

Vom Licht zur Beleuchtung

Teil 3: Lichtquelle – Leuchtmittel – Beleuchtung



Licht und Atome

Der physikalische Basismechanismus, der für die Entstehung von Licht verantwortlich ist, hängt mit dem Aufbau der Atome zusammen. Nach der Modellvorstellung bestehen sie im neutralen Zustand aus einem Kern mit einer gewissen positiven elektrischen Ladung und einer bestimmten Anzahl ihm in verschiedenen, diskreten Bahnabständen umkreisender Elektronen mit der gleichen negativen Ladung. Die Bahn eines Elektrons um den Kern (Orbital) repräsentiert in Abhängigkeit von der Bahnhöhe und der Umlaufgeschwindigkeit des Elektrons ein gewisses Energieniveau. Wird nun ein Elektron durch äußere Energiezufuhr auf ein entfernteres (energiereicheres) Orbital gehoben (man sagt auch, das Atom wird angeregt), fällt es nahezu sofort wieder (in der Größenordnung von 10^{-8} s) auf sein energieärmeres Ursprungsoorbital zurück (Bild 1). Die dabei frei werdende Energie manifestiert sich in abgestrahlten Photonen, auch als Lichtquanten oder -teilchen bezeichnet. Die Wellenlänge des abgestrahlten Lichts hängt von der frei werdenden Energie beim Zurückfallen des Elektrons auf die energieärmere Bahn gemäß der Planck-Einstein-Formel (Gleichung 1) ab.

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h \cdot \nu \quad \text{mit} \quad h = 6,626 \cdot 10^{-36} \text{ Joule} \cdot \text{s}$$

(Plancksches Wirkungsquantum)

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad \text{Frequenz,}$$

λ : Wellenlänge,
 c : Lichtgeschwindigkeit

Gleichung 1

Das hat zur Folge, dass die Farbe des Lichts von der Art des angeregten Atoms abhängt. Dieser Mechanismus ist bei allen Lichtarten gleich, lediglich die Art der Anregung unterscheidet sich. Sie kann einen thermischen, mechanischen oder chemischen Ursprung haben.

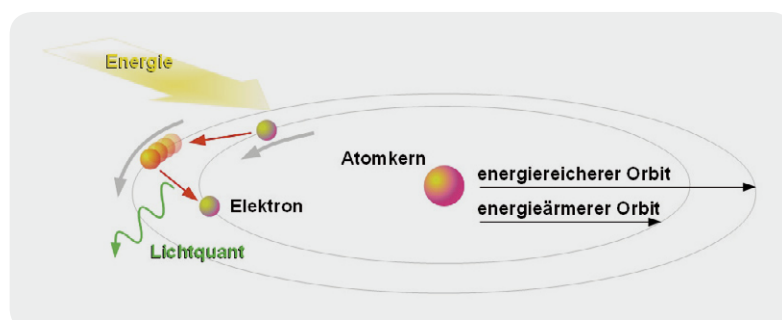


Bild 1: Fällt ein Elektron von einer energiereicheren Bahn um den Atomkern auf eine energieärmere zurück, wird die Energiedifferenz als Lichtquant abgestrahlt.

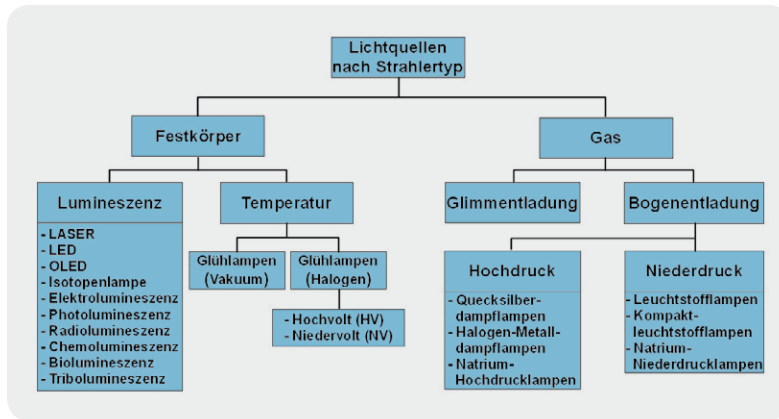


Bild 2: Dies ist eine Möglichkeit, Lichtquellentypen zu systematisieren.

Kategorisierung von Lichtquellen

Lichtquellen können je nach den bei der Lichterzeugung zugrunde liegenden physikalisch-chemischen Prinzipien wie in der Tabelle von Bild 2 in Kategorien eingeteilt werden. Die Grundunterscheidung erfolgt nach dem Aggregatzustand des strahlenden Mediums: fest oder gasförmig. Bei den Festkörperstrahlern wird zwischen lumineszenten und thermischen Typen unterschieden, die gasförmigen Strahler beruhen auf Entladungsvorgängen im ionisierten Gas.

Temperaturstrahler

Die Glühlampe ist die wohl bekannteste Vertreterin dieser Gattung. In der klassischen Form wird ein elektrisch leitender Glühfaden (meistens ein Wolframdraht in Form einer Wendel) im Vakuum durch einen entsprechenden Stromfluss zur Weißglut gebracht (typ. 2600 bis 3000 K). Die klassische Glühlampenform, wie sie überwiegend in Haushalten zum Einsatz kam, zeigt Bild 3. Der Kontakt zum Glühfaden oder zur Glühwendel wird über den Schraubsockel hergestellt. Je nach dessen Durchmesser – 14 oder 27 mm – spricht man von einem E14- oder E27-Sockel.

Glühlampen gibt es in einer extrem weiten Gestaltungs- und Sockelvielfalt. Von der bedrahteten, reiskorngroßen 3-mm-Subminiatur-Type mit wenigen hundert Milliwatt Leistungsaufnahme bis zur 1000-W-Langwendellampe mit E40-Sockel (Bild 4) mit Schraub-, Bajonett-, Soffitten- und Stecksockel ist alles erhältlich.

Energie(un)effizienz und Kurzlebigkeit

Der wesentliche Anteil der von einer Glühlampe abgestrahlten Energie liegt im infraroten Wellenlängenbereich (Wärmestrahlung) und dient somit nicht dem menschlichen Sehen. Ihr Wirkungsgrad ist mit etwa 5 % dementsprechend schlecht. Die Lichtausbeute einer normalen Vakuum-Glühlampe liegt bei 10 bis 20 lm/W und ist damit im Vergleich zu modernen Alternativen sehr niedrig. Allerdings empfinden viele Menschen Glühlampenlicht wegen seines hohen Rotanteils als warm und angenehm.

Die Lebensdauer einer Glühlampe (typ. 1000 h) hängt von der Temperatur des Glühfadens ab. Mit steigender Temperatur der Wendel nimmt die Lichtausbeute zu, die Lebensdauer hingegen ab. Letzteres ist eine Folge der stärker verdampfenden Wolframwendel, was zu einer Schwärzung des Glaskolbens und einem Durchbrennen der Glühwendel an der schwächsten durch den Abbrand entstandenen Stelle (hot spot) führt.

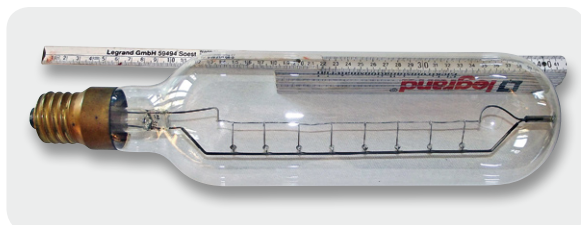


Bild 4: Eine 1000-W-Glühlampe mit gestreckter Glühwendel

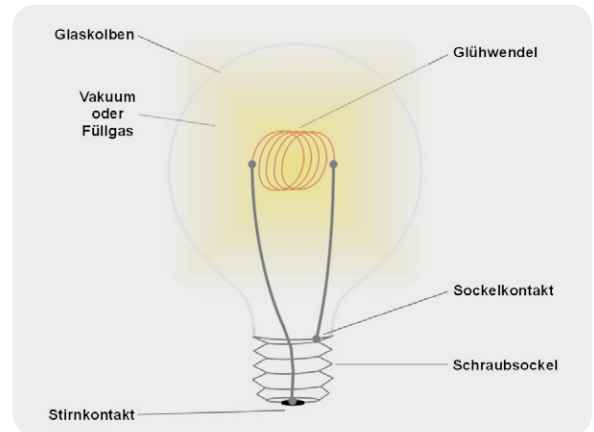


Bild 3: Die klassische Glühlampe besteht aus einem leitenden Faden in einem evakuierten Glaskolben. Wird der Faden von Strom durchflossen, beginnt er zu glühen.

Edelgasfüllung

Einen Weg, das Abdampfen von Wolfram-Glühwendelmaterial zu verringern, bietet das Füllen des Glaskörpers mit einem der reaktionsträgen Edelgase Argon, Xenon oder Krypton. Das erlaubt den Betrieb der Lampe mit einer höheren Glühwendeltemperatur bei um etwa 10 % gesteigerter Lichtausbeute gegenüber herkömmlichen Vakuum-Glühlampen mit vergleichbarer Kolbenschwärzung. Diese lässt sich durch Beifügen von Halogenen (Salzbildner wie Jod oder Brom) reduzieren. Dabei verbindet sich zunächst das abgedampfte Wolfram der Wendel in der Nähe der kühleren Glaskolbenwand zu einer stabilen Halogenverbindung. Diese wird durch die thermische Strömung in die Nähe der heißen Wendel transportiert, wo sie zerfällt und das Wolfram sich wieder auf der Wendel abscheidet. Das erfolgt in der Regel nicht an den Entstehungsstellen der Halogenverbindungen, wodurch auch bei Halogenlampen die Wendelunterbrechung an den „hot spots“ das Lampenleben nach 2000 bis 3000 Betriebsstunden beendet. Die höhere Wendeltemperatur verschiebt das Spektrum der Halogenlampe leicht in den kürzerwelligen Bereich. Dadurch sinkt der Infrarotanteil und der UV-Anteil nimmt zu.

IRC-Technologie

Eine selektiv die Wärmestrahlung reflektierende Beschichtung des Glaskolbens (IRC: Infra Red Coating = Infrarotbeschichtung) vermeidet den Verlust eines Teils der von der Wendel abgegebenen Wärmestrahlung. Vielmehr wird diese auf die Wendel zurückgeworfen und von ihr absorbiert. Das bewirkt eine Erhöhung der Wendeltemperatur und erlaubt eine die Lebensdauer steigernde Reduzierung der elektrischen Energie. Insgesamt sind Lebensdauer und Lichtausbeute von Halogenlampen mit IR-Beschichtung etwa doppelt so hoch wie bei Vakuum-Glühlampen.

Bei allen Glühlampen verlängert Dimmen deren Lebensdauer, erhöht aber auch zunehmend den Rot-Gelb-Anteil des abgegebenen Lichts. Eine Übersicht über gängige Typen gibt Bild 5.

Hoch- oder Niedervolt?

Als vor etwa 7 Jahren die ersten direkt an der Netzspannung 230 V betriebenen Hochvolt-Halogenlampen auf den Markt kamen, wurden sie wegen einiger

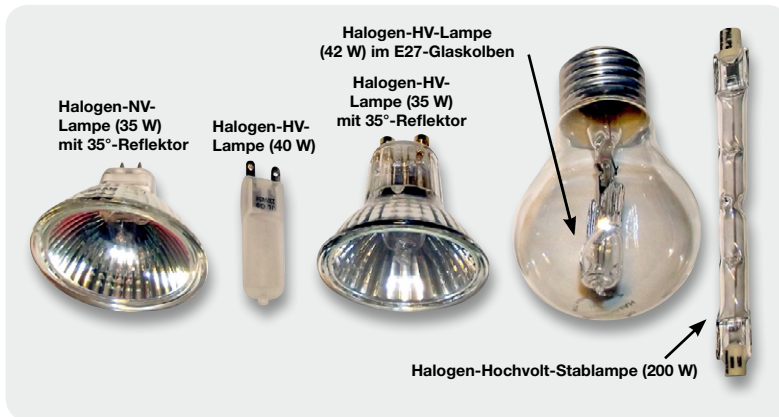


Bild 5: Diverse Halogen-Glühlampenausführungen

unbestreitbarer Vorteile gegenüber ihren Niedervolt-Pendants als Innovation gepriesen: kein Transformator erforderlich, wegen des geringeren Betriebsstroms genügen kleinere Leitungsquerschnitte, Verfügbarkeit in herkömmlichen Schraubfassungen (E14, E27) und einiges mehr. Bei genauerer Betrachtung steht diesen Vorteilen aber eine Vielzahl von Nachteilen entgegen: geringere Lebensdauer, geringere Lichtausbeute (unter anderem, weil IRC-Technik nicht anwendbar), höherer UV-Anteil, höherer Preis, Explosionsgefahr am Ende der Lebensdauer ...

Die Lebensdauer einer Glühlampe ist prinzipiell durch die Sublimation (Übergang aus der festen in die dampfförmige Phase) des Glühfadensmaterials (meistens Wolfram) begrenzt. Bei höherer Betriebsspannung muss der Fadenquerschnitt zurückgenommen und die Fadenlänge gesteigert werden, um den Fadenwiderstand an die Brennspannung anzupassen. Das lässt sich, wie in den Gleichungen 2 bis 5 gezeigt, leicht herleiten, denn die elektrisch aufgenommene Leistung wird einerseits von Länge, Querschnitt und spezifischem Widerstand des Glühdrahts bei Betriebstemperatur bestimmt und ist andererseits aber auch identisch mit der abgestrahlten Leistung.

$$P_{el} = \frac{U^2}{R} \quad \text{mit} \quad R = \frac{\rho \cdot l}{q} = \frac{4 \rho \cdot l}{\pi \cdot d^2}$$

$$P_{el} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot U^2}{4 \cdot \rho \cdot l} \quad \text{aufgenommene elektrische Leistung}$$

mit l = Drahtlänge in m, d = Drahtdurchmesser in m

$$\rho \approx 0,75 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \quad \text{spezifischer Widerstand von Wolfram bei } T = 3000 \text{ K}$$

Gleichung 2

$$P_{rad} = \sigma \cdot \pi \cdot A \cdot T^4 \quad (\text{Stefan-Boltzmann-Gesetz})$$

$$P_{rad} = \sigma \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot T^4 \quad \text{abgestrahlte thermische Leistung}$$

$$\text{mit } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \quad \text{Strahlungskonstante}$$

Gleichung 3

Aus den zwei Gleichungen 4 und 5 kann man Länge l und Durchmesser d des Glühdrahts bestimmen.

$$l = \sqrt[3]{\frac{P \cdot U^2}{4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot \sigma^2 \cdot T^8}}$$

Gleichung 4

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \rho \cdot P^2}{\pi^2 \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot U^2}}$$

Gleichung 5

Setzt man in diese Gleichungen $P = 20 \text{ W}$ (Leistungsaufnahme) und $T = 3000 \text{ K}$ (Glühfadentemperatur) ein, ergeben sich für eine HV-Lampe ($U = 230 \text{ V}$) und eine NV-Lampe ($U = 12 \text{ V}$) die Fadenlängen und -durchmesser gemäß Tabelle 1.

$$l_{HV} = 17,5 \text{ cm}$$

$$d_{HV} = 7,9 \mu\text{m}$$

$$l_{LV} = 2,44 \text{ cm}$$

$$d_{LV} = 56,9 \mu\text{m}$$

Tabelle 1

Man erkennt, dass der Glühdraht der Niedervolt-Lampe ca. siebenmal so stark und nur ein Siebtel so lang ist wie der einer vergleichbaren Hochvolt-Lampe. Er verfügt also über erheblich mehr Masse zum Verdampfen und braucht nicht gestützt zu werden. Daraus resultiert eine deutlich bessere mechanische Robustheit bei höherer Brenndauer. Einen Teil der größeren Lebensdauer kann man deshalb einer besseren Lichtausbeute „opfern“, indem man die Temperatur des Leuchtfadens steigert.

Substitution der Glühlampe sinnvoll?

Die schlechte Energieeffizienz der Glühlampe hat wegen der damit verbundenen CO₂-Emissionen zum EU-weiten Verbot gemäß einem Stufenplan ab September 2009 bis 2016 geführt.

Aber auch der zur Herstellung erforderliche Primärenergieeinsatz spricht gegen die konventionelle Glühlampe. In einer Studie der Osram Opto Semiconductors wurde der gesamte Lebenszyklus unter die Lupe genommen, also der Primärenergieverbrauch bei Herstellung, Nutzung und Entsorgung der Lampe während ihres Lebens unter Berücksichtigung der hierbei auftretenden Umweltbelastungen. Diese Gesamtlebenszyklusanalyse ergibt, dass 25 Glühbirnen à 40 W mit einer Gesamtlebensdauer von 25.000 Stunden etwa 3330 kWh an Primärenergie erfordern. Für eine vergleichbare 8-W-LED-Lampe mit 25.000 Stunden Lebensdauer müssen hingegen weniger als 700 kWh aufgewendet werden.

Bei der Glühlampenalternative fallen im Betrieb zudem ca. 500 kg CO₂ an, bei der LED hingegen nur 100 kg CO₂ – ein deutlicher Beitrag zur Verringerung des Treibhauseffekts. Es ist also unter allen physikalisch-technischen Aspekten sinnvoll, die Glühlampe (aber auch die Energiesparlampe) durch LED-Alternativen zu ersetzen. Letztere haben zudem noch lange nicht ihre Effizienzgrenzen erreicht, was die Bilanz zu ihren Gunsten weiter verbessern wird.

So logisch die Argumente gegen die Glühlampe auf den ersten Blick auch scheinen, haben sich dennoch namhafte Wissenschaftler gegen ein Verbot und die Substitution durch Energiesparlampen ausgesprochen. Der Mitschnitt einer Report-Sendung vom August 2009 fasst die Begründungen zusammen [2]. Neben Auswirkungen eines erhöhten Blauanteils im Licht auf den menschlichen Biorhythmus wird dabei auch die Substitution der mit Energiesparlampen verbundenen CO₂-Einsparungen durch frei werdende CO₂-Kontingente über den Emissionshandel angeführt.

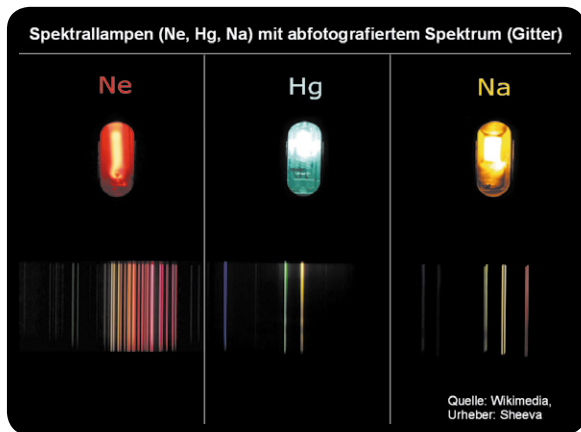


Bild 6: Gasentladungslampen haben ein Linienspektrum und deshalb eine unbrauchbare Farbwiedergabe.

Gasentladungsröhren

In einem transparenten Entladungskolben befindet sich ein reines Gas oder ein Gasgemisch, meist mit metallischen Zusätzen. Zwischen zwei gasdicht eingebrachten einander gegenüber liegenden Elektroden (heiß oder kalt) baut sich ein elektrisches Feld auf, das bei einer gewissen Höhe die Gasfüllung „zündet“ und ein leitfähiges Plasma entstehen lässt. Die einsetzende Stoßionisation würde die Ladungsträgerdichte schnell ansteigen lassen und bedarf zum Schutz der Lampe einer Begrenzung. Ausnahmen sind Blitzröhren, welche die in einem Kondensator gespeicherte Energie restlos in einen kurzen, tageslichtähnlichen Lichtimpuls hoher Intensität umsetzen. Auch bei Überspannungsableitern ist die lawinenartig ansteigende Ladungsträgerdichte erwünscht, weil sie zu einem schnellen Übergang in den niederohmigen Zustand führt. Auch hier verzichtet man in der Regel auf strombegrenzende Maßnahmen.

Das Spektrum von Entladungslampen ist diskontinuierlich, d. h. von den charakteristischen Spektrallinien der beteiligten Gase geprägt. Mit anderen Worten: Jedes Gas erzeugt ein eigenes Muster aus schmalbandigen Lichtaussendungen mit unterschiedlichen Farben. Z. B. zeigt Bild 6, wie Neon orangefarben, Quecksilberdampf bläulichweiß und Natriumdampf gelb leuchten, mit den jeweils zugehörigen Linienspektren. Bei der Mischung von Gasen entstehen deshalb Mischfarben, beispielsweise emittiert ein gelbes Glasrohr mit Neon-Quecksilber-Mischung ein kräftiges Grün. Darauf beruhen bunte Leuchtreklamen.

Auf einer anderen Art der Plasmabildung basiert die Schwefellampe (auch Schwefelkugellampe genannt). Sie besteht aus einem mit wenigen Milligramm Schwefel und Argongas gefüllten, etwa golfballgroßen

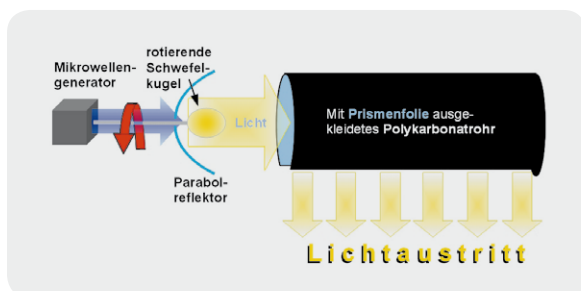


Bild 7: Die Schwefelkugellampe ist ein Exot unter den Lampen, verfügt aber über hoch attraktive Merkmale.

Quarkolben (Bild 7). Dessen Anregung erfolgt nicht mit Elektroden, sondern über in hoher Dichte eingestrahlte Mikrowellen (2,45 GHz), wie sie das Magnetron eines Mikrowellenofens erzeugt. Es bildet sich ein Druck von etwa 5 bar, der Schwefel heizt sich auf und die Entstehung eines heißen, hell leuchtenden Plasmas beginnt. Um das Schmelzen des Quarkolbens zu verhindern, wird er auf einer rotierenden Glasspindel angebracht.

Die Schwefellampe sendet ein Molekülspektrum mit bis zu einer Million Spektrallinien aus, die den Eindruck eines breiten, kontinuierlichen Spektrums hinterlassen. Dessen Maximum (536 nm) deckt sich nahezu mit dem der Augenempfindlichkeitskurve (555 nm) und vergleichsweise wenig Strahlung wird im ultravioletten und infraroten Bereich emittiert. Die Lichtqualität ist also wegen der großen Ähnlichkeit mit dem Tageslichtspektrum sehr hochwertig.

Der Lichtstrom einer einzelnen Schwefelkugel ist etwa 50-mal höher als der einer Leuchtstoffröhre und kann bis zu 250 100-W-Glühlampen ersetzen. Die Verteilung des Lichts erfolgt meistens über einen transparenten, auf der Innenseite mit Mikroprismen beschichteten Hohlzylinder. Auf der einen Stirnseite wird das gebündelte Licht des Quarkolbens eingestrahlt, die andere Stirnseite ist verspiegelt. Ist der Hohlzylinder durchgängig transparent, strahlt er sein Licht gleichförmig in radialer Richtung ab. Andernfalls muss er bis auf eine in axialer Richtung verlaufende Lichtaustrittsöffnung verspiegelt werden, aus der dann konzentriert das Gesamtlicht den Zylinder verlässt. Das vermittelt den Eindruck eines hellen Leuchtbandes. Im Zusammenwirken von Lichtleitern können die Orte von Lichterzeugung und Lichtabgabe beliebig entkoppelt werden.

Die Vorteile der Schwefellampe in Stichwörtern: Wirkungsgrad ca. 70 %, nach ca. 20 s bereits 80 % des Lichtstroms, hervorragende Farbwiedergabe, dimmbar auf 15 %, keine giftigen Substanzen, lange Lebensdauer (60.000 h Lampe, 20.000 h Magnetron).

Leuchtstofflampen

Allen Leuchtstofflampen ist eine Niederdruck-Gasfüllung aus Quecksilberdampf und einem Edelgas (meist Argon) gemeinsam, die im elektrisch leitenden Zustand UV-Strahlung emittiert. Dieser Lampentyp gehört deshalb auch zur Gruppe der Niederdruckentladungslampen. An der Innenseite des Lampenglaskörpers sorgt eine Leuchtstoffbeschichtung für die Umwandlung der UV-Strahlung in sichtbares Licht (Bild 8).

Zum Einschalten der Lampe ist eine Zündspannung erforderlich, die das Lampengas ionisiert und damit leitfähig macht. Durch das Vorheizen einer oder zweier Katoden kann die Zündspannung kleiner ausfallen. Nach dem Zünden setzt ein starker Elektronenfluss ein, d. h. es fließt ein Strom. Die freien Elektronen kollidieren dabei mit den Quecksilberatomen, die dadurch angeregt werden (Plasmabildung durch Stoßionisation) und bei der Rückkehr in den energieärmeren Grundzustand Photonen aussenden. Dabei entsteht vorwiegend UV-B-Strahlung mit einer Wellenlänge von 254 nm, die beim Durchdringen der Leuchtstoffschicht sichtbares Licht erzeugen. Gleichwohl gelangt ein nicht unerheblicher UV-Strahlungsanteil nach außen ($\sim 50 \mu\text{W}/\text{lm}$ UV-A, $\sim 10 \mu\text{W}/\text{lm}$ UV-B).

Wegen des negativen differentiellen Innenwiderstands des Plasmas würde nach dem Durchzünden ein zerstörerisch hoher Strom auftreten. Diesen zu begrenzen und die Glühzündung zur Plasmabildung einzuleiten, ist die Aufgabe eines elektronischen Vorschaltgerätes (EVG) (Quelle Wikipedia: Christian Taube) (Bild 9).

EVGs betreiben Leuchtstoffröhren mit 32 bis über 40 kHz. Dadurch sind sie kleiner und leichter als konventionelle Vorschaltgeräte (KVG) auf 50-Hz-Basis und haben geringere Verluste. Die Lampe hat deshalb einen höheren Wirkungsgrad (erhebliche Stromkosteneinsparungen!) und zündet sofort und flackerfrei bei gleichzeitig verlängerter Lebensdauer. Zudem erzeugen EVGs nahezu keine Oberwellen und Blindströme und sind damit ein wichtiger Beitrag zu einer höheren elektromagnetischen Verträglichkeit infolge geringerer Netzurückwirkungen.

Weil die Helligkeit mit der Temperatur des Plasmas der Entladungsröhre abnimmt und die Temperatur an der kältesten Stelle (dies sind meistens

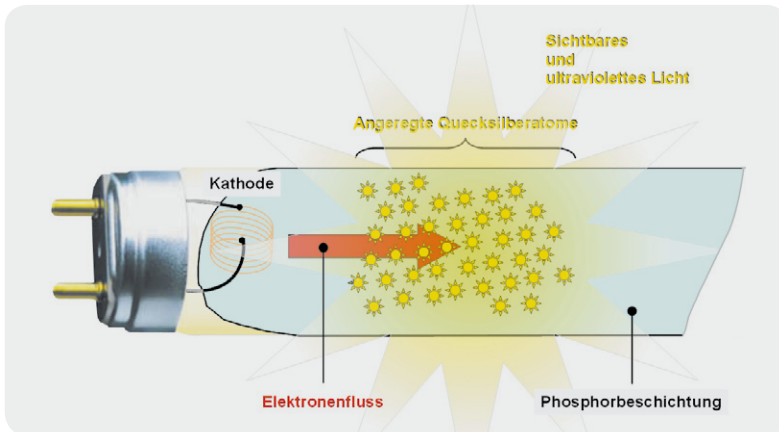


Bild 8: Das Prinzip der Leuchtstofflampe: Ein Argon-Quecksilberdampf-Gemisch strahlt im leitenden Zustand stark UV-haltiges Licht ab, das in der Leuchtschicht der Glasumhüllung in breitbandiges sichtbares Licht umgewandelt wird.

die Anschlussenden) den Gasdruck bestimmt, geht die Brennlage in die Lampenhelligkeit ein. Zitat aus dem Vorlesungsmanuskript von Dr. G. Waller, FH Kiel, Fachbereich Informatik und Elektrotechnik: „Besonders bei niedrigen Umgebungstemperaturen macht es einen enormen Unterschied, ob eine Kompakt-Leuchtstoffröhre stehend (18 % geringerer Lichtstrom bei $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) oder hängend eingesetzt ist (80 % geringerer Lichtstrom bei $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, für Osram Dulux L).“

Kompakt-Leuchtstofflampen

Kompakt-Leuchtstofflampen werden auch als Energiesparlampen mit integriertem Vorschaltgerät bezeichnet. Bild 10 zeigt die wesentlichen Baugruppen: Schraubsockel, Platine mit Vorschaltgeräteelektronik und gefaltete Leuchtstoffröhre. Es handelt sich um eine Megaman Compact Classic 1 W (MM011, 2700 K Warmwhite) mit 11 W Leistungsaufnahme und umhüllendem, splittergeschütztem Glaskolben. Wie das Vorschaltgerät mit der Leuchtstoffröhre und dem Netz verbunden ist, zeigt die vergrößerte Darstellung in Bild 11.

Einen typischen Schaltplan für ein derartiges Vorschaltgerät zeigt Bild 12 (Quelle: www.b-kainka.de/bastel112.htm). Es handelt sich dabei um einen frei schwingenden Gegentaktoszillator, dessen Schwingfrequenz durch die Serienschaltung der Spule L und des Kondensators $3,3\text{ nF}/4,5\text{ kV}$ zu etwa 36 kHz bestimmt wird.

Es geht auch ohne flüssiges Quecksilber!

Ein häufig angeführter Kritikpunkt an Kompakt-Leuchtstofflampen richtet sich gegen die Verwendung von Quecksilberdampf in der Gasfüllung. Jedoch geht von der geringen Menge von ca. 2 mg Hg/Lampenfüllung auch bei Lampenbruch nur eine geringe Gefahr für die menschliche Gesundheit aus. Nach kräftigem Lüften und sorgfältigem Aufsaugen des Glasbruchs ist mit keinen Nachwirkungen zu rechnen. Eine Einschätzung der Gesundheitsgefahren von dem Kinderarzt Prof. Dr. med. Karl Ernst von Mühlendahl ist unter [3] zu lesen.

Es gibt aber auch Hersteller, die ganz auf reines Quecksilber verzichten und stattdessen Amalgam einsetzen. Das ist eine stabile Metall-Quecksilber-Verbindung, aus der sich das Quecksilber erst bei Temperaturen von über $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ verflüchtigen kann. Im Übrigen wird Amalgam auch als Zahnfüllungsmaterial in großem Umfang eingesetzt.

Tatsache ist, dass bei einem Verzicht auf Energiesparlampen und deren Ersatz durch die verbrauchsintensiven Glühlampen die Umwelt unter dem Quecksilberaspekt nicht entlastet würde. Vielmehr stiege der Energiebedarf für Beleuchtung um 60 % auf 72.000 GWh pro Jahr an. Dafür würden 26 Mio. Tonnen mehr CO_2 und mehr als 2000 Tonnen Quecksilber durch die Schornsteine von Kohlekraftwerken geblasen. In einem Beitrag „Wie gesund sind Glühlampen?“ in der Zeitschrift „Licht“ 3/2009 [4] zieht der Autor Dr. Steffen Franke vom Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie e.V. Greifswald das Fazit: „Auf den Einsatz von Leuchtstofflampen zugunsten von Glühlampen zu verzichten, würde unsere Umwelt unnötig belasten. Deshalb sind Leuchtstofflampen im Sinne des Umweltschutzes eine gerechtfertigte Alternative zur Glühlampe.“

Kostenvergleich

In Bild 13 werden die Kosten einer Beleuchtung durch eine 100-W-Glühlampe (nicht mehr offiziell im Handel) mit denen einer in der Leuchtwirkung etwa vergleichbaren Energiesparlampe mit 21 W Leistungsaufnahme über eine Betriebsdauer von 4000 Stunden grafisch gegenübergestellt. Bei einem Strompreis von $0,25\text{ €/kWh}$, dem Preis einer Glühlampe von 3 € und dem Preis des Kompakt-Energie-Leuchtmittels von 12,50 € hat sich die Anschaffung der Energiesparlampe bereits nach knapp 500 Betriebsstunden amortisiert. Eine tägliche Brenndauer von 3 Stunden vorausgesetzt, dauert es also kein halbes Jahr, bis das Geldsparen anfängt. Nach 4000 Stunden (unter den gemachten Voraussetzungen etwa 3,5 Jahre) beläuft sich die Ersparnis bereits auf 78,50 €. Es ist also aus finanzieller Sicht höchst attraktiv, die Glühlampe durch eine Energiesparlampe zu ersetzen.

LED-Lampen

LED steht für Light Emitting Diode (Licht aussendende Diode). Dieser Lichtquellentyp ist für die allgemeine Raumbelichtung unschlagbar effizient, langlebig und enorm vielseitig. Auf der Homepage des Herstellers Osram [5] sind die Vorteile von LED-Lampen prägnant zusammengefasst im Hinblick auf:

Effizienz:

- Bis zu 90 % Energieersparnis gegenüber einer vergleichbaren herkömmlichen Glühlampe
- Bis zu 25 Jahre Lebensdauer (bei 25.000 Stunden Lebensdauer und 2,7 Stunden Brenndauer pro Tag)
- 1:1-Austausch gegen herkömmliche Leuchtmittel
- Äußerst geringe Wärmeentwicklung

Qualität:

- Keine UV- oder IR-Strahlung
- 100 % Leuchtkraft sofort nach dem Einschalten

Bild 9: Moderne Leuchtstofflampen brauchen für höchste Effizienz ein elektronisches Vorschaltgerät (EVG). (Quelle: Wikipedia, Urheber Christian Taube)

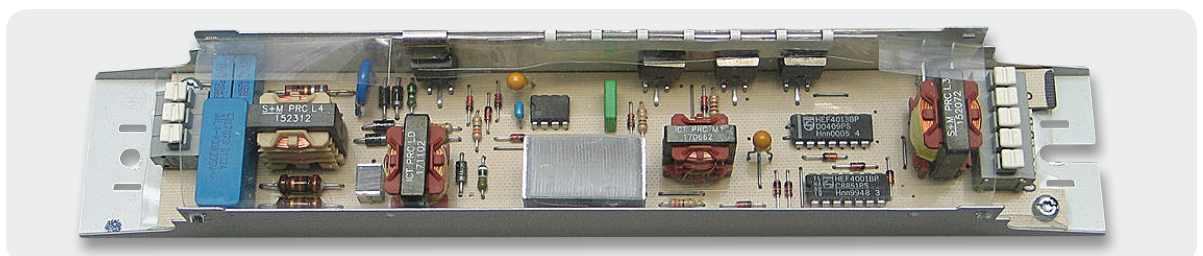




Bild 10: Die Kompakt-Energiesparlampe ist eine Leuchtstofflampe mit integriertem Vorschaltgerät.

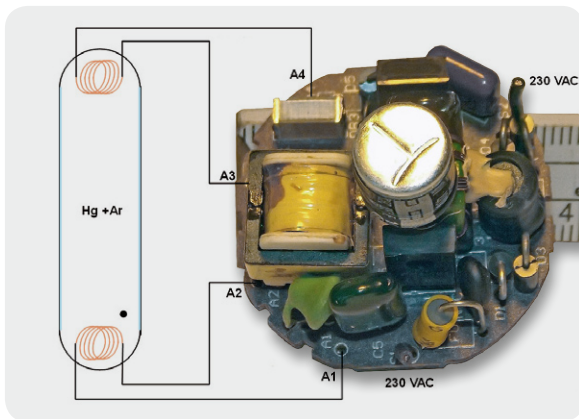


Bild 11: So wird die Leuchtstoffröhre bei der Kompakt-Energiesparlampe mit dem integrierten Vorschaltgerät verbunden.

- Mehr als 100.000 Schaltzyklen
- Gute Farbwiedergabe durch weißes oder warmweißes Licht ($R_a = 80...90$)
- Lange Garantiedauer (bis zu 5 Jahren)
- Stoß- und Vibrationsfestigkeit
- Vielfältigste Bauformen und Sockeltypen

Umweltschutz:

- 90 % weniger Energieverbrauch als vergleichbare Glüh- oder Halogenlampen
- Hervorragende Ökobilanz durch niedrigen Energieverbrauch bei Herstellung und Betrieb
- Quecksilberfrei
- Lebensdauerbedingt weniger Müll und geringerer Ressourcenverbrauch

Bauformen

Man unterscheidet zwischen rundum und gerichtet abstrahlenden Lichtquellen. Ein typisches Beispiel eines **Rundumstrahlers** zeigt Bild 14. Er kann als Äquivalent zu einer 30-W-Glühlampe eingesetzt werden. Man erkennt in dem nicht evakuierten Glaskolben zwei axial ausgerichtete gekreuzte Trägerplatinen mit 32 regelmäßig angeordneten SMD-Leuchtdioden (SMD: Surface Mounted Device = oberflächenmontiertes Bauteil). Auf der Stirnseite dieser beiden Trägerplatinen ist eine kreuzförmige dritte mit 8 weiteren SMD-LEDs gelötet. Die elektrische Leistungsaufnahme der gesamten Anordnung liegt bei 3 W. Bei einem Wirkungsgrad von etwa 85 % strahlt also jede Leuchtdiode über ihre leuchtende Oberfläche etwas über 60 mW an Licht ab

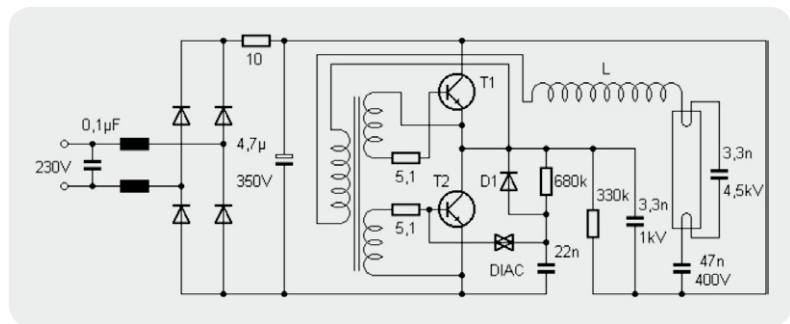


Bild 12: Diesen typischen Schaltplan eines elektronischen Vorschaltgeräts in einer Kompakt-Energiesparlampe hat Bernhard Kainka in mühevoller Arbeit ermittelt.

und erzeugt rund 11 mW thermische Leistung. In dieser Leistungskategorie bereitet das Kühlen der Chips noch keine Probleme, was sich günstig auf den Herstellungspreis auswirkt.

Bei **Leuchtstoffröhren**, die besonders häufig in Büro- und Industrieumgebungen zum Einsatz kommen, ist der Ersatz durch leistungsgleiche LED-Varianten besonders attraktiv (Bild 15). Das bezieht sich nicht nur auf die reine Stromersparnis im Betrieb, die eine Amortisation der höheren Anschaffungskosten heute schon in weniger als einem Jahr ermöglicht. Vielmehr muss man auch die längere Lebensdauer von 14 Jahren gegenüber 3 Jahren (bei 10 Stunden Brenndauer pro Tag) berücksichtigen. Das bedeutet weniger Aufwand für den Wechsel, insbesondere, weil auch Starter und Vorschaltgerät entfallen.

Zudem ist damit zu rechnen, dass der zu erwartende weitere Anstieg der Energie-, Rohstoff- und Entsorgungskosten die Entscheidung für einen Ersatz der Leuchtstoffröhren gegen die LED-basierten Alternativen immer sinnvoller werden lässt. Bei geschätzten 400 Millionen im Einsatz befindlichen Leuchtstoffröhren allein in Deutschland lässt sich das Potential der LED-Technologie bereits für diesen Anwendungszweck abschätzen.

Richtstrahler verwenden zur Bündelung des Lichts einer oder mehrerer LEDs entweder Reflektorspiegel oder strahlformende Vorsatzlinsen. Drei Beispiele zeigt Bild 16. Links eine Niedervoltausführung mit 12 V/3 W mit 15 SMD-LEDs, GU5,3-Stecksockel, 30° Öffnungswinkel und 3000 K Farbtemperatur, in der Mitte die vergleichbare Hochvoltausführung für 230 V mit E14-Schraubsockel und rechts eine HV-Variante 230 V/0,9 W mit 18 LEDs jeweils im Gehäuse mit Vorsatzlinse, E14-Schraubsockel, 45° Öffnungswinkel und 4000 K Farbtemperatur. Auch für diese Strahler gelten die LED-eigenen Vorteile im Vergleich zu den Halogenlampen.

Besonders scharf fokussierbar sind Lampen mit einer einzelnen Leucht-

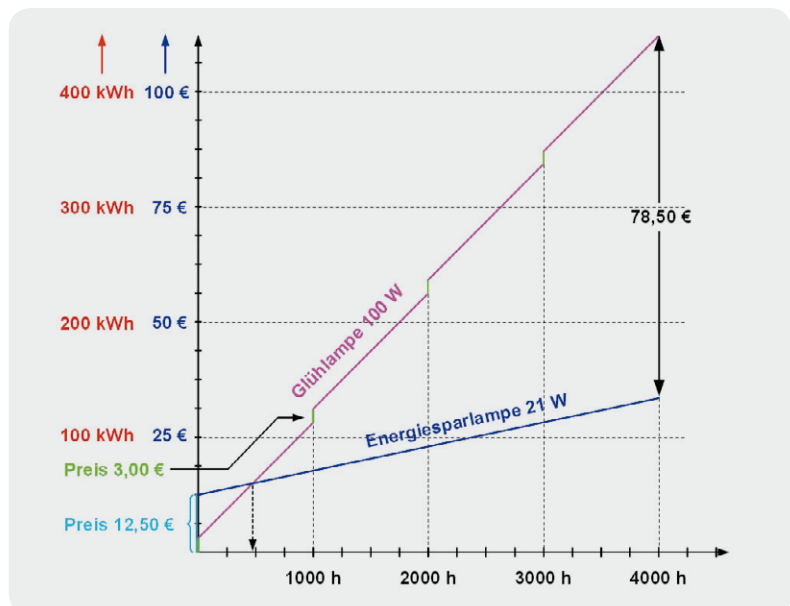


Bild 13: Vergleich der Anschaffungs- und Betriebskosten einer Kompakt-Energiesparlampe mit der Glühlampenalternative

diode. Um eine ausreichende Lichtleistung zu erzeugen, kommen hier nur LEDs mit einer elektrischen Leistungsaufnahme von 3 W und mehr in Frage. Unter Laborbedingungen sind schon LED-Chips mit 60 W getestet worden (Osram UX:3-Technologie).

Wegen der bei Hochleistungs-LEDs auf kleinstem Raum entstehenden Verlustleistungen spielt das Wärmemanagement zu deren Abfuhr eine wichtige Rolle. Es ist extrem wichtig, den thermischen Widerstand (R_{j-a} : $R_{\text{junction-ambience}}$) zwischen der LED-Sperrschicht (junction) und der Umgebung (ambience) zu minimieren, um die Lampe mit optimalen Kennwerten bei längstmöglicher Lebensdauer im gewünschten Umgebungstemperaturbereich betreiben zu können. Die weiteren zu optimierenden Übergänge sind in Bild 17 dargestellt und könnten als Stoff für einen eigenen Artikel dienen.

OLED-Beleuchtung

Organische Leuchtdioden (OLED) zeichnen sich dadurch aus, dass sie auf ein flexibles Trägermaterial aufgebracht werden können. Sie lassen sich damit in gewissen Grenzen als dünnes, flächenhaftes Leuchtmittel wie eine Tapete auch auf gekrümmten Oberflächen anbringen. Sie würden sich dabei in Helligkeit und Farbe steuern lassen und könnten, wenn man diese Vision weiterdenkt, auch als großflächige, hochauflösende Bildschirme dienen. Auf jeden Fall zählt die OLED-Technologie zu den Innovationen für Beleuchtungsanwendungen der Zukunft, die Technikern und Designern ganz neue Möglichkeiten eröffnen (Bild 18). Nach Expertenmeinung wird die OLED-Beleuchtung aber frühestens ab 2020 Marktrelevanz erreichen.

Fazit

Der weltweite Ersatz der Glühbirne durch effizientere Leuchtmittel wird einen großen Beitrag zur Umsetzung nachhaltiger Energiekonzepte leisten. Bedenkt man, dass 15 % des weltweiten Energiebedarfs allein für Industriebeleuchtung eingesetzt werden, und berücksichtigt man ergänzend die großen Felder der Straßenbeleuchtung und privaten Haushalte, wird deutlich, dass energieeffiziente Lichtquellen und ein intelligentes

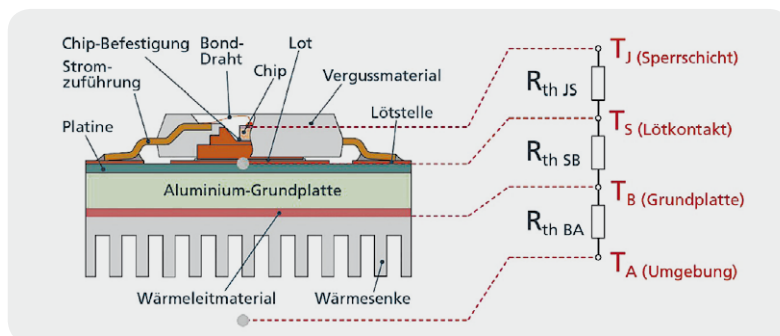


Bild 17: Bei Hochleistungs-LEDs ist ein geringer Wärmewiderstand zwischen der Licht erzeugenden Sperrschicht im Halbleiter (Quelle) und der wärmeabführenden Umgebung (Senke) von extremer Wichtigkeit für den optimalen und langlebigen Betrieb. (Quelle: Osram)



Weitere Infos:

- [1] www.siemens.com/press/de/pressemitteilungen/?press=/de/pressemitteilungen/2009/osram/osram_oekobilanz_led-lampen.htm
- [2] www.youtube.com/watch?v=sZgavaSunGU
- [3] www.allum.de/aktuell-archiv/quecksilber-in-energiesparlampen:-spagat-des-umweltbundesamtes.html
- [4] [www.inp-greifswald.de/web-n.nsf/0/6CACD638F123B5B2C12575D00028ABE9/\\$File/lichtbeitrag.pdf](http://www.inp-greifswald.de/web-n.nsf/0/6CACD638F123B5B2C12575D00028ABE9/$File/lichtbeitrag.pdf)
- [5] www.osram.de/osram_de/Consumer/Beleuchtung_fuer_Zuhause/LED-Lampen/_pdf/S19810_PI_LED_Lampen_2010_10AK_DE5282682174043149691.pdf

ELV Web-Shop: www.led.elv.de

Beleuchtungsmanagement einen signifikanten Teil unserer nationalen und globalen Energieprobleme lösen können. Die Zukunft gehört deshalb nach dem momentanen Stand der Technik zweifellos der LED, aber der technische Fortschritt ist immer für Überraschungen gut. **ELV**



Bild 14: Würde ein Mattgaskolben bei dieser LED-Lampe verwendet, wäre die eingesetzte Technik nur an der geringen Lampenerwärmung bemerkbar.



Bild 15: Leuchtstoffröhrenersatz mit Leuchtdioden (Quelle: Bioledex)



Bild 16: Typische Bauformen für Niedervolt- und Hochvolt-LED-Strahler



Bild 18: O'Leaf: ein futuristisches Lampendesign des belgischen Herstellers Modular Lighting auf der Grundlage organischer LED-Flächenstrahler