

2 Widerstand, Induktivität und Kapazität



Einige Grundlagenkenntnisse in Hinblick auf Widerstand, Induktivität und Kapazität sind essentiell für das weitere Verständnis, so haben beispielsweise die in Kapitel 3 behandelten Kabel und Leitungen neben einem Ohmschen Widerstand auch ein induktives und ein kapazitives Verhalten.

Widerstände, Induktivitäten (Spulen) und Kapazitäten (Kondensatoren) sind so genannte passive elektronische Bauteile, die sich in so ziemlich allen elektronischen Schaltungen finden. Widerstände werden zum Beispiel in Spannungsteilern, Spulen und Kondensatoren in Filterschaltungen und Netzteilen eingesetzt, um nur einige der vielfältigen Anwendungen zu nennen. Passive Bauteile können den Strom oder die Spannung nicht verstärken, im Gegensatz zu einem aktiven elektronischen Bauteil wie beispielsweise dem Transistor.

2.1 Widerstand

Den Widerstand haben wir bereits im vorigen Kapitel im Zusammenhang mit dem Ohmschen Gesetz kennen gelernt. Hier folgen nun weitere Informationen zum Widerstand als Bauteil.

Fließen Elektronen durch einen elektrischen Leiter, so verlieren sie Energie, da sie mit den Atomen des Leiters zusammenstoßen. Der Leiter setzt den Elektronen also einen Widerstand entgegen. Bei diesem Vorgang wird Wärme freigesetzt. Selbst das am meisten verwendete Leitermaterial, Kupfer, ist kein idealer Leiter, sondern besitzt einen gewissen (Ohmschen) Widerstand. Andere Materialien, wie beispielsweise Kohle, sind weder gute Leiter noch gute Isolatoren. Aus solchen Stoffen werden deshalb Widerstände als Bauelemente hergestellt.

Widerstände mit festem Widerstandswert

Die Werkstoffe, die für Drahtwiderstände (Abb. 2.1 Links) eingesetzt werden, sind spezielle Legierungen, zumeist aus Kupfer (Cu), Mangan (Mn) und Nickel (Ni). Diese Widerstandslegierungen haben einen größeren spezifischen Widerstand als die jeweiligen Materialien für sich alleine. Eine oft verwendete Widerstandslegierung ist Konstantan (CuNi 44) mit einem spezifischen Widerstand (s. Kap. 3.7) von $\rho = 0,49 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$. Daneben gibt es noch Kohleschichtwiderstände und Metalloxid-Schichtwiderstände (Abb. 2.1 Rechts).



Abb. 2.1 Links: Drahtwiderstände. Rechts: Schichtwiderstände.

Da elektrische Widerstände sehr klein sein können, so dass ein Aufdruck des Widerstandswertes eventuell nicht mehr gut lesbar ist, werden sie mit Farbringen gekennzeichnet. Anhand der Farbringe kann der Widerstandswert berechnet werden. Metallschichtwiderstände haben fünf Ringe zur Kennzeichnung, Kohleschichtwiderstände nur vier. Manchmal findet sich auch ein sechster Farbring, der für den Temperaturkoeffizienten steht (Abb. 2.2, Tab. 2.1 und 2.2).

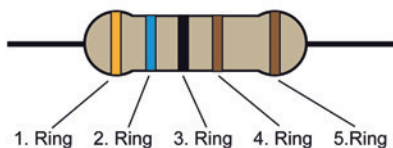


Abb. 2.2: Farbcode auf einem Metallschichtwiderstand.

Tab. 2.1: Farbcode zur Kennzeichnung von Metallschichtwiderständen.

Farbe	1. Ring = 1. Ziffer	2. und 3. Ring = 2. und 3. Ziffer	4. Ring = Multiplikator	5. Ring = Toleranz	6. Ring = Temperaturkoeffizient α
Silber			0,01 Ω	$\pm 10 \%$	
Gold			0,1 Ω	$\pm 5 \%$	
Schwarz		0	1 Ω		$\pm 250 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Braun	1	1	10 Ω	$\pm 1 \%$	$\pm 100 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Rot	2	2	100 Ω	$\pm 2 \%$	$\pm 50 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Orange	3	3	1 k Ω		$\pm 15 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Gelb	4	4	10 k Ω		$\pm 25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Grün	5	5	100 k Ω	$\pm 0,5 \%$	$\pm 20 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Blau	6	6	1 M Ω	$\pm 0,25 \%$	$\pm 10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Violett	7	7	10 M Ω	$\pm 0,1 \%$	$\pm 5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Grau	8	8	100 M Ω		$\pm 1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Weiß	9	9	0,1 Ω *	$\pm 10 \%$ *	
(ohne)				$\pm 20 \%$	

* Gold- und Silberlack können die Leitfähigkeit stören, daher wird für den 4. Ring manchmal Gold durch Weiß (Multiplikator 0,1 Ω) und für den 5. Ring Silber durch Weiß (für Toleranz $\pm 10 \%$) ersetzt.

Beispiel: Ein Widerstand ist mit den Farbringen Orange, Blau, Schwarz, Braun und Braun gekennzeichnet (s. Abb. oben).

Der Widerstandswert berechnet sich dann:

$$3 \ 6 \ 0 \cdot 10 \ \Omega = 3,6 \text{ k}\Omega, \text{ Toleranz } \pm 1 \%$$

Tab. 2.2: Farbcode zur Kennzeichnung von Kohleschichtwiderständen.

Farbe	1. Ring = 1. Ziffer	2. Ring = 2. Ziffer	3. Ring = Multiplikator	4. Ring = Toleranz
Silber			0,01 Ω	$\pm 10 \%$
Gold			0,1 Ω	$\pm 5 \%$
Schwarz		0	1 Ω	
Braun	1	1	10 Ω	$\pm 1 \%$
Rot	2	2	100 Ω	$\pm 2 \%$
Orange	3	3	1 k Ω	
Gelb	4	4	10 k Ω	
Grün	5	5	100 k Ω	$\pm 0,5 \%$
Blau	6	6	1 M Ω	$\pm 0,25 \%$
Violett	7	7	10 M Ω	$\pm 0,1 \%$
Grau	8	8	100 M Ω	
Weiß	9	9	0,1 Ω^*	$\pm 10 \%^*$
(ohne)				$\pm 20 \%$

* Gold- und Silberlack können die Leitfähigkeit stören, daher wird für den 3. Ring manchmal Gold durch Weiß (Multiplikator 0,1 Ω) und für den 4. Ring Silber durch Weiß (für Toleranz $\pm 10 \%$) ersetzt.

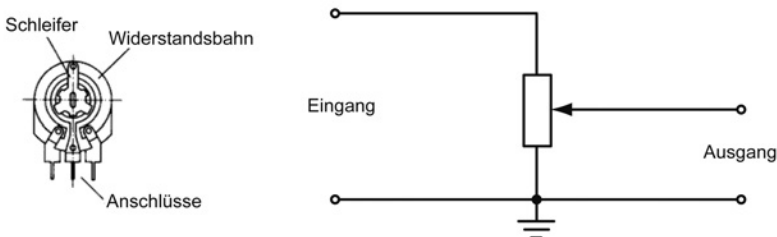
Beispiel: Ein Widerstand ist mit den Farbringen Braun, Schwarz, Rot und Silber gekennzeichnet. Der Widerstandswert berechnet sich dann:

$$1\ 0 \cdot 100\ \Omega = 1\ \text{k}\Omega, \text{ Toleranz } \pm 10\ \%$$

Widerstände mit veränderbarem Widerstandswert

Widerstände mit veränderbarem Widerstandswert werden auch Potentiometer genannt. Diese bestehen aus einem Träger, auf welchem ein Widerstandsmaterial aufgebracht ist, und einem beweglichen Schleifer bzw. Gleitkontakt. Der Schleifer unterteilt den Gesamtwiderstand in zwei Teilwiderstände. Damit ist ein Potentiometer ein einstellbarer Spannungsteiler, und wirkt so wie zwei in Reihe geschaltete Widerstände (Abb. 2.3).

Es gibt eine Vielzahl von verschiedenen Potentiometern, zum Beispiel Kohleschicht-, Draht- und Wendelpotentiometer.

**Abb. 2.3:** Prinzip eines Potentiometers.

Kohleschichtpotentiometer

Die Widerstandsschicht besteht hier aus Kohle. Ein Abgriff gleitet über diese Kohleschicht, und je nach Drehwinkel ergeben sich damit unterschiedliche Widerstandswerte. Die Bauformen und Größen sind auf die jeweilige Anwendung angepasst; manche sind so winzig, dass sie nur mit einem sehr kleinen Schraubendreher einzustellen sind (Abb. 2.4).

Drahtpotentiometer

Beim Drahtpotentiometer ist ein Widerstandsdraht auf einen Keramikkörper aufgewickelt (Abb. 2.5). Der Schleifer gleitet über die Drahtwindungen, und somit werden unterschiedliche Drahtlängen bzw. Widerstandswerte abgegriffen.

Wendelpotentiometer

Hier ist die Widerstandsbahn aufgrund der Konstruktion besonders lang. Dadurch sind besonders große Widerstandswerte und genaue Widerstandseinstellungen möglich (Abb. 2.6).



Abb. 2.4: Kohleschicht-Potentiometer verschiedener Bauformen.



Abb. 2.5: Draht-Potentiometer.

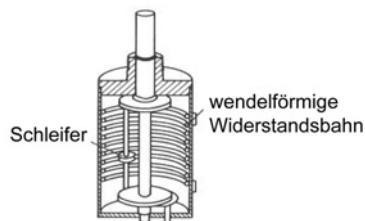


Abb. 2.6: Wendel-Potentiometer.

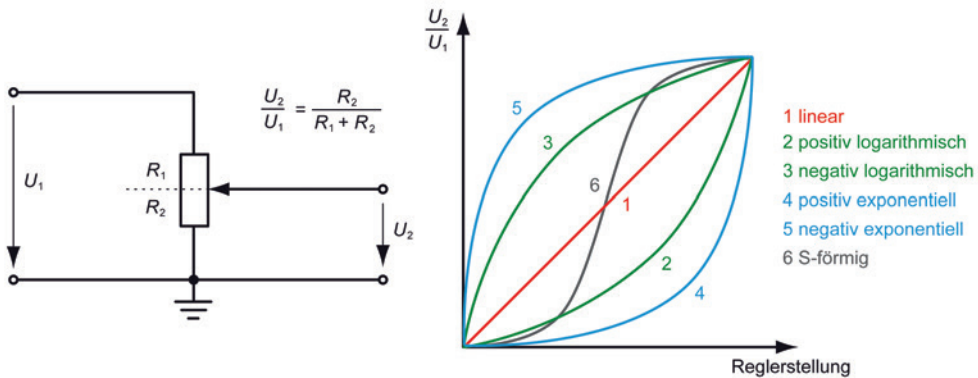


Abb. 2.7: Charakteristiken von Potentiometern.

Charakteristiken von Potentiometern

Bei Potentiometern kann die Funktion des Drehwinkels bzw. der Strecke zur Widerstandswertänderung verschiedene Charakteristiken aufweisen: Es gibt Potentiometer mit linearer, logarithmischer, exponentieller oder S-förmiger Charakteristik (Abb. 2.7).

Am häufigsten werden lineare und logarithmische Charakteristiken eingesetzt, die wie folgt gekennzeichnet werden:

- Linear = Keine Kennzeichnung bzw. „lin A“ oder „1“ hinter dem Widerstandswert.
- Positiv logarithmisch = „log B“, „+“ oder „2“ hinter dem Widerstandswert.
- Negativ logarithmisch = „log C“, „-“ oder „3“ hinter dem Widerstandswert.

Achtung: Manche Hersteller verwenden die Kennbuchstaben A und B genau andersherum, und leider gibt es noch weitere Variationen in der Kennzeichnung.

Verhalten des Ohmschen Widerstandes bei Gleich- und Wechselstrom

Der Ohmsche Widerstand R wird auch als linearer Widerstand oder Gleichstromwiderstand bezeichnet. Bei einem Ohmschen Widerstand gibt es keinen Unterschied, was das Verhalten bei Gleich- oder Wechselstrom angeht. Fließt Wechselstrom über einen Ohmschen Widerstand, so hat dies also keine Auswirkungen auf die Phase von Strom und Spannung – im Gegensatz zu Induktivität und Kapazität, die einen zeitlichen Versatz von Strom und Spannung zur Folge haben (s. Kap. 2.2 und 2.3). Die *Impedanz* Z eines Ohmschen Widerstandes ist damit über alle Frequenzen hinweg gleich, das bedeutet $R = Z$ (Abb. 2.8).

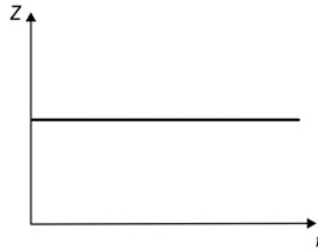


Abb. 2.8: Funktion Impedanz über die Frequenz beim Ohmschen Widerstand.

Was hat es mit der Impedanz auf sich?

„Impedanz“ leitet sich aus dem lateinischen Wort „Impedire“ ab, was so viel wie Hemmen oder auch Verhindern bedeutet. So sagt der Wert der Schallimpedanz aus, ob ein Medium Schall besser oder schlechter überträgt, also wie viel Widerstand der Schallausbreitung entgegen gesetzt wird (s. Kap. 2 im Band „Tontechnik für Veranstaltungstechniker“, ebenfalls erschienen im S. Hirzel Verlag). Bei der elektrischen Impedanz spielt die Strom-, Spannungs- oder Leistungsübertragung eine Rolle. Letztlich wird betrachtet, in welcher Quantität (Amplitude) und Qualität (Frequenzgang) ein Signal beim Empfänger ankommt.

Die Impedanz hat eine große Bedeutung bei der elektrischen Anpassung von Hochfrequenzleitungen, aber auch bei der Wellenausbreitung im freien Raum, also bei Schall- oder elektromagnetischen Wellen. Stimmen bei der HF-Übertragung die Impedanzwerte von Sender, Antennen, Kabelstrecken und Empfänger nicht überein, so wird an den Übergängen ein Teil der Energie reflektiert.

Die Impedanz kann als ein Quotient zweier physikalischer Größen angegeben werden. Ohne Berücksichtigung von Phasendifferenzen, d. h. $\varphi = 0^\circ$, entspricht die elektrische Impedanz Z dem Quotienten aus dem Effektivwert der Spannung U_{eff} und dem Effektivwert des Stroms I_{eff} :

$$Z = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} \quad (\text{Formel 2.1})$$

Die Einheit der elektrischen Impedanz Z ist das Ω (Ohm). Diese Einheit wird ebenso für den Ohmschen Widerstand R verwendet. Den Kehrwert der Impedanz Z bezeichnet man übrigens als Admittanz Y :

$$Y = \frac{1}{Z} \quad (\text{Formel 2.2})$$

In den folgenden Kapiteln wird erklärt, wie sich die Impedanz berechnen lässt, wenn im Wechselstromkreis Induktivitäten (Spulen) und Kapazitäten (Kondensatoren) vorhanden sind.

8 Licht, Optik und Auge



Die Eigenschaften des Lichts und die Optik, somit also die physikalischen Grundlagen der Beleuchtungstechnik, werden im ersten Lehrjahr unterrichtet. Daneben wird auch auf die Physiologie des menschlichen Auges eingegangen.

Licht ist Träger von Energie – eine von Licht bestrahlte Fläche erwärmt sich, und eine Fozelle gibt unter Lichteinwirkung elektrische Leistung ab.

Wissenschaftler fragten sich lange, ob sich Licht eher als eine elektromagnetische Welle beschreiben lässt, oder ob es aus Teilchen, den Lichtquanten bzw. Photonen besteht. Erst die Quantentheorie konnte eine Antwort auf diese Frage liefern, und sie lautet seltsamerweise: Beides! Dieses Phänomen wird Welle-Teilchen-Dualismus genannt. Im Folgenden werden beide Betrachtungsweisen des Lichts eine Rolle spielen – je nachdem, welcher Aspekt in einem bestimmten Sachverhalt zum Verständnis beiträgt, wird der Wellen- oder der Teilchencharakter herangezogen. Man sollte aber immer im Hinterkopf haben, dass der menschliche Geist das Wesen des Lichts im Grunde nur sehr schwer begreifen kann.

8.1 Lichttechnische Grundgrößen

Frequenz f und Wellenlänge λ

Eine wichtige lichttechnische Grundgröße ist die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c_0 . Sie beträgt 299 792 458 m/s. Für alle elektromagnetischen Wellen gilt (siehe dazu auch Kap. 1.4.2):

$$\text{Frequenz } f = \frac{\text{Lichtgeschwindigkeit } c}{\text{Wellenlänge } \lambda} \quad (\text{Formel 8.1})$$

Einheit Hz

$$\text{Wellenlänge } \lambda = \frac{\text{Lichtgeschwindigkeit } c}{\text{Frequenz } f} \quad (\text{Formel 8.2})$$

Einheit m

Die Wellenlänge λ des für Menschen sichtbaren Lichts – Kurzbezeichnung VIS – reicht von 380 bis 780 nm (Abb. 8.1).

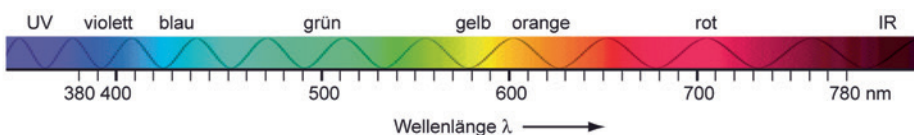


Abb. 8.1: Spektrum des Lichts.

Der nicht sichtbare, kurzwellige Bereich bis 380 nm umfasst das ultraviolette Licht (UV), der ebenfalls nicht sichtbare Bereich oberhalb von 780 nm wird als Infrarotlicht bezeichnet (IR).

Bei der spektralen Zerlegung des weißen Tageslichts mit Hilfe eines Prismas (s. Abb. 8.13 auf S. 183) werden die darin enthaltenen Spektralfarben sichtbar. Die Übergänge zwischen den Spektralfarben sind nicht klar abtrennbar, sondern fließend. Für bestimmte Spektralfarben können aber Bereichsgrenzen angegeben werden:

Violett	380 bis 424 nm
Blau	424 bis 486 nm
Blaugrün	486 bis 517 nm
Grün	517 bis 527 nm
Gelbgrün	527 bis 575 nm
Gelb	575 bis 585 nm
Orange	585 bis 647 nm
Rot	647 bis 780 nm

UV-Licht jenseits der Spektralfarbe Violett reicht von 100 bis 380 nm, unterteilt in die Bereiche UV-A (315 bis 380 nm), UV-B (280 bis 315 nm) und UV-C (100 bis 280 nm). Das ultraviolette Licht ist schädlich für die Haut und die Augen, besonders UV-B und UV-C. Die Auswirkungen reichen von Sonnenbrand und Bindehautreizung bis zu Hautkrebs und Erblindung, abhängig von der Intensität und Dauer der Einwirkung. Das Tageslicht der Sonne wird durch die Atmosphäre gefiltert, vor allem durch die Ozonschicht. Auf die Erdoberfläche treffen daher nur noch ca. 7 % UV-Licht – daneben 48 % sichtbares Licht, 45 % IR-Licht und sehr geringe Anteile von Röntgen- und Mikrowellenstrahlung. Infrarotlicht jenseits der Spektralfarbe Rot wird ebenfalls in drei Bereiche A, B und C unterteilt: IR-A = 780 nm bis 1,4 μm , IR-B = 1,4 bis 3 μm und IR-C = 3 μm bis 1 mm. Thermische Strahler wie beispielsweise Glühlampen und Heizstrahler sind IR-Quellen.

Im Folgenden betrachten wir weitere lichttechnische Größen, die in der Video- und Lichttechnik von Bedeutung sind, wie Lichtenergie, Farbtemperatur, Lichtstärke, Lichtstrom, Leuchtdichte, Beleuchtungsstärke und Belichtung.

Lichtenergie Q

Eine Möglichkeit zur Erzeugung von Licht ist die Anregung bestimmter Metalle oder Gase durch Wärme oder Elektrizität. In der Folge wechseln Elektronen in den Atomen des angeregten Stoffs von inneren auf energetisch höher liegende, äußere Umlaufbahnen. Die Energiedifferenz zwischen bestimmten Zuständen ist immer gleich und klar definiert und kann nicht jeden beliebigen Wert annehmen – sie ist *gequantelt*. Wenn ein Elektron anschließend spontan von einer Elektronenbahn mit höherem Energieniveau E_2 auf eine Bahn mit niedrigerem Energieniveau E_1 zurückfällt, kann die überschüssige Energie als Lichtquant freigesetzt werden (Abb. 8.2). Das Plancksche Wirkungsquantum h verknüpft die Wellen- und die Teilcheneigenschaften des Lichts: Die Lichtenergie Q eines Lichtquants berechnet sich aus dem Planckschen Wirkungsquantum h und der Frequenz f des abgestrahlten Lichts.

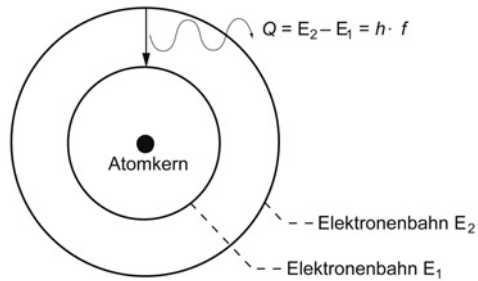


Abb. 8.2: Emission eines Lichtquants aus der Elektronenhülle eines Atoms.

$$Q = \frac{h \cdot c}{\lambda} = h \cdot f \quad (\text{Formel 8.3})$$

Einheit J

h : Plancksches Wirkungsquantum = $6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js}^2$ oder Js

c : Lichtgeschwindigkeit in m/s

λ : Wellenlänge in m

f : Frequenz in Hz

Eine länger anhaltende Lichtabstrahlung entsteht durch zahlreiche, ständige Elektronensprünge auf tiefer gelegene Bahnen. Man spricht hier auch von einer *spontanen Emission*. Da die Elektronen sehr verschiedene Energiebeträge haben können, wird Licht mit verschiedenen Wellenlängen bzw. mit einem breiten Spektrum erzeugt. Beim Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) wird dagegen Licht durch *stimulierte Emission* erzeugt. Laserlicht hat aufgrund dessen ein sehr enges Spektrum, mehr dazu aber in Kap. 9.1.3.

Farbtemperatur

Die Farbtemperatur des Lichts wird durch eine ideale thermische Strahlungsquelle definiert, dem Planckschen Strahler, der auch schwarzer Körper genannt wird. Der Plancksche Strahler ist eine theoretische Referenzquelle. Er lässt sich in Wirklichkeit nicht realisieren und ist nur als Gedankenmodell relevant. Das von Planckschen Strahler abgegebene Lichtspektrum hängt ausschließlich von seiner Temperatur ab. Die maximale Energie im Spektrum verschiebt sich mit steigender Temperatur zu kürzeren Wellenlängen bzw. höheren Frequenzen (Abb. 8.3). Dieser Zusammenhang wird Wiensches Verschiebungsgesetz genannt, und mit folgender Formel kann die Wellenlänge berechnet werden, bei der die jeweilige Strahlungskurve ein Maximum aufweist:

$$\lambda_{\max} = \frac{C}{T} \quad (\text{Formel 8.4})$$

Einheit μm

C : Wiensche Konstante = $2897,8 \mu\text{m} \cdot \text{K}$

T : Temperatur in K

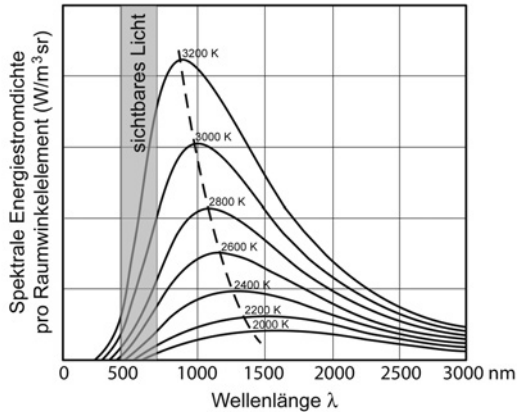


Abb. 8.3: Plancksche Strahlungskurven nach dem Wiensches Verschiebungsgesetz (Anm.: Die Einheit „sr“ steht für Steradian; Weiteres dazu wird auf S. 176 erklärt).

Wird der Plancksche Strahler auf 6500 K erhitzt, sendet er Licht mit einer Farbtemperatur aus, die der des Tageslichts in der Nachmittagssonne entspricht. Eine Kerze hat eine Farbtemperatur von ca. 1500 K, das abgestrahlte Licht erscheint dabei rötlich. Eine Glühlampe mit einer Farbtemperatur von ca. 3200 K erscheint gelblich. Der blaue Himmel weist dagegen eine Farbtemperatur von ca. 9000 bis 12.000 K auf. Erhöht sich die Farbtemperatur einer Lichtquelle also beispielsweise von 1000 bis 18.000 K, so ändert sich der Farbeindruck von Rot über Orange, Gelb, Weiß, Blau bis Violett. Zwei Körper mit der gleichen Farbtemperatur können auch bei unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung des Lichts im Auge des Betrachters den gleichen Farbeindruck auslösen.

Normlichtarten

Lichtquellen mit einer bestimmten Spektralverteilung können einer Normlichtart zugeordnet werden. Die Normlichtarten wurden eingeführt, um reproduzierbare Farbeindrücke bei abgestrahlten, farbigen Objekten zu erhalten.

- Normlichtart A: Entspricht einer Glühlampe mit 2856 K
- Normlichtart C: Entspricht Tageslicht mit 6774 K (sehr wenig UV-Anteil)
- Normlichtart D50: Entspricht mittlerem Tageslicht mit ca. 5000 K (wenig UV-Anteil)
- Normlichtart D65: Entspricht mittlerem Tageslicht mit 6504 K (viel UV-Anteil)

Wenn von einer Beleuchtung mit Tageslichtcharakter gesprochen wird, so ist damit meist die Normlichtart D65 gemeint. Licht mit dieser Farbtemperatur wird beispielsweise mit Halogen-Metallampflampen und Xenon-Hochdrucklampen erzeugt (s. Kap. 9.1.4).

Farbwiedergabe-Index R_a

Der Farbwiedergabe-Index beschreibt die Farbverschiebung bestimmter Testfarben bei der Beleuchtung durch die untersuchte Lichtquelle im Vergleich zur Beleuchtung durch eine Bezugslichtquelle. Letztere ist eine Normlichtquelle wie z. B. der Planckscher Strahler oder das Tageslicht.

Die bestmögliche Farbwiedergabe ist bei einem Indexwert von $R_a = 100$ gegeben; je niedriger der Wert, desto schlechter ist die Farbwiedergabe der Lichtquelle. Die Indizes werden in verschiedene Stufen eingeteilt (Tab 8.1).

Tab. 8.1: Stufen des Farbwiedergabe-Index.

Stufe	R_a	Farbwiedergabe der Lichtquelle	Anwendung
1A	90 bis 100	Sehr gut	Farbbemusterung, Wohnung, Büro
1B	80 bis 89		
2A	70 bis 79	Gut	Industrie (Farbverarbeitung)
2B	60 bis 69		
3	40 bis 59	Mittel	Industrie
4	20 bis 39	Gering	Industrie
Farbwiedergabeindex einiger Lampen			
Lampe	Index R_a		
Glühlampe	bis zu 100		
Leuchtstofflampe, weiß de Luge	85 bis 100		
Leuchtstofflampe, weiß	70 bis 100		
LED, weiß	70 bis 95		
Leuchtstofflampe	50 bis 90		
Halogen-Metaldampflampe	60 bis 95		
Natriumdampf-Hochdrucklampe, warmweiß	80 bis 85		
Quecksilberdampf-Hochdrucklampe	45		
Natriumdampf-Hochdrucklampe, Standard	18 bis 30		
Natriumdampf-Niederdrucklampe	bis zu 44		

Lichtstärke I

Die Lichtstärke ist eine physikalische Grundgröße des Lichts. Die Einheit ist Candela (cd), da die ursprüngliche Referenz tatsächlich eine brennende Kerze war. Bis zum Jahr 1979 wurde diese Einheit gemäß des internationalen Einheitensystems durch eine Normlichtquelle definiert: $1/60 \text{ cm}^2$ eines Planckschen Strahlers bei 2043,15 K, die Temperatur von erstarrendem Platin. Diese Normlichtquelle sendet eine Lichtstärke von 1 cd aus.

Die derzeit gültige Definition für die Lichtstärke lautet seit 1979:

„Die Candela ist die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ [Wellenlänge 555 nm] aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung $1/683 \text{ Watt}$ durch Steradian beträgt.“

(Quelle: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, www.ptb.de)

Anm.: Der Steradian wird unter Lichtstrom ϕ erklärt (s. u.).

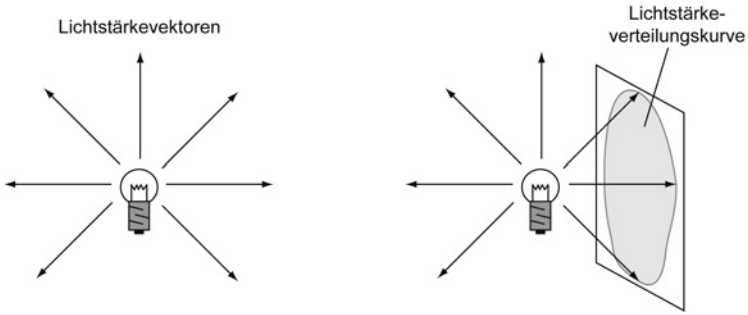


Abb. 8.4: Lichtstärkevektoren und Lichtstärkeverteilungskurve (LVK).

Die Lichtstärke ist richtungsabhängig und kann daher geometrisch durch Vektorpfeile dargestellt werden. Verbindet man die auf einer Ebene liegenden Lichtstärkevektoren einer Lichtquelle, so ergibt sich die Lichtstärkeverteilungskurve (Abb. 8.4). Quantitativ kann die Lichtstärke durch ein spezielles Messgerät, ein Photometer, erfasst werden.

Lichtstrom ϕ

Der Lichtstrom ist ein Maß für die Strahlungsleistung einer Lichtquelle im Raum. Man betrachtet hierbei die Lichtstärke über einen bestimmten Raumwinkel.

$$\text{Lichtstrom } \phi = \text{Lichtstärke } I \cdot \text{Raumwinkel } \Omega \quad (\text{Formel 8.5})$$

Einheit lm

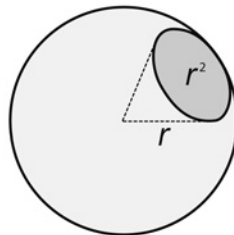
Definition der Einheit Lumen (lm):

$$1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot 1 \text{ sr}$$

sr : Einheit des Raumwinkels (s. u.)

Raumwinkel Ω

Der Raumwinkel definiert ein Oberflächenstück einer gedachten Kugeloberfläche um die Lichtquelle. Er ist der Winkel, der aus einer Kugeloberfläche eine Fläche der Größe r^2 ausschneidet (Abb. 8.5) und somit ein Maß für den von der Lichtstrahlung erfüllten Raumbereich. Die Einheit ist der Steradian (sr).



Maximum bei Vollkugel = 4π

Abb. 8.5: Raumwinkel.

Lichtausbeute η

Die Lichtausbeute ist ein Maß für die Wirtschaftlichkeit oder den Wirkungsgrad eines Leuchtmittels – daher wird manchmal auch die Bezeichnung *Effizienz* benutzt. Sie wird in Lumen pro Watt (lm/W) angegeben, ist also das Verhältnis von abgestrahltem Lichtstrom zu zugeführter elektrischer Leistung:

$$\text{Lichtausbeute } \eta = \frac{\text{Lichtstrom } \phi}{\text{elektrische Leistung } P} \quad (\text{Formel 8.6})$$

Einheit lm/W

Die physikalische Höchstgrenze liegt bei 683 lm/W bei einer monochromen Lichtquelle, die Licht mit einer Wellenlänge von 555 nm emittiert. Die maximale Lichtausbeute eines idealen Leuchtmittels, das dieselbe Energie gleichmäßig über das gesamte sichtbare Lichtspektrum abstrahlt, beträgt 238 lm/W. Da aber nahezu alle Leuchtmittel einen Großteil der Energie in Wärme wandeln, liegt die Lichtausbeute in der Regel deutlich niedriger. So zum Beispiel bei einer Glühlampe bei ungefähr 12 lm/W. Selbst eine Energiesparlampe hat nur eine Lichtausbeute von ca. 65 lm/W (s. Kap. 9.1 „Leuchtmittel“).

Leuchtdichte L

Die Leuchtdichte einer Lichtquelle oder einer beleuchteten Fläche ist die einzige für den Menschen tatsächlich wahrnehmbare lichttechnische Größe. Sie bestimmt maßgeblich den wahrgenommenen Helligkeitseindruck. Die Leuchtdichte steigt mit der Lichtstärke, verhält sich aber antiproportional zur Fläche der Lichtquelle (Abb. 8.6).

$$\text{Leuchtdichte } L = \frac{\text{Lichtstärke } I}{\text{Fläche } A} \quad (\text{Formel 8.7})$$

Einheit cd/m²

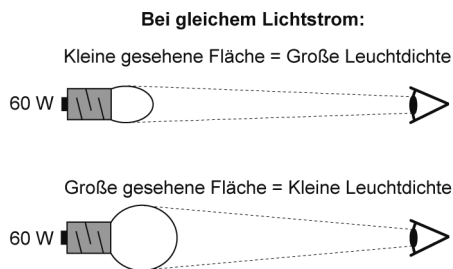


Abb. 8.6: Leuchtdichte.

9 Leuchtmittel und Scheinwerfer



Die Themenbereiche Leuchtmittel und Scheinwerfer sowie die Sicherheitsmaßnahmen beim Umgang damit sind im ersten Lehrjahr zu unterrichten.

9.1 Leuchtmittel

Es gibt eine Vielzahl verschiedener Leuchtmittel, und Abb. 9.1 gibt zunächst einen Überblick über die derzeit am häufigsten verwendeten Arten. In den folgenden Kapiteln werden wir uns diese näher ansehen. Eine Übersicht über wichtige Daten der einzelnen Leuchtmittel liefert Tab. 9.1 am Ende dieses Kapitels.

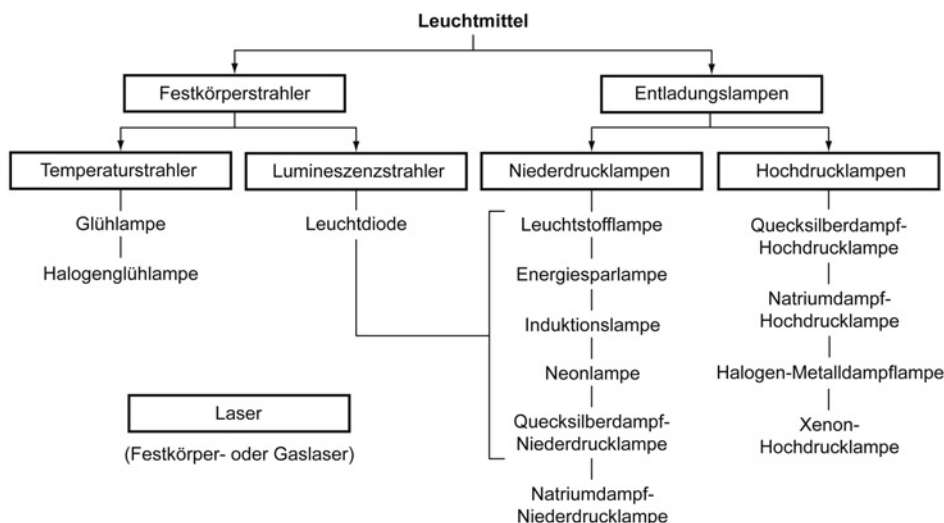


Abb. 9.1: Übersicht über die verschiedenen Leuchtmittel.

9.1.1 Temperaturstrahler

Glühlampe

Das Funktionsprinzip der Glühlampe beruht auf der so genannten spontanen Emission. Durch einen Wolfram-Glühfaden im Inneren der Glühlampe wird elektrischer Strom geleitet. Die Elektronen in den Wolfram-Atomen gewinnen dadurch an Energie und werden zum Wechsel in höhere Energieniveaus angeregt. Beim Zurückfallen emittieren sie Lichtquanten bzw. Photonen über einen weiten Frequenzbereich, darunter auch den des sichtbaren Lichts. Der Faden glüht – je höher die Temperatur des Fadens, desto heller strahlt er. Die Lichtausbeute und die Farbtemperatur sind direkt abhängig vom angelegten Strom. Zu beachten ist, dass der Glühfaden einen Schmelzpunkt hat und somit nur eine begrenzte Helligkeit zu erreichen ist. Bei Glühfäden aus

Wolfram liegt der Schmelzpunkt bei 3658 K. (Bitte nicht verwechseln mit der Farbtemperatur.) Die Glühlampe sollte aber nicht zu nahe am Schmelzpunkt betrieben werden, da der Faden dann sehr schnell aufgebraucht wird und seine Lebensdauer abnimmt. Die Wendeltemperatur beträgt daher üblicherweise maximal 3200 K. Um Oxidation und Verdampfungseffekte zu vermindern, werden verschiedene Gase in den Glaskolben eingefüllt. Für die normale Haushaltsglühlampe ist dies in der Regel ein Argon-Stickstoff-Gemisch. Für Theater- und Studiolampen werden zu meist Halogenverbindungen verwendet (s. u.).

Ein einzelner Glühfaden allein erreicht keine große Leuchtdichte. Diese wird durch das Aufwickeln des Glühfadens erhöht. Dabei dürfen sich die Wendeln des Glühfadens nicht berühren und müssen einen Mindestabstand zueinander haben, da es ansonsten zu einem elektrischen Überschlag kommt. Je enger der Faden aufgewickelt ist, desto kleiner kann auch der Leuchtkörper sein. Kleine Bauformen werden oft in Kombination mit einem Reflektorspiegel und einer Linse betrieben (Abb. 9.2). Das Licht kann dadurch besser auf eine bestimmte Position ausgerichtet werden. Der Wirkungsgrad von Glühlampen ist sehr gering; nur ca. 5 % der aufgenommenen Energie werden in Licht umgewandelt, dies entspricht einer Lichtausbeute von ungefähr 12 lm/W. Die maximale Betriebsstundenzahl beträgt ca. 750 Stunden bei Reflektorlampen und ca. 1000 Stunden bei Standardlampen. Die Helligkeit von Glühlampen kann mit allen erhältlichen Dimmern (s. Kap. 10.4) reguliert werden, dabei bleibt das Spektrum kontinuierlich (Abb. 9.3), allerdings ändert sich die Farbtemperatur und das Licht erscheint gelblicher.



Abb. 9.2 Links: Aufbau einer Standardglühlampe („Glühbirne“). **Rechts:** Reflektorleuchte.

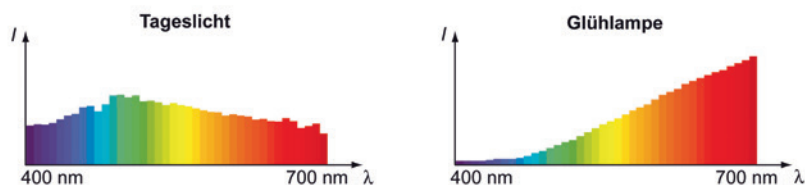


Abb. 9.3: Spektrum des Tageslichts im Vergleich zu dem einer Glühlampe.

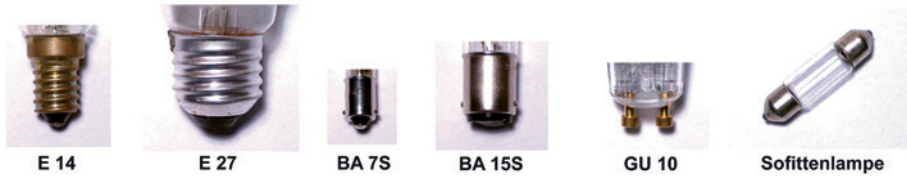


Abb. 9.4: Glühlampen mit Edison-Gewinde, Bajonettsockel und Stecksockel; Sofittenlampe.

Die Farbtemperatur (s. Kap. 8.1) von Glühlampen liegt je nach Leistungsaufnahme zwischen 2200 und 3200 K und ist damit im Vergleich zum Tageslicht (5600 bis 6500 K) relativ niedrig.

Die übliche Bauform der Glühlampe hat ein Edison-Gewinde (Kurzbezeichnung „E“), das es in verschiedenen Durchmessern gibt:

- E 5,5: Niedervoltlampen, beispielsweise für Taschenlampen
- E 10: Niedervoltlampen
- E 14: Kleine Haushaltsglühlampen (Kerzenlampen)
- E 27: Normale Haushaltsglühlampen
- E 40: Große Glühlampen mit mehr als 200 Watt Leistungsaufnahme, z. B. für Baustrahler

Weiterhin sind auch Glühbirnen mit Bajonettsockel (BA), Stecksockel (GU) und so genannte Sofittenlampen erhältlich (Abb. 9.4).

Verbot von Glühlampen geringer Energieeffizienz durch die EU

Aufgrund des äußerst schlechten Wirkungsgrades gilt bereits seit September 2009 ein Produktions- und Einfuhrverbot für sämtliche mattierte Glühlampen. Diese lassen sich nach Auffassung der EU-Kommission in der Regel problemlos durch Energiesparlampen (s. Kap. 9.1.4) ersetzen. Ebenfalls seit diesem Stichtag dürfen auch keine 100 Watt-Glühlampen mit klarem Glaskörper mehr verkauft werden. Für andere Glühlampen mit klarem Glaskörper galten folgende Fristen:

- 75 Watt-Glühlampen: Verkaufsverbot ab September 2010.
- 60 Watt-Glühlampen: Verkaufsverbot ab September 2011.
- 25 Watt-Glühlampen: Verkaufsverbot ab September 2012.

Seit September 2016 dürfen nur noch Glühlampen und Halogenglühlampen der Energieeffizienzklasse B im Handel angeboten werden (s. u.). Lagerbestände dürfen aber auch noch nach den genannten Terminen ausverkauft werden. Nicht betroffen vom Verbot sind Reflektorlampen mit einem gerichteten Lichtstrahl, bei dem mindestens 80 % des Lichts in einem Öffnungswinkel von maximal 120° austreten. Ebenso dürfen Speziallampen weiterhin verkauft werden, darunter fallen in der Veranstaltungstechnik u. a. Bühnen- und Studiolampen, Lampen für die Theaterbeleuchtung, Fotolampen und Projektionslampen. Für diese Lampen gibt es bisher keine ausreichenden Alternativen.

Energieeffizienzklassen für Leuchtmittel

Auf der Produktverpackung von Leuchtmitteln finden sich einheitliche Kennzeichnungen zur Energieeffizienz. Die Energieeffizienzklassen reichen von „A“ (sehr effizient) bis „G“ (wenig effizient). Daneben werden der Lichtstrom in Lumen, die elektrische Leistungsaufnahme in Watt und die durchschnittliche Lebensdauer in Stunden angegeben (Abb. 9.5).

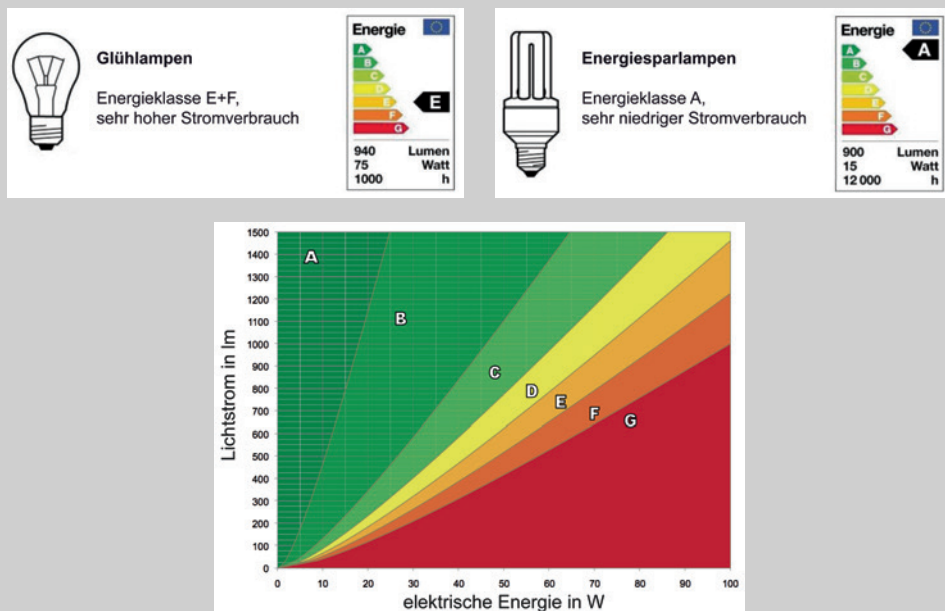


Abb. 9.5: Energieeffizienzklassen für Leuchtmittel.

Halogenglühlampe

Halogenglühlampen sind eine Weiterentwicklung der normalen Glühlampe. Sie haben ebenfalls eine Glühwendel, werden aber zusätzlich mit Halogen gasen (Brom, Jod und Fluor) gefüllt, was dazu führt, dass die Lampe während ihrer gesamten Lebensdauer einen konstanten Lichtstrom und eine konstante Farbtemperatur abgeben kann. Es findet der so genannte Halogenkreisprozess statt: Verdampfende Wolframpartikel der Wendel gehen eine Verbindung mit dem Halogen gas ein, und diese Moleküle lagern sich auf der heißen Glühwendel ab, wobei das Halogen gas wieder freigesetzt wird, die Wolframatome aber auf der Wendel verbleiben. Das freie Halogen kann nun wieder verdampfende Partikel aufnehmen, und der Kreislauf beginnt von vorne (Abb. 9.6).

Nebeneffekt des Halogenkreisprozesses: Durch die „Säuberung“ des Gases von Wolframpartikeln tritt keine Schwärzung des Kolbens auf, wie es bei normalen Glühlampen der Fall sein kann. Allerdings setzt der Halogenkreisprozess eine hohe Temperatur des Lampenkolbens von über 470 K voraus. Leider lagern sich die Partikel beim Halogenkreisprozess nicht gleichmäßig auf der Glühwendel ab, so dass bereits eine geringe Betriebsbelastung (z. B. durch Transporterschütterung) ausreichen kann, um den gewickelten Glühfaden zum Reißen bzw. Abschmelzen zu bringen.

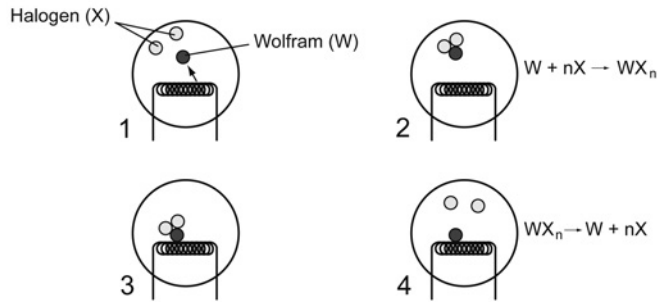


Abb. 9.6: Halogenkreisprozess.

Bei Halogenglühlampen kann es auch zu weiteren Defekten kommen: Luftzieher durch feine Risse im Kolben, verunreinigte Gasfüllungen oder unterbrochene Stromzufuhr durch defekte Leiter im Sockel. Dennoch liegt die Lebensdauer von Halogenglühlampen etwas über der normaler Glühlampen.

Halogenglühlampen haben eine Farbtemperatur zwischen 2800 und 3300 K und ein ähnliches Lichtspektrum wie herkömmliche Glühlampen, allerdings mit einem etwas größeren UV-Anteil. Daher werden sie meist mit einem UV-Filter betrieben. Die Lichtausbeute ist mit bis zu 37 lm/W größer als bei der Glühlampe. Das Licht einer Halogenglühlampe wird oft subjektiv als etwas kälter im Vergleich zum warmen Licht einer Glühlampe beschrieben.

Halogenglühlampen sind dimmbar (s. Kap. 10.4) und benötigen in der Hochvolt-Variante für 230 V (Abb. 9.7 Links) normalerweise keine zusätzlichen Betriebsgeräte; allerdings müssen Niedervolt-Halogenlampen (Abb. 9.7 Rechts) über einen Transformator an das 230 V-Netz angeschlossen werden, da sie mit 6, 12 oder 24 V betrieben werden.



Abb. 9.7 Links: Halogenglühlampe für 230 V (575 W). **Rechts:** Niedervolt-Halogenglühlampen.

9.1.2 Leuchtdiode

Eine Leuchtdiode oder kurz LED (Light Emitting Diode) wird aus Halbleitermaterialien hergestellt. Ein p-dotierter und ein n-dotierter Halbleiter bilden zusammen eine Diode, mit einer Durchlass- und einer Sperrrichtung für elektrischen Strom. Der p-Leiter ist hierbei die Anode und der n-Leiter die Kathode (Abb. 9.8). Liegt an der Kathode eine negative Spannung an, ist die LED in Durchlassrichtung beschaltet. Es fließt Strom, und an der Übergangsschicht zwischen p und n werden durch die Rekombination der Ladungsträger Photonen freigesetzt, damit also Energie in Form von Licht. Dabei ist die Wellenlänge des abgestrahlten Lichts proportional zur Dicke der Übergangsschicht. Da die Abmessung konstant ist, ist auch die Wellenlänge konstant – somit handelt es sich bei einer LED um einen monochromatischen Strahler, d. h. sie emittiert Licht in einem begrenzten Spektralbereich (Abb. 9.9). Typische Farben bzw. Wellenlängen hängen vom verwendeten Halbleitermaterial ab. Beispiele:

- Aluminium-Indium-Gallium-Phosphat (AlInGaP) für Rot, Rot-Orange und Amber.
- Indium-Gallium-Nitrogen (InGaN) für Grün, Cyan, Blau und Ultraviolett.
- Galliumnitrid (GaN) für Blau.
- Galliumphosphid (GaP) für Grün, Gelb und Rot.
- Gallium-Aluminium-Arsenid (GaAlAs): Infrarot.

LEDs, die mehrere Farben wiedergeben können, bestehen aus mehreren Dioden in einem Gehäuse (Multi-LED). So kann nach dem Prinzip der additiven Farbmischung aus einer Kombination von Rot, Grün und Blau eine RGB-LED konstruiert werden, die weißes Licht abstrahlt (Abb. 9.10 Links). RGB-LEDs werden oft für Videoleinwände genutzt. Der Zuschauer erkennt aus großer Entfernung nicht mehr die einzelne LED bzw. Bildpunkt, sondern sieht ein Gesamtbild, welches sich aus einer Vielzahl von Bildpunkten zusammensetzt.

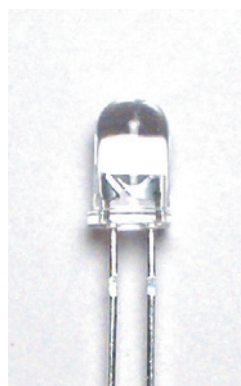
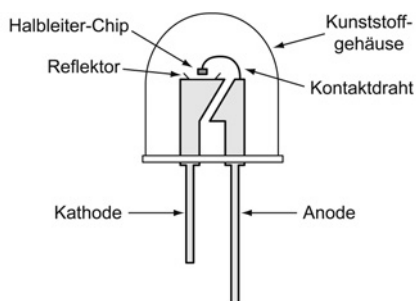


Abb. 9.8: Einfache LED. Den „LED-Kern“ umgibt ein Kunststoffgehäuse, das wie eine Optik wirkt: Die fast punktförmige Lichtquelle zwischen Anode und Kathode kann so je nach Bauweise auf Abstrahlwinkel von ca. 10° bis 110° gebündelt werden. Für sehr enge Abstrahlwinkel benötigt man einen so genannten Kollimator, eine optische Lichtführungsplastik aus Acryl, die vor die LED gesetzt wird.

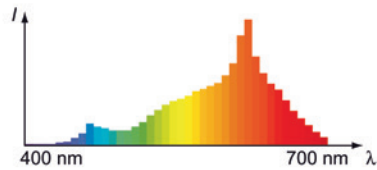


Abb. 9.9: Spektrum einer roten LED (Maximum bei $\lambda = 630$ nm).

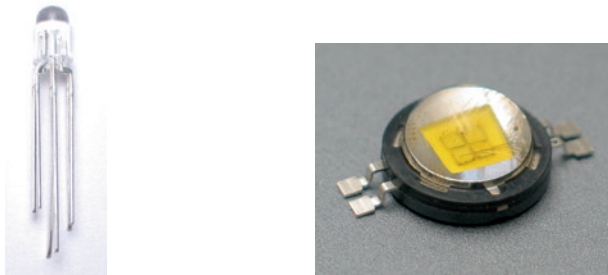


Abb. 9.10 Links: RGB-LED. **Rechts:** Hochleistungs-LED.

Es gibt aber auch Leuchtdioden, die Lumineszenzfarbstoffe im Leuchtkörper zur Erzeugung verschiedener Farben nutzen. So wird beispielsweise eine blaue LED mit einem Farbstoff kombiniert, der gelbes Licht abgibt. Aufgrund der additiven Farbmischung ergibt sich aus Blau und Gelb letztlich auch Weiß. Das weiße Licht dieser LED hat eine Farbtemperatur von 5000 bis 8000 K, liegt also in einem ähnlichen Bereich wie Tageslicht. Standard-LEDs mit einem Durchmesser von 5 mm werden mit einer Stromstärke von ca. 15 mA betrieben, sie leuchten dann mit ihrer hellsten Leuchtstärke. Low-Current-LEDs haben einen Durchmesser von 3 mm und leuchten schon bei 2 bis 4 mA mit der gleichen Leuchtstärke wie Standard-LEDs. Bei Hochleistungs-LEDs (H-LED, Abb. 9.10 Rechts) ist der Betriebsstrom mit bis zu 2,8 A deutlich größer. Allerdings bewirkt ein stärkerer Strom auch eine erhöhte Wärmeentwicklung, daher entstehen besondere Anforderungen an die Wärmeableitung. Die Wärmeenergie kann entweder über die Reflektorwanne und die Stromzuleitungen oder über in den LED-Körper eingearbeitete Wärmeleiter abgeführt werden.

Die Hersteller geben für LEDs eine Lebensdauer von 15 000 bis 30 000 Stunden an. Mit besonders niedrigen Strömen betriebene LEDs sollen sogar eine Lebensdauer von bis zu 100 000 Stunden haben. LEDs fallen meist nicht plötzlich aus, sondern werden nach und nach schwächer. Im Vergleich zu einer Glühlampe verbraucht eine LED bei gleicher Lichtmenge weniger Energie und erzeugt weniger Wärme. Der Wirkungsgrad ist mit derzeit ca. 30 % schon relativ groß, die Hersteller arbeiten aber dennoch fortlaufend an der weiteren Erhöhung des Wirkungsgrades. LEDs werden mit Gleichstrom betrieben und benötigen daher für den Anschluss an das Wechselstromnetz ein entsprechendes Netzteil. Das Dimmen von LEDs ist nur mit besonderen Vorschaltgeräten möglich, welche die Leistung des angelegten Gleichstroms durch Pulsweitenmodulation (PWM) regulieren (s. Kap. 1.6.3).

9.1.3 Laser

Ein Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) ist eine künstlich gerichtete Strahlungsquelle, deren Licht durch stimulierte Emission erzeugt wird. Die Anregung der Elektronen auf ein höheres Energieniveau kann durch Xenon-Blitzlampen, elektrische Gasentladungen, chemische Reaktionen oder einen anderen Laser erfolgen. Im Gegensatz zur spontanen Emission bei Glühlampen (s. o.) fallen beim Laser aber die meisten angeregten Elektronen nicht von selbst in ihren ursprünglichen Zustand zurück, sondern werden von anderen Photonen dazu veranlasst. Jedes auf diese Weise erzeugte Photon kann in einer Art Kettenreaktion angeregte Elektronen zum Zurückfallen und damit zur Abgabe eines weiteren Photons veranlassen. Es ergibt sich eine Verstärkung der Strahlung. Ein Resonator oder die Gestalt des aktiven Mediums sorgen dafür, dass diese Verstärkung rückgekoppelt und in einer bevorzugten Richtung erfolgt. Die Strahlung wird in einem Rohr mit Spiegeln an beiden Enden mehrmals reflektiert. Einer der beiden Spiegel ist teildurchlässig, so dass das nutzbare Laserlicht hier den Aufbau verlässt (Abb. 9.11).

Die emittierten Photonen besitzen die gleichen Eigenschaften (Frequenz, Phase, Polarisation und Ausbreitungsrichtung) wie das anregende Photon. – das Laserlicht ist damit kohärent. Es kann daher außerordentlich intensiv sein und lässt sich sehr scharf bündeln. Im Gegensatz dazu sendet eine Glühlampe inkohärentes Licht aus, also Lichtwellen, die nicht dieselbe Phasenlage und Wellenlänge aufweisen.

Als Lasermedium werden Festkörper (z. B. ein Rubinkristall), Halbleiter, Flüssigkeiten (z. B. gelöste Farbstoffe) oder Gase verwendet. Gaslaser sind mit einem Gasgemisch gefüllt, zum Beispiel auf Helium- oder Neonbasis mit Beimischungen von Halogenen (Fluor), Edelgasen (Argon, Krypton oder Xenon), Stickstoff, Kohlenmonoxid oder Kohlendioxid (Abb. 9.12). In der Veranstaltungstechnik begegnen uns Laser als spezielle Lichteffekte oder in Laserprojektoren. Es gibt aber auch Infrarotlaser, ultraviolette Laser und Laser mit einer Wellenlänge, die im Bereich der Röntgenstrahlung liegt.

Der nutzbare Wellenlängenbereich liegt derzeit etwa zwischen 200 und 10 000 nm (bei sehr großen Wellenlängen spricht man auch vom „Maser“ = Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Sehr billige und robuste Laser lassen sich, ähnlich wie LEDs, aus Halbleiterdioden herstellen. Sichtbare Laser dieser Art sind beispielsweise in einfachen Laserpointern oder in Entfernungsmessgeräten eingebaut und werden auch in der Lichtwellenleitertechnik (s. Kap. 3.3) eingesetzt.

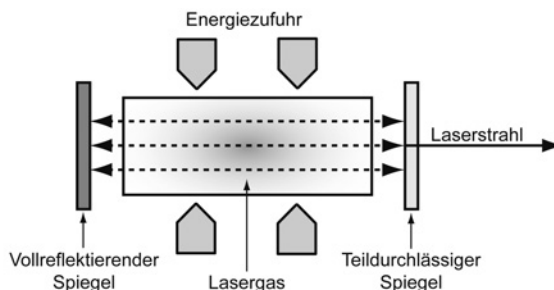


Abb. 9.11: Funktionsprinzip eines Lasers.

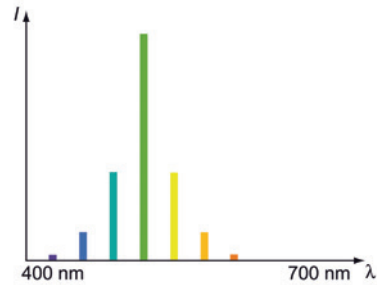
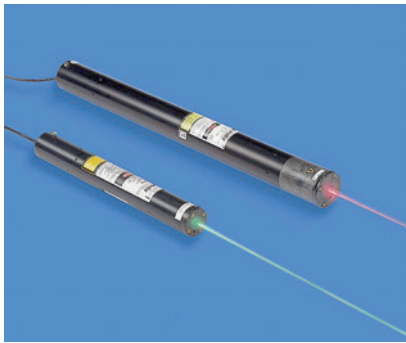


Abb. 9.12 Links: Helium-Neon-Laser in Rot und Grün. **Rechts:** Spektrum eines grünen Lasers.

9.1.4 Entladungslampen

Entladungslampen bestehen aus einer mit Gas gefüllten Glasröhre und zwei Elektroden. Eine dort angelegte Spannung regt einzelne Elektronen in den Gasatomen an, auf ein höheres Energieniveau zu wechseln. Beim Zurückspringen auf das ursprüngliche Energieniveau wird ein Photon abgestrahlt (spontane Emission).

Die meisten Entladungslampen benötigen spezielle Vorschaltgeräte (s. S. 231), können also nicht direkt an das Stromnetz angeschlossen werden. Das Vorschaltgerät ist zum einen notwendig, da zur Zündung einer Entladungslampe ein ausreichender Elektronenstrom im Entladungsgefäß (Brenner) fließen muss. Zum anderen muss nach dem Zünden der Strom begrenzt werden, da es ansonsten zu einer lawinenartigen Ionisierung des angeregten Gases und zu einem ständig steigenden Strom kommen würde, der die Zerstörung der Lampe zur Folge hätte. Entladungslampen sind nur bedingt elektronisch dimmbar, da unterhalb einer gewissen Spannung der Elektronenstrom abreißt und die Lampe erlischt (ohne weitere Maßnahmen meist bei ca. 50 % der Lampenleistung). Zudem führt ein Rückgang des Lichtstroms zu einer Veränderung der Farbwiedergabequalität, und bei geringerer Leistung steigt die Farbtemperatur, das Licht erscheint bläulicher. Ursache hierfür: Beim gedimmten Betrieb wird der Glaskolben kälter – die Metallverbindungen, die für den Rotanteil im Lichtspektrum ausschlaggebend sind, kondensieren als erste am Glaskolben und stehen damit für die Lichterzeugung nicht mehr zur Verfügung. Die Regulierung des Lichtstroms erfolgt daher bei Bühnenscheinwerfern mit diesen Leuchtmitteln meist über mechanische Blenden.

Man unterscheidet Niederdrucklampen mit Gasdrücken weit unter 1 bar und Hochdrucklampen mit wesentlich höheren Drücken im Brenner (s. S. 226).

12 Projektionstechnik



Projektionsgeräte und Projektionsverfahren stehen im 3. Lehrjahr auf dem Lehrplan. *Hinweis:* Die Grundlagen der Videotechnik finden sich im Band „Tontechnik für Veranstaltungstechniker“, ebenfalls erschienen im S. Hirzel Verlag

Ein Projektor ist ein optisches Gerät, das auf eine Bildfläche, meist eine Leinwand, ein vergrößertes Abbild wirft. Praktische Anwendungsfälle sind die Präsentation von Dias, einem Film, oder digitalen Bildern. Im Theater kann beispielsweise eine Standbildprojektion einen ansonsten aufwändig von Hand gemalten Hintergrund ersetzen. Aber oft sind es doch komplexere Anforderungen, beispielsweise mit Live-Kameras, die das Bühnengeschehen verfolgen und deren Bilder in Kombination mit Videoclips auf verschiedene Leinwände projiziert werden.

12.1 Diaprojektion

Schon sehr bald nachdem die Firma Leica die erste Kleinbildkamera auf den Markt brachte (im Jahr 1925), wurden auch Kleinbild-Diaprojektoren verkauft. Inzwischen gibt es allerdings nur noch wenige Hersteller dieser Geräte. Diaprojektoren haben eine Kondensoroptik, wie sie bereits in Kap. 8.2.5 beschrieben wurde (Abb. 12.1). Das Dia befindet sich hier dicht vor dem Brennpunkt des Objektivs, und es wird vom Licht einer Halogenglühlampe oder HMI-Lampe beleuchtet. Durch das Projektionsobjektiv entsteht ein seitenverkehrtes Abbild auf der Leinwand. Die Wiedergabe als Dia ist die qualitativ hochwertigste Art der Projektion – gut gemachte Fotos vorausgesetzt. Die gesamte Informationsfülle des aufgenommenen Bildes findet sich auf der Leinwand wieder, und selbst aus kürzestem Betrachtungsabstand wirkt das Foto scharf und lässt feinste Details erkennen. Diaprojektoren für das Mittelformat und spezielle Typen mit extremer Leistung stellen selbst hochwertige Videoprojektoren buchstäblich in den Schatten. Allerdings erfordern multimediale Diavorführungen mit mehreren Projektoren und komplexen Trickszenen einen enormen Aufwand, sowohl in Hinblick auf die benötigten Geräte als auch bei der Herstellung der Dias. Hier sind digitale Bilderschauen wiederum klar im Vorteil.

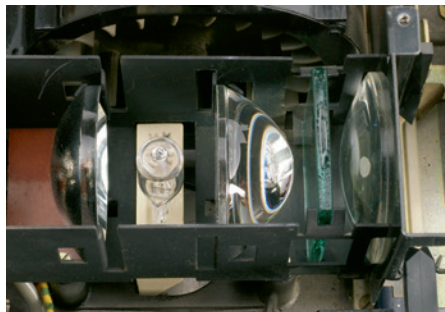
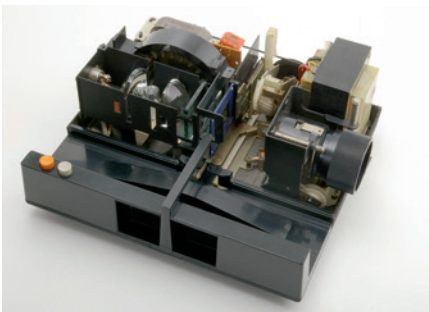


Abb. 12.1: Geöffneter Kleinbildprojektor.

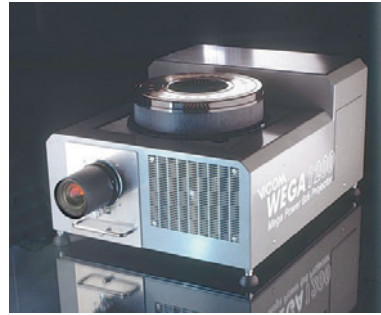


Abb. 12.2: Hochleistungs-Diaprojektoren (links: Pani AP2, rechts: Vicom WEGA1200).

Brennweiten bei Diaprojektoren

Das Dia muss weit genug vom Leuchtmittel entfernt sein, damit es nicht zu heiß wird und sich verformt. Dabei sollte die Temperatur am Dia auf ca. 60 bis 70 °C reduziert sein. Bei einer zu großen Entfernung wäre eine Projektion mit Normalobjektiven oder Weitwinkelobjektiven aber auch nicht ohne weiteres möglich. Es gibt für Diaprojektoren also verschiedene Brennweiten.

- Weitwinkeltyp: Kombination aus konkav-konvexem und plankonkavem Kondensator. Brennweiten unter 90 mm (z. B. 35 oder 70 mm).
- Normalprojektion: Einfacher, plankonvexer Kondensator. Die Normalbrennweite für Kleinbildprojektoren beträgt 90 mm.
- Langbrennweitige Projektoren: Konkav-konvexer Kondensator. Brennweiten über 90 mm (z. B. 135 oder 150 mm). Man spricht hier auch von Tele-Objektiven.

Abschätzung der Brennweite

$$\text{Brennweite } f = \frac{\text{Objekt } O \cdot \text{Distanz } D}{\text{Bild } B + \text{Objekt } O} \quad (\text{Formel 12.1})$$

O : Größe des Dia-Einschubes bzw. des durchleuchteten Objektes. Zum Beispiel gilt für die Projektoren der Firma Pani: 15,5 cm Filmdia, 17 cm Glasdia, 21,5 cm Filmdia und 23 cm Glasdia

D : Abstand Projektor zur Abbildungsfläche

B : Größe des erzeugten Bildes

Allerdings liefert diese Formel nur ungefähre Werte, da unterstellt wird, dass sich das Dia genau im Brennpunkt befindet. Dies ist technisch aber nicht machbar; das Dia würde dann nicht projiziert, da die Strahlen in einem Punkt zusammenlaufen und somit kein Bild erzeugen. Zudem würde das Dia die Hitze nicht überstehen und verbrennen.

Manchmal wird die Brennweite auch als Verhältniszahl angegeben, zum Beispiel „Objektiv mit Festbrennweite 3,3 : 1. Das bedeutet, dass bei einer Projektionsdistanz von 3,3 m eine Bildbreite von 1 m resultiert. Möchte man mit dieser Brennweite eine Bildbreite von 5 m erreichen, muss der Projektor in $3,3 \cdot 5 \text{ m} = 16,5 \text{ m}$ Entfernung aufgestellt werden.

Brennertypen für Diaprojektoren

Halogenglühlampen

- 24 V / 250 W oder 36 V / 400 W für Kleinbildprojektion (Bildformat 24 x 36 mm)
- 82 V / 300 W für Kleinbild, Mittel und Vollformat (36 x 36 mm und größer)

Alle Typen mit Halogenglühlampen sind elektronisch dimmbar (Leistungssteuerung durch Phasenanschnitt, s. Kap. 1.6.3).

Gasentladungslampen

Für Kleinbild-, Mittelbild- und Hochleistungs-Projektoren mit größeren Formaten werden Halogen-Metalldampflampen oder Xenon-Hochdrucklampen mit 575 W oder 1000 W eingesetzt. Projektoren mit Gasentladungslampen sind nur bedingt elektronisch dimmbar, die Regulierung des Lichtstroms erfolgt daher über mechanische Blenden. Während Gasentladungslampen problemlos im Brennpunkt des Kugelspiegels in der Kondensoroptik eingesetzt werden können, müssen Halogenglühlampen so justiert werden, dass das reflektierte Licht knapp an der Glühwendel vorbeistrahit. Dadurch lässt sich eine übermäßige Erhitzung vermeiden, welche die Lebensdauer des Leuchtmittels stark vermindern würde (Abb. 12.3).

Einige Diaprojektoren sind auch mit einer Mechanik zum automatischen Lampenwechsel ausgestattet. Brennt die Projektionslampe durch, schwenkt ein Spiegel um, und die Ersatzlampe schaltet sich ein.

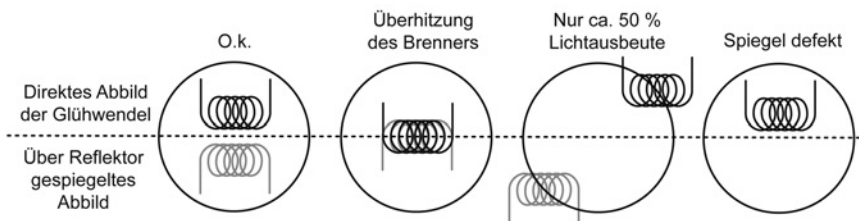


Abb. 12.3: Justage von Halogenglühlampen im Brennpunkt eines Kugelspiegels.

Diaprojektion und Audiovision

Artikel auf der Webseite des Photoindustrie-Verbandes e. V.

Die Diaprojektion ist sicher eine der hochwertigsten Formen der Bildpräsentation, denn Schärfe und Brillanz liegen auf unerreicht hohem Niveau. Dabei ist es so einfach, ein paar Dias zu rahmen und mit dem Diaprojektor auf eine Leinwand zu projizieren. Der verdunkelte Raum lenkt die Aufmerksamkeit der Zuschauer auf die Bilder und begünstigt deren intensive Wahrnehmung. Wer seine Diaserie auch noch unter ein Motto stellt, nach einem "roten Faden" strukturiert und vielleicht noch zu Musik überblendet, dem ist der Erfolg schon fast sicher.

Schon bei der Projektion einzelner Dias mit einem Projektor kann die hohe Bildqualität sichtbar werden. Moderne Diaprojektoren besitzen einen aktiven Autofokus mit Override-Funktion, der für automatische Scharfstellung der Dias sorgt, aber auch manuelles Fokussieren

per Fernbedienung ermöglicht. Mit fast allen Projektormodellen können mehrere Arten von Diamagazinen benutzt werden, wobei grundsätzlich zwischen Stangenmagazin- und professionellen Rundmagazinprojektoren unterschieden wird. In einigen Magazintypen sind die Dias verschüttgesichert, was zum Teil spezielle Diarahmen erfordert. Die Diarahmung kann man entweder bei der Entwicklung des Films gleich mitbestellen oder später selbst erledigen, was für Puristen und anspruchsvolle AV-Anwender selbstverständlich ist. Für eine optimale Randschärfe verwendet man verglaste Rahmungen. Um Dias in der Qualität zu beurteilen und Bildfolgen festzulegen, sind Lupen und Leuchtpulte wichtige Hilfsmittel.

Bei der Einzelprojektion wirkt der harte Bildwechsel oft störend, denn die Dunkelphase lässt die Augen der Zuschauer vorzeitig ermüden. Sicherlich ein Grund, warum einige Leute den letzten Diaabend vielleicht in nicht so guter Erinnerung haben. Hier hilft Überblendprojektion mit zwei Projektoren, die auf Tastendruck oder per Schieberegler die Bilder weich und ohne Dunkelpause wechseln. Doch eine Überblendung kann auch kreativ genutzt werden, wenn die Motive geschickt ausgewählt oder schon passend fotografiert worden sind. Eine echte Steigerung erfährt eine Dia-Show, wenn sie passend vertont und die Dias synchron zum Musiktakt überblendet werden.

Am einfachsten gelingt eine Überblendprojektion mit speziellen Doppelprojektoren, die zwei Projektionssysteme und die nötige Steuertechnik in einem Gerät vereinen. Über eine serielle Schnittstelle lassen sich diese Projektoren auch per Computer steuern. Da ein Doppelprojektor die Dias aus einem Magazin projiziert, ist die Wechselzeit von einem Dia zum nächsten mit rund vier Sekunden recht lang, was rasanten Bildfolgen gewisse Grenzen aufzeigt. Aus diesem Grund wird von anspruchsvollen Anwendern der Einsatz einzelner Komponenten bevorzugt. Eine Anlage besteht dann aus zwei, drei oder mehr Projektoren, einem Steuergerät und gegebenenfalls noch einem Audio-Player, der Musik und Steuersignale zur synchronen Wiedergabe liefert. Als Player kommen [...] CD-Player oder spezielle MP3-Player in Frage. Letztere gibt es auch mit integriertem Steuergerät für die Projektoren. Sie eignen sich auch ausgezeichnet für Schauen, mit synchron zur Musik laufenden und manuell gesteuerten Passagen.

Wenn man eine ansprechende Dia-Show mit raffinierten Überblendungen und Titeleinblendungen sowie einem emotional wirkenden Soundtrack aus Musik, Sprache und Originalgeräuschen gestalten möchte, kommt der richtigen AV-Software eine Schlüsselstellung zu. Moderne Software bietet nahezu unbegrenzte Möglichkeiten, Überblendfolgen und Ton zu bearbeiten und zu synchronisieren. Fast immer kann mit Vorschaubildern die Überblendwirkung auf einer virtuellen Leinwand im Computer betrachtet werden. Auch die Tonbearbeitung ist sehr komfortabel und bietet Überblendungen, Schnitte und das Zusammenmischen verschiedener Tonelemente. Wie aus anderen Programmen gewohnt, können fehlerhafte Bearbeitungen per Mausclick jederzeit wieder rückgängig gemacht werden, so dass auch Einsteiger kreativ experimentieren können. [...]

Quelle: www.prophoto-online.de

12.2 Filmprojektion

Über hundert Jahre waren Filmprojektoren zur Projektion von Bewegtbildern ohne Konkurrenz, aber inzwischen stellen viele Kinos auf digitale Film- bzw. Videoprojektoren um (das so genannte Digital Cinema). Daher soll hier nur kurz auf die Filmprojektion eingegangen werden. Das optische System eines Filmprojektors ist ähnlich aufgebaut wie bei einem Diaprojektor, es kommt hier ebenso eine Kondensoroptik zum Einsatz – damit hat es sich aber auch schon mit den Gemeinsamkeiten. Da zur Erzeugung flüssiger Bewegungsabläufe eine Bildwechselrate von mindestens 24 bis 25 Bildern pro Sekunde notwendig ist, muss eine entsprechende Mechanik zum Filmtransport vorhanden sein (Kinofilm = 24 Bilder pro Sekunde, Europäisches Standardfernsehen = 25 Bilder pro Sekunde). Neben dem Objektiv sind daher die wichtigsten Bauteile eines Filmprojektors (Abb. 12.4):

- Die Abwickel- und Aufwickelspulen.
- Die Filmbahn mit Bildfenster – dem entsprechenden Ausschnitt für das jeweilige Filmformat.
- Der Antrieb. Ein Greifer bewegt den Filmstreifen über die Perforation in der Dunkelphase ruckartig vor dem Bildfenster, während der Lichtstrom von einer Umlaufblende unterbrochen wird. In der Hellphase wird ein stillstehendes Bild projiziert.
- Die Umlaufblende. Diese unterbricht den Lichtstrahl sowohl während des Filmtransports als auch während der Projektion. Jedes Bild wird somit zweimal gezeigt, pro Sekunde erscheinen 48 Bilder, und dadurch flimmert die Wiedergabe weniger.
- Die Lichtquelle, in der Regel Xenon-Hochdrucklampen mit bis zu 10 kW Leistung, teilweise auch leistungsstarke Halogenleuchtampen.
- Die Lichtklappe, die bei einem Filmriss automatisch zufällt, aber ansonsten vom Vorführer manuell bedient wird.
- Die Vorrichtungen zur Tonwiedergabe (Lichtton, Magnetton und/oder digitale Formate).

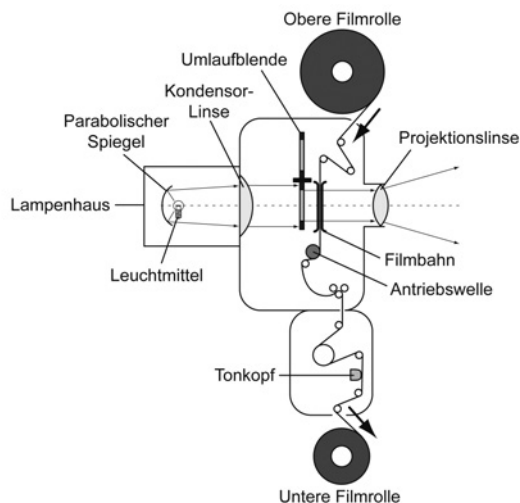


Abb. 12.4: Prinzip eines Filmprojektors.

Filmbildformate

Eine Auflistung sämtlicher bisher verwendeter Filmformate erscheint wenig sinnvoll und würde auch den Rahmen dieses Kapitels sprengen. Im Folgenden sollen daher nur die wichtigsten und am häufigsten verwendeten Formate kurz vorgestellt werden.

16 mm

- 16 mm-Film, Seitenverhältnis 1 : 1,37 (Bildfenster der Kamera 10,3 x 7,5 mm): Dieses Format wird vor allem für Fernsehproduktionen und Dokumentationen verwendet. Für eine Kinoprojektion lässt sich der 16 mm-Film auch mit qualitativen Verlusten auf 35 mm „aufblasen“ (Blow-up).
- Super 16, Seitenverhältnis 1 : 1,66 (Bildfenster der Kamera 12,35 x 7,42 mm): Ein Schmalfilmformat, das ebenfalls für Fernsehproduktionen eingesetzt wird. Im Unterschied zum 16 mm-Film verfügt Super 16 über keine Tonspur, hat dafür aber mehr nutzbare Negativbildfläche, und somit eine bessere Auflösung.

35 mm

- Normalfilm, Seitenverhältnis 1 : 1,37 (Bildfenster der Kamera 22 x 16 mm): Wird auch Standardformat oder Academy-Format genannt.
- Breitwand, Seitenverhältnis 1 : 1,66 (Bildfenster der Kamera 22 x 13,25 mm): Hat ein gegenüber dem Normalfilm verbreiterten schwarzen Streifen zwischen den Bildern. Daher wird dieses Format auch als "maskiertes" Format bezeichnet.
- Breitwand, Seitenverhältnis 1 : 1,85 (Bildfenster der Kamera 22 x 11,89 mm): Hier ist das Bild noch etwas schmaler als bei 1 : 1,66 und wird aufgrund einer etwas kürzeren Brennweite noch breiter projiziert.
- Cinemascope, Seitenverhältnis 1 : 2,35 (Bildfenster der Kamera 22 x 18,6 mm): Durch die anamorphe Optik wird der Film auf die Hälfte seiner Breite gestaucht.
- Super 35, Seitenverhältnis 1 : 1,33 (Bildfenster der Kamera 18,67 x 24,89 mm ohne Tonspur): Hier wird mit einem Normalfilm aufgenommen, aber nur ein begrenzter Breitwand-Ausschnitt verwendet, d. h. oben und unten wird ein Streifen nicht genutzt. Beim Umkopieren vor der Projektion werden dann die überflüssigen Teile geschwärzt. Alternativ kann der Film bei der Projektion durch schwarze Stoffbahnen an der Leinwand oder am Projektionsauslass kaschiert werden. Der Vorteil liegt in der besseren Umarbeitung für die Fernseh-wiedergabe mit dem Format 4 : 3. Die bei der Kinoprojektion nicht sichtbaren Teile werden hier dann wieder teilweise gezeigt. (Interessante Streitfrage, die hier oft aufkommt: Sieht man dann noch den selben Film?)

70 mm

Der 70 mm-Film hat ein Seitenverhältnis von 1 : 2,2 (Bildfenster der Kamera 52,5 x 23 mm). Die durchleuchtete Fläche ist doppelt so groß wie beim 35 mm-Film, dadurch wird die Projektion etwas schärfer und brillanter. Allerdings sind die Produktionskosten auch in etwa doppelt so hoch.

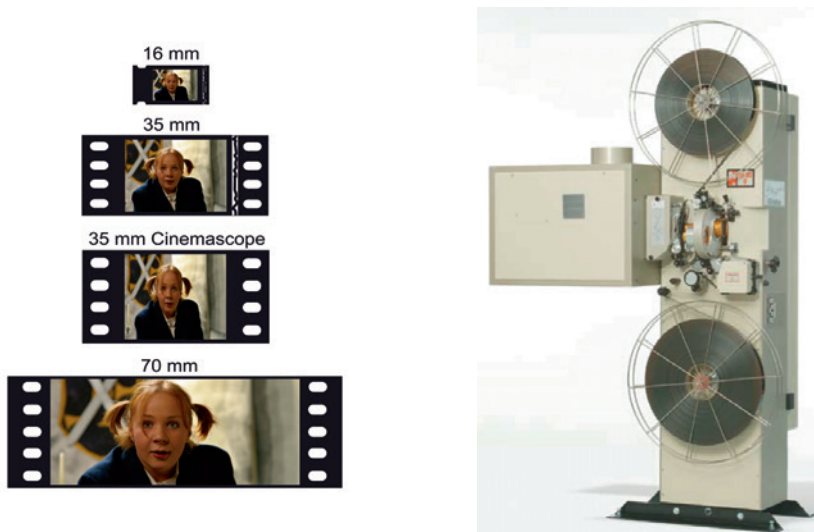


Abb. 12.5: Einige Filmformate im Vergleich und ein moderner Filmprojektor (Kinoton FP30D).

Filmtonformate

Für die Audiowiedergabe mit einem Filmprojektor gibt es unterschiedliche analoge und digitale Verfahren. In Tab. 12.1 finden sich die derzeit gebräuchlichsten Filmtonformate. Anmerkung: THX ist kein eigenes Tonsystem, sondern ein Zertifizierungsverfahren für die Tonanlage, die Akustik und die Optik in Kinosälen.

Tab. 12.1: Aktuelle Filmtonformate im Überblick.

Verfahren	Audiokanäle	Frequenzgang	Dynamik	Auflösung	Kompression
Stereo-Lichtton	2	40 Hz bis 10 kHz	ca. 50 dB	(analog)	-
Dolby Stereo (SR)	2	30 Hz bis 12,5 kHz	ca. 60 dB	(analog)	-
Dolby Digital	5.1	20 Hz bis 20 kHz LFE: 3 Hz bis 120 Hz	über 90 dB	20 Bit Datenrate: 320 kBit/s	17 : 1 LFE: 14 : 1
Digital Theatre System (dts)	5.1	20 Hz bis 20 kHz LFE: 3 Hz bis 80 Hz	über 90 dB	20 Bit Datenrate: 1.411 kBit/s	4 : 1
Sony Dynamic Digital Sound (SDDS)	7.1	20 Hz bis 20 kHz LFE: 3 Hz bis 120 Hz	über 90 dB	15 Bit Datenrate: 1.411 kBit/s	10 : 1

Abb. 12.6 zeigt den Signalweg der verschiedenen Tonformate vom „Tonträger“ (also dem Film bzw. bei dts einem speziellen, synchronisierten CD-Player) über die Digital-Analog-Wandlung in den Decodern bis zu den Lautsprechern.