrum.

Farbzerlegung durch Gitter

Verwendet man anstelle eines Prismas ein optisches Gitter, so tritt an diesem Gitter Beugung auf. Das gebeugte Licht überlagert sich, wobei die Lage der Interferenzmaxima auf einem Schirm von der Wellenlänge abhängig ist (Bild 3). Es entstehen farbige Interferenzstreifen, die in ihrer Gesamtheit ein Spektrum bilden, das auch als Gitterspektrum bezeichnet wird. Bei Verwendung von weißem Licht entsteht wie beim Prisma ein kontinuierliches Spektrum.

Ein **Prismenspektrum** und ein **Gitterspektrum** unterscheiden sich lediglich in der Abfolge der Farben. Trifft einfarbiges Licht (Licht einer Wellenlänge bzw. Frequenz) auf ein Prisma oder auf ein Gitter, so wird das Licht zwar gebrochen bzw. gebeugt und interferiert, es kann aber nicht aufgespalten werden. Licht, das unterschiedliche Farben bzw. Wellenlängen enthält, wird dagegen in seine Bestandteile zerlegt.



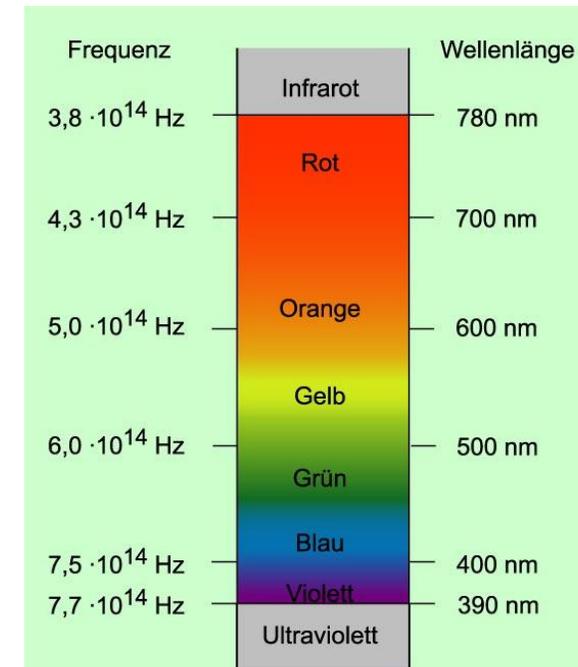
Wellenlängen und Frequenzen der Spektralfarben

Der für uns sichtbare Bereich des Spektrums (Bild 4) umfasst einen Wellenlängenbereich von 390 nm bis 780 nm. Das entspricht einem Frequenzbereich von $7,7 \cdot 10^{14}$ Hz bis $3,8 \cdot 10^{14}$ Hz.

In Richtung größerer Wellenlängen (kleinerer Frequenzen) schließt sich das infrarote Licht an, in Richtung kürzerer Wellenlängen (größerer Frequenzen) das ultraviolette Licht.

Nachfolgend sind die Frequenzen und Wellenlängen für die sechs Spektralfarben angegeben. Aus den Daten ist erkennbar, dass jede Spektralfarbe einen bestimmten Wellenlängenbereich umfasst.

Es ist deshalb zu unterscheiden zwischen Licht einer Spektralfarbe (umfasst immer einen Wellenlängenbereich) und Licht einer bestimmten Wellenlänge (ist immer Teil des Lichtes einer Spektralfarbe).



Beugungsgitter sind entscheidende optische Komponenten für eine Vielzahl von Anwendungen, z. B. für Spektrometer, andere Analysegeräte, Telekommunikation und Lasersysteme. Die Gitter enthalten eine mikroskopisch kleine, periodische Rillenstruktur, die das einfallende Licht durch Beugung in mehrere Strahlengänge aufteilt, so dass sich Licht verschiedener Wellenlängen in unterschiedliche Richtungen ausbreitet. Damit ähnelt die Funktion von Beugungsgittern der von Dispersionsprismen, wobei das Prisma Wellenlängen durch wellenlängenabhängige Brechung statt durch Beugung trennt (*Abbildung 1*). Für eine Diskussion der Unterschiede zwischen Beugung und Brechung von Licht lesen Sie unseren Anwendungshinweis [Optics 101: Level 1 Theoretical Foundations](#).

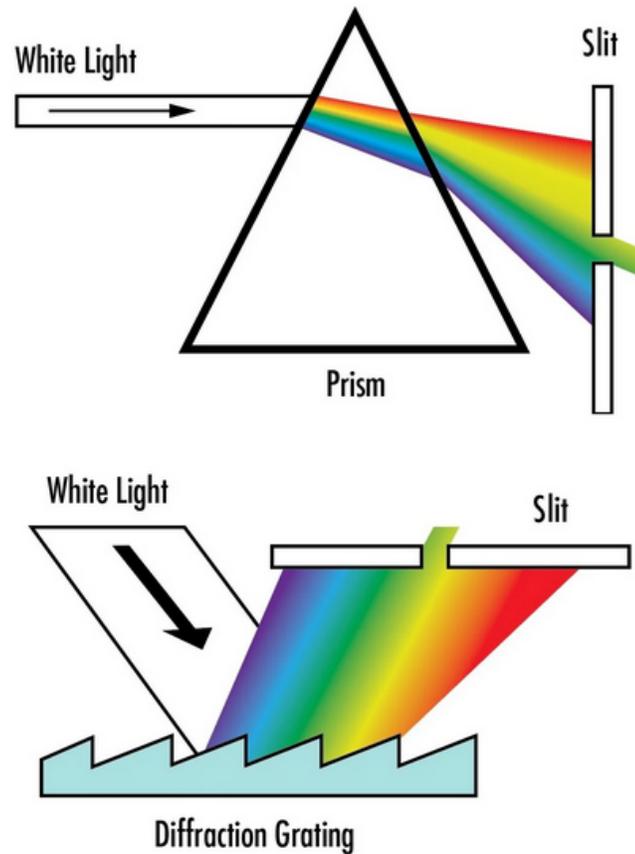


Abbildung 1: Während Dispersionsprismen Wellenlängen durch Brechung trennen (oben), trennen Beugungsgitter stattdessen Wellenlängen durch Beugung aufgrund ihrer Oberflächenstruktur (unten).

<https://www.edmundoptics.de/knowledge-center/application-notes/optics/all-about-diffraction-gratings/>

Licht, das auf ein Gitter fällt, wird nach dieser Gittergleichung gebeugt:

$$m\lambda = d(\sin \alpha + \sin \beta) \quad (1)$$

m ist ein ganzzahliger Wert, der die Beugungsordnung (oder spektrale Ordnung) beschreibt, λ ist die Wellenlänge des Lichts, d ist der Abstand zwischen den Rillen des Gitters, α ist der Einfallswinkel des Lichts und β ist der Beugungswinkel des Lichts, das das Gitter verlässt. Konstruktive Interferenz verschiedener Beugungswellenfronten tritt bei ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge auf, weshalb „ m “ in *Gleichung 1* erscheint. m definiert die Beugungsordnungen, wobei Beugungswinkel $m = 1$ als Beugung 1. Ordnung, Winkel mit $m = 2$ als Beugung 2. Ordnung und so weiter angesehen werden (*Abbildung 2*). Wenn $m = 0$ ist, wird das Licht entweder direkt vom Gitter reflektiert oder durch das Gitter transmittiert, je nachdem, ob es sich um ein Reflexions- oder Transmissionsgitter handelt, und dieses Licht wird als Beugung „0-ter Ordnung“ betrachtet. Im Gegensatz zu Dispersionsprismen liegen die unteren Wellenlängen immer näher am direkt reflektierten oder durchgelassenen Licht, in diesem Fall der 0-ten Ordnung. Bestimmte Ordnungen können sich überschneiden. Alle Winkel werden vom senkrechten Lichteinfall zum Gitter gemessen.

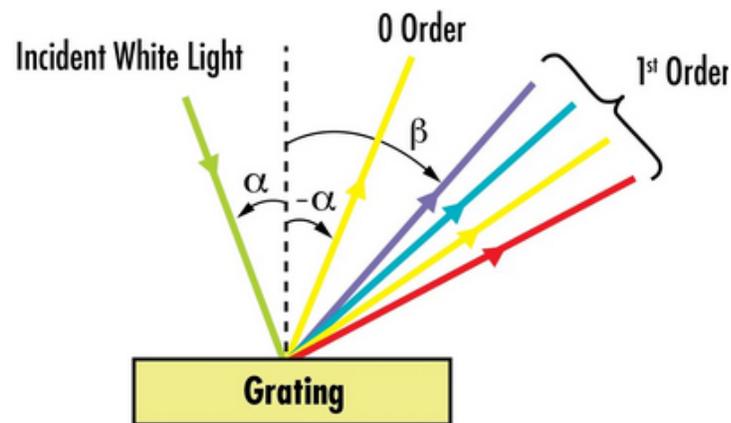


Abbildung 2: Während ein Teil des Lichts direkt von diesem Gitter als Beugung 0-ter Ordnung reflektiert wird, werden andere Teile des einfallenden Lichts in Abhängigkeit von der Wellenlänge in Winkeln 1. Ordnung gebeugt. Kleinere Anteile des einfallenden Lichts werden auch in größeren 2. und 3. Ordnungen bei höheren Winkeln getrennt.

Das Rillenmuster eines Gitters, oder der Abstand zwischen den Rillen (d), bestimmt die Winkel, unter denen verschiedene Ordnungen gebeugt werden. In manchen Situationen kann der Rillenabstand so gestaltet sein, dass er über das Gitter variiert, um unterschiedliche Beugungsgrade über das gesamte Element zu erreichen. Das Rillenprofil des Gitters hingegen beschreibt deren Form und bestimmt, wie viel Licht gebeugt wird und wie viel einfach vom Gitter reflektiert oder durchgelassen wird. Der Prozentsatz des Lichts, der bei der jeweiligen Wellenlänge gebeugt wird, wird in Effizienzdiagrammen dargestellt. Der Effizienzgrad ist für verschiedene Polarisationszustände unterschiedlich, daher zeigen die Effizienzdiagramme in der Regel unterschiedliche Kurven für s- und p-Polarisation. Oft werden metallische oder dielektrische Beschichtungen zu den Gittern hinzugefügt, um sie reflektierend zu machen und/oder die Effizienz zu erhöhen.

Arten von Gittern

Reflexions- und Transmissionsgitter

Die beiden Hauptkategorien von Beugungsgittern sind Reflexions- und Transmissionsgitter. Die *Abbildungen 1* und *2* zeigen Reflexionsgitter, die im Wesentlichen Spiegel mit mikroskopischen Rillen sind. Alle Beugungsordnungen werden unter verschiedenen Winkeln vom Gitter reflektiert. Transmissionsgitter sind wie Linsen mit mikroskopischen Rillen, und alle Beugungsordnungen werden durch das Gitter transmittiert, aber um die Winkel nach *Gleichung 1* versetzt. Reflexionsgitter werden auch als reflektierende Gitter und Transmissionsgitter auch als transmittierende Gitter bezeichnet.

Spektren

Das Wichtigste auf einen Blick

- Untersucht man Licht mit Hilfe eines Spektralapparats, so erhält man ein sogenanntes Spektrum. Aus diesen Spektren kann man vielfältige Informationen über den Aufbau von Atomen gewinnen.
- Das Spektrum von Licht, das ein heißer Körper aussendet, bezeichnet man als **Emissionsspektrum**. Beim Spektrum einer Glühlampe gehen die einzelnen Farben fließend ineinander über. Man spricht von einem **kontinuierlichen Emissionsspektrum**. Das Spektrum eines heißen Gases dagegen besteht aus einzelnen, voneinander getrennten dünnen Linien. Man spricht von einem **diskreten Emissionsspektrum (Linienspektrum)**.
- Das Spektrum von ursprünglich "weißem" Licht, das einen Gegenstand wie z.B. ein heißes Gas durchlaufen hat, bezeichnet man als **Absorptionsspektrum**. Absorptionsspektren sind durch dunkle Linien im kontinuierlichen Spektrum des "weißen" Lichts gekennzeichnet.
- Die Lage der Spektrallinien in einem Spektrum ist charakteristisch für das Atom bzw. Molekül.

Um Licht genauer zu untersuchen benutzt man **Spektralapparate**. Dabei handelt es sich um optische Instrumente, mit dem elektromagnetische Strahlung und im besonderen Licht benachbarter Wellenlängenbereiche in seine spektralen Anteile zerlegt, beobachtet und registriert werden kann. Prismen oder Gitter sind bereits einfache Spektralapparate.

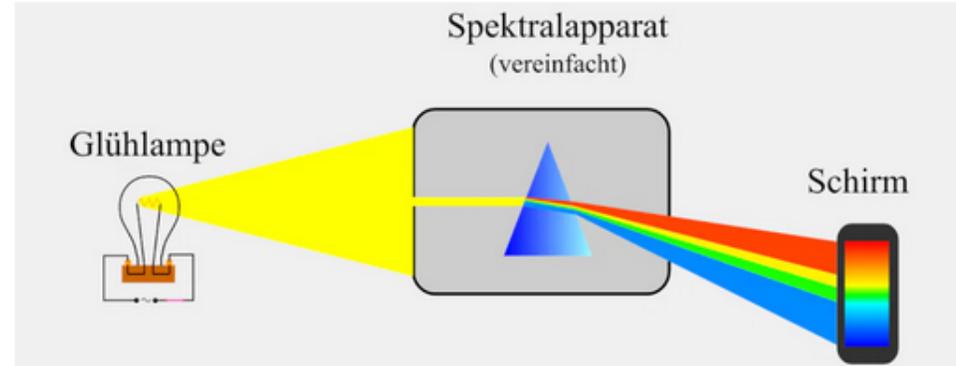
Als Ergebnis erhält man auf einem Schirm ein sogenanntes **Spektrum**. Aus beobachteten Spektren (spectrum (lat.): Erscheinung) kann man vielfältige Informationen über den Aufbau von Atomen gewinnen. Salopp sagt man auch "Das Spektrum ist der Fingerabdruck eines Atoms". Neben den genauen Wellenlängen werden dabei auch die unterschiedlichen Intensitäten der einzelnen Spektrallinien genutzt.

Grundsätzlich unterscheidet man bei Spektren nach der Art ihrer Entstehung zwischen **Emissionsspektren** und **Absorptionsspektren**.

Emissionsspektren

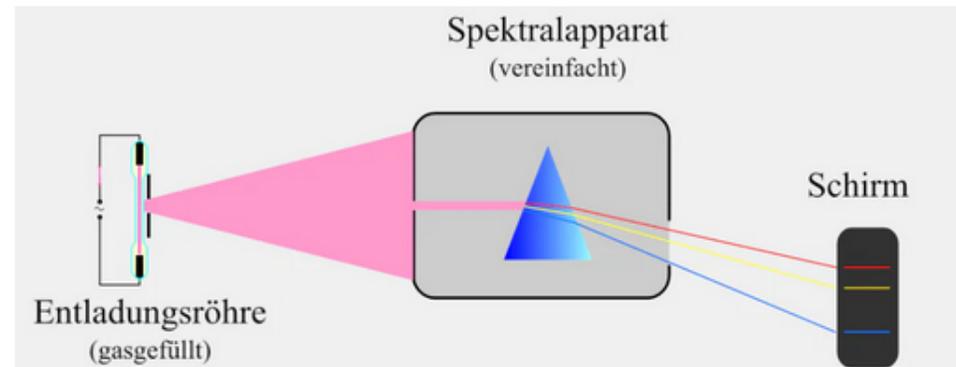
Heiße Materialien wie z.B. eine Glühlampe, der Lichtbogen einer Kohlebogenlampe, eine gefärbte Flamme oder das Gas in einer Entladungsröhre senden Licht aus, wir sagen dazu sie **emittieren** (emittere (lat.): aussenden) Licht. Das Spektrum des emittierten Lichts bezeichnen wir als **Emissionsspektrum**.

Untersucht man das Licht, das eine Glühlampe, eine Kohlebogenlampe oder die Sonne emittiert, besteht das Emissionsspektrum aus einem durchgehenden farbigem Band, in dem die verschiedenen Farben von rot bis violett nahtlos ineinander übergehen (**Abb. 1**). Ein solches Spektrum nennt man **kontinuierliches Emissionsspektrum** (continuum (lat.); zusammenhängend, fortwährend). Glühlampen aus verschiedenen Materialien zeigen dabei ein annähernd identisches kontinuierliches Emissionsspektrum.



© **Abb. 1** Prinzipieller Aufbau und zugehörige Beobachtung bei der Aufnahme des Emissionsspektrums einer Glühlampe, einer Kohlebogenlampe oder der Sonne

Untersucht man dagegen das Licht, das heißes Gas in einer Entladungsröhre emittiert, besteht das Emissionsspektrum aus mehreren einzelnen farbigen Linien (vgl. **Abb. 2**). Weil die einzelnen Linien voneinander getrennt sind, nennt man ein solches Emissionsspektrum **diskretes Emissionsspektrum** (discretus (lat.): abgesondert) oder **Linienpektrum**. Die Positionen bzw. Farben der einzelnen Linien im Spektrum sind dabei charakteristisch für das jeweilige Gas.



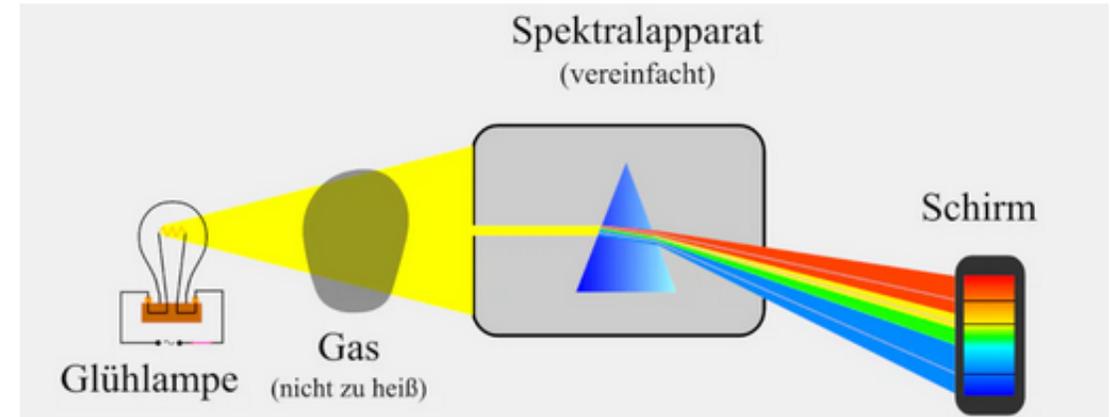
© **Abb. 2** Prinzipieller Aufbau und zugehörige Beobachtung bei der Aufnahme des Emissionsspektrums eines heißen Gases in einer Entladungsröhre

Absorptionsspektren

Lässt man das "weiße" Licht z.B. einer Kohlebogenlampe durch durchsichtige Gegenstände wie z.B. Glas, Flüssigkeiten oder Gase fallen, so erscheint das ausfallende Licht oft etwas dunkler und in einer anderen Farbe als das einfallende Licht. Wir sagen dazu, die Gegenstände **absorbieren** (absorbere (lat.): verschlingen) Licht. Das Spektrum des ausfallenden Lichts bezeichnen wir als **Absorptionsspektrum**.

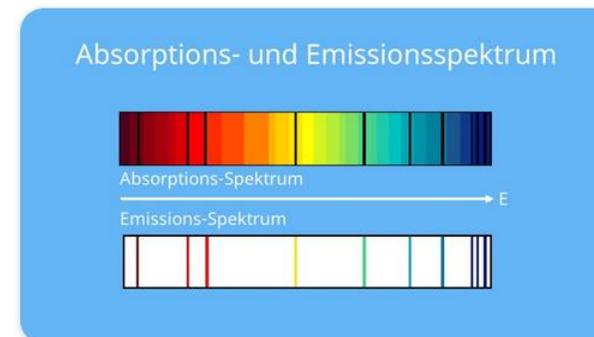
Untersucht man das Licht einer Kohlebogenlampe, nachdem es ein (nicht zu) heißes Gas durchquert hat, so besteht das Spektrum aus einem durchgehenden farbigem Band mit einzelnen dunklen Linien (**Abb. 4**). Im kontinuierlichen Spektrum der Kohlebogenlampe fehlen also einzelne Farben. Die einzelnen dunklen Linien nennen wir **Absorptionslinien**. Die Positionen der einzelnen Absorptionslinien im Spektrum sind dabei charakteristisch für das jeweilige Gas.

<https://www.leifiphysik.de/atomphysik/atomarer-energieaustausch/grundwissen/spektren>



© **Abb. 4** Prinzipieller Aufbau und zugehörige Beobachtung bei der Aufnahme des Absorptionsspektrums eines (nicht zu) heißen Gases

Das **Spektrum elektromagnetischer Wellen** ist eine physikalische Verteilungsfunktion der Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Strahlungsfrequenz. Das heißt du beurteilst danach, welche **Wellenlängen** in welcher **Intensität** innerhalb des beobachteten **Energiebereichs** vorkommen. Du unterscheidest dabei in Emissions- und Absorptionsspektrum. Ein **Emissionsspektrum** ist charakteristisch für eine bestimmte Strahlungsquelle. Ein **Absorptionsspektrum** beschreibt die Veränderung eines Emissionsspektrums beim Durchdringen einer Probe.



Absorptions- und Emissionsspektrum.

Spektrale Analyse verschiedener Lichtquellen

Gemäß DIN 5031 beschreibt der Begriff „*optische Strahlung*“ elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von 100 nm bis zu 1 mm (vgl. Abb. 1). Die Begriffe „Licht“ und „sichtbare Strahlung“ (VIS) beziehen sich auf den Wellenlängenbereich zwischen 360 nm und 830 nm. Diesen Bereich kann das menschliche Auge wahrnehmen. Optische Strahlung mit kürzeren Wellenlängen als 400 nm wird auch als ultraviolette Strahlung (UV) bezeichnet und ist weiter unterteilt in UV-A, UV-B und UV-C. Ähnlich deckt infrarote (IR) Strahlung den Wellenlängenbereich oberhalb von 800 nm ab und ist unterteilt in IR-A, IR-B und IR-C (DIN 5031, Teil 7). **Geräte zur Messung optischer Strahlung spektral aufgelöst heißen Spektrometer. Sind diese radiometrisch kalibriert spricht man von Spektralradiometern.**

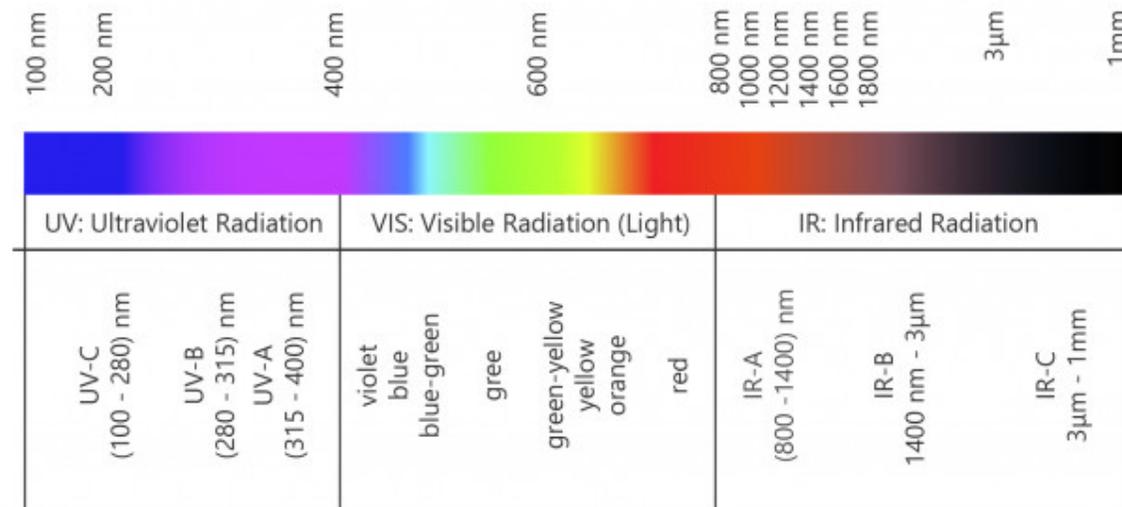


Abb. 1: Der Wellenlängenbereich elektromagnetischer Strahlung

Ein Spektrum beschreibt allgemein die Veränderung einer bestimmten physikalischen Größe als Funktion der Wellenlänge. Der Begriff „Spektrum“ ohne jegliche Spezifikation bezieht sich auf die Quantifizierung der monochromatischen Intensität als Funktion der Wellenlänge. Der Begriff des Spektrums wird auch für andere (physikalische) Größen verwendet, in diesem Fall wird jedoch immer ein gewisses Präfix hinzugefügt. Als Beispiel wird die Stärke einer biologischen Reaktion auf Licht verschiedener Wellenlängen (zum Beispiel Erythema, vgl. „**Der Wellenlängenbereich von optischer Strahlung**“) auch als spektrale Empfindlichkeit bezeichnet. Folgende Abbildung zeigt beispielhaft die Spektren einer Glühlampe, von natürlichem Sonnenlicht und von zwei verschiedenen Gasentladungslampen.

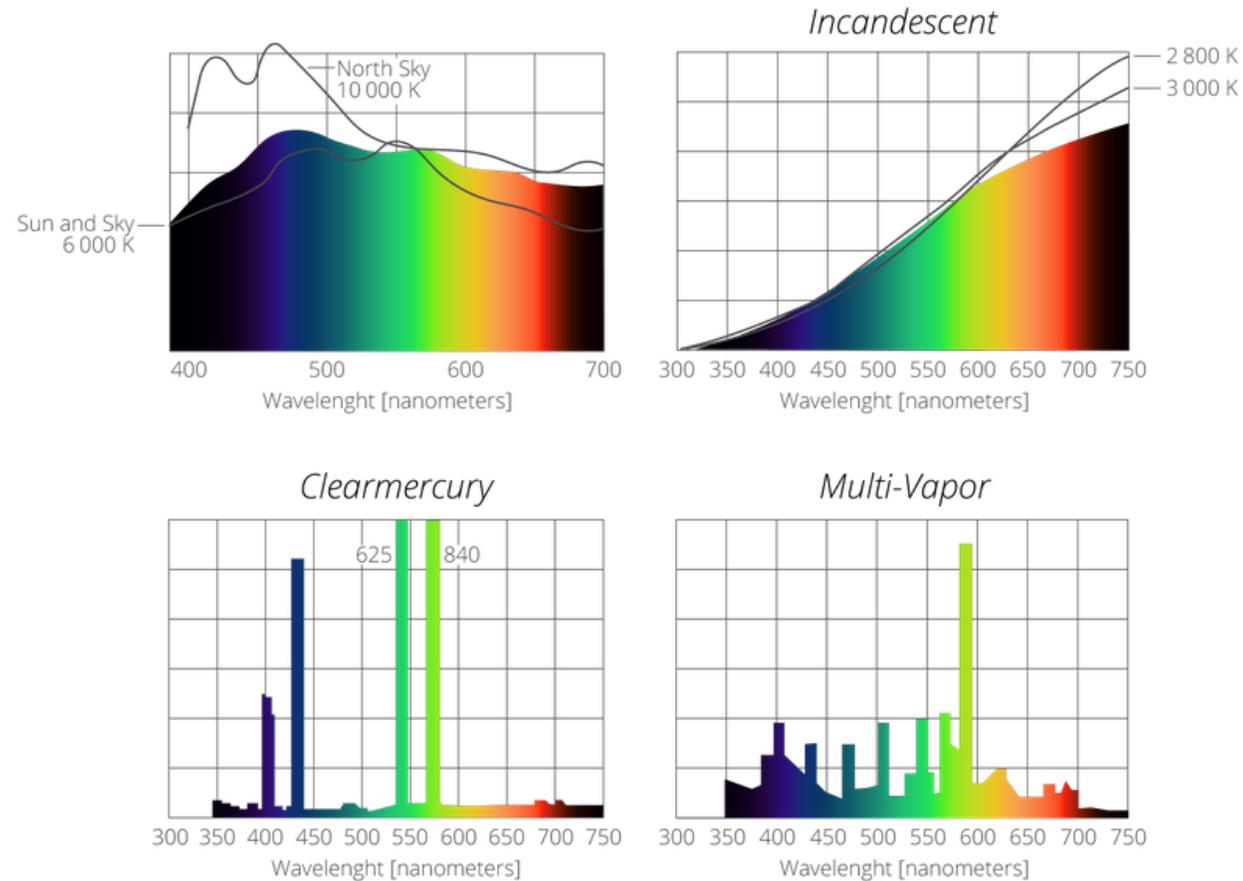


Abb. 1: Emissionsspektren von natürlichem Sonnenlicht und dem Himmel, von künstlichem Licht einer Glühlampe bei verschiedenen Temperaturen, von einer Quecksilberdampf Lampe sowie von einer Halogenmetaldampf Lampe

Quelle (Stand 2002): in Anlehnung an <http://www.salsburg.com/lightcolor/lightcolor.html>

<https://www.gigahertz-optik.com/de-de/service-und-support/informationsportal/grundlagenlichtmesstechnik/licht-farbe/lichtquellen-spektren/>

Wenn die spektrale Intensitätsverteilung verschiedener Lichtquellen untersucht wird, können vier maßgebliche Arten unterschieden werden. Diese sind im Einzelnen:

- monochromatische Strahlung
- nahezu monochromatische Strahlung
- kontinuierliche Spektren
- Bandspektren

Typische Quellen monochromatischer Strahlung sind Laser und das Ausgangssignal von Monochromatoren mit schmalen Bandbreiten. Typische Quellen nahezu monochromatischer Strahlung sind Leuchtdioden (*engl. light emitting diodes, LEDs*) und bandpassgefilterte Quellen.

Wenn eine Mischlichtquelle einen relativ breiten Wellenlängenbereich lückenlos abdeckt, so hat diese Strahlung ein kontinuierliches Spektrum. Typische Beispiele kontinuierlicher Strahlungsspektren sind direktes sowie diffuses Sonnenlicht und das von Glühlampen emittierte Licht. Andererseits existieren in Bandspektren Lücken, die individuelle Strahlungsbereiche voneinander trennen. Wenn ein Spektrum mehrere Spektrallinien mit monochromatischem Verhalten besitzt, so wird dieses als Linienspektrum bezeichnet. Typische Beispiele hierfür sind Gasentladungslampen wie z. B. Helium- oder Xenonlampen und Metalldampflampen (wie etwa Quecksilberdampflampen). Mischdampfentladungslampen werden verwendet, um eine gleichmäßigere Spektralverteilung zu erreichen (vgl. Abb. 1).

Geräte zur Messung solcher spektralen Leistungsverteilungen in radiometrischen Größen sind so genannte Spektralradiometer. Hierbei ist es wichtig, je nach spektraler Verteilung, die optimale optische Bandbreite oder sogar Bandbreitenkorrekturen gemäß CIE 214 anzuwenden.

Polarisation von Licht

Das Wichtigste auf einen Blick

- Passiert unpolarisiertes Licht einen idealen linearen Polarisationsfilter, so halbiert sich seine Intensität.
- Sind zwei Polarisationsfilter mit ihren Polarisationsachsen senkrecht zueinander ausgerichtet, kann kein Licht die Anordnung passieren.
- Sind zwei Polarisationsfilter mit ihren Polarisationsachsen verdreht zueinander ausgerichtet, passiert ein Teil des Lichtes die Anordnung mit geänderter Polarisationsrichtung.

Intensität des Lichtes

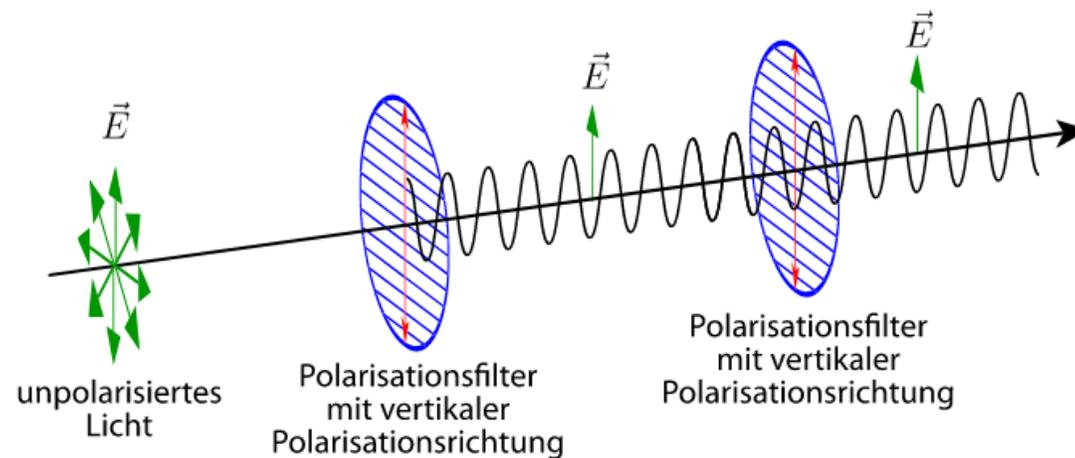
Trifft unpolarisiertes Licht der Intensität I_0 auf einen idealen linearen Polarisationsfilter, so wird die Intensität durch den Polarisationsfilter auf $I = \frac{I_0}{2}$ reduziert.

Zwei Polarisationsfilter kombiniert

Wenn du zwei Polarisationsfilter hintereinander in der Ausbreitungsrichtung eines Lichtstrahls positionierst, so bestimmt die Ausrichtung der Polarisationsfilter zueinander, welcher Teil des Lichtes die Anordnung passiert.

Polarisationsfilter parallel zueinander

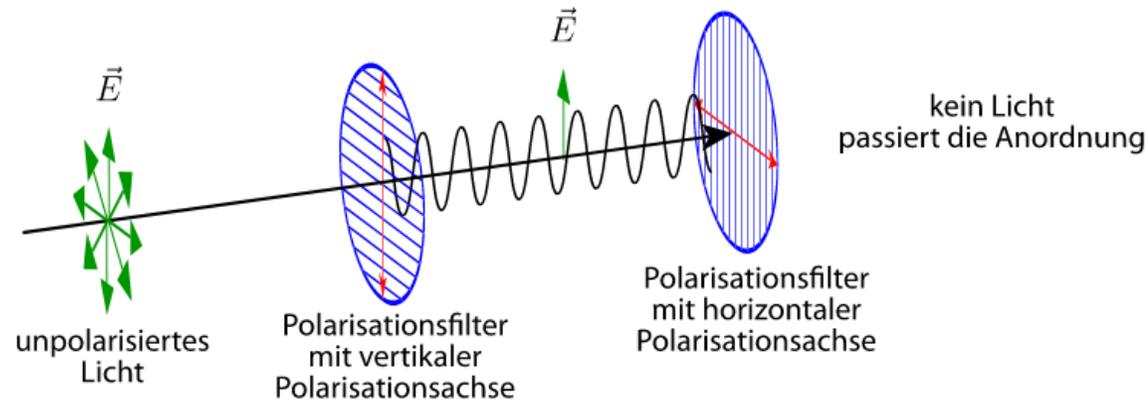
Wenn die beiden Polarisationsfilter parallel zueinander ausgerichtet sind, dann hat der zweite Filter keinerlei Auswirkungen mehr. Das Licht, das so polarisiert ist, dass es den ersten Filter passieren kann, kann auch den zweiten Filter vollständig und unverändert passieren.



<https://www.leifiphysik.de/optik/polarisation/grundwissen/polarisation-von-licht-fortfuehrung>

Polarisationsfilter senkrecht zueinander

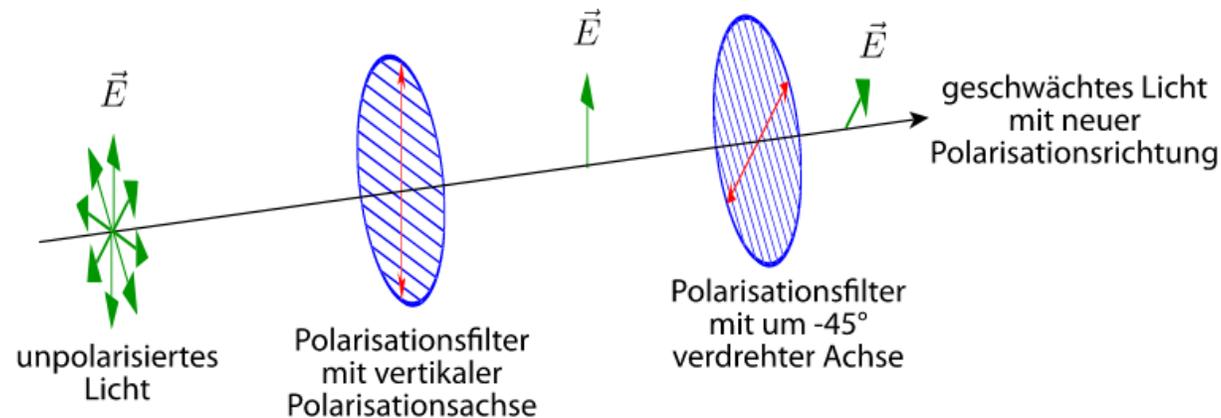
Wenn die beiden Polarisationsfilter senkrecht zueinander ausgerichtet sind, dann kann kein Licht die Anordnung passieren. Ist die Polarisationsachse des ersten Filters vertikal ausgerichtet, so ist das Licht hinter dem Filter vertikal polarisiert und besitzt keinen horizontal polarisierten Anteil mehr. Somit kann kein Teil dieses Lichtes den zweiten Filter passieren.



<https://www.leifiphysik.de/optik/polarisation/grundwissen/polarisation-von-licht-fortfuehrung>

Polarisationsfilter verdreht zueinander

Sind die beiden Polarisationsfilter verdreht zueinander ausgerichtet, zum Beispiel um 45° , so passiert ein Teil des Lichtes auch den zweiten Polarisationsfilter. Der E-Feldvektor des auftreffenden Lichtes wird dabei in einen Teil parallel und einen Teil senkrecht zur optischen Achse des Filters zerlegt. Der parallele Teil kann den Filter passieren. Entsprechend ist das Licht im Anschluss auch in der Richtung der Polarisationsachse des zweiten Filters polarisiert.



pl.2.4 Erzeugung von polarisiertem Licht

Natürliches Licht, auch z.B. das einer Spektrallinie, ist unpolarisiert. Im Elementarprozess wird das Licht zwar als Photon erzeugt, das einen Drehimpuls von $\pm h/2\pi$ besitzt, für sehr viele Photonen misst man aber die statistische Verteilung über alle Phasen, bekommt also unpolarisiertes Licht. Aus dem gleichen Grund ist dieses Licht auch inkohärent.

Im optischen Bereich kann man Polarisation durch Wechselwirkung mit Materie erhalten. Dazu gibt es folgende Möglichkeiten: richtungsselektive Absorption (Dichroismus), Reflexion, Streuung und Doppelbrechung und optische Aktivität. Näheres finden sie im Abschnitt *pl.2.5*.

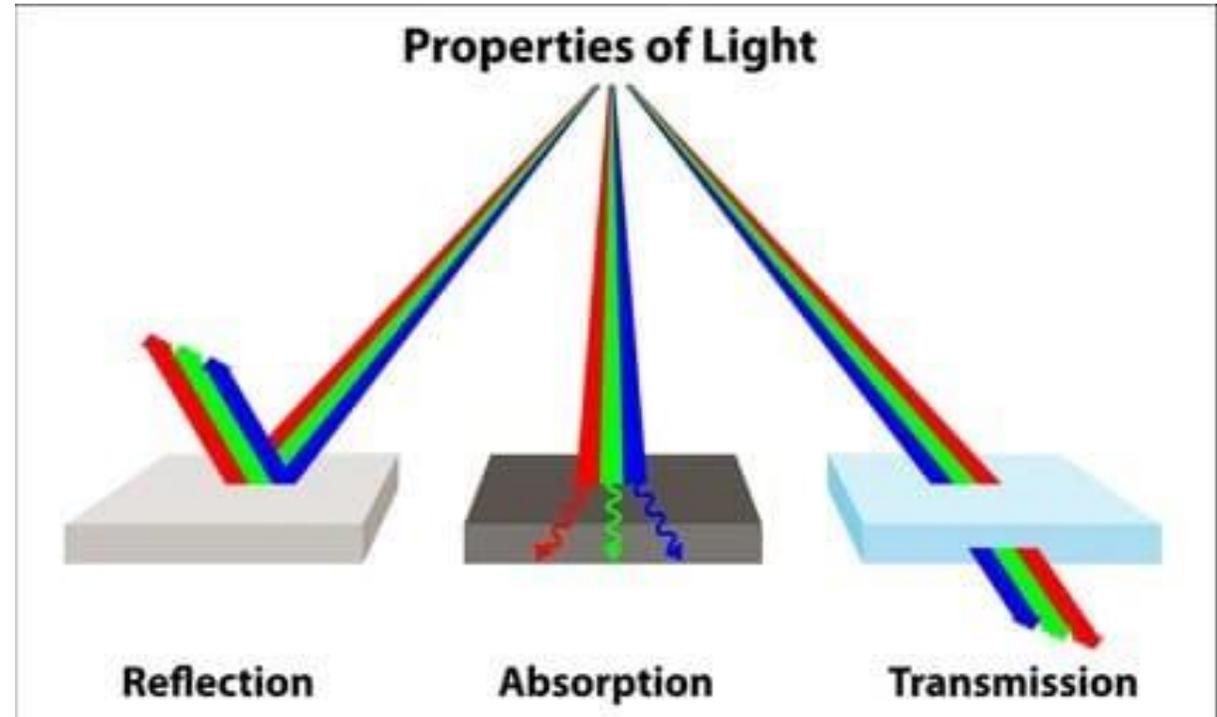
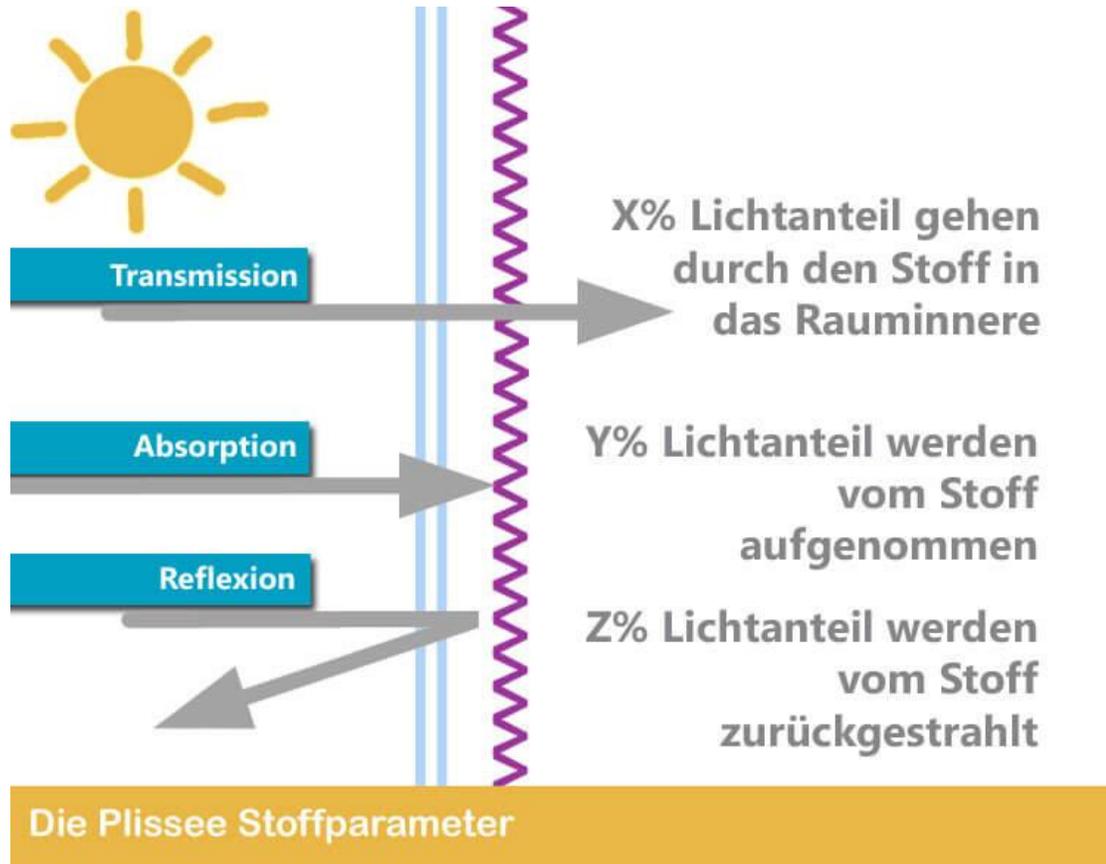
Bei all diesen Methoden geht natürlich ein Teil der Lichtintensität I_0 verloren. Fällt linear polarisiertes Licht auf einen "idealen" Polarisator, so gilt:

$$I(\theta) = I_0 \cos^2 \theta \quad (pl.12)$$

Dies ist das **Malus'sche Gesetz**. Dabei ist θ der Winkel zwischen der Durchlasspolarisationsrichtung des Polarisators und der Polarisationsebene des einfallenden Lichts. Fällt unpolarisiertes Licht auf den Polarisator so hat man über alle Winkel θ zu ermitteln:

$$\frac{I(\theta)}{I_0} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{1\pi} \cos^2(\theta) d\theta = \frac{1}{2} \quad (pl.13)$$

Transmission, Absorption, Reflexion von Licht



Subtraktive Farbmischung

<https://www.leifiphysik.de/optik/farben/grundwissen/additive-farbmischung>

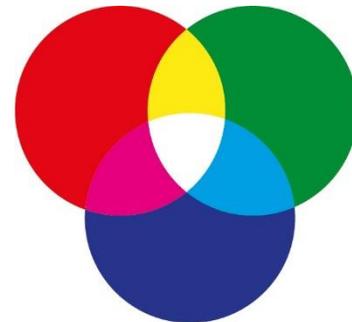
Das Wichtigste auf einen Blick

- Bei der subtraktiven Farbmischung entstehen unterschiedliche Farbeindrücke dadurch, dass aus vorhandenem Licht das Licht einzelner Spektralfarben herausgefiltert wird.
- In der Praxis filtert man aus Licht, in dem alle Spektralfarben enthalten sind, getrennt voneinander Licht des "roten", des "grünen" und des "blauen" Spektralbereichs heraus. Die entsprechenden Farbfilter erscheinen uns in den Farben "Cyan", "Magenta" und "Gelb" ("Yellow"). Man spricht deshalb vom CMY-Farbraum.
- Filtert man aus Sonnenlicht das Licht des "roten", des "grünen" und des "blauen" Spektralbereichs in unterschiedlichen Kombinationen und Filterstärken heraus, so erhält man fast alle möglichen Farbeindrücke bis hin zum Farbeindruck "schwarz".

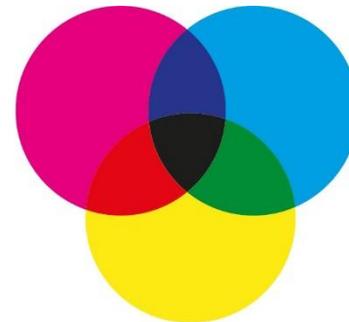
Additive Farbmischung

Das Wichtigste auf einen Blick

- Bei der additiven Farbmischung entstehen unterschiedliche Farbeindrücke dadurch, dass zu vorhandenem Licht das Licht weiterer Spektralfarben hinzugefügt wird.
- In der Praxis mischt man nur Licht der drei Spektralfarben "Rot", "Grün" und "Blau". Man spricht dann vom RGB-Farbraum und nennt die Spektralfarben "Rot", "Grün" und "Blau" die Grund- oder Primärfarben der additiven Farbmischung.
- Mischt man das Licht dieser drei Grundfarben passend zusammen, so erhält man fast alle möglichen Farbeindrücke und auch den Farbeindruck "weiß".



RGB



CMY

subtraktive Filter:

- C: Cyan / Blaugrün;
- M: Magenta / Purpur (Blaurot);
- Y: Yellow / Gelb.

additive Filter:

- R: Rot;
- G: Grün;
- B: Blau.

Was wird mit dem Photometer gemessen?

In der Photometrie werden drei grundlegende Messarten genutzt, die aufeinander aufbauen:

1. Transmission T (%): Wird **direkt** gemessen und ergibt sich aus dem Verhältnis von Lichtintensität nach (I) und vor (I_0) der Küvette. Die Transmission einer Probe verändert sich exponentiell mit Schichtdicke und Stoffkonzentration. Die Transmission wird auch zur **Trübungsmessung bei 180°** (Einheit FAU, z.B. in der Qualitätskontrolle) und für die Trübungskorrektur bei der Konzentrationsmessung eingesetzt.

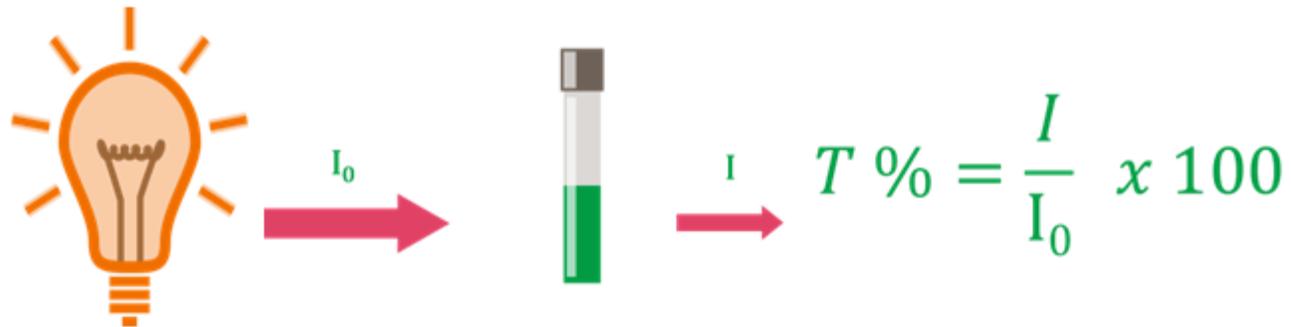
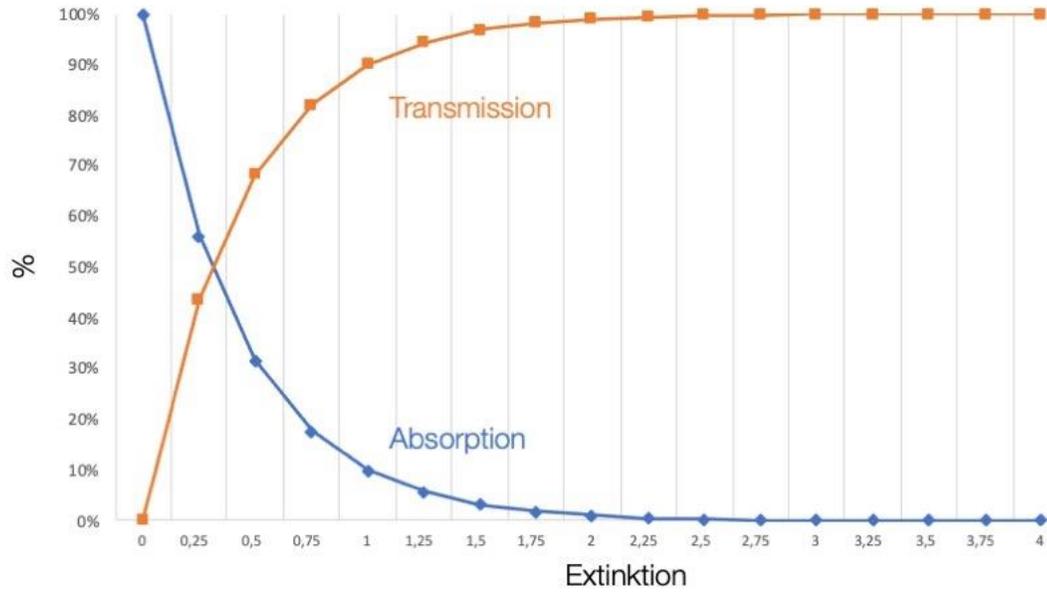


Abbildung 2: Verhältnis von Lichtintensität nach (I) und vor (I_0) der Küvette.

2. Extinktion E: Die Extinktion, auch als optische Dichte bezeichnet, ist **ein Maß für die Abschwächung/„Auslöschung“** des Lichts durch die Probe. Berechnet wird sie aus dem Logarithmus der Transmission: $E = -\log_{10}(T)$. (Anmerkung: im Sprachgebrauch oft auch als Absorption bezeichnet) Die Extinktion in einer Probe verändert sich proportional zu Schichtdicke und Konzentration.

Korrelation zwischen Extinktion und Absorption / Transmission



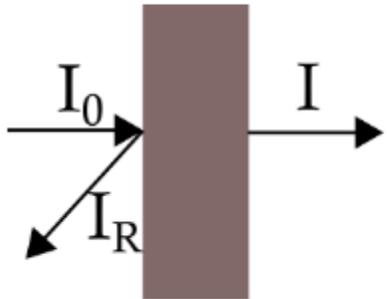
Transmission, Absorption, Reflexion

$$I = I_R + I_A + I_T$$

$$1 = \frac{I_R + I_A + I_T}{I}$$

$$1 = \underbrace{\frac{I_R}{I}}_R + \underbrace{\frac{I_A}{I}}_A + \underbrace{\frac{I_T}{I}}_T$$

↳ 100% = R + A + T



Transmissionsgrad: $T = \frac{I}{I_0}$

Absorptionsgrad: $\alpha = 1 - T$

Reflektivität: $R = \frac{I_R}{I_0}$

3. **Konzentration:** Hergeleitet über Extinktion oder Transmission. Quantitative Analyse einer Substanz (mg/l, ppm,...) bei definierter Wellenlänge auf Basis einer Kalibrierkurve.

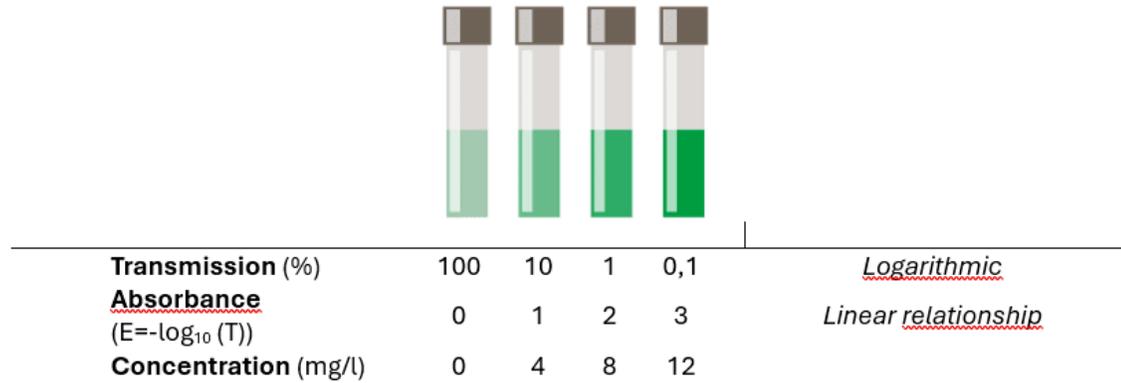


Abbildung 3: Beziehung von Transmission/ Extinktion zur Konzentration.

<https://www.xylemanalytics.com/de/unternehmen/blog/xylem-analytics-blog/2025/01/grundlagen-der-photometrischen-messung-auf-einen-blick>

Grundlagen der Konzentrationsbestimmung

Was sind die Voraussetzungen für eine Konzentrationsmessung

1. Der Farbstoff liegt in gelöster Form vor.
2. Die Färbung ist durch eine Extinktionsmessung bei einer Wellenlänge λ nachweisbar.
3. Die chemische Reaktion mit der Substanz führt zur Bildung oder Verminderung (z.B. CSB) des Farbstoffes
4. Die Farbreaktion hat eine fest definierte Reaktionszeit.
5. Die Farbintensität korreliert mit der Konzentration.
6. Die Reaktion muss selektiv für die gesuchte Substanz sein, es dürfen keine Kreuzreaktionen mit anderen Ionen auftreten.
7. Die Färbung muss eine Zeitlang stabil sein, z.B. ein Zeitfenster von 10 Minuten nach Reaktionsende ohne Farbveränderung (siehe Analysenvorschriften).

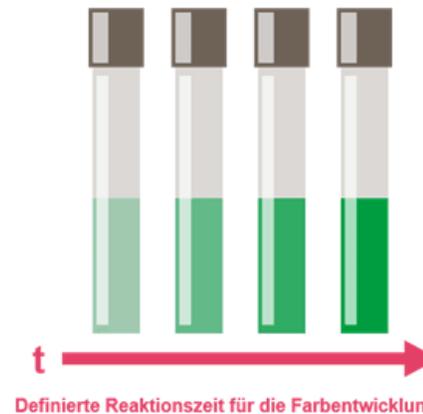


Abbildung 4: Definierte Reaktionszeit für die Farbentwicklung.

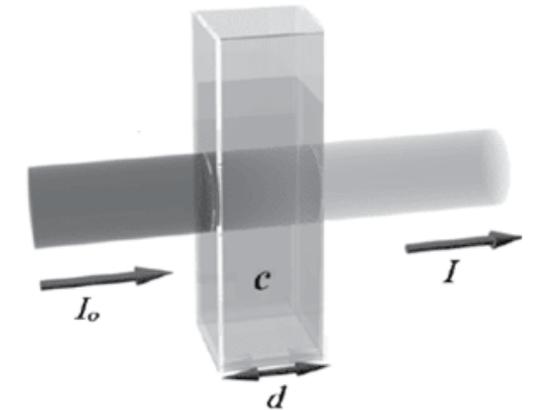
Wie wird aus der Extinktion die Konzentration hergeleitet?

1. Durch ein **photometrisches Spektrum** werden der oder die spezifischen Absorptions-Peaks von Stoffen bestimmt. So kann die optimale Wellenlänge für Konzentrationsmessungen ermittelt werden.
2. Mehrere **Lösungen mit einer bekannten Konzentration** des untersuchten Stoffes werden bei der festgelegten Wellenlänge gemessen. Die erhaltenen Extinktionswerte werden in Diagramm eingetragen. Daraus ergibt sich die **Kalibrierkurve**.
3. Anschließend kann die Stoffkonzentration einer **unbekannten Lösung** anhand des Extinktionswerts aus der **Kalibrierkurve** abgeleitet werden.

Worauf basiert die Konzentrationsmessung?

Das Lambert-Beer'sches Gesetz ist die Grundlage für die photometrische Konzentrationsbestimmung:

Die Abhängigkeit der **Extinktion von der Konzentration** des Analyten wurde von BEER (1825–1863) gefunden. Einige Zeit zuvor zeigten Untersuchungen von BOUGUER (1698–1758) und LAMBERT (1728–1777), dass die **Extinktion von der Schichtdicke der Küvette abhängt**. Die Kombination beider Gesetzmäßigkeiten führte zum Lambert-Beer'schen Gesetz, das durch folgende Beziehung beschrieben werden kann:



$$E = \epsilon \lambda \cdot c \cdot d$$

$\epsilon \lambda$ = molarer Extinktionskoeffizient l/(mol*cm) bei

Wellenlänge λ

d = Schichtdicke der Küvette in cm

c = Analyt-Konzentration in mol/l

Lambert-Beer'sches Gesetz

Eine monochromatische Lichtquelle, z.B. UV/VIS mit der Intensität I_0 passiert eine verdünnte Lösung einer speziellen chemischen Substanz der Schichtdicke d und resultiert in der Intensität I . Das Licht, welches durch die Lösung geht ergibt die

$$\text{Transmission} = \frac{I}{I_0}$$

welche exponentiell mit zunehmender Konzentration (c) der Lösung und mit der Schichtdicke (d) der Küvette abnimmt:

$$I = I_0 \cdot \exp(-\epsilon \cdot c \cdot d)$$

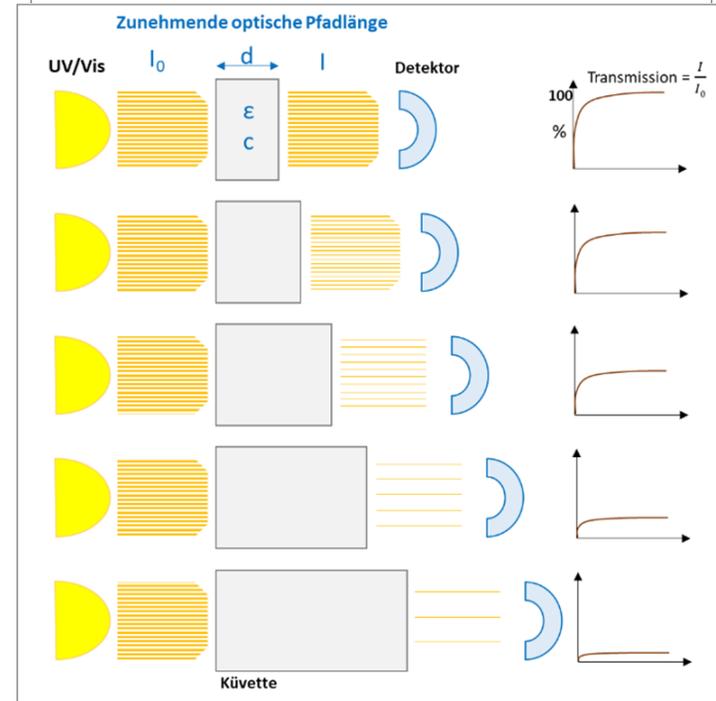
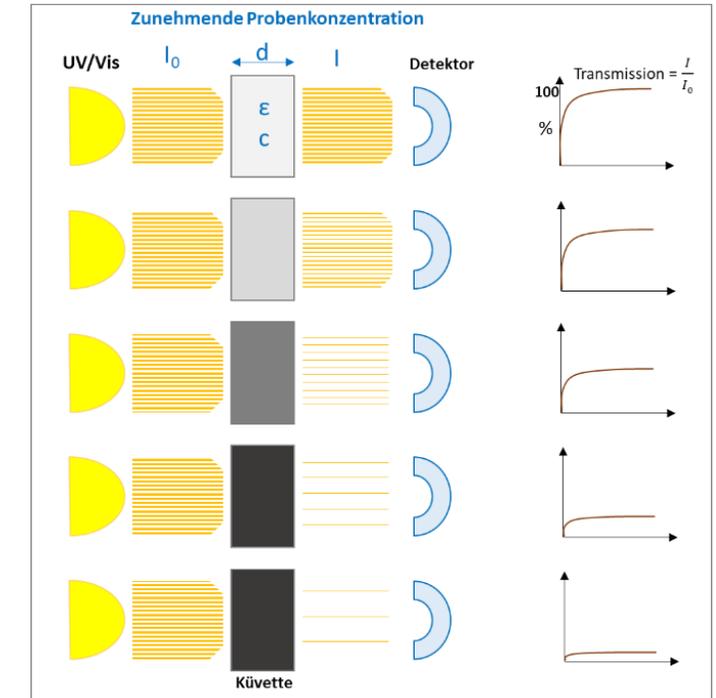
Nach Umstellen der Formel erhalten wir das "Lambert-Beer Gesetz":

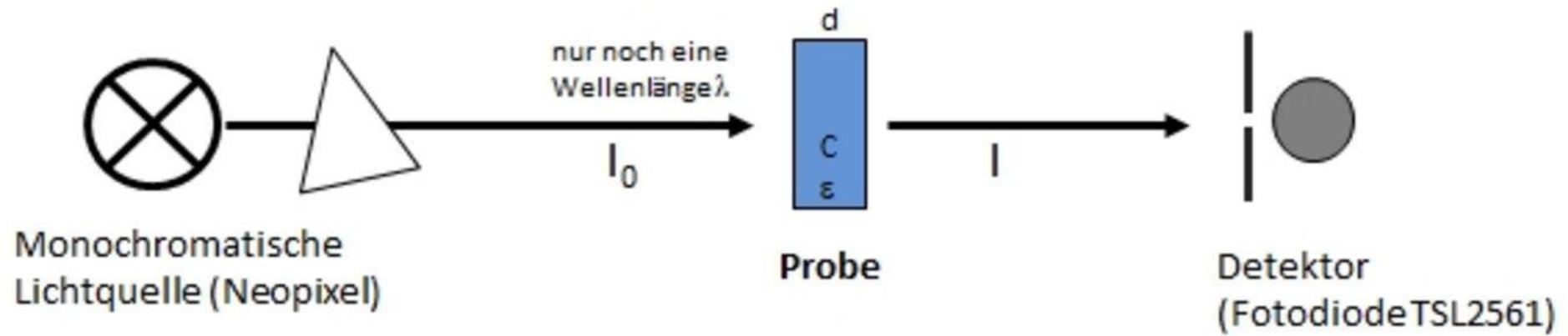
$$E = \epsilon \cdot c \cdot d = \log \frac{I_0}{I}$$

- I_0 : Intensität des Lichtstrahls vor der Lösung
- I : Intensität des Lichtstrahls nach dem Passieren der Lösung mit der Dicke d
- d : Schichtdicke d , oder optische Pfadlänge (cm)
- c : Konzentration der absorbierenden Substanz in mol l^{-1}
- ϵ : Molarer Extinktionskoeffizient bei spezifischer Wellenlänge für diese Substanz in $\text{l mol}^{-1} \text{cm}^{-1}$
- E : Extinktion

Im idealen Fall ist (ϵ), unter kontrollierten Messbedingungen (z.B. Temperatur, Lösungsmittel, pH u.s.w.) nur Abhängig von der Art der absorbierenden Substanz und der Wellenlänge (λ). Es ist eine Konstante und unabhängig von (c), aufgelistet in verschiedenen Tabellen für viele Chemikalien. Wenn die optische Pfadlänge (d) und die chemische Substanz bekannt sind (also ϵ), kann die unbekannte Konzentration (c) einer Substanz durch Messung der Extinktion (E) bei spezifischer Wellenlänge bestimmt werden:

$$c = \frac{E}{\epsilon \cdot d}$$





Lambert Beer'sche Gesetz

$$A = \lg\left(\frac{I_0}{I}\right) = C \cdot d \cdot \varepsilon(\lambda)$$

Absorbanz A

Lichtintensität I [Wm^{-2}]

Schichtdicke d [m]

Stoffmengenkonzentration C [mol L^{-1}]

Stoffspezifischer Absorptionskoeffizient ε [$\text{m}^2 \text{mol}^{-1}$]

<https://www.umwelt-campus.de/iot-werkstatt/tutorials/mint-absorptions-spektrometer>

Absorption von Licht

Neben Brechungs-, Streuungs-, Interferenz- und Beugungsphänomenen an teilweise oder vollständig transparenter Materie, die einen Farbeindruck erzeugen können, wie z.B. beim Regenbogen, dem Himmelsblau, schimmernden Seifenblasen, prächtigen Pfauenfedern oder dünnen Ölfilmen und Schichten, entstehen die Farben in unserer Umwelt vorrangig durch die Absorption bzw. Reflexion von Licht.

„Farbigkeit“ von Materie entsteht dabei durch selektive Absorption von Licht aus dem sichtbaren Teil des Spektrums der elektromagnetischen Strahlung. Dieser Bereich liegt zwischen ultraviolettem und infrarotem Licht. Auf molekularer Ebene bedeutet dies, dass Moleküle in einen elektronisch angeregten Zustand gelangen: Durch die Absorption eines Lichtquants (Photon) wird ein Elektron aus dem höchsten besetzten Molekülorbital (HOMO = **h**ighest **o**ccupied **m**olecular **o**rbital; Energie E_1) in das niedrigste unbesetzte Molekülorbital (LUMO = **l**owest **u**noccupied **m**olecular **o**rbital; Energie E_2) angehoben.

$$E_{\text{Photon}} = h \cdot \nu = (h \cdot c) / \lambda = \Delta E = E_2 - E_1$$

E_{Photon} : Energie des Photons

h : Planck-Konstante

ν : Frequenz der Strahlung

c : Lichtgeschwindigkeit

λ : Wellenlänge der Strahlung

ΔE : Energieunterschied der beiden Niveaus

Die Energie des absorbierten Photons entspricht genau dem Energieunterschied der beiden Energieniveaus, d.h. das Molekül kann nur in diskreten Energiezuständen existieren, die Energie ist „gequantelt“ und kann nur in definierten Portionen aufgenommen bzw. abgegeben werden.

UV/Vis-Spektroskopie

Die Absorption von Licht – z.B. in einer Farbstofflösung – kann gemessen werden. Grundlage für die quantitative UV/Vis-Spektroskopie ist das Lambert-Beer-Gesetz:

$$E = \lg(I_0 / I) = \varepsilon \cdot c \cdot d$$

E: Extinktion, optische Dichte (OD) oder englisch Absorbance (ABS)

ε : molarer Extinktionskoeffizient

c: Konzentration

d: Schichtdicke

I_0 : Lichtintensität vor der Probe

I: Lichtintensität nach der Probe

Durch Umformung der Gleichung erhält man die Konzentration c einer Verbindung

$$c = E / (\varepsilon \cdot d)$$

Das Lambert-Beer-Gesetz gilt für monochromatische Strahlung. Durch die Auftragung der Extinktion über der Wellenlänge erhält man für verschiedene Wellenlängen das UV/Vis-Spektrum einer Verbindung.

Das Lambert-Beer-Gesetz verliert seine Gültigkeit bei höher konzentrierten Lösungen sowie beim Auftreten von konzentrationsabhängigen Reaktionen, wie es z.B. die **Aggregation von Farbstoffen** darstellt.

Beim Durchgang durch die Lösung wird der Lichtstrahl abgeschwächt, ein Teil des Lichts ist von Molekülen in der Lösung absorbiert worden, d.h. es gilt bei Vernachlässigung von Streuung und Reflexion:

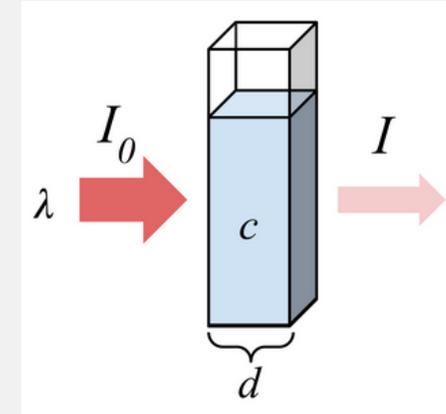
$$A + T = 1 = (I_0 - I) / I_0 + I / I_0$$

A = Absorption = absorbierter Teil des Lichts = $(I_0 - I) / I_0$

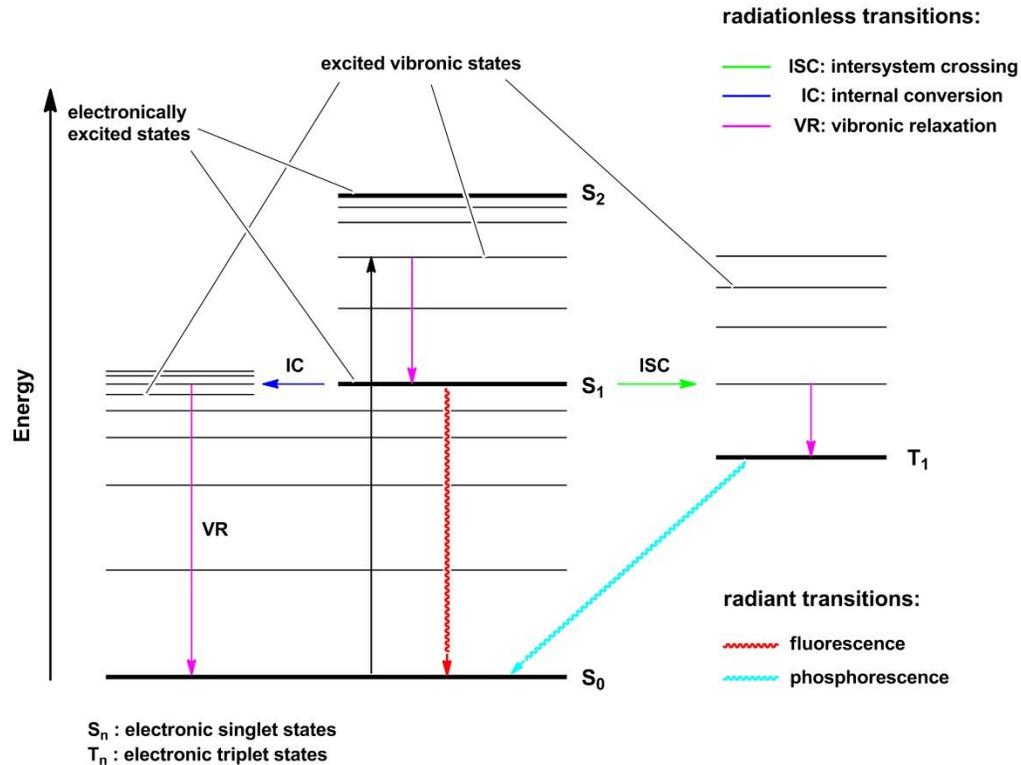
T = Transmission = durchgelassener Teil des Lichts = I / I_0

Daher gilt:

$$E = -\lg(T)$$



Die Absorption ist ein sehr schneller Prozess (10^{-15} bis 10^{-14} s), der ohne Spinumkehr verläuft. Die durch die Absorption des Photons vom Molekül aufgenommene Energie wird nach einer beschränkten Lebensdauer des Anregungszustandes in unterschiedlicher Form wieder abgegeben. Schließt man photochemische Reaktionen aus, so ist neben der Abgabe in Form von thermischer Energie auch das Auftreten einer Lumineszenzerscheinung als Fluoreszenz oder Phosphoreszenz möglich. Diese photophysikalischen Elementarprozesse, bei denen die chemische Identität des Moleküls am Ende erhalten bleibt, lassen sich graphisch in Form eines Jablonski-Diagramms oder Jablonski-Termschemas darstellen.



<https://www.atto-tec.com/fluoreszenz/absorption-fluoreszenz/?language=de>

Darin sind neben den Elektronenniveaus $S_0 - S_2$ und T_1 auch die zugehörigen Schwingungsunter-niveaus dargestellt. Man unterscheidet bei der Darstellung zwischen Strahlungsprozessen (Wellenlinien) und strahlungslosen Prozessen (Striche).

Ein Singulettzustand S besitzt nur gepaarte Elektronen, der Gesamtspin ist $S = 0$; ein Triplettzustand T besitzt zwei ungepaarte Elektronen, der Gesamtspin ist $S = 1$; daraus ergibt sich die Multiplizität $M = 2S + 1$ (Anzahl der Energieniveaus in Anwesenheit eines Magnetfelds). Für Singulettzustände ist $M = 1$ und für Triplettzustände ist $M = 3$. Die Auswahlregel der Erhaltung der Multiplizität erlaubt somit nur Übergänge innerhalb des Singulett- oder Triplett-systems („Spinverbot“).

Fluoreszenz

Fluoreszenz (10^{-9} bis 10^{-7} s) stellt die Lichtemission dar, die bei einer Desaktivierung des angeregten Moleküls durch Übergang vom niedrigsten Schwingungsniveau des ersten angeregten Singulettzustandes S_1 zu Schwingungsniveaus des elektronischen Grundzustandes S_0 (d.h. zwischen Zuständen gleicher Multiplizität) beobachtbar ist („Regel von Kasha“). Somit ist die beobachtete Fluoreszenz unabhängig von der Anregungswellenlänge.

8.1 Allgemeines zur Fluoreszenz

Strahlungserscheinungen, die bei einer Substanz nach vorangegangener Anregung ohne Abgabe von thermischer Energie auftreten, nennt man Lumineszenz. In Abhängigkeit von der Dauer der Emission wird zwischen Phosphoreszenz und Fluoreszenz unterschieden. Bei Raumtemperatur befinden sich die Moleküle normalerweise im untersten Schwingungsniveau des Grundzustandes S_0 . Durch Lichtabsorption können Übergänge in angeregte Zustände S_n erfolgen. Nach dem Jablonski-Termschema (Abb. 54) bestehen mehrere Möglichkeiten die absorbierte Energie wieder abzugeben. Der zunächst erfolgende Übergang aus einem höheren angeregten Singulettniveau zurück auf das niedrigste Energieniveau des angeregten Zustandes S_1 erfolgt strahlungslos durch Molekülstöße (internal conversion). Erfolgt die Rückkehr von S_1 direkt in den Grundzustand, findet die Lichtemission bereits 0.1 bis 100 ns nach der Anregung statt und man spricht von Fluoreszenz.

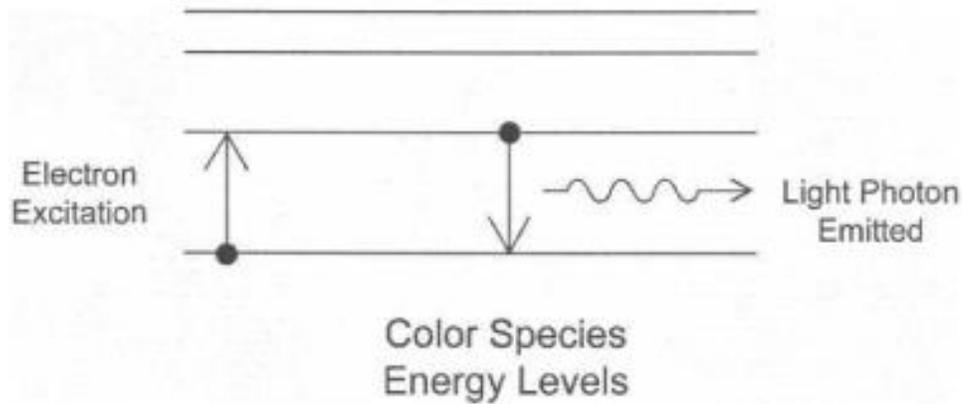
Im Allgemeinen ist die absorbierte Energie größer, als die bei der Emission frei werdende. Deshalb ist das Emissionsspektrum im Vergleich zum Absorptionsspektrum zu höheren Wellenlängen verschoben^[209].

Ein wichtiger Parameter bei Fluoreszenzuntersuchungen ist die Quantenausbeute Φ_F . Sie gibt das Verhältnis aus emittierten zu absorbierten Photonen an.

In stark verdünnten Lösungen ist die Fluoreszenzintensität F direkt proportional zur Intensität der anregenden Strahlung I_0 und wird nach Gleichung (3) berechnet. Durchlaufen alle angeregten Moleküle den Übergang von S_1 nach S_0 unter Abgabe der Energie in Form von Fluoreszenzstrahlung, ist die Quantenausbeute 1.

$$F = 2.3 \cdot \Phi_F \cdot I_0 \cdot \varepsilon \cdot c \cdot d \quad (3)$$

Entstehung von farbigen Flammen



Elektronenübergänge zwischen Energieniveaus, die einer Wellenlänge von ca. **400 – 700 nm** entsprechen (im sichtbaren Bereich), können wir mit dem Auge sehen.

Die **Plancksche Beziehung** besagt:

$$E = h \cdot f$$

Die Frequenz von Wellen entspricht $\frac{c}{\lambda}$

$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

Erklärung der Planckschen Beziehung

Für die einzelnen Werte gilt:

- E ist die Energie des Lichts
- $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{Js}$ ist das **Plancksche Wirkungsquantum** (konstant)
- $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ist die **Lichtgeschwindigkeit** (konstant)

Da h und c konstant sind, ist die Energie proportional zur Frequenz bzw. Wellenlänge.

