

Licht

Ein didaktisches Konzept zum Thema Licht und Lampen

1	Didaktische Überlegungen	2
1.1	1. Modul: Geschichte der Glühlampe	2
1.2	2. Modul: Licht und Lampen	2
1.3	3. Modul: Beleuchtungsstärke und Abstand	3
1.4	4. Modul: Beleuchtungsstärke und Energiekosten	3
2	Geschichte	4
3	Lichtenstehung	6
4	Funktion der verschiedenen Lampentypen	7
4.1	Glühlampe	7
4.2	Halogenlampen	8
4.3	Gasentladungslampen	8
4.4	LED-Lampen	10
5	Lichtmessung	12
6	Versuche	14
6.1	Sicherheitshinweise	14
6.2	Betrachtung der Lampenspektren	14
6.3	Messung der Beleuchtungsstärke	16
6.4	Messung des quadratischen Abstandsgesetzes	16
6.5	Messung der Einschaltkurve einer Energiesparlampe	17
6.6	Messung der Helligkeit verschiedener Lampentypen	18
7	Berechnung der Energiekosten	19
7.1	Kostenvergleich mit geschätzten Beleuchtungsstärken	19
7.2	Kostenvergleich mit gemessenen Beleuchtungsstärken	20



1 Didaktische Überlegungen

Die Einheit „Licht“ kann sowohl als Gesamtkonzept als auch in Teilen an verschiedenen Stellen im Unterricht eingebaut werden.

Unterrichts- module	Thema	Zeitdauer	
		minimal	maximal
1. Modul	Geschichte der Glühbirne	0,5	3
2. Modul	Licht und Lampen	1,5	4
3. Modul	Beleuchtungsstärke und Abstand	1	2
4. Modul	Beleuchtungsstärke und Energiekosten	1	2
Gesamt		4	11

Im Folgenden werden die 4 Module kurz besprochen und die Lernziele angegeben.
 Die Kapitel 2 – 5 stellen das Hintergrundwissen für die einzelnen Module her.
 Im Kapitel 6 werden die Versuche kurz erläutert.
 Zu den Versuchen gibt es für die Schüler die entsprechenden Übungsblätter.
 Alle Fotos findet man auch in einer Pow erpoint-Präsentation.

1.1 1. Modul: Geschichte der Glühlampe

Zeitdauer 0,5 – 3 UE

Lernziele:

Die Schüler und Schülerinnen

- lernen, dass Thomas Alva Edison und Friedrich W. Schindler die Glühlampe in der USA und Österreich entwickelt haben.
- wissen, wann die Glühlampe die Menschen erreichte.

Dieses Modul kann sehr kurz gefasst werden, man kann es jedoch mit zusätzlichen Unterlagen des ASE (Edison, Schindler) ausbauen.

1.2 2. Modul: Licht und Lampen

Zeitdauer 1,5 – 4 UE

Lernziele:

Die Schüler und Schülerinnen

- lernen verschiedene Lampentypen kennen.
- wissen, wie diese verschiedenen Lampen funktionieren.
- wissen, wie Licht entsteht.
- erkennen, dass verschiedene Lampentypen unterschiedliche Lichtspektren erzeugen.

Auch dieses Modul sollte zumindest einen kurzen Überblick über die Entstehung des Lichtes und die Lampentypen geben. Mit Hilfe der beigelegten Unterlagen kann jeder einzelne Lampentyp sehr genau besprochen werden, dies ist aber in keiner Weise unbedingt notwendig.

Unbedingt durchgeführt werden sollte der Versuch zur Betrachtung der Lampenspektren.

1.3 3. Modul: Beleuchtungsstärke und Abstand

Zeitdauer 1- 2 UE

Lernziele:

Die Schüler und Schülerinnen

- kennen die Begriffe Lichtstärke, Lichtstrom und Beleuchtungsstärke und die dazugehörigen Einheiten (Candela, Lumen, Lux).
- können die Beleuchtungsstärke mit einem Luxmeter messen.
- kennen einige Mindestwerte für die Beleuchtungsstärke.
- erkennen, dass sich Licht nicht linear ausbreitet.
- Erkennen, dass eine Energiesparlampe die volle Helligkeit erst nach einiger Zeit erreicht.

Nach einer kurzen Besprechung der wichtigsten Größen (Lichtstärke, Beleuchtungsstärke) kann der Versuch zur Messung der Beleuchtungsstärke durchgeführt werden. Unbedingt durchführen sollte man den Versuch zur Bestimmung des quadratischen Abstandsgesetzes. Interessant und aufschlussreich kann auch die Messung des Helligkeitsanstieges beim Einschalten einer Energiesparlampe sein.

1.4 4. Modul: Beleuchtungsstärke und Energiekosten

Zeitdauer 1 – 2 UE

Lernziele:

Die Schüler und Schülerinnen

- wissen, dass verschiedene Lampen unterschiedlich viel kosten.
- kennen den aktuellen Strompreis (Prospekt, Internet, ...).
- können die Energiekosten berechnen.
- erkennen, dass Energiesparlampen helfen Kosten zu sparen.

Die Berechnung der Energiekosten ist ebenfalls ein wichtiger Teil zum Thema Licht und Effizienz. Im einfachsten Fall erhebt man die Kosten der verschiedenen Lampentypen und den Strompreis. Dies kann als Arbeitsauftrag (im Vorfeld) vergeben werden. Diese Daten werden dann in der Schule zusammengeführt und es wird der Gesamtpreis ohne Berücksichtigung der exakten Helligkeitsmessungen durchgeführt.

Will man genauere Ergebnisse erhalten, so kann in einem Versuch die Helligkeit der mitgelieferten Lampentypen bestimmt werden und daraus lässt sich dann wiederum der Gesamtpreis errechnen.

Fächerübergreifend mit dem Informatikunterricht könnte in diesem Modul auch eine Excel-Tabelle zur Berechnung des Gesamtpreises erstellt werden.

2 Geschichte

Die Geschichte der Glühlampe beginnt in der Mitte des 19. Jahrhunderts. Zu dieser Zeit war die Gaslampe die gängigste Lichtquelle. Es gab jedoch schon von Beginn des Jahrhunderts an Versuche mit Kohlebogenlampen. Diese Lampen erzeugen das Licht über einen Lichtbogen zwischen zwei Kohlestäben. Dies ergibt ein sehr helles Licht, da die Kohlestäbe jedoch verbrennen, müssen sie laufend erneuert werden.

Viele verschiedene Forscher wollten die Ersten sein, die eine Glühlampe erfunden haben. In einer Glühlampe leuchtet ein „Faden“, d.h. eine Faser, durch die elektrischer Strom fließt. Ein Problem war die große Hitzeentwicklung, ein anderes Problem stellte die Füllung der Lampe dar. Befindet sich nämlich Luft im Kolben, so reagiert der Sauerstoff mit jedem Glühfaden so, dass der „Faden“ in kürzester Zeit verbrennt. Heinrich Göbel (1818 – 1893), ein Deutscher, der nach Amerika ausgewandert war, führte einige Prozesse, um als erster Erfinder der Glühlampe gelten zu dürfen. Er konnte seine Behauptungen jedoch nie beweisen.

Berühmt hingegen wurde Thomas Alva Edison (1847 – 1931), der in den 70er-Jahren des 19. Jhdts. ebenfalls mit Glühfäden experimentierte. Er testete mit seinen Mitarbeitern in Menlo Park (NJ) ca. 6.000 verschiedene Materialien, bis er endlich mit einer verkohlten Bambusfaser Glück hatte. Im Oktober 1879 brannte eine Glühlampe mit einer Bambusfaser mehr als 13 Stunden, dies war die Geburtsstunde der gebrauchsfähigen Glühlampe. Edison ließ sich das Schraubgewinde, das wir heute noch verwenden, patentieren. Vorgestellt hat er seine Glühlampe in der Silvesternacht 1879 in Menlo Park. Bereits 1882 ging das erste von Edison gebaute Elektrizitätswerk in New York (Pearl Street) in Betrieb. Dies war ein wichtiger Schritt zur Vermarktung der Glühlampe.

Edison erfand noch viele andere Geräte, so den Phonographen, einen Vorläufer des Plattenspielers, oder den ersten verwendbaren Filmprojektor und das erste Filmstudio¹.

Bereits 1881 wurde die Edison-Lampe bei der Weltausstellung in Paris gezeigt. Dort sah diese Erfindung der junge Friedrich Wilhelm Schindler (1856 -1920). Schindler brachte diese Erfindung in seinen Wohnort Kennelbach, wo er eine Textilfirma betrieb. Er elektrifizierte sein Wohnhaus, die Villa Grünau in Kennelbach, als eines der ersten Privathäuser in Vorarlberg. Schindler entwickelte viele Elektrogeräte und war Gründer der Firma „Elektra Bregenz“. Außerdem war er auch ein Mitgründer der heutigen Vorarlberger Kraftwerke, die er als „Elektrowerke Jenny und Schindler“ am Ende des 19. Jhdts. betrieb².



¹ Mehr über Edison erfahren Sie in der Broschüre „Thomas Alva Edison“ des ASE. Sie ist in Klassenstärke beim ASE (inkl. Powerpoint-Präsentation) erhältlich.

² Mehr über Schindler erfahren Sie in der Broschüre „Friedrich Wilhelm Schindler“ des ASE. Sie ist in Klassenstärke beim ASE (inkl. Powerpoint-Präsentation) erhältlich.

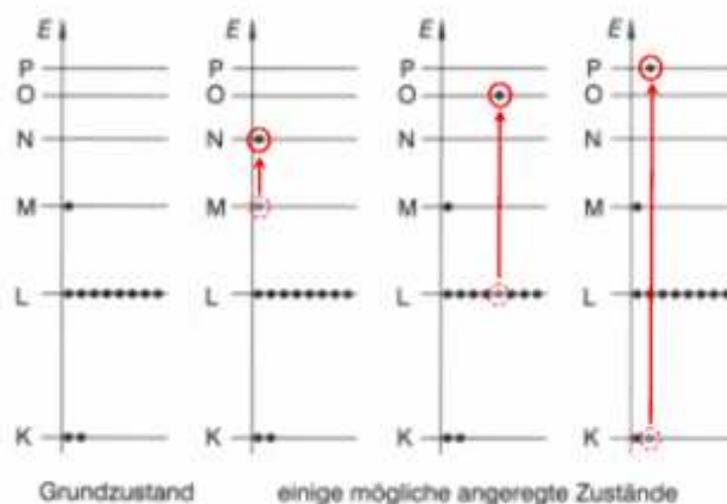
Die Glühlampe wurde laufend weiterentwickelt. Ca. 100 Jahre nach der Erfindung der Glühlampe kamen die ersten Gasentladungslampen (Energiesparlampen) auf den Markt. Die Zeit der Glühlampe scheint schön langsam abzulaufen. In Australien sind Glühlampen ab 2010 verboten, da sie zu viel Energie verbrauchen.

3 Lichtentstehung

Licht entsteht in den „Elektronenschalen“ des Atoms. Die Elektronen befinden sich in verschiedenen Schalen rund um den Atomkern (Orbitale). Physikalisch korrekt spricht man von verschiedenen Energiezuständen der Elektronen, da es im Quantenmodell keinerlei diskreten Bahnen mehr gibt!

Elektronen können durch Energiezufuhr von außen in ein höheres Orbital (höheren Energiezustand) gehoben werden. Diese Energie kann Wärme oder Stoß oder eine andere Art der Anregung sein. Das Atom befindet sich dann in einem angeregten Zustand. In der Grafik sind der Grund- und einige angeregte Zustände des Natriumatoms dargestellt.

Energiezustände des Natrium Atoms



In dieser höheren Energiestufe (angeregter Zustand) verweilt das Elektron jedoch nur ungefähr 10^{-8} s. Dann springt es wieder auf die untere Bahn (Grundzustand) zurück und gibt dabei die Energie in Form von Licht ab! (Emission)

Für die Emission gilt: $\Delta E = hf$

wobei: ΔE ... Energiedifferenz zwischen angeregtem Zustand und Grundzustand
 f ... Frequenz des emittierten Lichts
 h ... Planck'sches Wirkungsquantum $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js

Bei **Glühlampen**, **Halogenlampen** und **LEDs** werden freie Elektronen aus dem Leitungsband angeregt. Dadurch sind alle möglichen Energieniveaus vorhanden und es entsteht beim Rücksprung jedes Elektrons eine andere Farbe. Insgesamt ergibt dies ein kontinuierliches Spektrum.

Bei **Energiesparlampen** (Leuchtstofflampen) werden nur einige wenige Stoffe zum Leuchten angeregt. Dadurch entstehen die für den Stoff typischen Linienspektren.

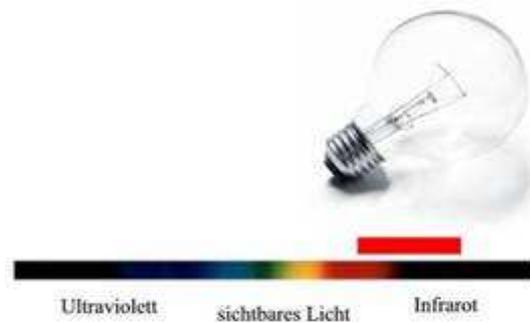
Dieser Unterschied lässt sich in einem Spektrographen oder mittels eines Gitters sehr gut darstellen. (siehe auch Versuch 6.2)

4 Funktion der verschiedenen Lampentypen

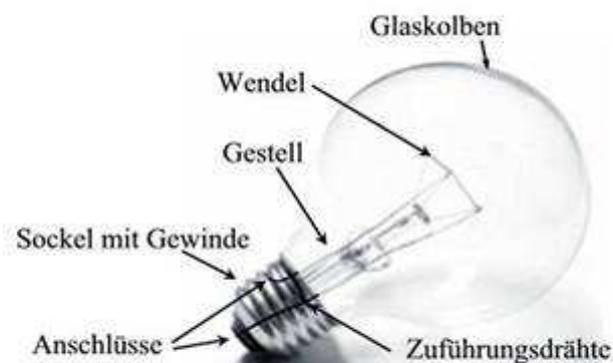
4.1 Glühlampe

Normale Glühlampen sind Temperaturstrahler, die ein kontinuierliches Spektrum erzeugen, die ihr Maximum im Infrarotbereich haben (siehe Balken in der Grafik). Strom bringt den aus Wolfram bestehenden Glühdraht bei einer Temperatur von zirka 2600 °C zum Glühen. Der Glühfaden ist meist aus Wolfram, seltener aus Osmium, Tantal oder Graphit (Kohlefadenlampe). Metallglühfäden sind im Allgemeinen gewendelt (Einfach- oder Doppelwendel). Allgebrauchslampen, meist mit Schraubfassungen (Edisongewinde) ausgerüstet, werden für Leistungsaufnahmen von 15 – 2.000 Watt hergestellt.

Der Glaskolben der Glühlampe ist entweder evakuiert oder mit neutralem Gas (Argon, Argon-Stickstoff-Gemisch, Krypton, Xenon) gefüllt. Die Füllung verhindert die Abdampfung des Glühdrahtes und erhöht die Lichtausbeute.



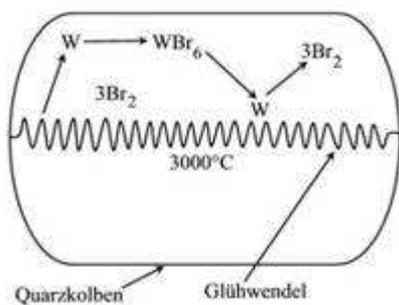
Die Lichtausbeuten der Glühlampen sind mit 6 bis 19 Lumen pro Watt gering. Mehr als 95% der Energie werden in Wärme umgesetzt. Die Lebensdauer normaler Glühlampen liegt bei etwa 1 000 Stunden.



4.2 Halogenlampen

Halogenglühlampen sind mit Halogengas (Iod oder Brom) gefüllt und haben eine zwei- bis dreifach höhere Lebensdauer als normale Glühlampen (2000 - 3000 Stunden) und eine maximale Lichtausbeute von 28 Lumen pro Watt, das ist ca. das Doppelte einer konventionellen Glühlampe. Auch die Halogenlampe enthält einen Glühfaden, der Unterschied liegt in der Gasfüllung des Kolbens. Durch diese Gasfüllung läuft ein chemischer Kreisprozess im Lampenkolben ab.

Halogenglühlampen für den Niedervoltbetrieb (12V) werden überwiegend für die Dekorativ- und Akzentbeleuchtung eingesetzt. Für eine gleichmäßige Ausleuchtung verwendet man Halogenglühlampen im Hochvoltbetrieb (230V).



Der Wolfram-Halogen Kreisprozess (vom Wolfram-Glühfaden her): Durch die hohe Temperatur des Glühfadens dampft das Metall (Wolfram) kontinuierlich von der Fadenoberfläche ab. Die Wolframmatome verbinden sich in der Nähe der Außenwand bei etwas kühlerer Temperatur mit Brom zu einem Metallhexahalogenid (WBr_6). Diese Verbindung wandert zur heißen Glühwendel. Dort zersetzt sich das Molekül wieder, das Wolfram lagert sich an der Glühwendel an und das Halogen ist wieder frei. Dadurch wird der Glühfaden wieder aufgebaut und hat eine längere

Lebensdauer, außerdem wird das Schwärzen der Glaswand durch die Rückwanderung verhindert. Dieser Aufbau erlaubt höhere Glühfadentemperaturen und damit eine wesentlich höhere Lichtausbeute; diese verdoppelt sich bei einer Temperaturerhöhung von 2800 auf 3500 K. Zusätzlich kann die Lampe kompakter gebaut werden, da die Schwärzung kein Problem mehr darstellt. Die notwendige bessere Kühlung wird durch höheren Gasdruck erreicht.

4.3 Gasentladungslampen (Energiesparlampen)

Eine elektrische Lampe, deren Lichterzeugung auf der Gasentladung beruht und die sog. „kaltes Licht“ ausstrahlt, nennt man im Allgemeinen Gasentladungslampe. In einem mit einem geeigneten Gas gefüllten Entladungsrohr befinden sich an den Enden zwei eingeschmolzene Elektroden, zwischen denen sich ein Strom von raschen Elektronen und Ionen durch die übrigen, unelektrischen Gasatome hindurch bewegt. Bei den Zusammenstößen zwischen Elektronen und den Gasteilchen werden diese angeregt, d.h. Elektronen der Gasatome springen in höhere Quantenbahnen und nach kurzer Zeit wieder zurück in den Grundzustand. Dabei wird Strahlung mit einem kennzeichnenden Spektrum ausgesendet. Man unterscheidet mehrere Typen von Gasentladungslampen:

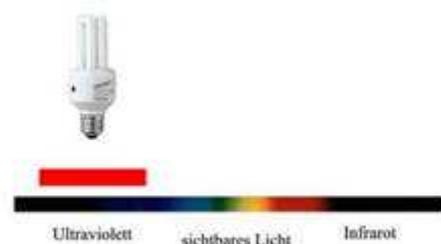


1. Hochspannungsrohren sind Gasentladungslampen in Röhrenform, gewöhnlich als Neonröhren bezeichnet. Sie sind mit einem Edelgas, Quecksilberdampf, Kohlenmonoxid (Moorelicht) oder Kohlendioxid gefüllt, werden in Längen bis 3 m hergestellt und mit einer Spannung von 6.000 – 9.000 Volt betrieben. Die ausgestrahlte Lichtfarbe ist vom Füllgas

abhängig, die Brenndauer beträgt etwa 10.000 Stunden. Oft werden diese Lampen für Reklamebeleuchtung benutzt.

2. Quecksilber- und Natrium-Dampflampen: Die Gasfüllung besteht aus den genannten Metalldämpfen und einem Zündgas, das die Entladung einleitet. Die Lampen sind sehr billig in Herstellung und Betrieb und werden daher zur Beleuchtung großer Flächen benutzt. Da die Lichtfarbe entweder kalt weiß (Hg) oder gelblich (Na) ist, darf beim Einsatzgebiet die Lichtfarbe keine Rolle spielen. Einsatzgebiete sind z.B. Autobahnbeleuchtungen,...

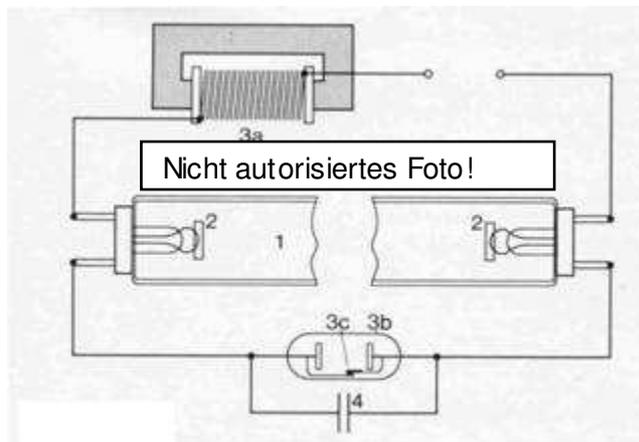
3. Leuchtströhren (Fluoreszenzlampen) sind Gasentladungslampen, bei denen die erzeugte Strahlung verschiedener anorganischer Chemikalien (Magnesium-Wolframat, Zinksilicat, Cadmiumborat, Quecksilber u. a.) genutzt wird. Diese Stoffe strahlen jedoch die meiste Energie im ultravioletten Spektralbereich aus, daher muss diese Strahlung erst umgewandelt werden. Dazu dienen Fluoreszenzstoffe, die als feinkörniges Pulver auf die Röhreninnenwand aufgetragen werden.



Je nach Kombination verschiedener Leuchtstoffe lassen sich Lichtfarben wie warmweiß, neutralweiß oder tageslichtweiß erzeugen. Zur Zündung der Lampe und zur Begrenzung des Stroms sind Vorschaltgeräte erforderlich.

Leuchtstofflampen haben eine mittlere Lebensdauer von 11.000 Betriebsstunden. Die Lichtausbeute beträgt zwischen 33 und 73 Lumen pro Watt, d.h. es werden bereits 25 – 35% der zugeführten Energie in Licht umgewandelt.

Funktion einer Leuchtstoffröhre:



- 1 Glasrohr
- 2 Elektroden
- 3 Stromversorgung - Zündung
- a) Drosselspule
- b) Glimmlampe
- c) Bimetall-Kurzschlusskontakt
- 4 Entstörkondensator

Beschreibung der Bauteilfunktion

Glasrohr - Das Rohr ist mit Quecksilber unter niedrigem Druck (0,1 bis 100 mbar) und geringen Mengen eines Edelgases gefüllt. Die Innenseite ist mit einer Leuchtschicht überzogen, die das in der

Lampe erzeugte UV-Licht in sichtbares Licht umwandelt

Glühelektroden - Elektronenquelle: Durch die hohe Temperatur der Elektroden erhalten einige Elektronen genügend Energie, um aus dem Metall austreten zu können (glühelektrischer Effekt). Durch die angelegte Spannung werden die Elektronen so stark zur Anode hin beschleunigt, dass sie die Atome der Gasfüllung anregen bzw. ionisieren können.

Zündung - Herstellung der Ladungsträger: Beim Einschalten der Lampe kann zunächst kein Strom durch das Gas fließen, da keine freien Ladungsträger vorhanden sind. Das Freisetzen von Elektronen (bei hoher Spannung) und das damit verbundene Aufleuchten der Lampe nennt man Zündung. Die Netzspannung von 230V reicht wegen des großen Abstandes der Elektroden in der Röhre nicht aus, um die Leuchtstoffröhre zu zünden. Zum Betrieb einer Leuchtstoffröhre sind deshalb ein Starter, der aus einer Glimmlampe mit eingebautem Bimetallschalter besteht, und eine Drosselspule, welche die nötige Zündspannung liefert und

die Stromstärke begrenzt, notwendig (heute auch durch Elektronik ersetzbar). Bei jedem Nulldurchgang der Wechselspannung erlischt die Gasentladung in der Leuchtstoffröhre und zündet während des anschließenden Spannungsanstieges wieder. Bei einer Netzfrequenz von 50 Hz geschieht dies also hundertmal pro Sekunde. Diesen raschen Helligkeitswechsel kann der Mensch zwar nicht bewusst wahrnehmen, wie neuere Untersuchungen zeigen, können dadurch aber raschere Ermüdung, Kopfschmerz und andere gesundheitliche Probleme verursacht werden. Geräte mit elektronischen Vorschaltgeräten können jedoch heute mit 45.000 Hz getaktet werden. Dadurch ist das Flimmern praktisch aufgehoben.

Der Vorgang der Zündung läuft folgendermaßen ab:

- 1) Beim Einschalten zündet zunächst (bei offenem Bimetallschalter) die Glimmlampe.
- 2) Die Glimmentladung erwärmt den Bimetallstreifen, worauf dieser die Glimmlampe kurzschließt. Die Glimmentladung erlischt. Es fließt ein stärkerer Strom, da der Widerstand im Stromkreis jetzt geringer ist. Dadurch beginnen die Glühelktroden zu glühen und setzen Elektronen frei.
- 3) Der Bimetallstreifen kühlt sich wieder ab und unterbricht den Stromkreis. Diese Unterbrechung verursacht eine hohe Induktionsspannung in der Drosselspule (Selbstinduktion, Lenz'sche Regel). Dieser starke Spannungsstoß zündet die Lampe. (In der Regel zündet die Lampe erst nach mehreren Zündversuchen. Das ist der Grund für das Flackern von Leuchtstoffröhren beim Einschalten.)
- 4) Wegen des Nebenschlusses durch die Leuchtstoffröhre zündet die Glimmlampe nicht mehr, und der Bimetallschalter bleibt offen. Durch den Aufprall von Quecksilberionen bleiben die Glühelktroden heiß. Durch die Ionisierung der Hg-Atome entstehen in der Lampe zusätzliche freie Ladungsträger (Elektronen und Ionen), wodurch die Gasfüllung leitfähig wird. Zur Aufrechterhaltung der Gasentladung reicht daher die Netzspannung. Die Lampe leuchtet weiter, die Drosselspule begrenzt die Stromstärke.

Kompaktleuchtstofflampen (Energiesparlampen)

Kompaktleuchtstofflampen sind einseitig gesockelte Leuchtstofflampen mit mehrfach gebogenem Entladungsrohr. Man unterscheidet Lampen mit integriertem und solche mit externem Vorschaltgerät. Sie haben eine Lebensdauer von etwa 10.000 Betriebsstunden und eine Lichtausbeute von 25 bis 70 Lumen pro Watt.



4.4 LED-Lampen

LED ... Light Emitting Diode – Licht aussendende Diode

Die LED ist ein Halbleiterbauelement. Wird eine LED in Durchlassrichtung betrieben, so sendet sie Licht im Ultraviolett- oder Infrarotbereich aus. Dies hängt von den verwendeten Halbleitern ab.



Im Unterschied zu allen anderen Glühlampen ist die LED kein Temperaturstrahler. Das Licht wird in einem engen Spektralbereich erzeugt, es ist fast monochromatisch (einfärbig) und eignet sich daher besonders gut zur Signalübertragung.

Um mit Leuchtdioden weißes Licht zu erzeugen, kommen verschiedene Verfahren zur additiven Farbmischung zum Einsatz:

- ✚ Leuchtdioden verschiedener Farben z. B. Blau und Gelb (zwei LEDs) oder Rot, Grün und Blau (RGB) werden so kombiniert, dass sich ihr Licht gut mischt und damit als weiß erscheint. Zur besseren Lichtmischung sind meist zusätzliche optische Komponenten erforderlich.
- ✚ Eine LED wird mit photolumineszierendem Material (Fluoreszenzfarbstoff, Leuchtstoff) kombiniert. Ähnlich wie z. B. in Leuchtstoffröhren kann so kurzwelliges, höher energetisches Licht (blaues Licht und Ultraviolettstrahlung) in langwelliges, niedriger energetisches Licht umgewandelt werden. Die Wahl der Leuchtstoffe kann variieren. Man kann z. B. eine UV-LED mit mehreren verschiedenen Leuchtstoffen (rot, grün und blau) oder eine blaue LED mit nur einem einzigen Leuchtstoff (gelb, meistens Cer-dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat) kombinieren. So gefertigte Bauteile verfügen über gute Farbwiedergabeeigenschaften. Die Verwendung mehrerer Farbstoffe verteuert allerdings den Herstellungsprozess und reduziert die Lichtausbeute.

Für Beleuchtungszwecke wird aus Kostengründen fast immer die Variante mit einer Leuchtdiode in Kombination mit Leuchtstoffen verwendet; weiße LEDs bestehen meistens aus einer blauen LED mit einer darüber liegenden gelblich fluoreszierenden Schicht aus Cer-dotiertem Yttrium-Aluminium-Granat-Pulver. Da blaue LEDs den höchsten Wirkungsgrad haben (UV-LEDs hingegen weniger als die Hälfte), ist dieses die wirtschaftlichste Methode, weißes Licht per LED zu erzeugen. Der Ultraviolett-Anteil, den blaue LEDs am kurzwelligen Ausläufer ihres Strahlungsspektrums aussenden, wird durch die Fluoreszenzschicht ebenfalls weitgehend in gelbliches Licht umgewandelt.



5 Lichtmessung

Um die Lichtmenge einzelner Lampen vergleichen zu können, muss man sich zuerst über die entsprechenden Größen der Lichtmessung im Klaren sein.

Die SI-Grundeinheit für die Lichtmessung ist die Lichtstärke.

Lichtstärke I [I]=1cd
cd ... candela

SI-Definition: Die Candela ist die Lichtstärke, mit der ein schwarzer Körper senkrecht zu seiner Oberfläche von $(1/600.000)\text{m}^2$ leuchtet, wenn seine Temperatur gleich der des bei normalem Luftdruck erstarrenden Platins (2042,5K) ist.

Die Lichtstärke von 1cd ist in etwa mit der Helligkeit einer 2cm dicken Kerze zu vergleichen.

Da die Menge des Lichtes auch vom Raumwinkel abhängt, gibt es eine weitere Größe, den

Lichtstrom Φ [Φ]=1lm
lm ... lumen

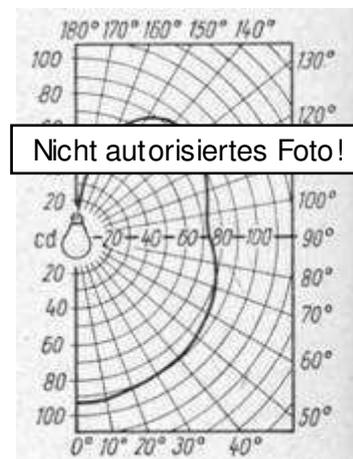
Unter dem Lichtstrom Φ versteht man das Produkt aus Lichtstärke und dem durchstrahlten Raumwinkel: $\Phi = \int I \cdot d\omega$; wobei ω der Raumwinkel (gemessen in Steradian sr) ist. Die Einheit des Lichtstroms heißt Lumen (1lm), dies ergibt für die Einheiten: $1\text{lm}=1\text{cd}\cdot 1\text{sr}$
Der Raumwinkel ist das Verhältnis einer Kugeloberfläche zum Quadrat ihres Radius.

$\omega = \frac{A}{r^2}$, wobei A die Kugeloberfläche ist. Für Einheiten gilt daher: $1\text{sr} = \frac{1\text{m}^2}{1\text{m}^2} = 1$

Der volle Raumwinkel beträgt 4π sr. Ein Raumwinkel von 1sr entspricht einem Kreisbogen mit einem Öffnungswinkel von $65,6^\circ$

Der Lichtstrom, der unsere technischen Lichtquellen verlässt, ist in den verschiedenen Richtungen von unterschiedlicher Stärke. In den Tabellen gibt man daher stets den Gesamtlichtstrom Φ_{ges} an. Wie er sich auf die einzelnen Richtungen verteilt ist dann der Lichtverteilungskurve zu entnehmen.

Lichtverteilungskurven müssen gemessen werden. Eine der wenigen Messstellen für derartige Kurven befindet sich in Dornbirn bei der Fa. Zumtobel Leuchten. Eine derartige Messstelle besteht aus einem Turm (ca. 12m hoch), in dem sich genau in der Mitte die zu prüfende Lampe befindet. Auf einer Halbkreislinie fährt dann ein Lichtsensor um diese Lampe herum und nimmt in Abhängigkeit des Winkels die jeweilige Lichtstärke auf. Das nebenstehende Diagramm zeigt die Lichtverteilungskurve für eine Glühlampe mit einem Gesamtlichtstrom von 1000lm.



Nicht autorisiertes Foto!

Als Dritte und bekannteste Einheit dient die

Beleuchtungsstärke E [E]=1lx

Unter der Beleuchtungsstärke versteht man das Verhältnis des senkrecht auftreffenden Lichtstromes zur Auftrefffläche. Die Einheit heißt Lux (1lx).

$$E = \frac{\Phi}{A} \text{ oder für die Einheiten. } 1lx = \frac{1lm}{m^2}$$

Natürliche Beleuchtungsstärken liegen zwischen 100.000lx für das Sonnenlicht im Sommer und ca. 0,2lx in einer Vollmondnacht. Die Grenze der Farbwahrnehmung liegt beim Menschen bei ca. 3lx.

Welche Beleuchtungsstärken sind für eine Wohnung oder einen Arbeitsplatz erforderlich:

Normalbeleuchtungsstärke E (in lx)				
Ansprüche	niedrig	mittel	hoch	
Wohnräume, Allgemeinbeleuchtung	40	80	150	
Art der Arbeit	grob	mittel	fein	sehr fein
Schule nur Allgemeinbeleuchtung	40	80	150	300
Allgemeinbeleuchtung mit zusätzlicher Arbeitsplatzbeleuchtung	20	30	40	50
	300	500	1000	5000
Verkehrsstärke	schwach	mittel	stark	sehr stark
Durchgänge und Treppen	50		100	
Straßen und Plätze	3	8	15	30
Fabrikhöfe	3		15	

6 Versuche

Zum Thema Licht bieten sich in der Schule einige Versuche an. Die dazu notwendigen Geräte (Lichtkoffer) können Sie beim ASE ausleihen.

Folgende Versuche sind mit den Geräten durchführbar:

- ✚ Betrachtung der Lampenspektren
- ✚ Messung der Beleuchtungsstärke an verschiedenen Orten
- ✚ Messung des quadratischen Abstandsgesetzes
- ✚ Messung der Einschaltkurve einer Energiesparlampe
- ✚ Messung der Helligkeit für einen Kostenvergleich

6.1 Sicherheitshinweise

Folgende Sicherheitshinweise sind beim Lichtkoffer unbedingt zu beachten:

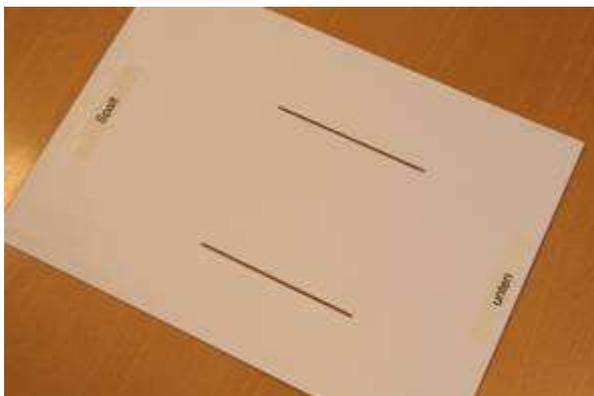
- ✚ Die Lichtleiste arbeitet mit 230V Netzspannung. In die Leiste ist ein Trenntrafo integriert, um die Gefahr für Schülerinnen und Schüler herabzusetzen. Trotzdem sind die Schülerinnen und Schüler unbedingt darauf hinzuweisen, dass sie nicht in die Lampenfassungen hineingreifen dürfen!
- ✚ Die Lampen sind von der Lehrerin oder vom Lehrer vor der Verteilung der Lichtleisten einzuschrauben. Die Schülerinnen und Schüler dürfen die Lampen nicht heraus-schrauben!
- ✚ Die Schülerinnen und Schüler sind während der Versuche unbedingt zu beaufsichtigen.

6.2 Betrachtung der Lampenspektren

Die Spektren der Lampen können sehr einfach betrachtet werden. Eine exakte Ausmessung der Lichtwellenlänge ist allerdings nur auf einer optischen Bank möglich.

Zur Betrachtung der Spektren dient ein Rowland Gitter mit 600 Strichen/mm. Sie finden 6 Gitter bei den Versuchsgeschäften. **Achtung, nicht mit den Fingern auf die Gitter greifen.** Die Dias am Rand angreifen!

Vor die Lampe muss ein möglichst dünner Spalt gestellt werden. 6 Spalte sind dem Lichtkoffer beigelegt. Auf jedem Blatt finden Sie 2 Spalte. Es darf nur eine Lampe eingeschaltet werden, der Spalt sollte möglichst genau vor der Lampe stehen. Um den Spalt zu fixieren, ist an der Lichtleiste vorne ein Einschub angebracht.



Betrachtet man die Lampe, d.h. den Spalt mit dem Gitter, so sieht man leicht seitlich davon im Gitter das Spektrum.

Aufbau des Versuches:



Ergebnisse einer Glühlampe und einer Energiesparlampe:



Kontinuierliches Spektrum



Linienspektrum

Sehr schön kann die unterschiedliche Art der Spektren gesehen werden.

6.3 Messung der Beleuchtungsstärke

Lassen Sie die Schülerinnen und Schüler an verschiedenen Orten (z.B. in der Schule) die Beleuchtungsstärke messen. Anschließend können die gemessenen Werte mit den geforderten Mindestwerten verglichen werden. (Siehe Tabelle Kapitel 5.)

Lassen Sie die Schülerinnen und Schüler im Internet nach Mindestbeleuchtungsstärken suchen.



6.4 Messung des quadratischen Abstandsgesetzes

Nimmt die Beleuchtungsstärke einfach linear mit der Entfernung ab, oder wie hängen diese beiden Größen zusammen. Diese Frage soll anhand eines einfachen Versuches geklärt werden. Insgesamt können sie mit den Versuchsmaterialien 6 Schülergruppen gleichzeitig beschäftigen.

Verwenden Sie von der Lichtleiste nur jeweils eine Lampe. Dunkeln Sie den Raum etwas ab und stellen Sie die Anordnungen so auf, dass das Streulicht der einzelnen Gruppen nicht zu groß ist. Zusätzlich benötigen Sie für jede Gruppe ein Maßband. Die Sensoren müssen möglichst senkrecht zur Lichtquelle gehalten werden.

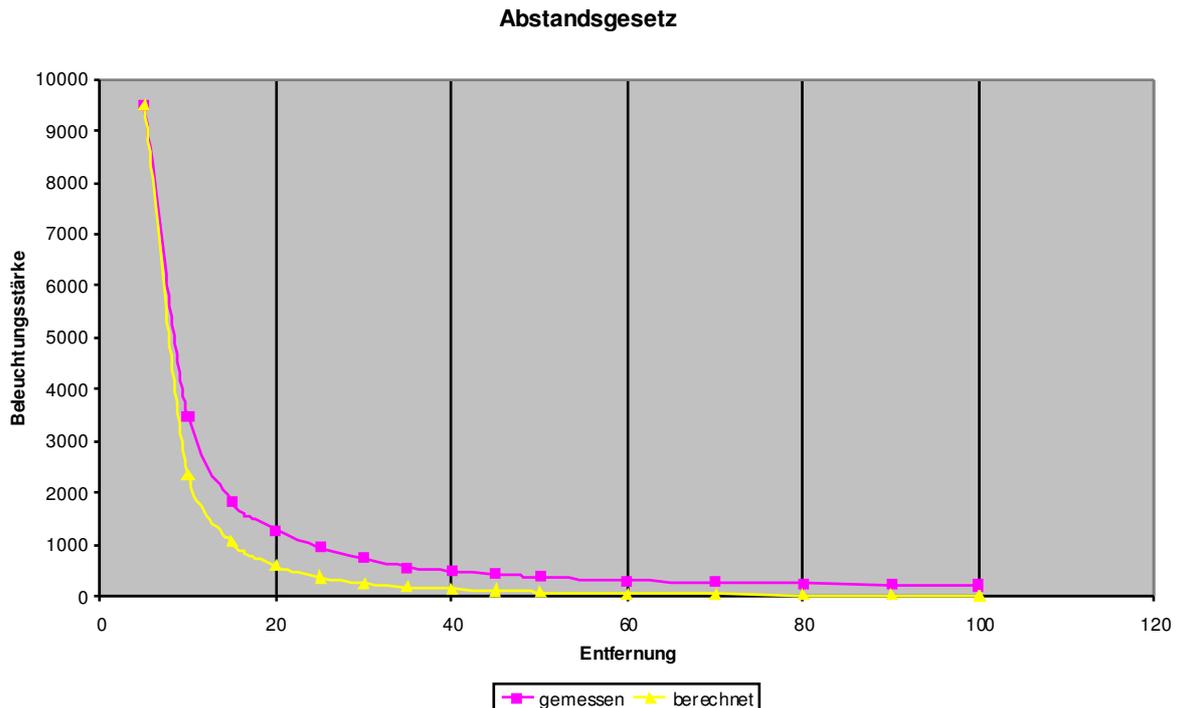


Die Auswertung kann entweder auf dem beiliegenden Übungsblatt (in der Millimetertabelle) erfolgen oder die Schülerinnen und Schüler verwenden ein Excel-Programm zur graphischen Darstellung. Auch bei ungenauer Messung ist die Nichtlinearität sehr schön zu sehen.

Im beiliegenden Excel-Programm wird auch noch der Vergleich zum exakten quadratischen Abstandsgesetz dargestellt.

Die Beleuchtungsstärke (Helligkeit) einer Lichtquelle nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$



6.5 Messung der Einschaltkurve einer Energiesparlampe

Aufnahme einer Beleuchtungskurve einer Energiesparlampe beim Einschaltvorgang.

Da Energiesparlampen eine gewisse Zeit brauchen, bis sie ihre endgültige Leuchtstärke erreichen, ist die Aufnahme einer Lichtkurve möglich. Dieser Versuch kann nur mit einer kalten Energiesparlampe durchgeführt werden!

Der Raum soll möglichst dunkel sein.



Nach Messung der Hintergrundbeleuchtung (sofern messbar) kann eine Messreihe aufgenommen und ausgewertet werden. Damit diese Messung gelingt, sollte der Messkopf auf einem Stativ befestigt werden. Der Messkopf kann mit einer Klemme (vorsichtig) befestigt werden oder man klebt ihn mit einem Streifen Tixo an ein Stativ. Die Entfernung von der Energiesparlampe zum Messkopf sollte 20cm betragen. Leichte Verdrehungen während des Versuches führen zu unbrauchbaren Ergebnissen.

Als Alternative kann dieser Versuch nur von der Lehrkraft durchgeführt werden. Dabei kann die Kurve mit dem Beleuchtungsmessgerät PCE-174 aufgenommen und direkt am Computer aufgezeichnet werden. Dies ist eine schnelle Alternative zum Schülerversuch. Bevorzugt werden sollte aber auf jeden Fall der Versuch durch die Schüler.

6.6 Messung der Helligkeit verschiedener Lampentypen

Um einen exakten Kostenvergleich verschiedener Lampentypen zu erhalten, muss unbedingt die Helligkeit berücksichtigt werden. In einem Versuch können die spezifischen Helligkeiten der 4 verschiedenen Testlampen bestimmt werden.

Dunkeln Sie den Raum ab und lassen Sie die Schülergruppen jeweils in der gleichen Entfernung die Beleuchtungsstärke der 4 Lampentypen ermitteln. Nehmen Sie als Entfernung ca. 30 cm und achten Sie darauf, dass die Messsensoren senkrecht zur jeweiligen Lampe stehen. Es darf jeweils nur eine Lampe eingeschaltet sein. Die Energiesparlampe sollte zumindest 4 Minuten vorher eingeschaltet werden, damit sie annähernd die volle Helligkeit erlangt (siehe Versuch 5)

Lampentyp	gemessene Beleuchtungsstärke [lx]
Glühlampe	870
Halogenlampe	830
Energiesparlampe	815
LED-Lampe*	13

* LED-Lampe: Die LED-Lampe ist so lichtschwach, dass die Messung in einer Entfernung von 30 cm nur sehr schlecht funktioniert. Die Hintergrundbeleuchtung ist hier bereits sehr störend. Daher muss man bei der LED-Lampe den Messkopf senkrecht über die LED-Lampe in einer Entfernung von 5cm (ab Lampenmitte) halten, um vernünftige Werte zu erhalten. Diesen Wert kann man dann auf die Normentfernung umrechnen.

Messwert in 5cm Entfernung: 480 lx; Umrechnung auf die Normentfernung von 30 cm (siehe Versuch 6.4):

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \rightarrow E_2 = E_1 \frac{r_1^2}{r_2^2} = 480 \cdot \frac{5^2}{30^2} = 13,33 \text{ lx}$$

Die Schülerinnen und Schüler sollen auf dem beiliegenden Übungsblatt die Werte für die Beleuchtungsstärke eintragen.

Als weiteren Faktor müssen die Gruppen den aktuellen Preis der einzelnen Lampentypen erheben. Es können auch die angegebenen Werte genommen werden.

Mögliche Preise und die mittlere Lebensdauer entnehmen Sie der untenstehenden Tabelle

Lampentyp	Preis	Lebensdauer
Glühlampe	€ 0,50	1.000 Stunden
Halogenlampe	€ 4,-	2.000 Stunden
Energiesparlampe	€ 10,-	10.000 Stunden
LED-Lampe	€ 30,-	15.000 Stunden

Der Strompreis beträgt ca. € 0,15 pro kWh.

7 Berechnung der Energiekosten

- ✚ Kostenvergleich mit geschätzten Beleuchtungsstärken
- ✚ Kostenvergleich mit gemessenen Beleuchtungsstärken

7.1 Kostenvergleich mit geschätzten Beleuchtungsstärken

Eine einfache Art der Berechnung ist der Kostenvergleich, wenn wir die Helligkeit nur schätzen.

Die Grunddaten entnehmen Sie der Tabelle.

Berechnet werden soll

- ✚ Die erforderliche Strommenge für eine Betriebsdauer von 5 bzw. 20 Jahren, wenn die Lampe durchschnittlich täglich 3 Stunden in Betrieb ist.
- ✚ Die Stromkosten für diese Zeiträume für den jeweiligen Lampentyp.
- ✚ Die Gesamtkosten incl. Der Anschaffung der dazu notwendigen Lampen für beide Zeiträume.

Lampentyp	Leistungsaufnahme
Glühlampe	60W
Halogenlampe	50W
Energiesparlampe	12W
LED-Lampe*	1W*

* Bei der LED-Lampe ist derzeit noch nicht die entsprechende Helligkeit erreichbar, daher ist hier ein Kostenvergleich nicht sinnvoll.

Beispiel für die Berechnung der Kosten laut Aufstellung:

$$W = P \cdot t$$

W ... Arbeit [in Wh]

P ... Leistung [in W]

t ... Zeit [in Stunden]

Berechnung der Zeit in Stunden:

$$5 \text{ Jahre: } t = 365 \cdot 3 \cdot 5 = 5475$$

$$20 \text{ Jahre: } t = 365 \cdot 3 \cdot 20 = 21900$$

Berechnung der Arbeit für die 3 Lampentypen:

Strompreis: 1kWh kostet € 0,15

Lampe	Jahre	Arbeit [Wh]	Arbeit [kWh]	Betrag [€]	Anzahl Lampen	Kosten Lampen [€]	Gesamt [€]
		$W = P \cdot t$	$\frac{W[Wh]}{1000}$	$W[kWh] \cdot 0,15$	$\frac{\text{Betriebszeit}}{\text{Lebensdauer}}$		
Glühlampe	5	328.500	328,50	49,28	6	3,-	52,28
	20	1.314.000	1.314,00	197,10	22	11,-	208,10
Halogenlampe	5	273.750	273,75	41,06	3	12,-	53,06
	20	1.095.000	1.095,00	164,25	11	44,-	208,25
Energiesparlampe	5	65.700	65,70	9,86	1	10,-	19,86
	20	262.800	262,80	39,42	3	30,-	69,42

Man sieht aus der Rechnung sehr deutlich, dass Halogenlampen zu dekorativen Zwecken eingesetzt werden können, jedoch keine Preisersparnis bringen. Energiesparlampen sind trotz der relativ höheren Anschaffungskosten durch den geringen Stromverbrauch eine sehr große finanzielle Entlastung (über 60% Ersparnis).

Die Tabelle eignet sich auch sehr gut zur Umsetzung in Excel. Dadurch kann dann sehr schnell für verschiedene Betriebsdauer die Kostenersparnis berechnet werden. Zu beachten ist, dass bei der Anzahl der Lampen immer auf die nächste höhere ganze Zahl gerundet werden muss!

7.2 Kostenvergleich mit gemessenen Beleuchtungsstärken

Im Prinzip ist die Rechnung der obigen ähnlich. Es muss nur berücksichtigt werden, dass jeder angegebenen Leistung der Lampe eine entsprechende gemessene Helligkeit entspricht.

Die Helligkeitsmessungen kann man dem Versuch 6.6 entnehmen.

Um jetzt die Helligkeit in die Rechnung einzubeziehen, gehen wir folgendermaßen vor. Wir nehmen einen Glühlampentyp als Referenz.

In diesem Beispiel wird alles auf die Helligkeit der Glühlampe bezogen.

Den Faktor errechnet man aus dem Quotienten:

Beleuchtungsstärke Glühlampe / Beleuchtungsstärke Lampe X

Lampentyp	gemessene Beleuchtungsstärke [lx]	Faktor
Glühlampe	870	1
Halogenlampe	830	1,048
Energiesparlampe	815	1,067
LED-Lampe	13	66,923

Mit diesem errechneten Faktor muss jetzt die Arbeit [in kWh] multipliziert werden. Der Rest der oben angeführten Tabelle bleibt vollständig gleich.

Dadurch werden alle Beträge auf die gleiche Helligkeit hin berechnet.

Lampe	Jahre	Arbeit [kWh]	Faktor	Betrag [€]	Anzahl Lampen	Kosten Lampen [€]	Gesamt [€]
		$\frac{W[Wh]}{1000}$	k	$W[kWh] \cdot k \cdot 0,15$	$\frac{\text{Betriebszeit}}{\text{Lebensdauer}}$		
Glühlampe	5	328,50	1	49,28	6	3,-	52,28
	20	1.314,00	1	197,10	22	11,-	208,10
Halogenlampe	5	273,75	1,048	43,03	3	12,-	55,03
	20	1.095,00	1,048	172,13	11	44,-	216,13
Energiespar- lampe	5	65,70	1,067	10,52	1	10,-	20,52
	20	262,80	1,067	42,06	3	30,-	72,06
LED-Lampe*	5	11,00	66,923	109,92	1	30,-	139,92
	20	44,00	66,923	439,68	2	60,-	499,68

* Die Ergebnisse bei der LED-Lampe sind völlig unrealistisch, da die Beleuchtungsstärke zu niedrig ist.