

Analyse der wirtschaftlichen und technischen Perspektiven für effizienteren Energieeinsatz bei der Beleuchtung

DIPLOMARBEIT

ausgeführt am Institut für

Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft

der technischen Universität Wien

unter der Anleitung von

Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Reinhard Haas

und

Dipl.-Ing. Andreas Müller

durch

Nanna Nora Sagbauer

Wien, 28. März 2008

Kurzfassung

Der stetig steigende Energiebedarf stellt eine große Herausforderung für Österreich und die EU dar. Energieeffizienzmaßnahmen bieten Möglichkeiten dieser Entwicklung entgegen zu wirken. Diese Arbeit befasst sich mit dem effizienten Energieeinsatz bei Beleuchtung, da dieser Bereich der Energieeffizienzmaßnahmen eine sehr gute Kosten-Nutzen-Relation aufweist. Diese Arbeit spannt den Bogen von den technischen Grundlagen bis zu Zukunftsszenarien für Beleuchtung in Österreich. Die Entwicklung des Marktes wird aus historischen Blickpunkten betrachtet. Lebenszyklusanalysen verschiedener Lampentechnologien zeigen sowohl den wirtschaftlichen, als auch den ökologischen Wert von effizienten Beleuchtungssystemen. Eine Betrachtung von Markthindernissen und Maßnahmen zu deren Überwindung runden diese Arbeit ab.

Abstract

A big challenge for Austria and the EU is the constantly rising demand of energy. Energy efficiency measures provide a good way to counteract this development. This work presents energy efficient lighting as a part of energy efficiency measures with a very good cost-benefit-ratio. The history of lighting helps on the understanding of the current market situation. Technical aspects of different lamps are discussed in order to identify the best available lamp for different applications. A lifecycle analysis shows the economical and environmental impact of lighting technologies. Barriers for energy efficient lighting and measures to overcome those are identified. Scenarios for lighting in Austria based on lamp sales for the domestic sector are developed and discussed in order to complete this work.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	ii
1. Motivation und zentrale Fragestellung	1
2. Historische Entwicklung der künstlichen Beleuchtung	3
2.1. Lagerfeuer, Kerzen und Öllampen	3
2.2. Gasbeleuchtung	5
2.3. Elektrische Beleuchtung	6
3. Lichttechnologien, Lichtqualitäten und Einsatzgebiete	11
3.1. Temperaturstrahler	12
3.1.1. Glühlampe	12
3.1.2. Halogenglühlampen	14
3.2. Niederdruck-Entladungslampen	15
3.2.1. Leuchtstofflampen	15
3.2.2. Kompakte Leuchtstofflampen (CFL)	18
3.2.3. Induktionslampen	19
3.2.4. Natriumdampf-Niederdrucklampen	19
3.3. Hochdruck-Entladungslampen	20
3.3.1. Quecksilberdampf-Hochdrucklampen	21
3.3.2. Halogen-Metaldampflampen	22
3.3.3. Natriumdampf-Hochdrucklampen	24
3.4. Elektrolumineszenzstrahler	25
3.4.1. Leuchtdioden(LED)	26
3.4.2. Organische Leuchtdioden	28
3.5. Vergleich verschiedener Technologien zur elektrischen Lichterzeugung	30
4. Ganzheitliche Bilanzierung ausgewählter Lampen	32
4.1. Glühlampe	33
4.2. Halogenglühlampen	34

Inhaltsverzeichnis

4.2.1. Hochvolt-Halogenglühlampe mit niedriger Leistung	34
4.2.2. Hochvolt-Halogenglühlampe mit hoher Leistung	35
4.2.3. Niedervolt-Halogenglühlampe(12V)	36
4.3. Kompakte Leuchtstofflampe mit integriertem elektronischen Vor- schaltgerät	38
4.4. Direkter Vergleich von Energieverbrauch, Quecksilberemission, Treib- hauspotential und Lebenszykluskosten der verschiedenen Lampen- technologien	39
5. Analyse des Beleuchtungsbestands in der EU	44
5.1. Haushaltssektor	44
5.1.1. EU	44
5.1.2. Österreich	49
5.2. Dienstleistungssektor	52
5.3. Industrie	55
5.4. Straßenbeleuchtung	55
6. Energieeinsparpotentiale bei der Beleuchtung und Hemmnisse bei der Realisierung	58
6.1. Energieeinsparpotentiale durch den Einsatz effizienter Technologien	58
6.1.1. Haushaltssektor	59
6.1.2. Dienstleistungssektor	59
6.1.3. Industrie	60
6.1.4. Straßenbeleuchtung	60
6.2. Markthindernisse für die Steigerung der Energieeffizienz der Be- leuchtung	61
6.2.1. Mangel an Interesse	61
6.2.2. Vorurteile	62
6.2.3. Mangel an Information	63
6.2.4. Investor-Nutzer-Dilemma	64
7. Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung bei der Beleuchtung	65
7.1. Chronologie der internationalen Bemühungen zur Energieeffizienz- steigerung bei der Beleuchtung	65
7.1.1. Etablierte gesetzliche Regulierung im Jahr 2006	66
7.1.2. Chronologie der internationalen Entwicklungen seit 2006	66
7.2. Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung bei Beleuchtung in der EU	69

Inhaltsverzeichnis

7.2.1. Gebäuderichtlinie	69
7.2.2. Umweltrichtlinien	69
7.2.3. Energieeffiziananforderungen	71
7.2.4. Kennzeichnung	75
7.2.5. Initiativen und Förderprogramme	79
8. Zukunftsperspektiven für Energieverbrauch und Steigerung der Ef- fizienz der Beleuchtung	80
8.1. Österreich	80
8.1.1. Szenario BAU 06	81
8.1.2. Szenario BAU 07	81
8.1.3. Szenario Amb 80	81
8.1.4. Szenario Amb 95	81
8.1.5. Ergebnisse der Analyse	81
8.2. Zukunftsweisende Technologien	84
8.2.1. Leuchtdioden	84
8.2.2. Organische Leuchtdioden	86
9. Schlussfolgerungen	87
A. Glossar	89
Literaturverzeichnis	94

1. Motivation und zentrale Fragestellung

Elektrische Beleuchtung ist in unserer Gesellschaft seit über 100 Jahren etabliert und ein selbstverständlicher Bestandteil unserer Kultur. Künstliches Licht ermöglicht das Arbeiten bis in die Abend- und Nachtstunden, setzt Architektur in Szene und erhöht die Sicherheit in allen Bereichen unseres Lebens. Beleuchtung ist zu einer Notwendigkeit geworden. Elektrische Beleuchtung ist allgegenwärtig und dennoch wurde diesem Thema lange Zeit wenig Aufmerksamkeit geschenkt, obwohl beachtliche Energiemengen dafür eingesetzt werden.

Im Jahr 2005 wurden weltweit mehr als 2.500TWh an elektrischer Energie für Beleuchtungszwecke eingesetzt [Hal06]. Der entsprechende Ausstoß an CO₂ liegt bei etwa 1.775 Millionen Tonnen. In industrialisierten Ländern beträgt der Lichtanteil der gesamten elektrischen Energie 5% bis 15%. In Entwicklungsländern liegt dieser bei bis zu 86%, wobei dort auch nicht-elektrische Beleuchtung eine wichtige Rolle spielt. Kerosin-betriebene Lampen werden von etwa 2 Milliarden Menschen genutzt. Sie emittieren sehr wenig Licht bei hohem Energieeinsatz. Die Kosten sind 1625-mal höher als bei Beleuchtung mit Energiesparlampen¹. Selbst bei Verwendung einer sehr alten und ineffizienten Lichterzeugungstechnologie, der Glühlampe, ist die Einsparung mit dem Faktor 325 noch sehr deutlich [Mil02]. Die beiden unterschiedlichen Faktoren zeigen, dass das Einsparpotential auch bei rein elektrischer Beleuchtung beträchtlich ist. Ineffiziente Technologien erhöhen unnötig den Energieverbrauch und kosten dabei viel Geld. Beleuchtung europäischen Büros verschlingt etwa die Hälfte des elektrischen Energiebedarfs dieser Gebäude. In Krankenhäusern liegt dieser Anteil bei 20% bis 30% [Hal06] und in Haushalten bei 10% bis 20%. [Ber07b] Das Einsparpotential in der EU beträgt bis zu $44 \frac{TWh}{a}$ [Ber07a].

Energieeffizienzmaßnahmen bei der Beleuchtung können im Hinblick auf aktuelle Klimadebatten wichtige Beiträge zu Energie- und Emissionsreduktionen liefern. Auch in wirtschaftlicher Sicht sind sie meist lohnende Investitionen mit geringen Amortisationszeiten. Technologisch ausgereifte Technologien, die hohe Lichtausbeuten und gute Lichtqualitäten bieten, sind am Markt verfügbar. Trotz-

¹kompakte Leuchtstofflampen

1. Motivation und zentrale Fragestellung

dem werden veraltete Beleuchtungen erhalten und auch bei der Installation neuer Anlagen wird häufig auf ineffiziente Systeme zurückgegriffen. Dieses Marktversagen wirft viele Fragen auf:

- Warum werden Maßnahmen zur Verbesserung von Beleuchtungssystemen, die sowohl wirtschaftliche und energetische Einsparungen ermöglichen, nicht durchgeführt?
- Welche Lichttechnologien sind heute im Einsatz und warum?
- Sind Energiesparlampen wirklich so umweltfreundlich, wenn man Herstellung und Entsorgung mitberücksichtigt?
- Was sind die Marktbarrieren für effiziente Beleuchtungstechnologien?
- Welche Potentiale zur Energieeinsparung sind in der EU mit energieeffizienter Beleuchtung zu realisieren?
- Wie sieht die Zukunft der Beleuchtung in Österreich aus?

Antworten auf diese zentralen Fragestellungen werden im Rahmen dieser Arbeit gesucht. Zum besseren Verständnis der Thematik wird auf die geschichtliche Entwicklung genauso eingegangen, wie auf die verschiedenen Lichterzeugungsprinzipien und -technologien.

2. Historische Entwicklung der künstlichen Beleuchtung

Die historische Entwicklung der künstlichen Beleuchtung reicht weit in die Menschheitsgeschichte zurück. Der Schein eines Lagerfeuers nach Sonnenuntergang gewährte urzeitlichen Menschen Schutz vor wilden Tieren. Im Lauf der Geschichte entwickelte sich künstliche Beleuchtung zu einem wesentlichen Wirtschaftsfaktor, da die Arbeit auch nach Sonnenuntergang noch weitergeführt werden konnte. Künstliche Beleuchtung im eigenen Heim konnten sich zu Beginn nur reiche Leute leisten. Im Wandel der Zeit wurde der Luxus jedoch zur Selbstverständlichkeit. Elektrisches Licht ist in Europa zu einer für jeden leistbaren Energiedienstleistung geworden.

2.1. Lagerfeuer, Kerzen und Öllampen

Die ältesten Funde künstlicher Beleuchtung waren Lagerfeuer. Ihre Hauptaufgaben waren Wärmegewinnung und Lichterzeugung und der damit verbundene Schutz vor wilden Tieren. Sie stammen von den so genannten „Peking Menschen“ aus China und werden auf 400.000 Jahre vor Christus datiert [Wil05]. Sie ermöglichten den Menschen erstmals nach Sonnenuntergang die Erzeugung von Wärme und Licht. Um Licht auch abseits der Feuerstelle nutzen zu können, wurden portable Lichtquellen, wie die Fackel, entwickelt. Sie bestand meist aus einem Holzstock, der mit brennbaren Materialien umwickelt wurde. Lagerfeuer und Fackeln waren sehr lange die einzigen Möglichkeiten eine Höhle oder ein Heim mit etwas Licht zu erhellen.

Erste primitive Lampen bestanden aus einem Gefäß, das mit Fett gefüllt und mit einem Docht versehen war. Sie kamen um 5000 vor Christus auf¹. Aufgrund

¹Je nach geographischer Lage wurden unterschiedliche Fette für Lampen benutzt. Im Mittelmeerraum wurde vorrangig Olivenöl verwendet, in nördlicheren Regionen dagegen meist Tierfett [Wil05].

2. Historische Entwicklung der künstlichen Beleuchtung

ihrer längeren Lebensdauer stellten sie eine wesentliche Verbesserung zu Fackeln dar.

Ein lichttechnischer Quantensprung war die Erfindung der Kerze etwa 400 Jahre nach Christus. Sie waren viel einfacher in der Handhabung und gaben außerdem mehr Licht. Qualitativ hochwertige Kerzen wurden aus Bienenwachs hergestellt. Diese waren sehr teuer und wurden deshalb hauptsächlich für religiöse Rituale verwendet. Billigere Kerzen bestanden aus in Talg getauchten Binsen. Diese wurden von ihren Blättern befreit und fungierten als Docht. Talglichter gaben nur sehr wenig Licht. Ein weiteres Problem dieser Art von künstlicher Beleuchtung stellte die niedere Schmelztemperatur des Talgs dar. Talglichter fanden daher im Mittelmeerraum kaum Verwendung, allerdings waren sie in kühleren Regionen wie England sehr weit verbreitet. Im Jahr 1300 lag ihre Effizienz bei etwa $15 \frac{\text{lm}}{\text{kW}}$, außerdem rauchten und stanken sie stark [Fou06].

Künstliche Beleuchtung war zu jener Zeit sehr teuer. Erst zwischen dem 14. und 16. Jahrhundert begannen die Kosten für Leuchtmittel zu sinken. Während dieser Zeitspanne von 200 Jahren halbierte sich der Preis von ungefähr $28000 \frac{\text{€}}{\text{Mlmh}}$ ² auf $14000 \frac{\text{€}}{\text{Mlmh}}$ ³, was zu einer stärkeren Verbreitung der künstlichen Beleuchtung führte. Große Fortschritte der Kerzentechnologie wurden erst mit der Entdeckung des Stearins⁴ am Anfang des 19. Jahrhunderts gemacht. Stearin-Kerzen rauchen und riechen kaum und brennen außerdem mit einer klaren, hellen Flamme. Im 17. Jahrhundert wurden für Straßenbeleuchtungen wieder vermehrt Öllampen eingesetzt⁵. Anfangs wurde die Straßenbeleuchtung von den Bewohnern der Häuser betrieben, in weiterer Folge wurde diese Aufgabe von Dienstleistern oder den Städten übernommen.

²Euro pro Mega-Lumen-Stunde

³Die Preise beziehen sich auf England und sind auf das Preisniveau des Jahres 2000 angepasst [Fou06] bei einem Euro/Pfund Wechselkurs von 0,72.

⁴ein hartes, weißes Fett, das aus pflanzlichen und tierischen Rohstoffen gewonnen wird

⁵Öllampen galten als Licht für die Armen, da sie sehr stark rauchten und wenig Licht gaben. Erst in den 1680er Jahren gab es große Effizienzsteigerungen und der Preis für Walöl, mit dem die Lampen hauptsächlich betrieben wurden, fiel stark.

2. Historische Entwicklung der künstlichen Beleuchtung



Abbildung 2.1.: Lichtinsel einer Straße mit Ölbeleuchtung zu Beginn des 19. Jahrhunderts. Quelle: [Abe95]



Abbildung 2.2.: Nachfüllen einer Straßenlaterne mit Öl im 18. Jahrhundert. Quelle: [Abe95]

2.2. Gasbeleuchtung

In der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts wurde künstliche Beleuchtung für die Industrie immer bedeutender, jedoch waren die vorhandenen Technologien unzureichend. Um Ruß- und Funkenbildung zu verhindern mussten Öllampen ständig mit der richtigen Ölmenge versorgt werden. Bei Kerzen musste der Docht regelmäßig gekürzt werden. Es wurden viele Preise für die Verbesserung der Beleuchtung vergeben⁶ und die Forschungen liefen auf Hochtouren. Allein zwischen 1790 und 1810 gab es in England 43 neue Patente zum Thema Beleuchtung [Fou06].

1792 beleuchtete der Schotte William Murdock sein Heim und sein Büro erstmals mit Kohlegas. Er gilt als Pionier der Gasbeleuchtung. Die Straßen-, Geschäfts- und Allgemeinbeleuchtung in einigen reichen Haushalten machten den Anfang. Im Jahr 1820 lag der Preis für künstliches Licht mit Gas noch über $4100 \frac{\text{€}}{\text{Mlmh}}$,

⁶z.B.: von der Royal Society in London

2. Historische Entwicklung der künstlichen Beleuchtung

sankt bis zum Jahr 1840 rapide auf etwa $1800 \frac{\text{€}}{\text{Mlmh}}$, nur um weitere zehn Jahre später schon unter $700 \frac{\text{€}}{\text{Mlmh}}$ zu fallen. Gasbeleuchtung wurde somit auch für die Mittelschicht erschwinglich und verbreitete sich stark. Ärmere Haushalte konnten sich meist die Infrastruktur, die zur Nutzung von Gas nötig war, nicht leisten, weshalb hier weiterhin Kerzen und Talglichter in Verwendung blieben.

Die Einführung von Mineralölen, wie Kerosin und Paraffin, in den 1860er Jahren verhalf den Öllampen zu einem neuen Aufschwung, da hierfür keinerlei Infrastrukturinvestitionen in den Gebäuden nötig waren. Auch in diesem Beleuchtungssektor zeichnete sich ein Preisverfall von $700 \frac{\text{€}}{\text{Mlmh}}$ in 1870 bis auf unter $300 \frac{\text{€}}{\text{Mlmh}}$ im Jahr 1900 ab. Kerosinbetriebene Lampen konnten in Großbritannien einen Marktanteil von 14% ⁷ erreichen, wobei der Gasbeleuchtung die Markführerschaft mit 81% des gesamten Beleuchtungsmarktes sicher war. Stetige Verbesserungen der Gaslampen, wie die Erfindung des Glühstrumpfs⁸ von Carl Auer von Welsbach im Jahr 1880, führten zu Energieeffizienzsteigerungen und höheren Lichtausbeuten pro Lampe. Gaslampen stellten durch den niedrigen Preis von $175 \frac{\text{€}}{\text{Mlmh}}$ zur Jahrhundertwende die günstigste Beleuchtungsart dar. Allein in Großbritannien wurden damals $8,65 \text{Tlmh}$ ⁹ mit Gasbeleuchtungen generiertes Licht konsumiert [Fou06].

2.3. Elektrische Beleuchtung

1802 demonstrierte Sir Humphry Davy erstmals die elektrische Bogenlampe¹⁰ in der Royal Institution in London [Fou06]. Bogenlampen haben sehr große Lichtstärken und sind deshalb zur Innenraumbeleuchtung ungeeignet. Der erste Beleuchtungsversuch mit handregulierten elektrischen Bogenlampen fand 1844 am Place de la Concorde in Paris statt. Die erste installierte Außenbeleuchtungsanlage war die der Oper in Paris 1881 [Abe95]. Die Verbreitung von elektrischen Außenbeleuchtungsanlagen schritt rasch voran. Im Jahr 1884 beleuchteten schon

⁷bezogen auf das Jahr 1900

⁸Ein Glühstrumpf ist ein kuppel- oder birnenförmiges, feinmaschiges Gebilde aus Oxiden, welches in gasbetriebenen Leuchten die Lichtquelle bildet, indem es durch die Flamme zum Leuchten angeregt wird.

⁹ Terralumenstunde: $1 \text{Tlmh} \hat{=} 1 \cdot 10^{12} \text{lmh}$

¹⁰Durch Ionisierung entsteht zwischen zwei getrennten Elektroden ein Lichtbogen, wobei die eigentliche Lichtquelle nicht der Lichtbogen selbst, sondern die glühenden Elektrodenspitzen sind.

2. Historische Entwicklung der künstlichen Beleuchtung

90.000 Bogenlampen in der Ausführungsform der Jablochhoff'schen Kerze¹¹ die USA bei Nacht [Wil05]. Sie bestanden aus zwei Kohleelektroden, die parallel angeordnet und durch einen Isolator getrennt waren. Dieser wurde im Betrieb langsam durch den Lichtbogen abgebrannt. Diese Ausführungsform hatte den Vorteil, dass die sonst notwendige Regeleinrichtung zur Einstellung des Elektrodenabstands und somit der Lichtbogenlänge entfallen konnte. Nachteilig war die Lebensdauer dieser Lampen, da die Elektroden nach etwa 90 Minuten abgebrannt waren. Die Differentialbogenlampe stellte eine Verbesserung der Jablochhoff'schen Kerze dar, die die Schaltung mehrerer Lampen in einem Stromkreis ermöglichte. Das Problem der kurzen Lebensdauer wurde durch sie jedoch nicht gelöst. Die Entdeckung des elektromagnetischen Prinzips zur Selbsterregung von Generatoren 1866 stellte einen wichtigen Schritt zur preisgünstigen Stromerzeugung dar. Somit trug diese technologische Entwicklung zur Verbreitung der elektrischen Beleuchtung bei.

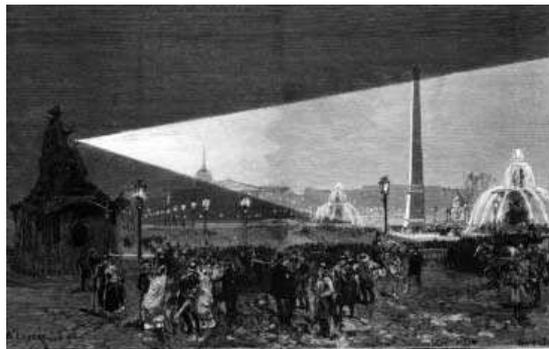


Abbildung 2.3.: Erster öffentlicher Beleuchtungsversuch mit handregulierten Lichtbogenlampen auf der Place de la Concorde in Paris, 1844. Quelle: [Abe95]

Bereits in den 1850er Jahren konstruierte Heinrich Göbel eine brauchbare Kohlefadenlampe; als Erfinder der Glühbirne gilt jedoch Thomas Alva Edison. Dieser suchte in den 1870er Jahren nach einem haltbaren Glühfaden mit hohem Widerstand um sein elektrisches Licht bei hohen Spannungen und somit kostengünstig betreiben zu können. Dabei stießen er und seine Mitarbeiter auf eine Bambusfaser, die als Glühfaden besonders geeignet war. Ziel dieser Glühbirnen war es, das sanfte Licht der Gaslampen zu imitieren und diese in den Häusern zu ersetzen. Dieses Konkurrenzprodukt zur Gaslampe hatte große Sicherheitsvorteile, jedoch

¹¹Die Jablochhoff'sche Kerze war einfacher und billiger als frühere Bogenlampen. Sie war viel heller als bislang verwendete Gasbeleuchtung und weckte das öffentliche Interesse an elektrischer Beleuchtung.

2. Historische Entwicklung der künstlichen Beleuchtung

den Nachteil des höheren Preises bis ins erste Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts. Elektrische Beleuchtung war lange Zeit ein Luxusartikel und Prestigeträger. Die Wettbewerbssituation zwischen Gas und Elektrizität förderte Forschung und Entwicklung in beiden Sektoren. Bogenlampen wurden mit verminderter Luftzufuhr ausgeführt, was zu einer Lebensdauer bis zu 150 Stunden führte. Auch die Glühlampe machte Fortschritte. Die Verwendung von metallischen Glühdrähten mit hohem Schmelzpunkt senkte den Energiebedarf der Glühbirnen drastisch.

1879 lag die Energieeffizienz einer Kohlefadenlampe bei $2 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ und hatte sich mit der Erfindung der Wolframdrahtlampe bis zum Jahr 1897 auf $7 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ mehr als verdreifacht. Einen weiteren Entwicklungsschritt stellte die Gasfüllung des Glaskolbens, in welchem sich der Glühdraht befindet, dar. Mit dem Ansteigen der Energieeffizienz und durch größere Produktionsvolumen fiel der Preis für elektrische Beleuchtung stetig. Beginnend Mitte der 1880er Jahre bei über $1400 \frac{\text{€}}{\text{Mlmh}}$, welches dem Vierfachen der Kosten für Gasbeleuchtung entsprach, sank das Preisniveau auf $500 \frac{\text{€}}{\text{Mlmh}}$ im Jahr 1900, auf $250 \frac{\text{€}}{\text{Mlmh}}$ in 1910 und unter $50 \frac{\text{€}}{\text{Mlmh}}$ in 1920 (siehe Abbildung 2.4). Elektrische Beleuchtung hatte das Preisniveau der Gasbeleuchtung erreicht.

Damit begann der Triumphzug der elektrischen Beleuchtung, der mit vielen Lampenarten und Lichterzeugungsprinzipien bis heute anhält. Abbildung 2.5 zeigt die geschichtliche Entwicklung der elektrischen Lichttechnologien.

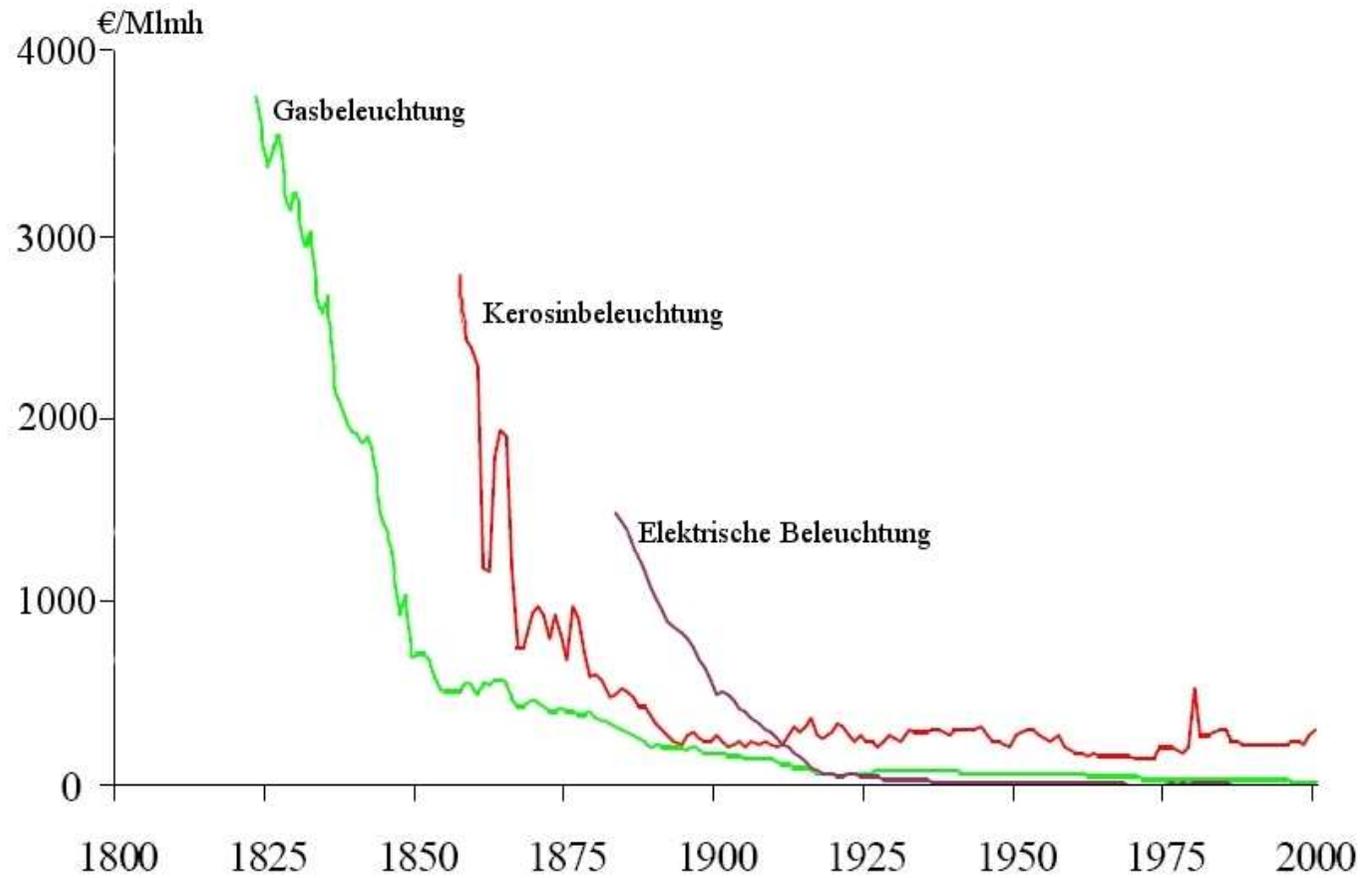


Abbildung 2.4.: Historische Preisentwicklung von Gas-, Kerosin- und elektrischer Beleuchtung in England. Die Preise sind umgerechnet auf das Preisniveau des Jahres 2000. Sie sind in Euro pro Millionen Lumen-Stunden ($\frac{\text{€}}{\text{Mlmh}}$) angegeben. Quelle: [Fou06]

2. Historische Entwicklung der künstlichen Beleuchtung

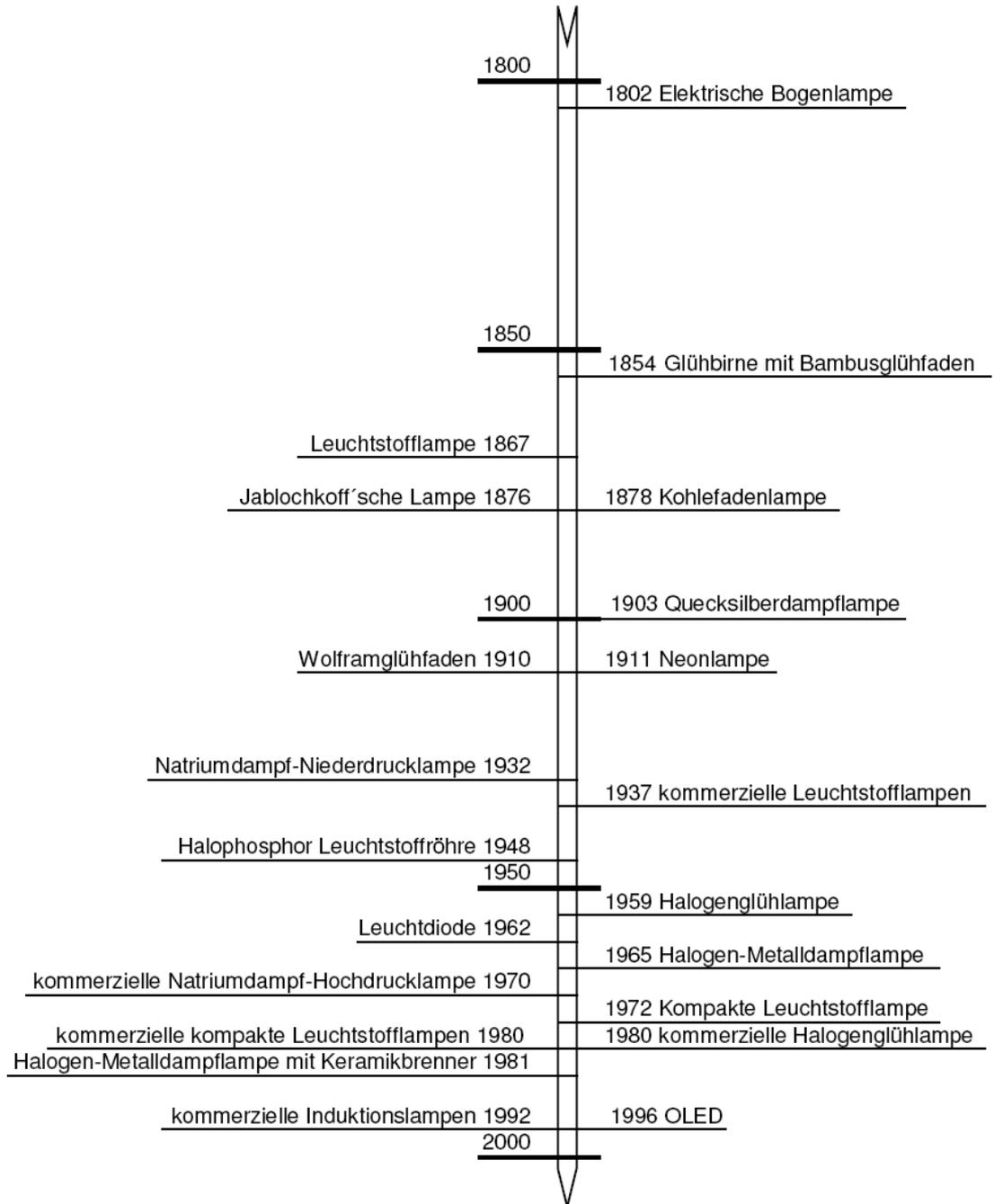


Abbildung 2.5.: Zeitreihe der geschichtlichen Entwicklung der elektrischen Lichttechnologien

3. Lichttechnologien, Lichtqualitäten und Einsatzgebiete

Dieses Kapitel behandelt die Lichterzeugungsprinzipien der verschiedenen Lichttechnologien. Die Bauweisen der Lampen, sowie Vor- und Nachteile des von ihnen abgegebenen Lichts werden analysiert. Die Einsatzgebiete der Technologien werden angeführt.

Die folgenden beiden Bilder dienen dem besseren Verständnis der nächsten Abschnitte. Abbildung 3.1 zeigt Lichtfarben und dazugehörige Wellenlängen des sichtbaren Lichtspektrums und Abbildung 3.2 die Wahrnehmung der Farbtemperatur, wobei rot für warmes und blau für kaltes Licht steht.

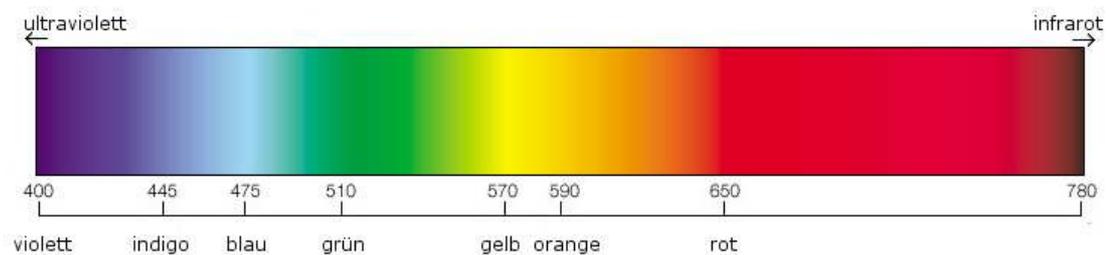


Abbildung 3.1.: Lichtfarben und dazugehörige Wellenlängen (in nm) des sichtbaren Lichtspektrums

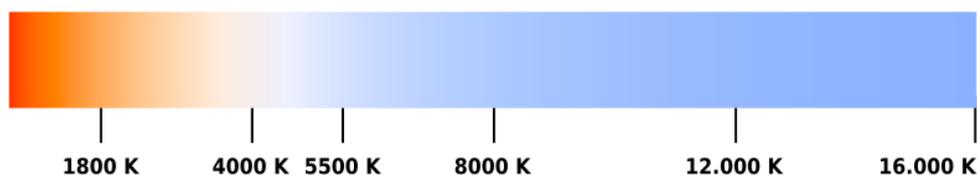


Abbildung 3.2.: Wahrnehmung der Farbtemperatur. Rot steht für warmes und blau für kaltes Licht.

3.1. Temperaturstrahler

Glühlampen und Halogenglühlampen gehören zur Gruppe der Temperaturstrahler. Diese emittieren einen hohen Anteil an infraroter Strahlung, dagegen nur wenig Licht im sichtbaren Spektralbereich. Daraus resultiert die niedrige Lichtausbeute. Temperaturstrahler zeichnen sich durch perfekte Farbwiedergabe mit $R_a = 100$ ¹ aus.

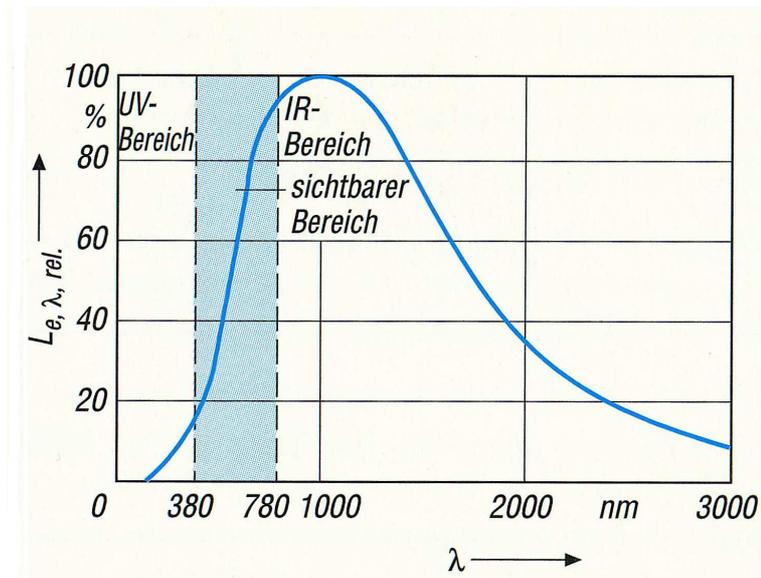


Abbildung 3.3.: Relative spektrale Dichteverteilung von Temperaturstrahlern. Quelle: [Bae06]

3.1.1. Glühlampe

Ein Wolframdraht, der in einem Glaskolben angeordnet ist, wird durch Stromdurchgang auf ca. 2500°C erhitzt und glüht dadurch. Die Lichtausbeute von Temperaturstrahlern steigt mit der Temperatur. Die Verdampfung des Wolframs in der Glühwendel wird dadurch allerdings auch beschleunigt, was eine starke

¹Der allgemeine Farbwiedergabeindex R_a beschreibt zahlenmäßig die Farbwiedergabeeigenschaft, wie natürlich Farben der Umwelt unter dem Licht einer Lampe erscheinen. Er wird auf der Basis von acht definierten Körperfarben und einer Bezugslichtart ermittelt. $R_a = 90$ bis $R_a = 100$ steht für sehr gute Farbwiedergabe, 80 ... 89 für gute, und je niedriger das R_a ausfällt, desto schlechter werden Farben wiedergegeben. [Bae06]

3. Lichttechnologien, Lichtqualitäten und Einsatzgebiete

Reduzierung der Lebensdauer² zur Folge hat. Das verdampfte Wolfram setzt sich am Glaskolben ab und führt zu einer Schwärzung des Kolbens und somit zu einer Reduzierung des austretenden Lichtstroms. Die Glaskolben werden mit einem chemisch inaktiven Gasgemisch gefüllt um die Lebensdauer zu erhöhen, wodurch sich allerdings die Wärmeableitung verbessert und die Wärmeverluste steigen. Eine Gasfüllung mit schweren Gasen wie Krypton verringert die Wärmeverluste. Krypton ist relativ teuer und wird daher nur für Spezialanwendungen verwendet. Eine Wendelung des Glühdrahtes verringert den Wärmeübergang vom Draht auf das Gas infolge von Konvektion. Heutige Standard-Glühlampen haben eine doppelte oder dreifache Wendelung und sind mit einem Stickstoff-Argon-Gemisch gefüllt.

Die Lebensdauer einer Allgebrauchsglühlampe beträgt ca. 1000h und die Lichtausbeute je nach Leistung von $10 \frac{lm}{W}$ bis maximal $17 \frac{lm}{W}$. Glühlampen für 110V Nennspannung haben um 5 bis 15% höhere Lichtausbeuten als jene für 230V, da sie bei gleicher Lebensdauer mit dickerem Glühdraht ausgeführt werden. Auch Lampen für höhere Leistung werden aufgrund der höheren Ströme bei gleich bleibender Stromdichte mit dickerem Glühdraht versehen und haben deshalb höhere Lichtausbeuten. Spannungsschwankungen wirken sich erheblich auf die Betriebsdaten von Glühlampen aus, so sinkt die Lebensdauer bei einer dauerhafte Spannungsanhebung von 10% auf die Hälfte [Hen02]. Das abgestrahlte Licht hat einen hohen Rotanteil. Das Licht wird als warmes angenehmes Licht wahrgenommen. Die Lichtfarbe liegt im Bereich von 2400K bis 3100K [Int06]. Es ist kontinuierlich über das Spektrum verteilt, was zu einer sehr guten Farbwiedergabe führt. Ein weiterer Vorteil ist die kontinuierliche Dimmbarkeit.

Glühlampen sind noch immer die Hauptlichtquellen in österreichischen Haushalten. Die meisten Leuchten für Haushalte sind mit Schraubsockeln ausgeführt und für Glühlampen ausgelegt. Es gibt sowohl matte, als auch klare Glühbirnen in den verschiedensten Formen und in mehreren Schraubsockelgrößen. Der Gebrauch hat sich historisch entwickelt.

²Im interessierenden Bereich nimmt die Lebensdauer mit der 39. Potenz der Temperatur ab. [Hen02]

3.1.2. Halogenglühlampen

Die Zugabe von geringen Mengen an Halogenen führt im Glaskolben zur Ausbildung eines Kreisprozesses. Wolfram wird am Glühdraht verdampft und durch die thermische Strömung Richtung Glaskolben getrieben. Dort verbindet es sich mit gasförmigen Halogenatomen. Diese Verbindung bleibt bis etwa 250°C gasförmig. Diese hohen Temperaturen müssen an der Glaskolbenwand gegeben sein um die Schwärzung des Glaskolbens zu unterbinden. Der Kolben wird daher aus schwer schmelzbarem Quarzglas ausgeführt und die räumlichen Abmessungen werden kleiner gewählt. Oft werden zwei Glaskolben ineinander ausgeführt um eine thermische Isolierung gegenüber der Raumluft zu gewährleisten. Die gasförmige Wolfram-Halogen-Verbindung diffundiert zurück zum Glühwendel, wo sie durch die hohe Temperatur wieder aufgebrochen wird. Das Wolfram lagert sich zum Teil am Glühdraht an und das Halogen ist frei für zukünftige Kreisprozesse. Die Ablagerung von Wolfram am Glühdraht führt allerdings nicht zu einer Regeneration desselben. Die Ausbildung des Kreisprozesses und die Verwendung von mechanisch stabileren Gläsern erlauben höhere Betriebstemperaturen und kleinere Bauweisen (geringes Volumen). Die Lampen werden mit teuren Gasen bei hohem Druck gefüllt, was zu einer Verringerung der Verdampfungsgeschwindigkeit des Wolframs führt.

Die Temperatur der Glühwendel ist bei Halogenglühlampen in der Regel höher als bei Glühlampen und das führt zu einer Verschiebung des abgestrahlten Spektrums [Bae06]. Das Licht hat mehr Blauanteile und erscheint somit „weißer“. Die Effizienz dieser Lampen liegt bei etwa $18 \frac{lm}{W}$ bis $33 \frac{lm}{W}$. Wird der Glaskolben der Halogenglühlampe mit einer infrarotreflektierenden Schicht außen beschichtet, ist eine Steigerung der Lichtausbeute möglich. Diese Beschichtung weist hohe Transparenz für sichtbare und hohe Reflexion für infrarote Strahlung auf, somit wird ein erheblicher Anteil der unerwünschten Wärme zur Wendel zurück transportiert und die zur Erhitzung nötige elektrische Leistung reduziert. Die Vorteile der Halogenglühlampen liegen bei den kleinen räumlichen Abmessungen, dem über die Lebensdauer konstanten Lichtstrom und der gleich bleibenden Farbtemperatur von etwa 3000K. Das Spektrum des abgegebenen Lichts ist kontinuierlich und somit die Farbwiedergabe ausgezeichnet. Dimmen ist stufenlos möglich, wobei im gediminten Betrieb die Effizienz der Lampe rapide absinkt.

Weit verbreitet sind Halogenglühlampen im Gewerbe zur Objekt- und Ausla-

3. Lichttechnologien, Lichtqualitäten und Einsatzgebiete

genbeleuchtung. Im Haushaltsbereich werden Halogenleuchtstofflampen zur Allgemeinbeleuchtung, als auch zum Setzen von Lichtakzenten genutzt.

3.2. Niederdruck-Entladungslampen

Gasentladungslampen nutzen elektrisch angeregtes Plasma zur Erzeugung von sichtbarem Licht. Plasma ist ein Gemisch aus neutralen Teilchen, Ionen und Elektronen die in starker Wechselwirkung zueinander stehen und auch mit den erzeugten Photonen reagieren [Hei06].

3.2.1. Leuchtstofflampen

Der Aufbau einer klassischen Leuchtstofflampe besteht aus einem zylindrischen Glasrohr an dessen Enden sich jeweils eine Elektrode befindet. Diese sind Wolframwendel, die mit einer Aktivierungsschicht versehen werden. Der Glaskolben ist mit einer geringen Menge Quecksilber und einem Puffergas, meist Argon oder einem Argon-Krypton-Gemisch, gefüllt. Die Kolbeninnenseite ist mit einer Leuchtstoffschicht versehen.

Wird die Lampe gezündet, so fließt am Beginn nur ein sehr geringer Strom. In der Anfangsphase ist es notwendig Ladungsträger von außen in das System einzubringen. Dies geschieht durch Glühemission an den auf 600°C bis 800°C vorgeheizten Elektroden. Die freien Ladungsträger geben ihre Energie in Form von Stößen im Plasma ab. Während dieser Phase der unselbständigen Entladung leuchtet das Gas nicht, da das elektrische Feld zu schwach ist um die Ladungsträger auf die zur Gasanregung benötigte Geschwindigkeit zu beschleunigen. Durch die zusätzlich eingebrachten Ladungsträger verbessert sich die Leitfähigkeit im Gas und der Stromfluss wird begünstigt. Es bilden sich Raumladungszonen vor den Elektroden aus, die die benötigte Zündspannung unter die Netzspannung absenken. Sobald die äußere Spannung die Zündspannung überschreitet, werden die freien Elektronen vom elektrischen Feld so stark beschleunigt, dass deren Energie zur elektrischen Anregung des Gases, somit einer Lichtemission, als auch zur Ionisierung ausreicht. Zuerst bildet sich die so genannte Glimmentladung an den Elektroden. Sie zeichnet sich dadurch aus, dass nur Sekundärelektronen durch das Auftreffen von Ionen von den Elektroden gelöst werden. Nach kurzer

3. Lichttechnologien, Lichtqualitäten und Einsatzgebiete

Zeit geht diese in eine Bogenentladung³ über. Somit besteht eine Quecksilber-Niederdruckentladung im Puffergas. Vor der negativen Elektrode bildet sich eine Glimmentladung, das Kathodenglimmlicht. Darauf folgt der Faradaysche Dunkelraum, in dem kein Beitrag zur Lichterzeugung geleistet wird. Die positive Säule, das eigentliche Plasma, liefert den Hauptanteil der Strahlung. Die positive Säule des Plasmas erlischt im Rhythmus der doppelten Betriebsfrequenz, ohne dabei ihren Ort relativ zu den Betriebselektroden zu verändern. Das Kathodenglimmlicht alterniert mit der einfachen Betriebsfrequenz zwischen den jeweils umgepolten Elektroden. Es wird in erster Linie Strahlung mit 253,7nm erzeugt [Bae06]. Diese entspricht der Quecksilber-Resonanzlinie und ist nicht sichtbar. Sie wird erst in der Leuchtstoffschicht in sichtbares Licht umgewandelt.

Der Verlauf der selbständigen Gasentladung besitzt eine negative Kennlinie. Aus diesem Grund ist ein Vorschaltgerät für diese Lichterzeugungstechnologie unbedingt erforderlich um den Strom zu begrenzen. Weiters kann mittels Vorschaltgerät die Zündung durch Anlegen eines hohen Spannungsimpulses schneller bewerkstelligt werden. Das netzbedingte sichtbare Flimmern bei 50Hz und 100Hz bei der Verwendung von magnetischen Vorschaltgeräten kann mittels elektronischem Vorschaltgerät durch eine Lampenbetriebsfrequenz mit wenigen kHz verhindert werden. Bei Betrachtung der Energieeffizienz muss daher immer die Kombination aus Lampe plus Vorschaltgerät bewertet werden. Leuchtstofflampen erreichen den vollen Lichtstrom aufgrund des Startvorganges nicht sofort nach dem Einschalten. Die Lichtausbeuten von Leuchtstofflampen liegen je nach Leistung und Art des Vorschaltgerätes zwischen $45 \frac{lm}{W}$ und $104 \frac{lm}{W}$ ⁴. Elektronische ermöglichen in der Regel bessere Systemeigenschaften als magnetische Vorschaltgeräte. Die Effizienzen sind aber auch von der Umgebungstemperatur abhängig, da sich durch Temperaturänderungen auch der Quecksilberdampfdruck im Inneren der Lampe ändert. Diese Abhängigkeit lässt sich durch die Zugabe von Amalgamen ins Lampeninnere auf die gewünschte Arbeitumgebungstemperatur anpassen⁵.

Die Lichtfarbe hängt vom im Glasrohr aufgebrauchten Leuchtstoff ab. Dieser ist

³Die Elektroden müssen nicht mehr extra beheizt werden, da die thermische Energie der auftreffenden Ionen groß genug ist um Glühemission zu ermöglichen.

⁴Standardlampen in Bauform T5 mit elektronischem Vorschaltgerät bei optimaler Arbeitstemperatur [Int06]

⁵Leuchtstofflampen für den Innengebrauch haben bei einer Umgebungstemperatur von ca. 25°C ihre optimalen Betriebsparameter

3. Lichttechnologien, Lichtqualitäten und Einsatzgebiete

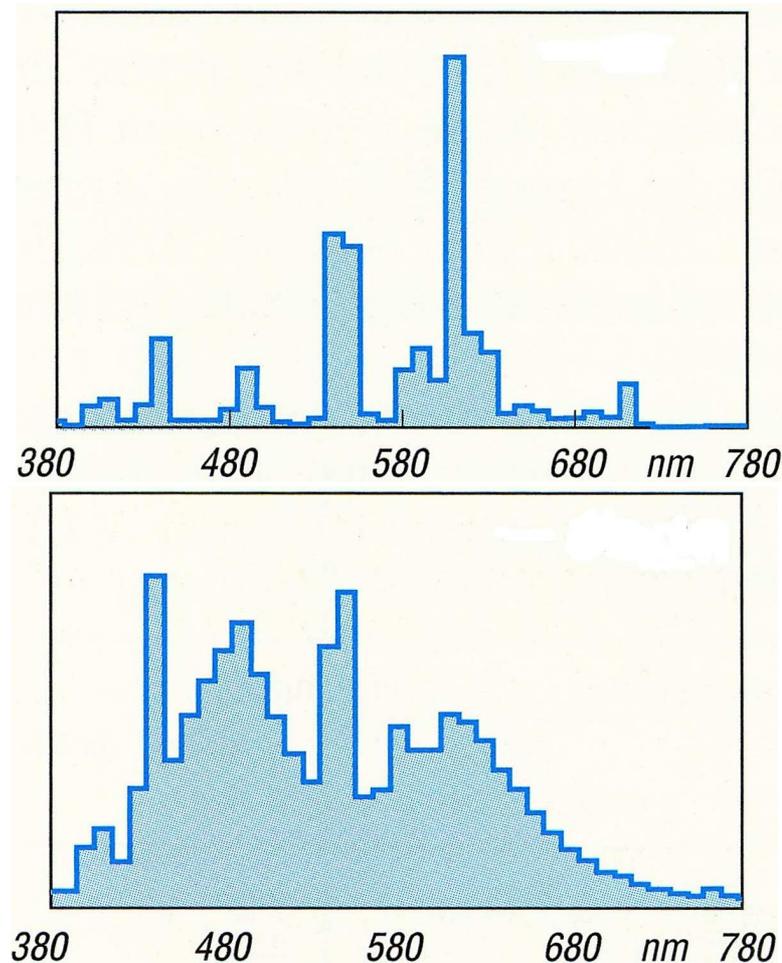


Abbildung 3.4.: Vergleich der Strahldichteverteilungen von Leuchtstofflampen mit Farbwiedergabeindex $R_a > 80$ (obere Abbildung) und $R_a = 98$ (untere Abbildung). Quelle: [Bae06]

auch entscheidend für die Farbwiedergabe. So genannte Dreibandlampen nutzen mehrere Leuchtstoffkomponenten um sowohl gute Lichtausbeuten, als auch gute Farbeigenschaften zu erreichen. Im Frequenzspektrum dieser erkennt man drei ausgeprägte schmale Banden im blauen bei 450nm, im grünen bei 543nm und im roten Spektralbereich bei 610nm. Verschiedene Mischungsverhältnisse der Komponenten ergeben eine breite Palette an Lichtfarben, die einen allgemeinen Farbwiedergabeindex von $R_a = 85$ bis $R_a = 98$ aufweisen [Bae06].

Leuchtstofflampen zu dimmen war lange Zeit nicht möglich. In der letzten Zeit wurde jedoch auch dieser Nachteil beseitigt, wobei der Preis für dimmbare Leuchtstofflampensysteme im Vergleich zu Standardlampensystemen sehr hoch

3. Lichttechnologien, Lichtqualitäten und Einsatzgebiete

ist. Leuchtstofflampen sind technologiebedingt flächige Lichtquellen und deshalb nicht zum Setzen von Lichtakzenten geeignet.

Die Einsatzgebiete von Leuchtstofflampen sind sehr vielfältig. Sie erstrecken sich von Allgemein- und Arbeitsplatzbeleuchtung in Büros, über Fertigungshallen und Außenbeleuchtung, bis zur Beleuchtung in Haushalten.

3.2.2. Kompakte Leuchtstofflampen (CFL)

Beträchtliche Fortschritte der Leuchtstoffröhrentechnologie und hoch belastbare Leuchtstoffe erlauben immer kleinere Abmessungen und neue Bauformen. Dies hat den kompakten Leuchtstofflampen⁶den Weg bereitet, da diese aus gebogenen oder gebrückten Leuchtstoffröhren bestehen. Das Lichterzeugungsprinzip gleicht demnach dem der klassischen Leuchtstofflampen. Die vorhandenen Bögen verursachen Temperaturunterschiede im mit Leuchtstoff beschichteten Glasrohr wodurch der Wirkungsgrad der Lampe etwas absinkt. Die Lichteigenschaften, wie Lichtfarbe und Farbwiedergabe sind ebenso wie bei Leuchtstofflampen in einem breiten Rahmen verfügbar. CFLs werden meist mit Dreibandleuchtstoffen ausgeführt. Die Energieeffizienz von kompakten Leuchtstofflampen liegt je nach Leistung und Ausführung zwischen $40 \frac{lm}{W}$ und $90 \frac{lm}{W}$ [Hen02], wobei Lampen höherer Leistung meist bessere Effizienzen aufweisen.

Im wesentlichen gibt es zwei Ausführungsformen, CFLs mit Schraubsockel und integriertem elektronischen Vorschaltgerät und CFLs mit Stiftsockel ohne integriertem Vorschaltgerät. Erstere sind als Substitution für Glühlampen gedacht und werden oft als Energiesparlampen bezeichnet. Bei sehr kurzen Einschalt Dauern oder bei Bedarf einer punktuellen Lichtquelle ist ein Austausch nicht sehr sinnvoll. Für CFLs mit Stiftsockel sind Vorschaltgeräte separat erhältlich, was den Vorteil bietet, dass nur die Lampe nach ihrer Lebensdauer gewechselt werden muss und das Vorschaltgerät, dessen Lebensdauer meist höher ist, in der Leuchte verbleiben kann.

⁶Compact fluorescent lamp(CFL)

3.2.3. Induktionslampen

Induktionslampen bestehen aus einem Rohr oder Kolben, der wie bei Leuchtstoffröhren mit Quecksilber und Puffergas gefüllt und mit Leuchtstoff beschichtet ist. Elektroden werden nicht ausgeführt. Die Energieeinbringung in den Lampeninnenraum erfolgt über Induktion. Sie werden auch elektrodenlose Leuchtstofflampen genannt und müssen mit speziellen Vorschaltgeräten betrieben werden, da sie mit sehr hohen Anregungsfrequenzen arbeiten. Die Systemlichtausbeute liegt hierbei bei Werten von $64 \frac{lm}{W}$ bis $80 \frac{lm}{W}$ [Bae06]. Die Einhaltung der Betriebstemperatur ist sehr wichtig, weshalb diese Lampen nur in entsprechenden Leuchten zum Einsatz kommen. Ein sehr großer Vorteil dieser Technologie ist die extrem lange Lebensdauer⁷ von über 60.000 Stunden, wobei darauf zu achten ist, dass das elektronische Vorschaltgerät eine ähnliche Lebensdauer aufweist. Sie sind daher besonders für Anlagen mit erschwerter Zugänglichkeit, die eine hohe Anzahl an Betriebsstunden aufweisen und hohe Lichtströme pro Lampe erfordern, geeignet.

Die Einsatzgebiete sind unter anderen Tunnel-, Flughafen- und Displaybeleuchtungen.

3.2.4. Natriumdampf-Niederdrucklampen

Natriumdampf-Niederdrucklampen bestehen aus einem U-förmigen Brenner aus natriumfestem Spezialglas, worin sich eine Natriumdampf-Gasmischung⁸ befindet. Zum Betrieb sind hohe Temperaturen von etwa 300°C nötig, weshalb sich der Brenner in einem evakuierten Glaskolben, der zusätzlich mit einer infrarotreflektierenden Schicht bedampft ist, befindet.

Die Anregung der Natrium-Doppellinie erzeugt Licht mit 589nm⁹. Diese Frequenz befindet sich im Bereich der maximalen Hellempfindung des menschlichen Auges [Bae06]. Natriumdampf-Niederdrucklampen erreichen Lichtausbeuten von $70 \frac{lm}{W}$ bis $200 \frac{lm}{W}$ und sind somit die Lampen mit der höchsten im Moment erreich-

⁷Die Lebensdauer gibt jene Zeitspanne an, die durch den Rückgang des Lichtstroms um 30% begrenzt wird.

⁸Das Penning-Gemisch besteht aus Natriumdampf und Argon, das mit ca. 1% Neon versehen ist.

⁹Bei 589nm findet der Übergang zwischen dem ersten angeregten Zustand und dem Grundzustand von Natrium statt. [Hei06]

3. Lichttechnologien, Lichtqualitäten und Einsatzgebiete

ten Effizienz. Das Licht wird als gelb wahrgenommen, bietet allerdings eine sehr schlechte Farbwiedergabe, da es sich um monochromatisches Licht handelt.

Diese Lampen werden hauptsächlich in der Straßenbeleuchtung verwendet und gehören der Gruppe der HID-Lampen¹⁰ an.

3.3. Hochdruck-Entladungslampen

In Hochdruck-Entladungslampen brennt ein meist nur wenige Millimeter langer Lichtbogen zwischen zwei nicht beheizbaren Wolframelektroden. Ein auf die Elektroden aufgebrachttes Emittermaterial sichert die ausreichende Elektronenemission schon bei niedrigen Temperaturen. In der Startphase tritt Glühemission auf, die mit steigender Temperatur in Bogenentladungen zwischen den Elektroden übergeht. Diese heizen den Entladungsbogen im Lampeninneren während des Betriebs auf 6.000K bis 8.000K auf. Der Druck im Lampeninneren steigt. Die hohen Plasmatemperaturen bewirken, dass das Hochdruckplasma nahezu isotherm ist. Daher stehen Elektronen und Ionen im thermischen Gleichgewicht zueinander. Übergänge oberhalb des ersten angeregten Zustands treten nur bei diesen sehr hohen Temperaturen auf und erzeugen Licht im sichtbaren Bereich. In den Randzonen der Brennkammer herrschen nur Temperaturen um 1.000K. Hier wird oft sogar mehr Licht absorbiert als erzeugt. Die Brennkammermaterialien begrenzen die maximale Wandtemperatur¹¹. Die Brennkammer befindet sich in einem evakuierten oder mit Inertgas gefüllten Hüllkolben, um die Wärmeverluste gering zu halten und um die Gefahr von Spannungsüberschlägen zu minimieren. In der Brennkammer entwickelt sich starke Gaskonvektion aufgrund der Temperaturunterschiede zwischen Kammerwand und Bogenentladung. Bei horizontal brennenden Plasmen neigt sich der Bogen daher nach oben.

Hochdruck-Entladungslampen zeichnen sich durch einen sehr hohen Lichtstrom aus. Sie gehören der Gruppe der HID-Lampen an und werden meist für Außenbeleuchtungen verwendet.

¹⁰High Intensity Discharge

¹¹Die Temperatur darf bei Quarz 1.100K und bei Keramik 1.500K nicht überschreiten [Hei06]

3.3.1. Quecksilberdampf-Hochdrucklampen

Quecksilberdampf-Hochdrucklampen bestehen aus einer Brennkammer in der der Lichtbogen zwischen zwei eng aneinander stehenden Elektroden brennt und einem Außenkolben. Die Lampe wird mit einem Betriebsdruck von 1bar bis 20bar betrieben und ist mit einem aus Argon und Quecksilber bestehenden Penning-Gemisch gefüllt. Die Zündung erfolgt oberhalb von etwa 120V zwischen der Wolframkathode und einer Hilfsanode. Zunächst bildet sich eine Glimmentladung, die aber rasch in eine Bogenentladung übergeht. Bei ungefähr 50% der maximalen Stromaufnahme ist das in der Lampe enthaltene Quecksilber vollständig verdampft. Zur Strombegrenzung ist wie bei Niederdruckentladungslampen ein magnetisches oder elektronisches Vorschaltgerät notwendig.

Eine charakteristische Erscheinung der Quecksilberdampf-Hochdrucklampe sind druckverbreiterte Spektrallinien, sowie ein schwaches Resonanzspektrum, dessen Intensität mit der Stromdichte und dem Dampfdruck zunimmt. In der Randzonen der Brennkammer tritt Selbstabsorption bei 185nm und 254nm auf [Hei06]. Diese absorbierte Strahlung wird thermalisiert¹². Die Lampe erzeugt auch UV-Strahlung anderer Wellenlängen und sichtbares Licht, jedoch nur blau und grün mit Wellenlängen unter 600nm, welche nicht absorbiert werden. Meist ist eine Leuchtstoffschicht¹³ auf der Innenseite des Außenkolbens aufgebracht, die das UV-Licht in sichtbares Licht im roten Spektralbereich umwandelt, welches vom Lichtbogen nicht erzeugt wird. Bei höherwertigen Lampen werden Mehrbanden-Leuchtstoffe, verwendet um die Farbwiedergabe zu verbessern.

Quecksilberdampf-Hochdrucklampen benötigen eine so genannte Anlaufzeit von etwa fünf Minuten um nach dem Einschalten Nennwerte zu erreichen. Ein Nachzünden nach dem Abschalten ist erst nach einer Abkühlzeit von ebenfalls etwa fünf Minuten möglich. Aufgrund des hohen Innendrucks in der Brennkammer ist der Lichtstrom dieser Lampe in weiten Bereichen unabhängig von der Außentemperatur¹⁴. Ein weiterer Vorteil ist eine Verträglichkeit gegenüber Spannungs-

¹²Die Strahlung wird in Wärme umgewandelt. Im Frequenzspektrum entsteht eine Lücke im Zentrum der Linien 185nm und 254nm, deren Breite mit der Quecksilberkonzentration korrespondiert.

¹³Die Leuchtstoffe sollten ein Absorptionsmaximum im UV-Bereich aufweisen. Die Absorption sollte nicht bis 579nm [Fle06] hinaufreichen, da sonst das direkt in der Bogenentladung erzeugte sichtbare Licht auch absorbiert werden würde.

¹⁴Ein Zünden der Lampe ist bis -20°C möglich.

3. Lichttechnologien, Lichtqualitäten und Einsatzgebiete

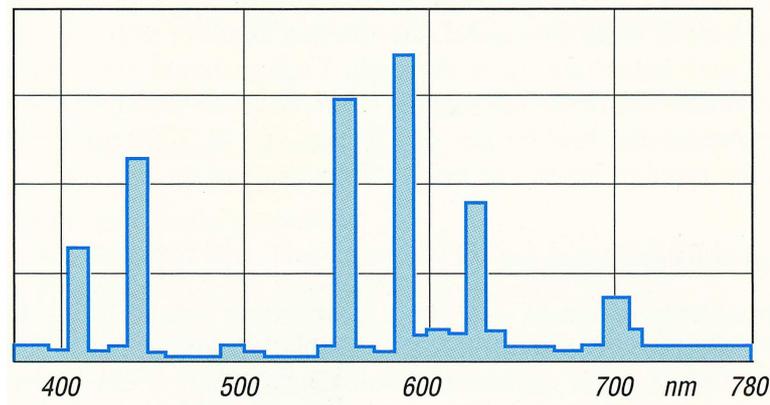


Abbildung 3.5.: Strahldichtevertelung einer Quecksilberdampf-Hochdrucklampe in Standardausführung. Quelle: [Bae06]

schwankungen von 10%. Quecksilberdampf-Hochdrucklampen sind herstellerbedingt nicht dimmbar¹⁵. Die Lichtausbeuten liegen je nach Leistung zwischen $30 \frac{lm}{W}$ und $60 \frac{lm}{W}$, bei einer Brenndauer über 10.000h und einer Lebensdauer von 9.000h¹⁶ [Hen02].

Quecksilberdampf-Hochdrucklampen fanden hauptsächlich in der Straßenbeleuchtung Verwendung, wurden aber in den letzten Jahren von Natriumdampf-niederdrucklampen ersetzt. Auch in der Industriebeleuchtung ist der Einsatz dieser Lampentechnologie rückläufig.

3.3.2. Halogen-Metaldampflampen

Halogen-Metaldampflampen sind Quecksilberdampf-Hochdrucklampen, die mit Zusätzen von Metallhalogeniden versehen sind. Halogenide bestimmter Alkali-metalle, Elemente der III. und IV. Hauptgruppe und einiger Seltenerdmetalle¹⁷ werden in den Brenner zugesetzt, um die Lichtemission im sichtbaren Bereich zu steigern und die Farbwiedergabe zu verbessern. Die genaue Zusammensetzung der Brennkammerfüllung ist hersteller- und lampentypabhängig. Die Gasphase

¹⁵Werden die Lampen im gedimmten Betrieb verwendet schränken die Hersteller die Gewährleistung ein, da bei 90% der Netzspannung der Lichtstrom nur noch etwa 70% beträgt.

¹⁶Die Lebensdauer gibt jene Zeitspanne an, die durch den Rückgang des Lichtstroms um 30% begrenzt wird.

¹⁷Zu den wichtigsten Zusätzen gehören Halogenverbindungen von Natrium, Thallium, Indium, Lithium, Zinn, Dysprosium, Holmium, Thulium und Scandium.

3. Lichttechnologien, Lichtqualitäten und Einsatzgebiete

des Brenners ist unter Betriebsbedingungen an Metallhalogenen gesättigt. Es findet ein relativ komplexer Kreisprozess statt. Die Halogenide übernehmen einerseits den Transport der Metalle zum Entladungsbogen, damit diese dort angeregt werden, andererseits werden außerhalb des Bogens wieder Halogenverbindungen gebildet und die Ablagerung der Metalle an der Brennkammerwand wird verhindert.

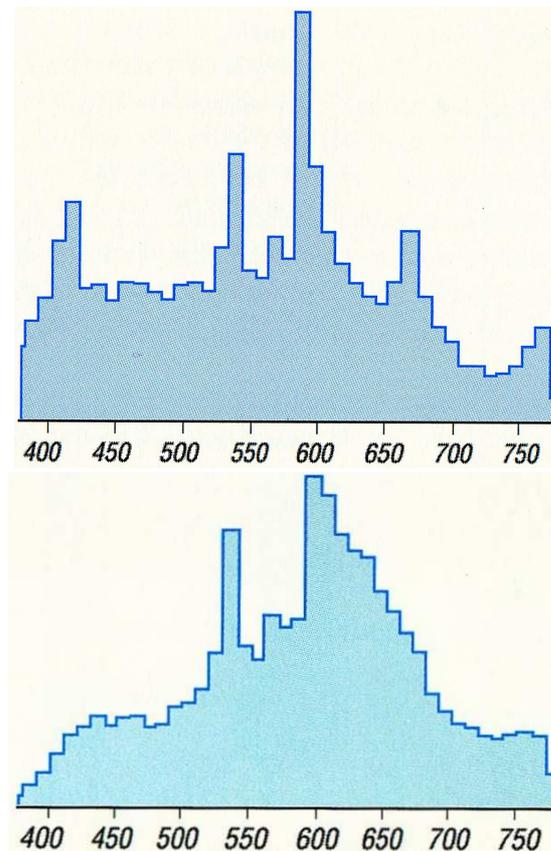


Abbildung 3.6.: Strahlungsverteilungen von Halogen-Metaldampf lampen mit Quarzbrenner (obere Abbildung) und Keramikbrenner (untere Abbildung). Quelle: [Bae06]

Die Brennkammerwand kann aus Quarzglas oder Keramik¹⁸ hergestellt werden. Der Betriebsdruck in der Brennkammer beträgt bis zu zehn bar. Für den Betrieb von Halogen-Metaldampf lampen ist sowohl ein Vorschaltgerät, als auch eine Zündvorrichtung nötig, da Spannungen von 5kV bis 80kV zum Zünden der Lampe aufgebracht werden müssen. Ein Dimmen der Lampen ist in der Regel¹⁹

¹⁸Lampen mit Keramikbrennern zeichnen sich durch etwas bessere Licht- und Betriebseigenschaften aus.

¹⁹Es gibt spezielle dimmbare Halogen-Metaldampf lampensysteme verschiedener Hersteller.

3. Lichttechnologien, Lichtqualitäten und Einsatzgebiete

nicht möglich, da sich durch eine Spannungsabsenkung²⁰ die Druck- und Temperaturverhältnisse im Brenner ändern, was zu einer Verringerung der Lebensdauer, die je nach Lampentyp zwischen 500h und 1.500h beträgt und zu Veränderungen der Lichteigenschaften führt. Die Lampen benötigen bei Verwendung eines magnetischen Vorschaltgeräts eine Einschaltzeit von drei bis fünf Minuten. Dies kann aber durch den Einsatz eines elektronischen Vorschaltgerätes auf nur 90 Sekunden reduziert werden. Die Wiederzündzeit²¹ liegt bei Quarzglasbrennern bei acht bis zehn Minuten und bei Keramikbrennern bei etwa einer Viertelstunde, da Keramik langsamer abkühlt als Quarzglas. Beim Zünden brennen die Elektroden stark ab, weshalb häufige Schaltvorgänge die Lebensdauer stark verkürzen. Die Effizienz von Halogen-Metalldampf lampen liegt zwischen $70 \frac{lm}{W}$ und $120 \frac{lm}{W}$ [Bae06]. Die Farbwiedergabe ist mit Werten bis $R_a = 95$ sehr gut.

Dieser Lampentyp wird vielfältig in der Innen- und Außenbeleuchtung, wo die Lampen sehr selten geschaltet werden müssen, eingesetzt. Sie sind punktförmige Lichtquellen und deshalb zur Akzentbeleuchtung geeignet.

3.3.3. Natriumdampf-Hochdrucklampen

Aluminiumoxid ist die Basis des keramischen Sintermaterials, das die Wand der Brennkammer von Natriumdampf-Hochdrucklampen bildet. Es ist lichtdurchlässig und ermöglicht eine Erhöhung von Druck und Temperatur, um eine Strahlung in größeren Spektralbereichen von Grün bis Rot und eine gelblichweiße Lichtfarbe zu ermöglichen. Die Füllung der Brennkammer besteht aus Natrium, Quecksilber und Xenon.

Zum Start der Lampen ist eine Hochspannung von einigen kV nötig, die durch ein Zündgerät zur Verfügung gestellt wird. Die Lampe zündet sicher bis -25°C nach einer Anlaufzeit von fünf bis acht Minuten und nach Erlöschen durch Spannungsunterbrechung im heißen Zustand innerhalb einer Minute. Der Lampenbetrieb erfordert eine gute Spannungsstabilität²² von 3% und die Verwendung eines Vorschaltgeräts, wobei elektronische verbesserte Systemeigenschaften er-

²⁰Die Spannung soll eine Abweichung von 3% von der Nennspannung nicht überschreiten.

²¹Zeit vom Abschalten der Lampe bis zum nächsten möglichen Zünden

²²Ein Dimmen der Lampen ist durch ein entsprechendes Vorschaltgerät möglich, das die Leistung bei konstanter Spannung reduziert, was bei einlampigen Straßenbeleuchtungssystemen zur Anwendung kommt.

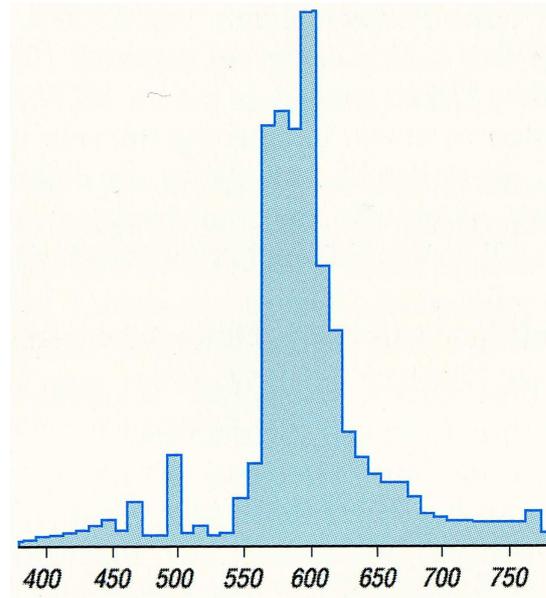


Abbildung 3.7.: Spektrale Energieverteilung einer Natriumdampf-Hochdrucklampe mit ausgeprägten Anteilen im Bereich von 550 bis 650nm. Quelle: [Bae06]

möglichen.

Aufgrund des relativ schlechten Farbwiedergabeindex von $R_a = 20$ werden Standard-Natriumdampf-Hochdrucklampen vorwiegend in der Außenbeleuchtung angewendet, da sie sich durch Effizienzen von $50 \frac{lm}{W}$ bis $150 \frac{lm}{W}$ auszeichnen. Der so genannte Impulsbetrieb erlaubt eine verbesserte Farbtemperatur von 2000K auf 2500K bis 2900K und eine Erhöhung des Farbwiedergabeindex auf $R_a = 80$. Natrium-Hochdrucklampen im Impulsbetrieb werden häufig in der Lebensmittelbeleuchtung wegen ihrer guten Rot- und Braunwiedergabe genutzt. Die Farbwiedergabe kann auch durch Erhöhung des Gasdrucks verbessert werden, was sich jedoch in einer Verschlechterung der Effizienz niederschlägt. Die Lebensdauer beträgt je nach Ausführungsform bis 16.000h.

3.4. Elektrolumineszenzstrahler

Elektrolumineszenzstrahler emittieren Licht durch Elektronenübergänge zwischen definierten Atom-Energieniveaus, die in Form von Energiebändern im Material vorliegen. Es sind nur Strahlungsquanten mit den Energieabständen entsprechenden Lichtfarben möglich. Die Lichtemission ist nahezu monochromatisch.

3.4.1. Leuchtdioden(LED)

Ein PN-Übergang von Halbleitern der III. und V. Hauptgruppe²³ emittiert bei anlegen einer Spannung Licht. Das äußere elektrische Feld regt Elektronen an, die ihre Energie im Bereich des Halbleiterübergangs durch Rekombination in Form von Photonen abgeben. Der Halbleiterchip wird zur besseren Wärmeabfuhr²⁴ und zum Schutz mit seinen Elektroden und einem Reflektor in ein Kunststoffgehäuse, meist aus transparenter Harz-Vergussmasse, eingegossen. Die Wellenlänge des Lichts ist von den Halbleitermaterialien abhängig und entspricht den vorhandenen Energieabständen. Materialsysteme aus InGaN²⁵ werden für die Erzeugung von blauen, weißen und grünen LEDs genutzt. Das Farbspektrum von Gelb über Orange bis Rot liefert AlInGaP²⁶.

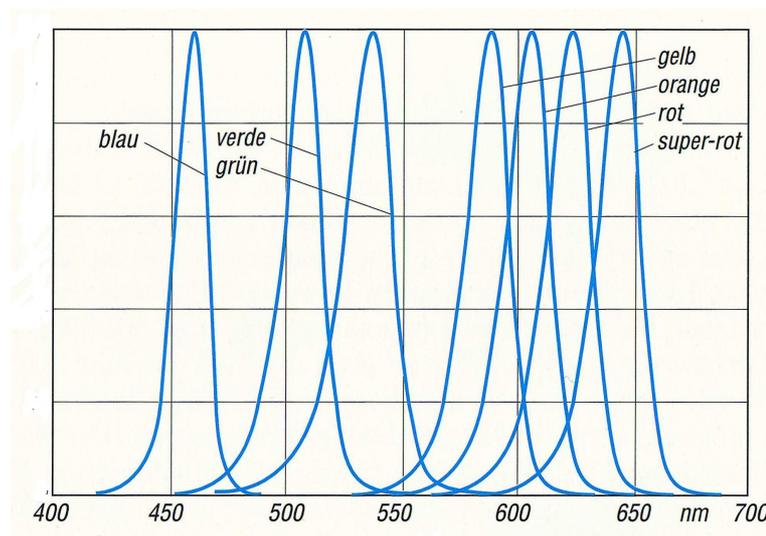


Abbildung 3.8.: Spektrale Verteilung der wichtigsten LED Farben. Quelle: [Bae06]

Um weißes Licht zu erzeugen, wird das von der Leuchtstofflampe bekannte Verfahren der Umwandlung einer Primärfarbe über Leuchtstoffe in weitere Farben angewendet. Eine kurzwellige blaue LED (Primärspektrum) regt Leuchtstoffe an, die

²³Typische Vertreter sind Galliumarsenid(GaAs) und Indiumphosphid(InP).

²⁴Einerseits ist der Lichtstrom temperaturabhängig, er wird mit steigender Temperatur geringer, andererseits muss ein Überhitzen und somit eine Zerstörung des Halbleiterübergangs verhindert werden.

²⁵Indiumgalliumnitrit

²⁶Aluminiumindiumgalliumphosphid

3. Lichttechnologien, Lichtqualitäten und Einsatzgebiete

im gelb-grünen Bereich(Sekundärspektrum) emittieren. Hieraus ergibt sich ein weißes Mischspektrum. Die Farbtemperatur kann über die Leuchtstoffe gesteuert werden. Der Farbwiedergabeindex beträgt zwischen $R_a = 70$ bis $R_a = 95$ [Bau07].

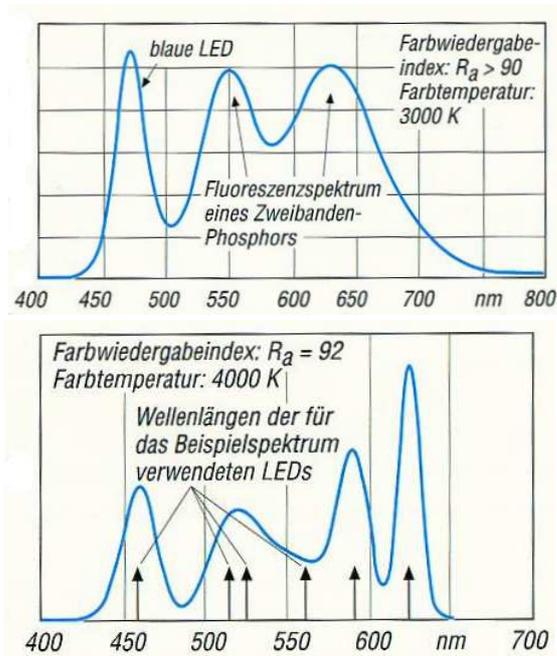


Abbildung 3.9.: Spektrale Verteilungen von weißem Licht erzeugt mit einer blauen LED mittels Leuchtstoff(obere Abbildung) und mittels Kombination von verschiedenen LEDs(untere Abbildung). Quelle: [Bae06]

Eine weitere Möglichkeit mittels Leuchtdioden weißes Licht zu erzeugen, liegt darin verschiedenfarbige LEDs in unmittelbarer Nähe anzuordnen und somit eine Überlagerung der Spektren zu erreichen. Um weißes Licht mit guter Farbwiedergabe mit $R_a > 80$ zu erreichen, ist es notwendig fünf oder sechs unterschiedliche Farben zu mischen, weil das Spektrum einer einzelnen Diode sehr eng ist. Dies ist meist unwirtschaftlich und sehr empfindlich auf Temperaturschwankungen, da die unterschiedlichen Halbleitermaterialien nicht gleich auf eine Änderung der Betriebstemperatur reagieren.

LEDs benötigen Gleichspannungen von 2V bis 4V bei typischen Strömen von 20mA bis 250mA. Der Betriebspunkt der LED muss aufgrund der großen Steilheit der Strom-Spannungs-Kennlinie stabilisiert werden. Beim direkten Betrieb von Leuchtdioden an Wechselspannung liefern diese weniger als 50% des emittierten

3. Lichttechnologien, Lichtqualitäten und Einsatzgebiete

Lichts wie bei entsprechender Gleichspannung²⁷. Die Emission von Licht erfordert ein Überschreiten der Flussspannung, das während der negativen Halbwellen und vor dem Erreichen ebendieser Spannungsschwelle nicht gegeben ist. Für Beleuchtungszwecke werden aus diesen Gründen LED-Module mit elektronischen Vorschaltgeräten, die sowohl die Spannungsgleichrichtung als auch die Stabilisation des Betriebspunktes übernehmen, im Handel angeboten. Da die Ausfallrate von LEDs bei nur ca. 1% liegt, wird die Lebensdauer als jene Zeit, die zu einem Rückgang des Lichtstroms auf 50% des ursprünglichen Lichtstroms führt, angegeben. Sie liegt je nach thermischen Management bei 10.000h bis 50.000h.

LEDs werden aufgrund ihrer geringen räumlichen Abmessungen und der langen Lebensdauern in Elektrogeräten, in der Autobeleuchtung und anderen Nischenmärkten angewendet. Sie sind punktförmige Lichtquellen.

3.4.2. Organische Leuchtdioden

Eine organische Leuchtdiode ist ein dünnfilmiges Bauelement aus organischen halbleitenden Materialien. Der für die Lichterzeugung notwendige PN-Übergang besteht aus mehreren dünnen Schichten. Auf ein Trägermaterial²⁸ wird ein Anodenmaterial(meist Indium-Zinn-Oxid²⁹) aufgebracht. Eine Schicht aus PEDOT bzw. PSS³⁰ dient zur Absenkung der Injektionsbarriere für Löcher und Verhindert das Eindiffundieren von Indium in die darauf folgende Lochleitungsschicht. Als nächste folgt die Emitterschicht, die einen Farbstoff enthält. Zum Abschluss folgen eine Elektronenleitungsschicht und die Kathode mit geringer Austrittsarbeit³¹. Als Schutzschicht und zur Verringerung der Injektionsbarriere für Elektronen wird in vielen Fällen zwischen Kathode und Emitterschicht eine sehr dünne leitfähige Schicht, beispielsweise aus Silber, aufgedampft. [Wik07b].

Elektronen werden von der Kathode bereitgestellt und Löcher von der Anode. Die Ladungen driften aufeinander zu. Sie treffen sich in der Emitterschicht, die auch als Rekombinationsschicht bezeichnet wird. Es bilden sich so genannte Exzitonen. Diese stellen abhängig vom Mechanismus entweder selbst angeregte

²⁷Zum Vergleich mit der Gleichspannung wird der Effektivwert der Wechselfspannung herangezogen.

²⁸Glas oder durchsichtige Kunststoffe

²⁹ITO

³⁰Polyethylendioxythiophen bzw. Polystyrolsulfonat

³¹z.B.:Calcium, Aluminium, Barium, Ruthenium oder Magnesium-Silber-Legierungen

3. Lichttechnologien, Lichtqualitäten und Einsatzgebiete

Farbstoffmoleküle dar oder regen durch ihren Zerfall die Farbstoffmoleküle an. Beim Übergang der angeregten Teilchen in den Grundzustand wird jeweils ein Photon frei [Mül06].

Die Lichtfarbe kann durch die Wahl des Farbstoffes eingestellt werden. PLEDs³² verwenden Polymere, wie Derrivate von Poly-Phenyl-Vinyl als Farbstoff. Durch die Verwendung von metall-organischen Komplexen kann die Effizienz deutlich gesteigert werden³³. An weiteren Verbesserungen dieser Technologie wird laufend gearbeitet. Im Jahr 2006 lag die Lichtausbeute unter Laborbedingungen bei $60 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ [D'A06]. Durch die Verwendung verschiedener Farbstoffe am selben Trägermaterial können die Lichtfarben und der Farbwiedergabeindex wunschgemäß zusammengestellt werden.

OLEDs findet man neuerdings als Displays für Elektrogeräte als flächige Lichtelemente. Ein Einsatz in der Allgemeinbeleuchtung ist in Zukunft denkbar. Es ist allerdings noch einiges an Entwicklungsarbeit hierfür notwendig.

³²P steht für Polymer.

³³Die Lichtaussendungen erfolgt hierbei durch Triplett Zustände.

3.5. Vergleich verschiedener Technologien zur elektrischen Lichterzeugung

Technologie	Effizienz	Lebensdauer ^a	R_a ^b
Glühlampe	$10 \frac{lm}{W}$ - $17 \frac{lm}{W}$	1.000h	100
Halogenglühlampe	$18 \frac{lm}{W}$ - $33 \frac{lm}{W}$	2.500h	100
Leuchtstofflampe	$45 \frac{lm}{W}$ - $104 \frac{lm}{W}$	8.000h - 50.000h	40 - 98
Kompakte Leuchtstofflampe	$40 \frac{lm}{W}$ - $90 \frac{lm}{W}$	3.000h - 20.000h	80 - 98
Induktionslampe	$18 \frac{lm}{W}$ - $33 \frac{lm}{W}$	>60.000h	50 - 95 ^c
Natriumdampf-Niederdrucklampe	$70 \frac{lm}{W}$ bis $200 \frac{lm}{W}$	>15.000h	<20
Quecksilberdampf-Hochdrucklampe	$30 \frac{lm}{W}$ bis $60 \frac{lm}{W}$	9.000h	40 - 69
Halogen-Metaldampflampen	$70 \frac{lm}{W}$ bis $120 \frac{lm}{W}$	500h - 15.000h	60 - 95
Natriumdampf-Hochdrucklampen	$50 \frac{lm}{W}$ bis $150 \frac{lm}{W}$	<16.000h	20 - 89
Leuchtdiode	$40 \frac{lm}{W}$ bis $80 \frac{lm}{W}$ ^d	10.000h - 50.000h ^e	70 - 90 ^f
Organische Leuchtdiode	bis $60 \frac{lm}{W}$ ^g	^h	hoch ⁱ

^aDie Lebensdauer von Temperaturstrahlern endet mit dem Durchbrennen des Glühfadens, die von Entladungslampen mit dem Erreichen von 80% des ursprünglichen Lichtstroms, da dieser über die Betriebszeit abnimmt.

^bFarbwiedergabeindex [Zum01]

^cJe nach eingesetzten Leuchtstoffen [Hei06]

^dStand November 2007 [Wik07a]

^eDie Lebensdauer gibt jene Zeitspanne an, die zu einem Rückgang des Lichtstroms auf 50% des ursprünglichen Lichtstroms führt.

^fBezogen auf weiße LEDs.

^gim Labor

^hDie Lebensdauer hängt stark von den verwendeten Materialien und Betriebsbedingungen ab.

ⁱDurch die Verwendung von verschiedenen Farbstoffen am selben Trägermaterial können die Lichtfarben und Farbwiedergabeindices wunschgemäß zusammengestellt werden.

Abbildung 3.10.: Effizienz, Lebensdauer und Farbwiedergabeindex verschiedener Technologien zur elektrischen Lichterzeugung

In Abbildung 3.11 sind die Effizienzbereiche der verschiedenen Lichterzeugungstechnologien grafisch dargestellt.

3. Lichttechnologien, Lichtqualitäten und Einsatzgebiete

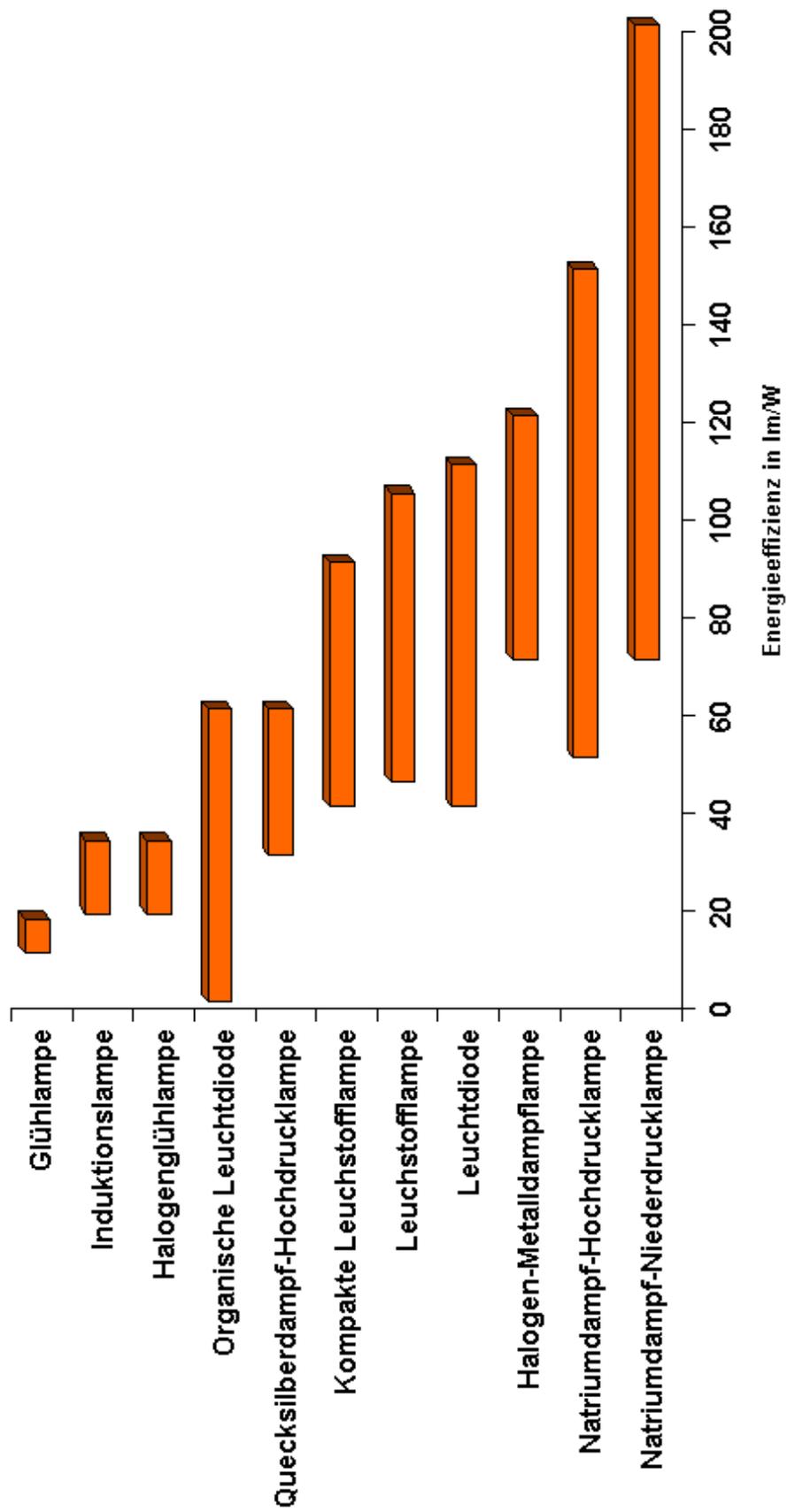


Abbildung 3.11.: Effizienzvergleich der Lichttechnologien

4. Ganzheitliche Bilanzierung ausgewählter Lampen

In diesem Kapitel wird eine ganzheitliche Bilanzierung verschiedener Leuchtmittel durchgeführt. Der Lebenszyklus einer Lampe besteht aus Produktion, Transport, Gebrauch und Entsorgung. Jede dieser Phasen weist für eine Lampentechnologie spezifische Werte des Energiebedarfs auf und ist für bestimmte technologierelevante Umweltemissionen verantwortlich. Einzig den Transport erkennt als man über alle Lampenarten hinweg als ungefähr gleich bleibenden Beitrag. Die ökologische Bilanzierung gibt Aufschlüsse über das relative Treibhauspotential¹ und Quecksilberemissionen. In der Energiebilanz werden die eingesetzten Energien für den gesamten Lebenszyklus näher analysiert. Ein wirtschaftlicher Vergleich mittels Lebenszykluskosten verschiedener Lampen rundet dieses Kapitel ab.

Am Beispiel von Glühlampen, Halogenglühlampen und kompakten Leuchtstofflampen mit integriertem elektronischem Vorschaltgerät soll hier gezeigt werden, dass die jeweiligen Hauptanteile der Umweltemissionen als auch des Energiebedarfs während des Gebrauchs auftreten. Energieeffiziente Technologien werden somit über die gesamte Lebensdauer als umweltfreundlicher identifiziert. Leuchtstofflampen in Röhrenform werden hier nicht betrachtet. Deren Umweltbilanz fällt durch den Wegfall des Vorschaltgeräts² bei der Lampenherstellung im Vergleich zu kompakten Leuchtstofflampen noch besser aus. Die hier präsentierten Daten wurden im Rahmen der vorbereitenden Studie der EuP-Richtlinie für Haushaltsbeleuchtung in der EU [VT08a] erhoben.

¹Das (relative) Treibhauspotenzial (engl.: Global Warming Potential, Greenhouse Warming Potential oder GWP) oder CO_2 -Äquivalent gibt an, wieviel eine festgelegte Menge eines Treibhausgases zum Treibhauseffekt beiträgt. Als Vergleichswert dient Kohlendioxid; die Abkürzung lautet CO_2e (für equivalent). Der Wert beschreibt die mittlere Erwärmungswirkung über einen bestimmten Zeitraum; oft werden 100 Jahre betrachtet.

²Das Vorschaltgerät hat meist viel höhere Lebensdauern als die eingesetzte Lampe. Es kann daher in der Leuchte verbleiben und trägt nur zu einem geringen Anteil in den Bilanzen bei.

4.1. Glühlampe

Betrachtet wird eine Allgebrauchsglühlampe mit 54W³.

Wichtige Lampendaten:

- 54W Leistung
- 1.000h Lebensdauer
- $11 \frac{lm}{W}$ Effizienz⁴
- 0,60€ Produktpreis
- 8,00€ Stromkosten⁵ beim Betrieb der Lampe über die Lebensdauer
- 8,60€ Lebenszykluskosten⁶

In der Produktion für eine Glühlampe eingesetzte Rohstoffe⁷:

- 15,5g Glas
- 1,25g Aluminium

Die Freisetzung von Quecksilber über die gesamte Lebensdauer beträgt 0,54mg. Hierbei wird nur das während des Gebrauchs durch die elektrische Energiegewinnung in Kraftwerken⁸ emittierte Quecksilber betrachtet, da Produktion, Transport und Entsorgung vernachlässigt werden können.

Die Entsorgung der Glühlampe erfolgt zu 100% mit dem Restmüll. [VT08a]

³Dies repräsentiert die durchschnittliche Leistung einer in der EU-25 installierten Glühlampe.

⁴Dies ist die Effizienz einer matten Glühlampe. Die Effizienz einer Glühlampe in Klarglasausführung ist mit $11,4 \frac{lm}{W}$ nur unwesentlich höher.

⁵Der Strompreis wurde mit 0,1528€ entsprechend dem EU-27 Durchschnittspreis im Jahr 2006 angenommen.

⁶Für den Verbraucher ergeben sich die Lebenszykluskosten aus der Summe von Produktpreis und Stromkosten.

⁷Materialien mit sehr kleinen Anteilen werden vernachlässigt.

⁸Der Kraftwerksmix der EU-25 setzt sich zu 31% aus Kohle-, 22% aus Gas- und Ölkraftwerken und 47% nicht fossiler Energiegewinnung zusammen.

4. Ganzheitliche Bilanzierung ausgewählter Lampen

Bilanzierung einer Glühlampe über den ganzen Lebenszyklus^a:

	Energie MJ	davon elektrisch MJ	Treibhauspotential $kgCO_2e$
Produktion	1	0	0
Transport	52	0	5
Gebrauch	567	567	25
Entsorgung	2	0	0
Gesamt	621	0	30

^aDer Umrechnungsfaktor elektrischer Energie in kWh in Gesamtenergie in MJ beträgt $10,5 \frac{MJ}{kWh}$, wobei hier die gesamte Vorkette der elektrischen Energiegewinnung mitberücksichtigt wird.

Abbildung 4.1.: Bilanzierung einer Glühlampe

4.2. Halogenglühlampen

Betrachtet werden drei für Anwendungen im Haushaltssektor relevante Halogenglühlampen.

4.2.1. Hochvolt-Halogenglühlampe mit niedriger Leistung

Wichtige Daten:

- 35W Leistung
- 2.000h Lebensdauer
- $13,65 \frac{lm}{W}$ Effizienz
- 4,30€ Produktpreis
- 10,29€ Stromkosten beim Betrieb der Lampe über die Lebensdauer
- 14,59€ Lebenszykluskosten

In der Produktion für eine Hochvolt-Halogenglühlampe mit niedriger Leistung eingesetzte Rohstoffe:

4. Ganzheitliche Bilanzierung ausgewählter Lampen

- 15,5g Glas
- 1,25g Aluminium

Bilanzierung einer Hochvolt-Halogenglühlampe mit niedriger Leistung über den ganzen Lebenszyklus:

	Energie MJ	davon elektrisch MJ	Treibhauspotential $kgCO_2e$
Produktion	1	0	0
Transport	52	0	5
Gebrauch	735	735	32
Entsorgung	1	0	0
Gesamt	788	735	37

Abbildung 4.2.: Bilanzierung einer Hochvolt-Halogenglühlampe mit niedriger Leistung

Die Freisetzung von Quecksilber über die gesamte Lebensdauer beträgt 0,7mg. Hierbei wird nur das während des Gebrauchs durch die elektrische Energiegewinnung in Kraftwerken emittierte Quecksilber betrachtet, da Produktion, Transport und Entsorgung vernachlässigt werden können.

Die Entsorgung der Hochvolt-Halogenglühlampe mit niedriger Leistung erfolgt zu 100% mit dem Restmüll. [VT08a]

4.2.2. Hochvolt-Halogenglühlampe mit hoher Leistung

Wichtige Daten:

- 300W Leistung
- 2.000h Lebensdauer
- $17,7 \frac{lm}{W}$ Effizienz
- 4,00€ Produktpreis
- 88,22€ Stromkosten beim Betrieb der Lampe über die Lebensdauer

4. Ganzheitliche Bilanzierung ausgewählter Lampen

- 92,22€ Lebenszykluskosten

In der Produktion für eine Hochvolt-Halogenglühlampe mit hoher Leistung eingesetzte Rohstoffe:

- 9g Glas ⁹

Bilanzierung einer Hochvolt-Halogenglühlampe mit hoher Leistung über den ganzen Lebenszyklus:

	Energie MJ	davon elektrisch MJ	Treibhauspotential <i>kgCO₂e</i>
Produktion	0 ^a	0	0
Transport	52	0	5
Gebrauch	6300	6300	275
Entsorgung	1	0	0
Gesamt	6353	735	280

^aDie in der Produktion benötigte Energie liegt bei 0,1MJ und wurde daher vernachlässigt.

Abbildung 4.3.: Bilanzierung einer Hochvolt-Halogenglühlampe mit hoher Leistung

Die Freisetzung von Quecksilber über die gesamte Lebensdauer beträgt 6mg. Hierbei wird nur das während des Gebrauchs durch die elektrische Energiegewinnung in Kraftwerken emittierte Quecksilber betrachtet, da Produktion, Transport und Entsorgung vernachlässigt werden können.

Die Entsorgung der Hochvolt-Halogenglühlampe mit hoher Leistung erfolgt zu 100% mit dem Restmüll. [VT08a]

4.2.3. Niedervolt-Halogenglühlampe(12V)

Wichtige Daten:

- 34,1W Leistung¹⁰

⁹Das Aluminium entfällt hier, da es sich hier nicht um einen Schraubsockel handelt.

¹⁰Die Lampenleistung liegt bei 31W und der vorgeschaltete Transformator hat eine Verlustleistung von weiteren 3,1W.

4. Ganzheitliche Bilanzierung ausgewählter Lampen

- 2.500h Lebensdauer
- $18,3 \frac{lm}{W}$ Effizienz
- 4,00€ Produktpreis
- 12,33€ Stromkosten beim Betrieb der Lampe über die Lebensdauer
- 16,33€ Lebenszykluskosten

In der Produktion für eine Niedervolt-Halogenglühlampe eingesetzte Rohstoffe:

- 2g Glas ¹¹

Bilanzierung einer Niedervolt-Halogenglühlampe über den ganzen Lebenszyklus:

	Energie MJ	davon elektrisch MJ	Treibhauspotential <i>kgCO₂e</i>
Produktion	0 ^a	0	0
Transport	52	0	5
Gebrauch	903	903	39
Entsorgung	0	0	0
Gesamt	955	903	44

^aDie in der Produktion benötigte Energie liegt bei unter 0,1MJ und wurde daher vernachlässigt.

Abbildung 4.4.: Bilanzierung einer Niedervolt-Halogenglühlampe

Die Freisetzung von Quecksilber über die gesamte Lebensdauer beträgt 0,86mg. Hierbei wird nur das während des Gebrauchs durch die elektrische Energiegewinnung in Kraftwerken emittierte Quecksilber betrachtet, da Produktion, Transport und Entsorgung vernachlässigt werden können.

Die Entsorgung der Niedervolt-Halogenglühlampe erfolgt zu 100% mit dem Restmüll. [VT08a]

¹¹Das Aluminium entfällt hier, da es sich hier nicht um einen Schraubsockel handelt.

4.3. Kompakte Leuchtstofflampe mit integriertem elektronischen Vorschaltgerät

Betrachtet wird eine kompakte Leuchtstofflampe mit 17W ¹².

Wichtige Lampendaten:

- 17,85W Leistung ¹³
- 6.000h Lebensdauer
- $48,5 \frac{lm}{W}$ Effizienz
- 4,63€ Produktpreis
- 15,38€ Stromkosten beim Betrieb der Lampe über die Lebensdauer
- 20,01€ Lebenszykluskosten

In der Produktion für eine kompakte Leuchtstofflampe mit integriertem elektronischen Vorschaltgerät eingesetzte Rohstoffe:

- 31,25g Glas
- 20,25g Kunststoff
- 18,25g bestückte Printplatte
- 1,25g Aluminium
- 0,004g Quecksilber

Die Freisetzung von Quecksilber über die gesamte Lebensdauer beträgt 1,871mg. Hierbei wurde angenommen, dass 20% des in den Lampen enthaltenen Quecksilbers bei der Entsorgung freigesetzt wird. Der etwas größere Anteil von 1,071mg wird während des Betriebs durch die Elektrizitätserzeugung freigesetzt.

¹²Dies repräsentiert eine Standard CFL

¹³0,85W ist der Leistungsbedarf des integrierten elektronischen Vorschaltgeräts.

4. Ganzheitliche Bilanzierung ausgewählter Lampen

Bilanzierung einer kompakte Leuchtstofflampe über den ganzen Lebenszyklus:

	Energie MJ	davon elektrisch MJ	Treibhauspotential <i>kgCO_{2e}</i>
Produktion	12	7	1
Transport	53 ^a	0	5
Gebrauch	1125	1125	49
Entsorgung	0	-1 ^b	0
Gesamt	1190	1131	54

^aDer geringfügig höhere Energieaufwand im Transport gegenüber den anderen Lampentypen, besteht aufgrund des etwas höheren Platzbedarfs von kompakten Leuchtstofflampen.

^bDurch das Recycling wird elektrische Energie eingespart.

Abbildung 4.5.: Bilanzierung einer kompakten Leuchtstofflampe

Die Entsorgung der kompakten Leuchtstofflampe erfolgt durch Abgabe an einer Sammelstelle¹⁴. 95% der Materialien können wieder verwendet werden und nur 5% landen beim Restmüll. [VT08a]

4.4. Direkter Vergleich von Energieverbrauch, Quecksilberemission, Treibhauspotential und Lebenszykluskosten der verschiedenen Lampentechnologien

Ein direkter Vergleich der oben aufgeführten Werte ist nicht möglich, da sowohl Lebensdauer als auch Effizienz der unterschiedlichen Technologien stark voneinander abweichen. Aus diesem Grund werden hier der Gesamtenergiebedarf, das Treibhauspotential, die in der Öffentlichkeit oft diskutierte Freisetzung von Quecksilber und die Lebenszykluskosten auf die Effizienz und die Lebensdauer der jeweiligen Lampe bezogen.

Der Gesamtenergieverbrauch bezogen auf die Lichtausbeute und die Lebensdauer ergibt sich zu:

$$\text{bezogene Energie} = \frac{\text{Gesamtenergie}}{\text{Leistung} \cdot \text{Effizienz} \cdot \text{Lebensdauer}}$$

¹⁴Verkäufer von kompakten Leuchtstofflampen sind verpflichtet diese nach Gebrauch einem Recycling-System zuzuführen.

4. Ganzheitliche Bilanzierung ausgewählter Lampen

Die Quecksilberemissionen bezogen auf die Lichtausbeute und die Lebensdauer ergeben sich zu:

$$\text{bezogene Quecksilberemission} = \frac{\text{Quecksilberemission}}{\text{Leistung} \cdot \text{Effizienz} \cdot \text{Lebensdauer}}$$

Das Treibhausgaspotential bezogen auf die Lichtausbeute und die Lebensdauer ergibt sich zu:

$$\text{bezogenes Treibhauspotential} = \frac{\text{Quecksilberemission}}{\text{Leistung} \cdot \text{Effizienz} \cdot \text{Lebensdauer}}$$

Die Lebensdauerkosten bezogen auf die Lichtausbeute und die Lebensdauer ergibt sich zu:

$$\text{bezogenes Lebenszykluskosten} = \frac{\text{Lebenszykluskosten}}{\text{Leistung} \cdot \text{Effizienz} \cdot \text{Lebensdauer}}$$

	bezogener Energie- verbrauch $\frac{J}{lmh}$	bezogene Quecksilber- emission $\frac{mg}{lmh}$	bezogenes Treibhaus- potential $\frac{kgCO_2e}{lmh}$	bezogene Lebenszyklus- kosten $\frac{€}{lmh}$
Glühlampe	1045	$909 \cdot 10^{-9}$	$51 \cdot 10^{-6}$	$14,48 \cdot 10^{-6}$
Hochvolt- Halogenleuchte 35W	825	$733 \cdot 10^{-9}$	$39 \cdot 10^{-6}$	$14,59 \cdot 10^{-6}$
Hochvolt- Halogenleuchte 300W	598	$565 \cdot 10^{-9}$	$26 \cdot 10^{-6}$	$8,68 \cdot 10^{-6}$
Niedervolt- Halogenleuchte	612	$551 \cdot 10^{-9}$	$28 \cdot 10^{-6}$	$10,47 \cdot 10^{-6}$
Kompakte Leuchtstofflampe	229	$360 \cdot 10^{-9} \text{ }^a$	$10 \cdot 10^{-6}$	$3,85 \cdot 10^{-6}$

^aWird das gesamte in der kompakten Leuchtstofflampe enthaltene Quecksilber in der Entsorgungsphase durch fehlendes oder unzureichendes Recycling frei, so beträgt die Quecksilberemission $976 \cdot 10^{-9} \frac{mg}{lmh}$.

Abbildung 4.6.: Vergleich von bezogenem Energieverbrauch, bezogener Quecksilberemission, bezogenem Treibhauspotential und bezogenen Lebenszykluskosten verschiedener im Haushaltssektor relevanter Lampen

In Abbildung 4.7 wird der bezogene Gesamtenergieverbrauch der fünf analysierten Technologien dargestellt. Die Glühlampe dient hier und in den folgenden Abbildungen als Referenztechnologie (100%). Eine deutliche Energie-

4. Ganzheitliche Bilanzierung ausgewählter Lampen

einsparung von mehr als 40% im Vergleich zur Glühlampe ist sowohl bei der Hochvolt-Halogenglühlampe mit hoher Leistung, die in Haushalten üblicherweise in Stehlampen eingesetzt wird, als auch bei der Niedervolt-Halogenglühlampe zu erkennen. Im Vergleich zur kompakten Leuchtstofflampe schneiden jedoch auch diese Lampentypen schlecht ab. Die CFL spart gegenüber einer Allgebrauchsglühlampe fast 80% der für den gesamten Lebenszyklus nötigen Energie.

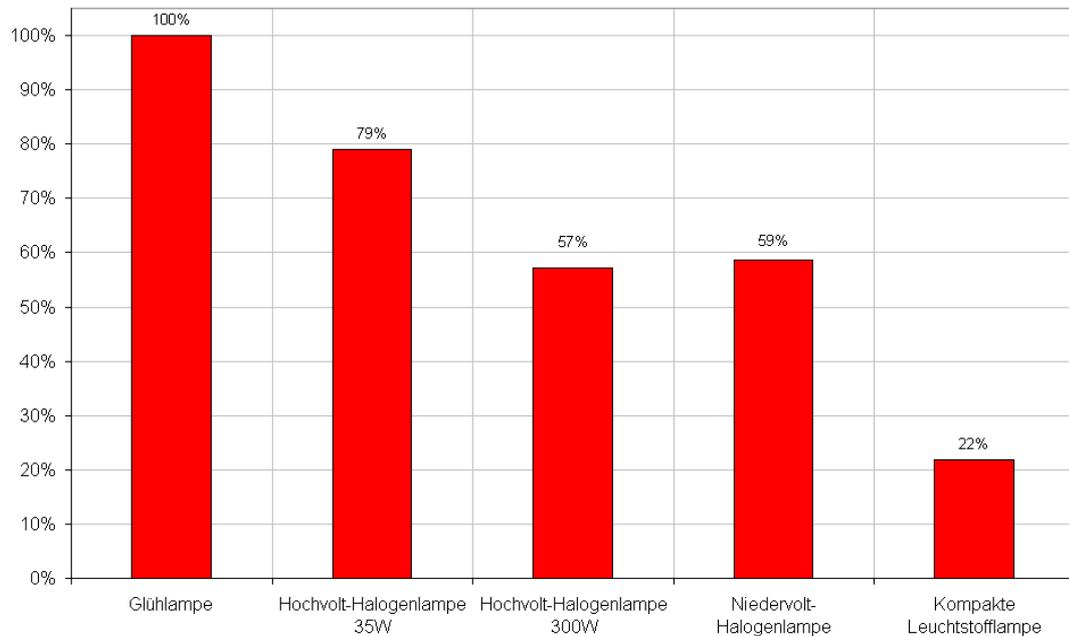


Abbildung 4.7.: Bezogener Gesamtenergieverbrauch auf Lichtausbeute und Lebensdauer (Referenztechnologie Glühlampe entspricht 100%)

Abbildung 4.8 zeigt die bezogene Quecksilberemission im Technologievergleich. Hier erkennt man ein zu dem bezogenen Gesamtenergieverbrauch ähnliches Muster. Aufgrund des in der kompakten Leuchtstofflampe technologiebedingt nötigen Quecksilbers ist die Emissionseinsparung mit 60% gegenüber der Glühlampe etwas geringer als die oben erwähnte Energieeinsparung.

In Abbildung 4.9 ist das bezogene Treibhauspotential dargestellt. Auch hier zeigt sich die deutliche Überlegenheit der Leuchtstofflampen gegenüber den Glühlampen.

Abschließend sind in Abbildung 4.10 die bezogenen Lebenszykluskosten ebenfalls mit der Glühlampe als Referenztechnologie dargestellt. Interessant ist hierbei, dass Glühlampe und Hochvolt-Halogenglühlampe mit niedriger Leistung,

4. Ganzheitliche Bilanzierung ausgewählter Lampen

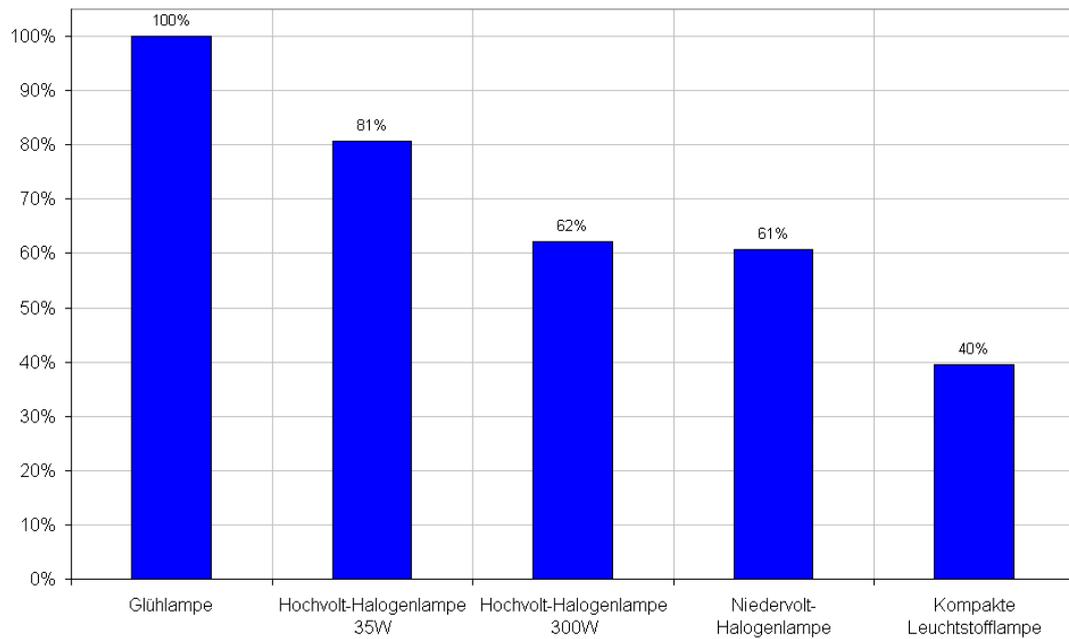


Abbildung 4.8.: Bezogene Quecksilberemissionen auf Lichtausbeute und Lebensdauer (Referenztechnologie Glühlampe entspricht 100%)

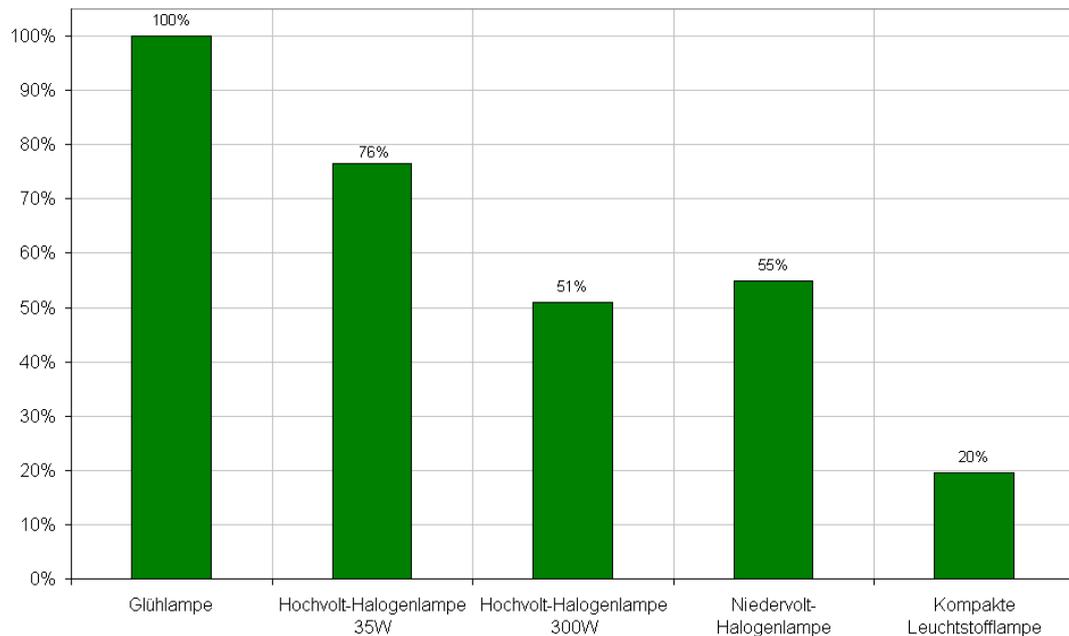


Abbildung 4.9.: Bezogenes Treibhauspotential auf Lichtausbeute und Lebensdauer (Referenztechnologie Glühlampe entspricht 100%)

4. Ganzheitliche Bilanzierung ausgewählter Lampen

bezogen auf Lichtausbeute und Lebensdauer, etwa gleich teuer sind. Hochvolt-Halogenglühlampen mit hoher Leistung weisen zur Glühlampe Einsparungen im Bereich von 40% auf, die kompakte Leuchtstofflampe sogar über 70%.

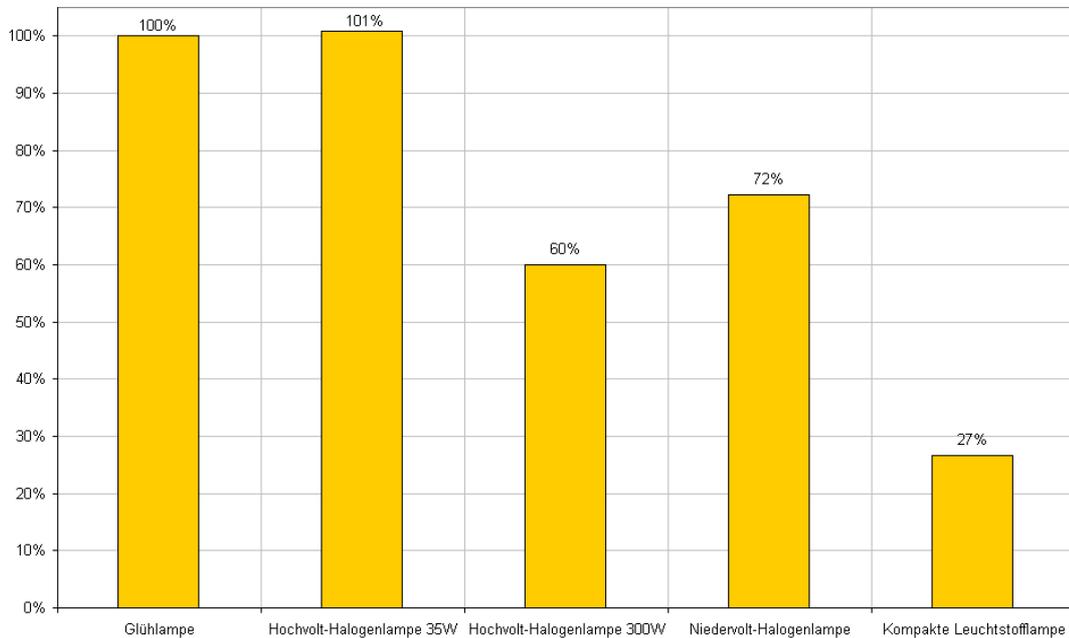


Abbildung 4.10.: Bezogene Lebenszykluskosten auf Lichtausbeute und Lebensdauer (Referenztechnologie Glühlampe entspricht 100%)

Im direkten Vergleich erkennt man die Überlegenheit der kompakten Leuchtstofflampe. Sie weist in allen vier verglichenen Kategorien, bezogener Energieverbrauch, bezogene Quecksilberemission, bezogenes Treibhauspotential und bezogene Lebenszykluskosten, die niedrigsten Werte auf. Somit stellt sie die, über die gesamte Lebensdauer betrachtet, umweltfreundlichste und auch wirtschaftlichste der verglichenen Lampen dar.

5. Analyse des Beleuchtungsbestands in der EU

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem aktuellen Stand der Beleuchtung in der EU. Beleuchtung wurde lange Zeit sehr wenig beachtet. Es sind nur wenige Daten verfügbar. In Österreich sind Beleuchtungsdaten im Haushaltssektor sehr spärlich gesät und für andere Sektoren überhaupt nicht erfasst. Aus diesem Grund wird nur im folgenden Kapitel 5.1 Haushaltssektor explizit auf Österreich eingegangen.

5.1. Haushaltssektor

Der Bedarf an elektrischer Energie in den EU-25 Mitgliedstaaten¹ ist im Haushaltsbereich von 1999 bis 2004 um 10,8% auf 765TWh gestiegen. Die Hauptgründe dafür sind ein Mehr an Geräten und deren verstärkter Gebrauch. Im Hinblick auf die Beleuchtung ist vor allem der Anstieg der Anzahl von Einfamilienhäusern und der allgemeine Trend zu mehr Wohnfläche pro Einwohner ausschlaggebend.

5.1.1. EU

Im Jänner 2006 startete die EU mit REMODECE² ein Projekt zur Erfassung von Daten des Energieverbrauchs von einzelnen Verbrauchergruppen in Haushalten der EU. Im Rahmen dieses Projekts soll auch Beleuchtung genauer betrachtet werden. Außerdem soll eine Datenbank der neu erfassten Daten entstehen. Frühere Studien und Datenerhebungen auf nationaler Ebene sind bereits darin

¹Belgien (BE), Dänemark (DK), Deutschland (DE), Estland (EE), Finnland (FI), Frankreich (FR), Griechenland (GR), Irland (IE), Italien (IT), Lettland (LV), Litauen (LT), Luxemburg (LU), Malta (MT), Niederlande (NL), Österreich (AT), Polen (PL), Portugal (PT), Schweden (SE), Slowakei (SK), Slowenien (SI), Spanien (ES), Tschechien (CZ), Ungarn (HU), Vereinigtes Königreich (UK) und Republik Zypern (CY)

²Residential Monitoring to Decrease Energy Use and Carbon Emissions in Europe

5. Analyse des Beleuchtungsbestands in der EU

abrufbar. Eine französische Studie erhob im Jahr 2002 den elektrischen Energieverbrauch für Beleuchtung in 100 Haushalten. In Abbildung 5.1 sieht man die jahreszeitbedingten Änderungen im Energiebedarf für Beleuchtung eines Haushalts³. Dies verdeutlicht die Abhängigkeit des Energiebedarfs zu Beleuchtungszwecken vom Dargebot an natürlichem Licht.

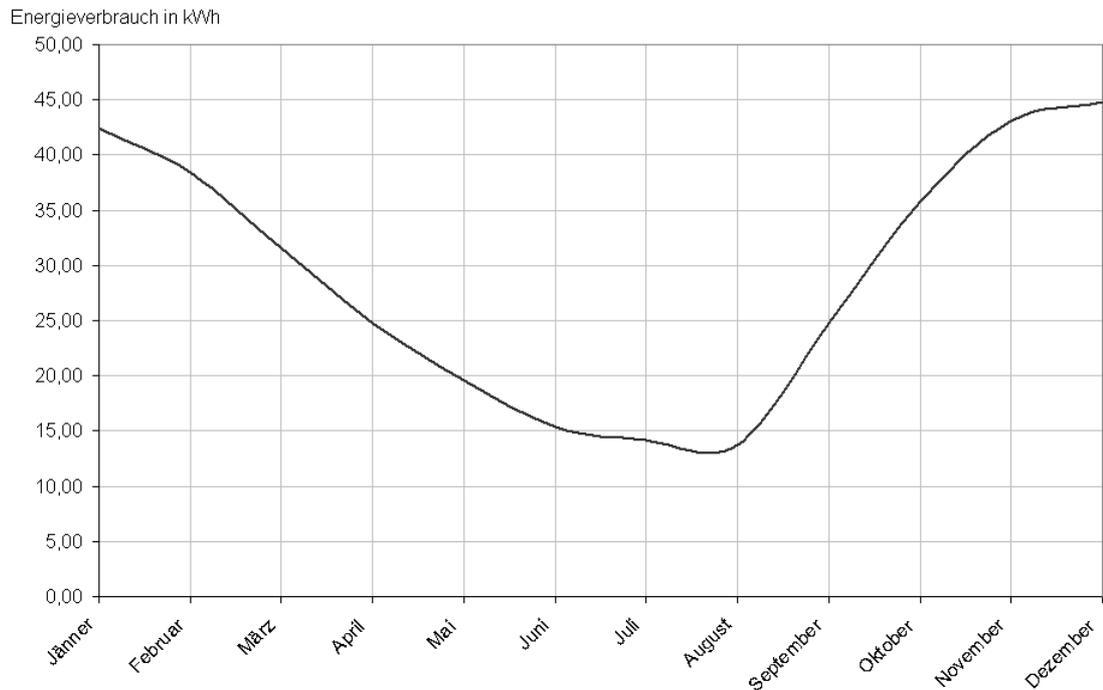


Abbildung 5.1.: Jahresgangkennlinie der Beleuchtung eines Haushalts in Frankreich im Jahr 2002. Quelle: eigene Darstellung; Datenquelle: [REM08]

Im Jahr 2006 wurde in Portugal eine Studie über die Verteilung verschiedener Lampentechnologien in Haushalten durchgeführt. Es wurde analysiert in welchen Räumen welche Lampentypen verwendet werden. In Abbildung 5.2 erkennt man, dass ineffiziente Glühlampentechnologien (in der Grafik als Incandescent bezeichnet) in Wohnräumen, vor allem in Wohn- und Schlafzimmern, sehr stark vertreten sind. CFLs sind in Portugal hauptsächlich im Außenbereich anzutreffen. Eine mögliche Erklärung hierfür ist die längere Lebensdauer dieser Lampen und die daraus resultierenden längeren Wartungsintervalle. Leuchtstoffröhren (in der Grafik als Fluorescent bezeichnet) haben verstärkt in Küchen, Büros und

³Durchschnittsverbrauch der 100 Haushalte der Studie *Lighting in France (2002-2003)* [REM08]

5. Analyse des Beleuchtungsbestands in der EU

Garagen Einzug gefunden.

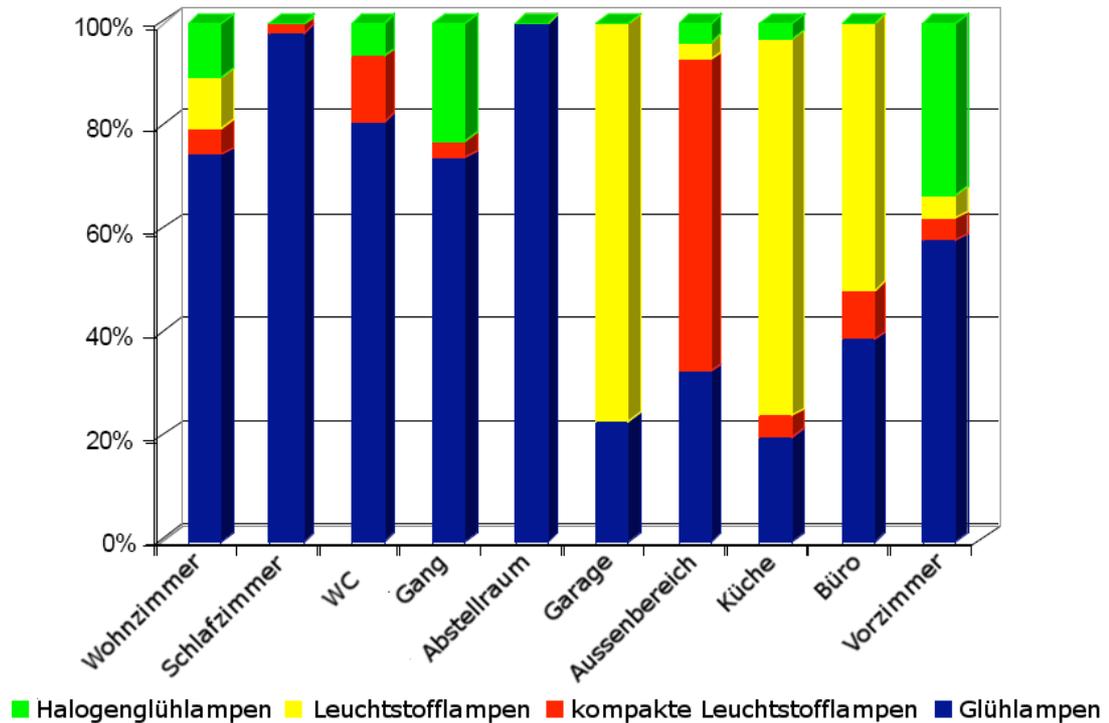


Abbildung 5.2.: Prozentuelle Aufteilung der Lampentechnologien in verschiedenen Bereichen eines Haushalts. Quelle: [Alm07]

In der Studie wurden weiters die durchschnittlichen Beleuchtungsdauern (siehe Abbildung 5.3) erfasst und daraus eine grobe Abschätzung des elektrischen Tagesverbrauchs für Beleuchtungszwecke (siehe Abbildung 5.4) erstellt ⁴ [Alm07].

Eine Übertragbarkeit dieser Ergebnisse von Portugal auf den Rest der EU ist nicht zweckdienlich, da die Beleuchtungsstrukturen und -gewohnheiten aufgrund nationaler Förderprogramme und geographischer Unterschiede, wie dem Lichtangebot über die Jahreszeiten, sehr stark variieren. Der Anteil des elektrischen Energiebedarfs für Beleuchtungszwecke schwankt in den Ländern der EU-25 zwischen 6,4% in Frankreich und 28% Estland und Lettland. Im Fall von Portugal liegt er bei knapp 15% [Ber07a].

⁴Die hier präsentierten Zahlen sind konservative, da die Messungen im Frühjahr und Sommer durchgeführt wurden. Außerdem wurden hauptsächlich Häuser betrachtet, was den hohen Anteil der Außenbeleuchtung erklärt.

5. Analyse des Beleuchtungsbestands in der EU

	durchschnittliche Einschaltdauer pro Tag $\frac{h}{Tag}$	durchschnittliche Leistung W
Wohnzimmer	3,04	117,33
Schlafzimmer	1,31	152,54
Badezimmer	1,42	82,01
Gang	1,03	66,43
Abstellzimmer	0,44	66,77
Garage	0,72	80,44
Küche	4	59,92
Büro	2,75	72,76
Vorzimmer	1,18	65,66
Außenbeleuchtung	3,56	59,10

Abbildung 5.3.: Durchschnittliche Beleuchtungsdauern in portugiesischen Haushalten. Quelle: [Alm07]

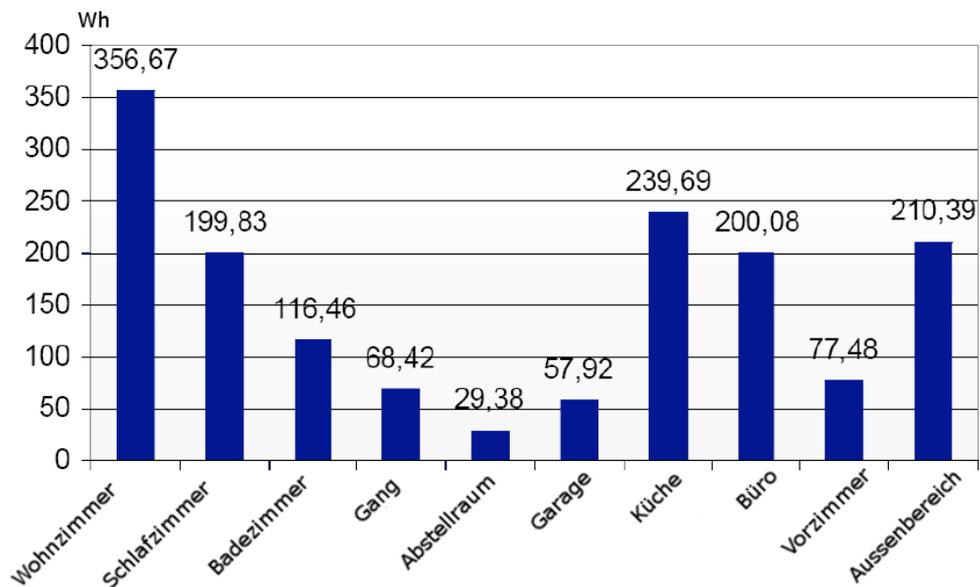


Abbildung 5.4.: Täglicher Energiebedarf für Beleuchtung in portugiesischen Haushalten. Quelle: [Alm07]

Die Durchdringung des Beleuchtungsmarktes mit effizienten Technologien ist ebenfalls sehr unterschiedlich über die EU-Mitgliedstaaten verteilt. In Abbildung

5. Analyse des Beleuchtungsbestands in der EU

5.5 ist der Anteil von CFLs an der Anzahl der gesamten pro Haushalt installierten Lichtpunkte dargestellt. Vor allem in östlichen Ländern, mit Ausnahme von Tschechien⁵, sind kompakte Leuchtstofflampen als Vertreter von energieeffizienter Beleuchtung in Haushalten sehr selten. Die durchschnittliche Effizienz der Beleuchtung in Europa unterliegt nationalen Schwankungen und beträgt zwischen $25 \frac{lm}{W}$ im Vereinigten Königreich und $38 \frac{lm}{W}$ in Portugal.

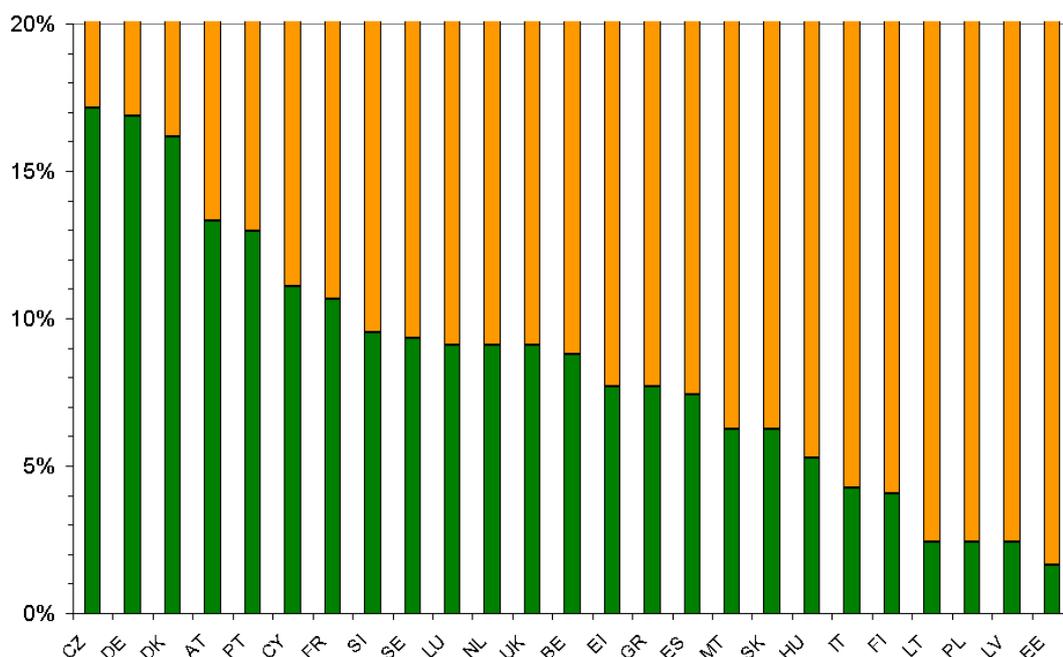


Abbildung 5.5.: Prozentueller Anteil von CFLs an den Lichtpunkten pro Haushalt in der EU-25. Quelle: [Ber07a]

Ein europäischer Haushalt verbraucht im Durchschnitt etwa 561kWh für Beleuchtungszwecke im Jahr. Das sind 6,2kWh pro Quadratmeter Wohnfläche und Jahr, wobei nördlichere europäische Länder tendenziell mehr als südlicher gelegene Staaten verbrauchen. Zum Teil kann dieser Umstand durch die stärkere Tageslängenänderung über den Jahreszeiten und den somit im Winter verlängerten Betriebszeiten der Beleuchtung erklärt werden. Ein durchschnittlicher

⁵In Tschechien wurde von 2001 bis 2003 eine Beleuchtungskampagne mit TV- und Zeitungswerbung, sowie enger Zusammenarbeit mit Lampenproduzenten und -verkäufern durchgeführt. Diese resultierte in einem Anstieg der jährlichen CFL-Verkaufszahlen um 15% gegenüber der natürlichen Marktentwicklung. Das Bewusstsein der Konsumenten über die Hauptvorteile von CFLs konnte um 50%, von bestehenden 25% auf 35-40% erhöht werden. [Ber07b]

5. Analyse des Beleuchtungsbestands in der EU

europäischer Haushalt verbraucht nur 85kWh elektrischer Energie in den Zeiten, wenn Tageslicht verfügbar ist, pro Jahr. Dies zeigt die gute Tageslichtnutzung im privaten Bereich.

5.1.2. Österreich

Der elektrische Energiebedarf in Österreich für den Haushaltssektor liegt bei 15 TWh⁶ pro Jahr. Davon werden laut einer Schätzung von Bertoldi aus dem Jahr 2006 [Ber07a] 1,1TWh, das entspricht 7,3%, für Beleuchtungszwecke eingesetzt. Rechnet man das auf die 3,08 Millionen österreichische Haushalte um, so bedeutet das einen Energieverbrauch von 357,14kWh für Licht pro Haushalt und Jahr.

Biermayr [Bie94] ermittelte im Jahr 1994 einen Beleuchtungsanteil von 14,63% am Gesamtstromverbrauch. Messungen in über 1100 Haushalten in Wien wurden dazu herangezogen. Der elektrische Jahresenergieverbrauch dieser Haushalte lag bei durchschnittlich 4,73MWh. Somit ergibt das einen Lichtanteil von 323,3kWh pro Haushalt und Jahr.

Ein Vergleich der beiden Studien ist nicht unmittelbar möglich. Einerseits liegt eine Zeitspanne von zwölf Jahren zwischen der Erstellung der Studien. In dieser Zeit ist der Energieverbrauch in Haushalten gestiegen und Lichttechnologien haben sich weiterentwickelt. Andererseits betrachtet Biermayr ausschließlich städtische Haushalte. Meiner Ansicht nach verbrauchen diese mehr Energie für Beleuchtungszwecke aufgrund von schlechterer Tageslichtverfügbarkeit in der Stadt, als Haushalte in ländlichen Gegenden.

Trotz der schlechten Vergleichbarkeit der beiden Studien legen die Ergebnisse von Biermayr den Schluss nahe, dass der prozentuelle Anteil für Beleuchtung bei der Schätzung Bertoldis mit nur 7,3% etwas zu niedrig angesetzt ist⁷. Der Durchschnitt der EU-15 Staaten liegt bei 11,61%.

Laut Bertoldis Schätzungen besitzen 70% der österreichischen Haushalte mindestens eine kompakte Leuchtstofflampe. 15,4% aller in Haushalten installierten Lichtpunkte sind mit CFLs ausgestattet. Dies ergibt bei 26 Lichtpunkten durchschnittlich 4 kompakte Leuchtstofflampen pro Haushalt(siehe Abbildung 5.5 für

⁶4,87MWh pro Haushalt pro Jahr

⁷Bertoldi korrigierte seine Schätzung des prozentuellen Anteils für Beleuchtung in Österreich aus dem Jahr 2006 von 6,875% [Ber07b] auf 7,3% [Ber07a] veröffentlicht 2007.

5. Analyse des Beleuchtungsbestands in der EU

einen europäischen Vergleich).

Betrachtet man Lampenverkaufsdaten⁸ der letzten Jahre für den Haushaltssektor in Österreich (siehe Abbildung 5.6) so zeigt sich, dass bei angenommenen Lampenlebensdauern von 2,5 Jahren für Glühbirnen, 4 Jahren für Halogenglühlampen⁹, 6 Jahren für kompakte Leuchtstofflampen und 10 Jahren für Leuchtstofflampen in Röhrenform¹⁰ der aktuelle Lampenbestand zu über 60% aus Glühbirnen besteht (siehe Abbildung 5.7).

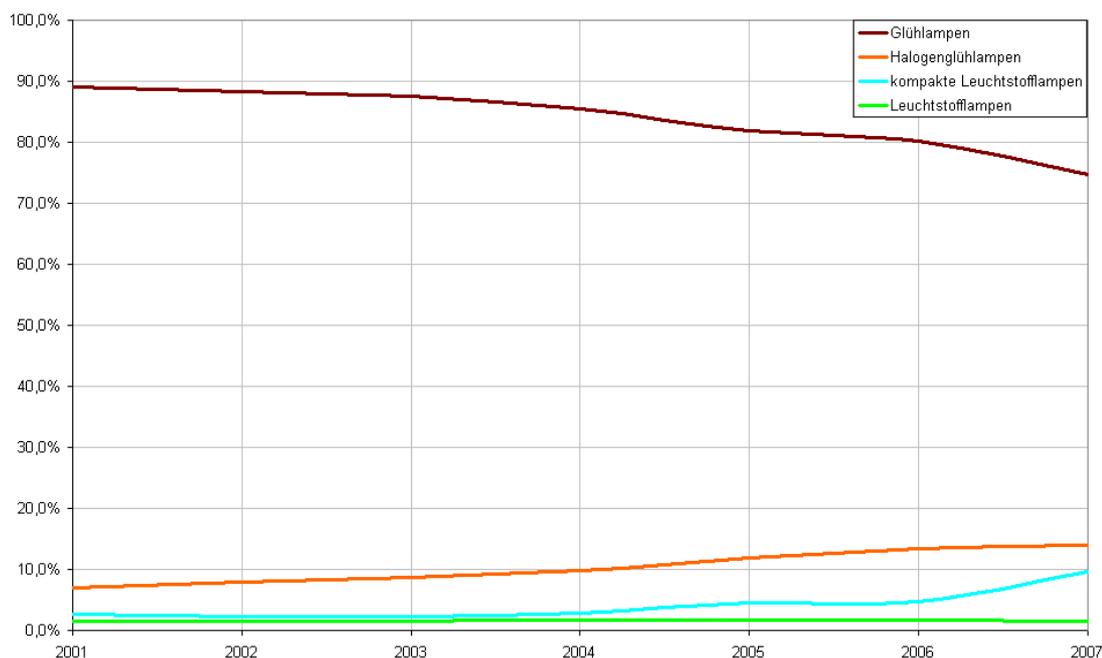


Abbildung 5.6.: Prozentuelle Anteile der verkauften Lampen in Österreich für den Haushaltssektor.

Etwa 20% der Lampen sind Halogenglühlampen. Der Anteil von kompakten

⁸Die hier verwendete Verkaufsstatistik [GFK08] erfassen mehr als 60% des Lampenmarktes für Haushalte in Österreich. Aus diesem Grund erachte ich eine Projektion der Daten auf den gesamten Haushaltssektor zur Analyse des Lampenmarktes als zulässig.

⁹Die Lebensdauer von Hochvolt-Halogenglühlampen wird auf 3,33 Jahre, die von Niedervolt-Halogenglühlampen auf 6, 25 Jahre geschätzt. Da bei den Lampenverkaufsdaten nicht zwischen diesen beiden Typen unterschieden wird, wird eine durchschnittliche Lampenlebensdauer von 4 Jahren angenommen.

¹⁰Die hier angenommenen Lampenlebensdauern sind Schätzungen von Experten [VT08a] und gehen von unterschiedlichen jährlichen Brenndauern der einzelnen Lampentypen aus.

5. Analyse des Beleuchtungsbestands in der EU

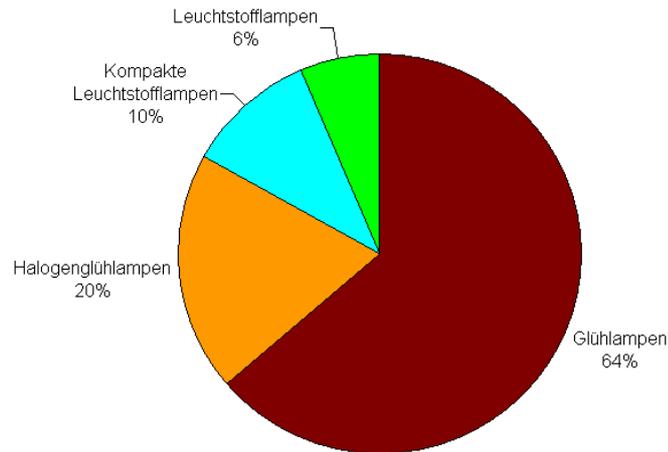


Abbildung 5.7.: Schätzung der prozentuellen Anteile des Lampenbestands in Österreich für den Haushaltssektor.

Leuchtstofflampen liegt bei 10%. Dieser Wert liegt unter dem von Bertoldi geschätzten CFL-Anteil von 15,4% im Jahr 2006 [Ber07a]. Hierbei ist zu beachten, dass die Analyseergebnisse eine hohe Sensitivität gegenüber der angenommenen Lampenlebensdauern aufweisen. Setzt man für alle Technologien gleiche Brenn-

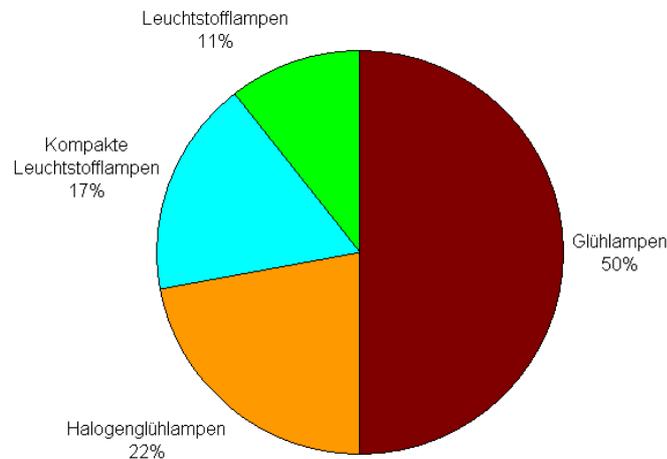


Abbildung 5.8.: Schätzung der prozentuellen Anteile des Lampenbestands in Österreich für den Haushaltssektor. Annahme: Gleiche Brenndauern für alle Technologien

dauern von 1.000 Stunden pro Jahr fest, so liegt die Lebensdauer von Glühlampen bei 1 Jahr, die von Halogenglühlampen bei 2,5 Jahren, von kompakten Leuchtstofflampen bei 6 Jahren und die Lebensdauer von Leuchtstofflampen bei 10 Jahren. Dies verändert die Ergebnisse der Schätzung der installierten Lampen in

5. Analyse des Beleuchtungsbestands in der EU

österreichischen Haushalten beträchtlich. In Abbildung 5.8 fällt sofort der auf 50% gesunkene Glühlampenanteil auf. Im Gegenzug dazu steigen die Werte für kompakte und röhrenförmige Leuchtstofflampen.

5.2. Dienstleistungssektor

Im Dienstleistungssektor stieg der Bedarf an elektrischer Energie im Zeitraum 1999 bis 2004 in der EU-25 um 15,6% auf 670TWh an. Beleuchtung spielt in diesem Sektor eine besonders große Rolle, da sie mit etwa 175TWh, das entspricht 26%, den größten einer Energiedienstleistung zuordenbaren Anteil am elektrischen Energiebedarf einnimmt [Ber07a]. Die IEA schätzt den elektrischen Energiebedarf für Beleuchtung in OECD-Europa¹¹ im Jahr 2005 auf 185TWh(28,3%).

Im Gegensatz zum Haushaltssektor, den wenige Gebäudetypen(Wohnhäuser) charakterisieren, variieren sowohl der Gebäudetyp als auch die Nutzungsdauern im Dienstleistungssektor stark. Bürogebäude in OECD-Europa weisen im globalen Vergleich die kürzesten Einschaltdauern der Beleuchtung mit nur 1405 bis 1901 Stunden auf. Stärker geregelte Arbeitszeiten und die Architektur in Europa führen zu erhöhter Tageslichtverfügbarkeit. Kleine Büroräume mit nur wenigen Arbeitsplätzen haben meist mehr Fenster pro Arbeitsplatz und ermöglichen bessere Kontrolle über die Beleuchtung im Gebäude als Großraumbüros, die oft keine differenzierten Beleuchtungssektoren aufweisen. Dies führt im Vergleich mit dem OECD Durchschnitt zu einem um 32% geringerem Energiebedarf für Beleuchtung pro Quadratmeter. Selbst im Vergleich mit japanischer Bürobeleuchtung, deren Effizienz 23% höher ist, schneidet OECD-Europa gut ab. Der flächenbezogene Energiebedarf ist auch hier um 16% geringer. Auch die Größe der Unternehmen, die die Gebäude betreiben ist für die Energieeffizienz in der Beleuchtung ausschlaggebend. Kleine und Mittlere Unternehmen weisen in der Regel schlechtere Werte auf als Großunternehmen. Eine mögliche Ursache hierfür ist die geringe Wichtigkeit von Beleuchtung in diesen Betrieben [Int06].

Der Beleuchtungsmarkt im Dienstleistungssektor ist höher entwickelt als der für den Haushaltssektor. Bei Bau oder Renovierung von großen Gebäuden wird oft

¹¹Belgien, Niederlande, Dänemark, Norwegen, Deutschland, Österreich, Finnland, Polen, Frankreich, Portugal, Griechenland, Schweden, Irland, Schweiz, Island, Slowakische Republik, Italien, Spanien, Tschechische Republik, Türkei, Ungarn, Luxemburg, Vereinigtes Königreich

5. Analyse des Beleuchtungsbestands in der EU

ein Lichtexperte hinzugezogen. Leider ist der Erbauer meist nicht der Nutzer des Gebäudes, was sich in einem Interessenskonflikt, dem Investor-Nutzer-Dilemma, widerspiegelt. Eine detaillierte Analyse der Markthindernisse für energieeffiziente Beleuchtung folgt in Kapitel 6.2.

Beleuchtung im Dienstleistungssektor weist eine durchschnittliche Effizienz von $46,1 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ in OECD-Europa auf. Dies liegt unter dem OECD Durchschnitt von $51 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$. Über 70% des Lichts wird in diesem Sektor mit Leuchtstofflampen generiert. Die alte T12-Lampen-Generation¹² wird zusehends von T8¹³, die in dieselben Fassungen eingesetzt werden können, substituiert. Nur ein Drittel der installierten T8-Lampen gehört den effizienteren Drei-Banden Lampen mit Wertem von bis zu $90 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ an. Der Rest sind so genannte Halo-Phosphat-T8 mit einer etwas niedrigeren Effizienz bis $80 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$. In Ländern mit 120V Netzspannung können T12-Lampen aus technologischen Gründen nicht mit T8-Lampen substituiert werden, da das Vorschaltgerät hierfür getauscht werden müsste. In den USA, Kanada und Japan wurden die ineffizienteren Halo-Phosphat-T8-Lampentypen vom Markt verbannt, sodass nur mehr T8-Drei-Banden-Lampen verfügbar sind. In diesen Ländern ist zwar der Anteil an T12-Lampen etwas höher als in Europa, dafür ist die vorherrschende T8-Technologie im Durchschnitt effizienter [Int06]. Die effizienteste Generation der Leuchtstofflampen, T5¹⁴, kann ausschließlich mit elektronischem Vorschaltgerät betrieben werden und erreicht Effizienzwerte von bis zu $104 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$. Die Entwicklung des Leuchtstofflampenmarkts in der EU der letzten Jahre ist in Abbildung 5.9 dargestellt.

2002 wurde erstmals der Verkauf der ineffizientesten Vorschaltgeräte für Leuchtstofflampen in der EU verboten. Trotzdem sind elektromagnetische Vorschaltgeräte in Europa noch sehr stark verbreitet. Meist werden erst bei der Installation eines neuen Beleuchtungssystems die Leuchten und somit auch die Vorschaltgeräte ausgetauscht. Eine Leuchtenlebensdauer von bis zu 30 Jahren ist durchaus nicht ungewöhnlich¹⁵. Elektronische Vorschaltgeräte haben grundlegende Vorteile, wie bessere Effizienz und schnelleren Start der Lampe. Der Betrieb von mehr als einer Lampe an einem Vorschaltgerät ist möglich¹⁶ und durch hohe Be-

¹²Durchmesser 36mm mit maximaler Effizienz von $75 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$

¹³Durchmesser 26mm

¹⁴Durchmesser 16mm

¹⁵Die Lebensdauer des Vorschaltgerätes ist meist geringer. Das defekte Gerät wird oft aufgrund fehlenden Wissens durch ein gleichwertiges Vorschaltgerät ersetzt. Es kommt daher nicht zu einer Effizienzverbesserung des Beleuchtungssystems.

¹⁶je nach Ausführung des Vorschaltgerätes

5. Analyse des Beleuchtungsbestands in der EU

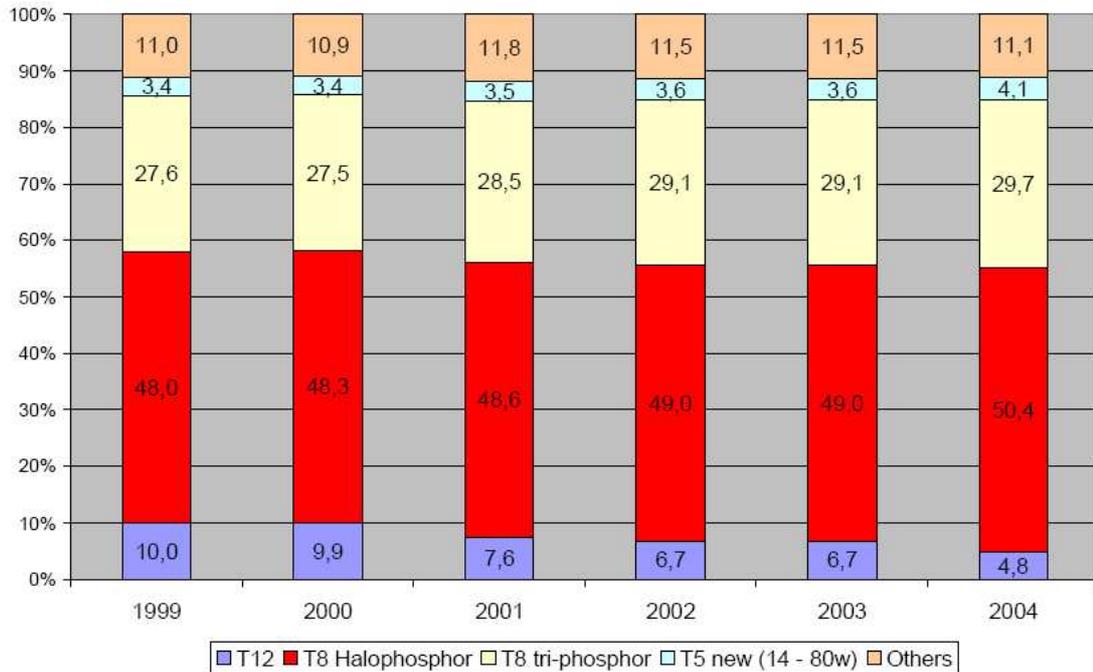


Abbildung 5.9.: Lampenverkäufe in Europa. Quelle: [VT07a]

triebsfrequenzen der Lampe wird 100Hz-Flimmern vermieden (siehe Kapitel 3.2).

Kompakte Leuchtstofflampen werden in Bürogebäuden hauptsächlich für die Beleuchtung von Nebenräumen¹⁷ eingesetzt. Sie erzeugen laut einer französischen Studie weniger als 10% des Lichts [VT07a]. Andere Gebäudearten im Dienstleistungssektor, wie beispielsweise Verkaufsflächen, weisen höhere Anteile an kompakten Leuchtstofflampen auf. Hier dominieren, im Gegensatz zum Haushaltssektor, CFLs ohne integriertes Vorschaltgerät. Sie haben einerseits Preisvorteile, da das Vorschaltgerät in der Leuchte integriert ist und somit nicht bei Lampentausch gewechselt werden muss. Andererseits weisen die Leuchtensysteme meist höhere Lichtausbeuten auf, da diese Leuchten explizit für die Verwendung mit CFLs ausgelegt werden.

Die Entwicklung der europäischen Leuchtstofflampen- und Vorschaltgerätemärkte der letzten Jahre zeigt Abbildung 5.10.

¹⁷Eingangshallen, Flure und Sanitärbereiche

5. Analyse des Beleuchtungsbestands in der EU

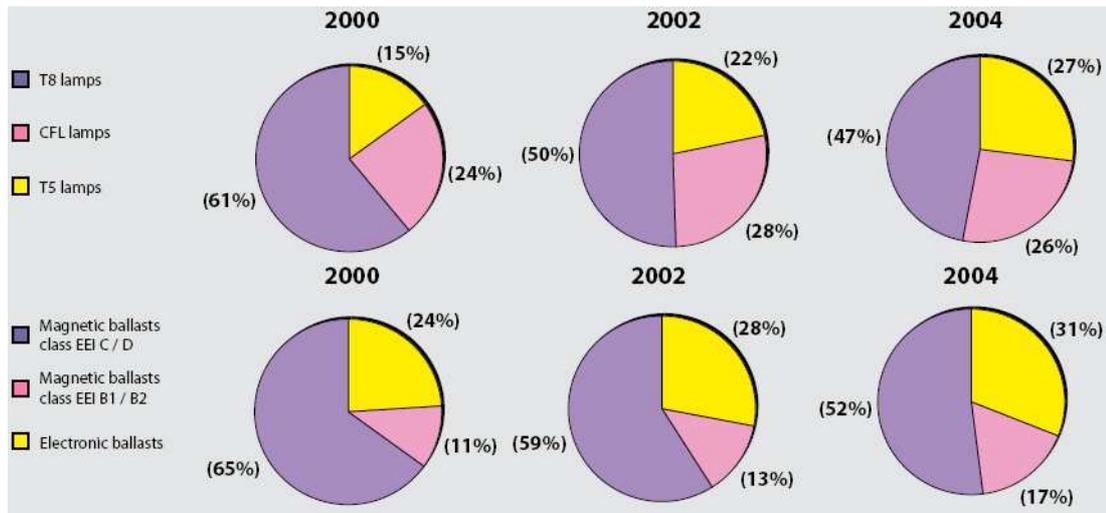


Abbildung 5.10.: Entwicklung des Leuchtstofflampen- und Vorschaltgerätemarktes.

Quelle: [CEL07]

5.3. Industrie

Die Analyse der eingesetzten Beleuchtung in der Industrie in Europa ist von einem Mangel an Daten geprägt. In der EU wurden bisher keine dementsprechenden Daten erfasst. Die Internationale Energieagentur schätzt den elektrischen Energiebedarf für industrielle Beleuchtung der europäischen OECD Staaten im Jahr 2005 auf etwa 100,3TWh. Dies entspricht einem Anteil von 8,7% des gesamten elektrischen Energiebedarfs der Industrie. Industrielle Beleuchtungssysteme sind im Vergleich zu den Sektoren Haushalt und Dienstleistung sehr effizient. Geschätzte Werte reichen von $74,8 \frac{lm}{W}$ bis $80,4 \frac{lm}{W}$ [Int06]. Industrielle Beleuchtung wird aufgrund des vorher schon angeführten Mangels an Daten hier nicht ausführlicher behandelt.

5.4. Straßenbeleuchtung

Straßenbeleuchtung verbrauchte im Jahr 2005 in der EU-25 35TWh an elektrischer Energie. Dies stellt 1,3% des gesamten elektrischen Endenergieverbrauchs dar [VT07b]. Dieser Sektor weist sehr gute Effizienzwerte mit durchschnittlich $74 \frac{lm}{W}$ auf [Int06]. Das Verbesserungspotential ist trotzdem noch enorm, da viele

5. Analyse des Beleuchtungsbestands in der EU

alte Leuchtensysteme installiert sind. Die Lebensdauer einer Straßenleuchte liegt bei etwa 30 Jahren und ein Technologiewechsel geht meist mit einem Leuchten-tausch einher. Straßenbeleuchtungssysteme lassen sich durch eine hohe Anzahl an Betriebsstunden und relativ niedrige Anforderungen an die Farbwiedergabe cha-rakterisieren. Diese Eigenschaften erlauben den Einsatz von Lichttechnologien, die aufgrund ihrer schlechten Farbwiedergabewerte oder des hohen Lichtstroms einer Lampe weder in Haushalten, noch im Dienstleistungssektor regelmäßig zum Einsatz kommen.

Eine genaue Analyse des derzeitigen Lampenbestands in Europa gestaltet sich schwierig, da nur sehr wenige Datenquellen zur Verfügung stehen. Diese wurden im Rahmen einer vorbereitenden Studie für die Öko-Design Richtlinie für Stra-ßenbeleuchtung [VT07b] analysiert. Natriumdampflampen, sowohl in Hochdruck- als auch Niederdruckausführung, wurden mit 49% aller verkauften Lampen für Straßenbeleuchtung in der EU-25 im Jahr 2004 als Marktführer identifiziert. Diese weisen je nach Ausführung $50 \frac{lm}{W}$ bis $200 \frac{lm}{W}$ auf und gehören somit zu den effizi-entesten im Moment verfügbaren Lampen. Quecksilberdampf-Hochdrucklampen erreichen nur $30 \frac{lm}{W}$ bis $60 \frac{lm}{W}$ und sind aber mit einem Anteil von 35,4% sehr stark am europäischen Markt vertreten. Obwohl die Technologie längst über-holt ist, werden 28% der neu installierten Straßenbeleuchtung noch immer mit Quecksilberdampf-Hochdrucklampen ausgeführt. Kompakte Leuchtstofflampen mit höheren Leistungen in Bereichen um 36W werden ebenfalls als Leuchtmittel in Straßenlaternen eingesetzt. Sie erreichen einen Marktanteil von knapp über 10% und finden sich vor allem in öffentlichen Bereichen, in denen Farbwiedergabe eine Rolle spielt, wie etwa in Ortskernen oder Fußgängerzonen. In diesen Berei-chen werden teilweise auch Halogen-Metaldampf-Lampen eingesetzt, da diese bei Effizienzen von $70 \frac{lm}{W}$ bis $120 \frac{lm}{W}$ Farbwiedergabeindizes von bis zu $R_a = 95$ erreichen. Mit 5,2% der verkauften Lampen für Straßenbeleuchtung gehören sie jedoch einer Minderheit an.

Abbildung 5.11 zeigt die prozentuelle Verteilung der vier am Straßenbeleuch-tungsmarkt vorherrschenden Technologien. Die linke Spalte zeigt den gesamten Markt. Aufgrund der langen Leuchtenlebensdauer zeigt der Ersatzlampenmarkt in der mittleren Spalte einen hohen Anteil der ineffizienten Quecksilberdampf-lampen. Im Fall neu errichteter Straßenbeleuchtung sind die effizienteren Tech-nologien (in blau und grün gehalten) stärker vertreten.

5. Analyse des Beleuchtungsbestands in der EU

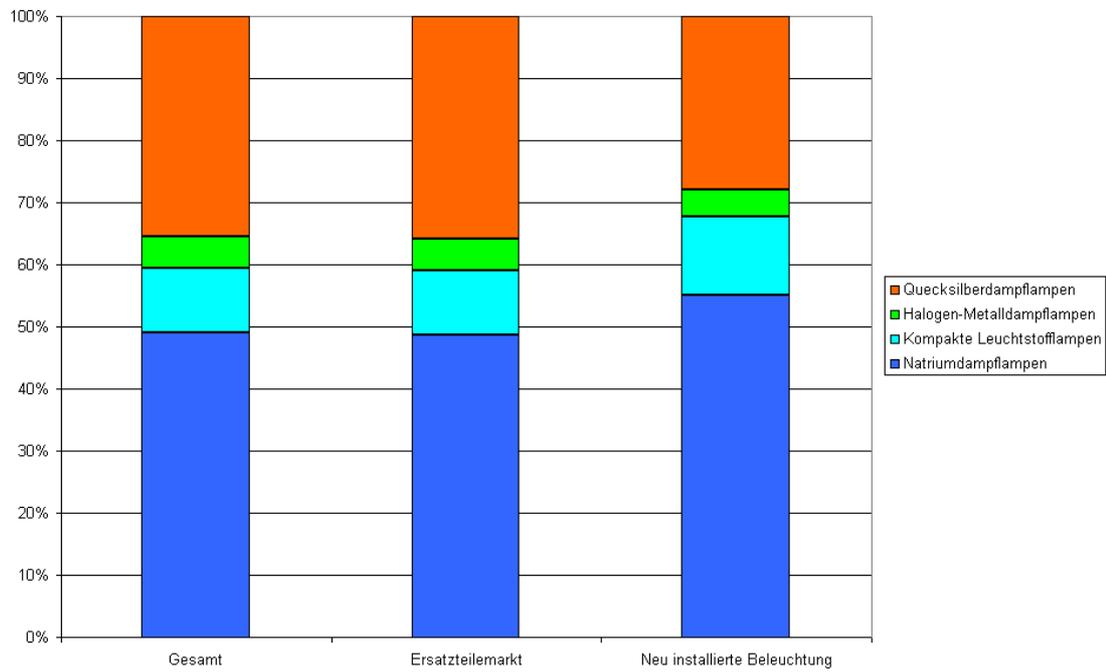


Abbildung 5.11.: Überblick über die Anteile verschiedener Lichterzeugungstechnologien am EU-25 Lampenmarkt für Straßenbeleuchtung im Jahr 2004. Quelle: [VT07b]

6. Energieeinsparpotentiale bei der Beleuchtung und Hemmnisse bei der Realisierung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Ursachen der aktuellen Beleuchtungssituation in industrialisierten Ländern. Sowohl Potentiale als auch Hemmnisse von energieeffizienter Beleuchtung werden aufgezeigt.

6.1. Energieeinsparpotentiale durch den Einsatz effizienter Technologien

Die Energieeinsparpotentiale von effizienter Beleuchtung kann man im Wesentlichen in zwei Teilgruppen aufteilen:

- Technisches Potential von energieeffizienter Beleuchtung
- Wirtschaftliches Potential von energieeffizienter Beleuchtung

Das technische Potential befasst sich mit den möglichen Energieeinsparungen mit den besten im Moment am Markt erhältlichen Lichttechnologien. Wirtschaftliche Aspekte werden dabei nicht beachtet.

Das wirtschaftliche Potential betrachtet die ökonomisch sinnvollste, also die über den gesamten Lebenszyklus kostengünstigste, Beleuchtungsvariante. Diese stellt im Vergleich mit der existierenden Beleuchtungslösung meist eine energetische Verbesserung dar. Die im weiteren Verlauf angeführten Zahlen beziehen sich auf wirtschaftliche Potentiale.

Eine Schätzung des Einsparpotentials bei Beleuchtung für die EU-27 liegt bei 114,9TWh pro Jahr im Fall eines kompletten Wechsels von aktuellen Beleuchtungstechnologien auf energieeffizientere Alternativen. Dies bedeutet mögliche Einsparungen von 42,5 Millionen Tonnen CO₂ im Jahr oder 17,5 Milliarden Euro

6. Energieeinsparpotentiale bei der Beleuchtung und Hemmnisse bei der Realisierung

pro Jahr [ELC07a]. Einer anderen Schätzung nach, beträgt das realistische Einsparpotential der Beleuchtung in der EU zwischen 30% und 40% des gesamten für die Lichterzeugung eingesetzten Energieverbrauchs [Ver07]. Diese Einsparungen sind durch den Tausch von Lampen, die vermehrte Nutzung von Tageslicht, bessere Steuerungsmöglichkeiten von Beleuchtungsanlagen, bessere Vorschaltgeräte und effizienteres Leuchtendesign möglich. Die Durchführung von Energieeffizienzmaßnahmen im Bereich der Beleuchtung ist somit der schnellste, praktikabelste und auch wirtschaftlichste Weg um Treibhausemissionen in der EU zu reduzieren und dem stetigen Anstieg des Stromverbrauchs entgegenzuwirken [ELC07b].

6.1.1. Haushaltssektor

Der Haushaltsektor weist die schlechteste durchschnittliche Effizienz bei den installierten Lampen auf (siehe Kapitel 5.1.1). Dies birgt ein großes Potential von geschätzten 62,2TWh in der EU-27 pro Jahr, was einer Verringerung des Energiebedarfs für Beleuchtung um ca. 65% gleichkommt. Der Haushaltssektor ist im Hinblick auf Energieeffizienzmaßnahmen bei Beleuchtung der größte, aber auch schwierigste (siehe Kapitel 6.2), Markt. Kann dieses Potential ausgeschöpft werden, so ergeben sich Einsparungen von 23 Millionen Tonnen CO₂ oder 9,5 Milliarden Euro.

In Österreich ist eine Verringerung des Energiebedarfs für Beleuchtungszwecke in Haushalten laut einer eigenen Schätzung¹ um etwa 60% durch den Austausch von Glüh- und Halogenleuchtstofflampen durch effizientere Technologien wie kompakte Leuchtstofflampen² möglich.

6.1.2. Dienstleistungssektor

Im Dienstleistungssektor liegt die durchschnittliche Effizienz der installierten Lampen bei $46,1 \frac{lm}{W}$ in Europa (siehe Kapitel 5.2). Das Einsparpotential liegt hier bei

¹Die Schätzung ist gestützt auf Lampenverkaufsdaten für den Haushaltssektor [GFK08].

Durchschnittliche Lampenleistungen wurden folgendermaßen angenommen: Glühlampe 60W, Halogenleuchtstofflampe 30W, kompakte Leuchtstofflampe 11W, Leuchtstofflampe 20W.

²Eine Effizienzsteigerung um 70% wurde für den Austausch von Glühbirnen mit kompakten Leuchtstofflampen angenommen. Dies entspricht dem Austausch einer 60W Glühbirne mit einer 18W Energiesparlampe. Eine Einsparung von 50% wurde beim Austausch von Halogenleuchtstofflampen angenommen.

6. Energieeinsparpotentiale bei der Beleuchtung und Hemmnisse bei der Realisierung

21,6TWh pro Jahr. Dies entspricht etwa 8 Millionen Tonnen CO₂ oder 3,3 Milliarden Euro [ELC07a]. Amortisationszeiten von Energieeffizienzmaßnahmen liegen je nach Ausführung zwischen einem und elf Jahren [Int06]. Die Beleuchtungssysteme im Dienstleistungssektor arbeiten sehr oft während Tageslicht verfügbar ist. Durch eine bessere Nutzung von natürlichem Licht ergeben sich hier Einsparungen von bis zu 50% der benötigten Energie [Per07]. Mit Hilfe von neuen Technologien, wie beispielsweise LEDs, ist es möglich zum Beispiel bei Schaufensterbeleuchtungen ebenfalls die Hälfte der eingesetzten Energie zu sparen, wie eine amerikanische Studie [Fre06] zeigt.

6.1.3. Industrie

Das Einsparpotential der Industrie fällt in etwa gleiche Größenordnungen wie im Dienstleistungssektor. Aufgrund der schlechten Datenverfügbarkeit ist keine genauere Schätzung möglich.

6.1.4. Straßenbeleuchtung

Trotz der sehr hohen durchschnittlichen Effizienz von $74 \frac{lm}{W}$, bergen Energieeffizienzmaßnahmen bei der Straßenbeleuchtung ein großes Potential von 9,5TWh pro Jahr. Dies entspricht 3,5 Millionen Tonnen CO₂ oder 1,5 Milliarden Euro [ELC07a]. Hier kann die Ausschöpfung dieses Potential nur durch eine Kombination von Lampen-, Leuchten-, Vorschaltgerätetausch und besserer Steuerung resultieren. Im Hinblick auf Lichtverschmutzung³ ist eine Erneuerung der Leuchten eine wichtige Maßnahme. Das erzeugte Licht wird hierdurch besser gerichtet und erhellt somit nur noch das zu beleuchtende Objekt und nicht die komplette Umgebung und den Himmel. Ein Austausch des Vorschaltgerätes ist meist beim Wechsel zu einer anderen Lampentechnologie nötig und muss somit bei Lampenwechsel durchgeführt werden. Bessere Steuerungen ermöglichen das Dimmen von Straßenabschnitten zu verkehrsarmen Zeiten oder bei Dämmerung. Eine norwegische Studie [Mjø07] weist auf ein Einsparpotential von 66% der bisher verbrauchten Energie bei der Straßenbeleuchtung von Oslo hin. Eine moderne Steuerung

³Das von Außenbeleuchtung abgestrahlte Licht dient nicht ausschließlich der Beleuchtung des zu beleuchtenden Objekts, sondern erhellt direkt oder durch Reflektion auch den Nachthimmel. Dies führt dazu, dass über städtischen Gebieten oft nur noch die hellsten Sterne zu erkennen sind.

6. *Energieeinsparpotentiale bei der Beleuchtung und Hemmnisse bei der Realisierung*

ermöglicht das Absenken des Beleuchtungsniveaus sobald Schnee liegt. Zu diesen Zeiten reichen nur 20% des ursprünglichen Lichtstroms der Lampen aus um eine ausreichende Beleuchtung sicherzustellen. Außerdem weist diese Studie auch auf den mit Straßenbeleuchtung verbundenen Sicherheitsaspekt, durch bessere Sichtbarkeit im Straßenverkehr und verbesserte Gesichtserkennung in Einkaufsstraßen nach Ladenschluss, hin. Eine Verbesserung der Straßenbeleuchtung ist also nicht nur im Hinblick auf Stromverbrauch und Wirtschaftlichkeit empfehlenswert, sondern hat auch Auswirkungen auf die Sicherheit im Straßenverkehr und auf öffentlichen Plätzen.

6.2. Markthindernisse für die Steigerung der Energieeffizienz der Beleuchtung

Der Frage: “Warum werden die vorhandenen Potentiale, die sowohl den Energieverbrauch senken, als auch wirtschaftlich von Vorteil sind, nicht genutzt?“ widmet sich der folgende Abschnitt. Markthindernisse für die Verbreitung von energieeffizienter Beleuchtung werden analysiert und mögliche Lösungen erarbeitet.

6.2.1. Mangel an Interesse

Eines der größten Markthindernisse für energieeffiziente Beleuchtung ist ein Mangel an Interesse von Entscheidungsträgern diesem Thema gegenüber. Egal ob im Haushalt, Dienstleistungssektor oder in der Industrie, die Kosten für elektrische Beleuchtung werden meist nicht explizit wahrgenommen. Die Beiträge der Beleuchtung im Verhältnis zu anderen Energieverbrauchern am Gesamtenergieverbrauch sind oft relativ klein. Sie sind für die Nutzer nirgends explizit sichtbar und aus diesem Grund auch nicht wichtig [Coo07]. Das mögliche Einsparpotential und die durch gute Lichtplanung erreichbaren Verbesserungen der Arbeitsumgebung und Sicherheit sind den Entscheidungsträgern häufig nicht bewusst [ELC07b]. Diese Tatsachen leiten nahtlos zu weiteren Markthindernissen, wie z.B.: einem Mangel an Information (siehe Kapitel 6.2.3), über.

Im Dienstleistungssektor spielt das Investor-Nutzer-Dilemma (siehe 6.2.4) eine wichtige Rolle. Weder der Investor, der die laufenden Energiekosten des Gebäudes meist nicht trägt, noch der Nutzer, der keinen Einfluss auf die installierte

6. Energieeinsparpotentiale bei der Beleuchtung und Hemmnisse bei der Realisierung

Lichtanlage hat, interessieren sich für den Einsatz energieeffizienter Beleuchtung.

Im Fall der Straßenbeleuchtung liegen die Prioritäten der Betreiber, meist der Gemeinden, klar auf der Hand:

- Verbesserung der Verkehrssicherheit
- Verbesserung des Verkehrsflusses
- Verbesserung der öffentlichen Sicherheit und des Sicherheitsgefühls der Anwohner

Erfüllt ein installiertes System diese Anforderungen, so ist das Interesse des Betreibers an Veränderungen oder Verbesserung meist sehr gering.

6.2.2. Vorurteile

Im Haushaltssektor hat das bisherige Fehlen von Standards und Qualitätskriterien bei kompakten Leuchtstofflampen zum Aufbau vieler Vorurteile von potentiellen Anwendern geführt. Billige Produkte halten im Bezug auf Lebensdauer und Lichtstärke oft nicht was versprechen. Das dadurch entstandene Misstrauen des Kunden in die Technologie prägt dessen zukünftiges Kaufverhalten stark. Das Nutzervertrauen ist geschädigt und der Käufer greift beim nächsten nötigen Lampentausch auf die „altbewährte“ Glühlampe zurück. Auch der Kaufpreis ist ein Markthemmnis. CFLs kosten im Einkauf ein Vielfaches normaler Glühlampen. Dem Kunden sind die Lebenszykluskosten aufgrund unzureichender Information (siehe Kapitel 6.2.3) meist nicht bewusst, weshalb er zur über die gesamte Lebensdauer viel teureren Glühbirne greift.

Die erste Generation von Energiesparlampen hatte einige Nachteile wie schlechte Farbwiedergabe, große Abmessungen, kalte Lichtfarbe und lange Einschaltzeiten⁴. Die Lebensdauer dieser Lampen wurde stark von den Schaltzyklen beeinflusst [Ber07b]. Die technologische Entwicklung der letzten 20 Jahre hat die meisten dieser oft zitierten technischen Mängel jedoch ausgeräumt. Es gibt mittlerweile kompakte Leuchtstofflampen in einer Vielzahl an Lichtfarben und mit

⁴Die Einschaltzeit bezeichnet jene Zeit, die die Lampe benötigt um 80% ihres endgültigen Lichtstroms zu erreichen

6. Energieeinsparpotentiale bei der Beleuchtung und Hemmnisse bei der Realisierung

guten Farbwiedergabewerten zu kaufen. Diese sind meist nur unwesentlich größer als Glühbirnen und sind daher problemlos in den meisten Leuchten einsetzbar. Der Einfluss der Schaltzyklen auf die Lampenlebensdauer spielt für den normalen Gebrauch keine Rolle mehr. Auch die Einschalt Dauern haben sich im Lauf der Zeit verkürzt, liegen allerdings immer noch bei etwa einer Minute. CFLs werden manchmal mit flackerndem Licht in Verbindung gebracht. Die Verwendung von elektronischen Vorschaltgeräten⁵ führt zu einer Lampenfrequenz von wenigen Kilohertz, was die Wahrnehmung eines Flackerns für das menschliche Auge unmöglich macht.

Das Dimmen von kompakten Leuchtstofflampen ist in der Regel nicht möglich. Sie können daher nicht in Leuchten mit Dimmer eingesetzt werden. In letzter Zeit sind einige stufig und auch stufenlos dimmbare CFLs am Markt erschienen. Dies ist durch spezielle elektronische Vorschaltgeräte möglich. Die Kosten dieser Lampen liegen jedoch weit über dem Preis von Standard-Energiesparlampen.

6.2.3. Mangel an Information

Ein Mangel an Information über energieeffiziente Beleuchtung stellt ein großes Problem dar [ELC07b]. Lampenverpackungen geben in der Regel zu wenige Informationen über Lichtqualitäten und schnelle Amortisationszeiten wieder. Mehr Information über die Vorteile und Qualitäten von verschiedenen Beleuchtungstechnologien ist am Verkaufsort nötig. Weiters trägt eine fehlende Aufschlüsselung der Energiekosten auf die einzelnen elektrischen Verbraucher dazu bei, dass dem Thema Beleuchtung in der Regel sehr wenig Aufmerksamkeit geschenkt wird.

Ein vorherrschender Trend hingehend zur Verwendung von Halogenglühlampen ist aus Energieeffizienzsicht nicht zu begrüßen. Diese Lampen sind etwas effizienter als Allgebrauchsglühlampen und es wurden in den letzten Jahren noch weitere Steigerungen durch die Nutzung von infrarotreflektierenden Schichten in den Glaskolben erzielt (siehe Kapitel 3.1.2). Trotzdem reichen sie in Sachen Effizienz bei weitem nicht an kompakte Leuchtstofflampen heran.

⁵In der EU sind CFLs mit integrierten elektronischen Vorschaltgeräten der aktuelle Standard.

6.2.4. Investor-Nutzer-Dilemma

Das Investor-Nutzer-Dilemma tritt sehr häufig im Dienstleistungssektor auf. Das Problem hierbei besteht aus den unterschiedlichen Interessen die von Investor und Nutzer eines Investitionsobjekts verfolgt werden [Haa07]. Bei der Errichtung eines Gebäudes liegen die Präferenzen des Investors bei niedrigen Investitionskosten, was zu einer Vermeidung von Energieeffizienzmaßnahmen führt. Dies ermöglicht günstige Angebotspreise, erhöht jedoch die laufenden Kosten für den Betrieb. Der Nutzer steht bei der Errichtung des Gebäudes oft noch nicht fest und hat daher auch keine Mitsprachemöglichkeit im Hinblick auf energieeffiziente Beleuchtungssysteme. Der Nutzer hat die laufenden Kosten zu tragen, wobei Energiekosten bei Bürogebäuden oder Geschäftslokalen häufig in einer Gesamtmiete pauschaliert sind. Somit besteht von der Nutzerseite ebenfalls kein Interesse an effizienteren Lichttechnologien [Nil06].

7. Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung bei der Beleuchtung

Mangelndes Interesse und das Fehlen von Daten zu Beleuchtung drückten sich lange Zeit durch politische Ignoranz gegenüber diesem Thema aus. Auch Probleme der Messbarkeit von Energieeffizienzmaßnahmen trugen ihren Anteil zur beständigen Missachtung von energieeffizienter Beleuchtung in Europa bei. Einige nationale Förderprogramme und Initiativen versuchten Einsparpotentiale aufzuzeigen. Das allgemeine Interesse an Energieeffizienzmaßnahmen wurde jedoch erst durch die öffentliche Diskussion zum Klimawandel geweckt. Dies verhilft energieeffizienter Beleuchtung zu einer Chance.

Das mangelnde Interesse der Öffentlichkeit kann durch Werbekampagnen verstärkt werden. Die vermehrte Medienpräsenz des Themas im letzten Jahr hat ein wenig dazu beigetragen dieses zu wecken. Die Bereitstellung von Information am Verkaufsort wurde durch eine Kennzeichnung von Lampen für den Hausgebrauch, die EU-weit auf der Verpackung aufgebracht sein muss, verbessert. Dieses Label umfasst leider nicht alle Lampentypen. Dieses Problem und das der Qualitätsmängel soll durch weitere Kennzeichnungen im EU-Raum in den Griff bekommen werden. An einem stufenweisen Verkaufsverbot für Glühlampen wird im Moment gearbeitet.

7.1. Chronologie der internationalen Bemühungen zur Energieeffizienzsteigerung bei der Beleuchtung

Bemühungen die Treibhausgasemissionen zu senken, ziehen seit etwa zwei Jahren wie ein roter Faden rund um den Globus. Die Reduzierung der Verwendung von ineffizienten Glühlampen wird sowohl bei Herstellern als auch bei Gesetzgebern diskutiert und an vielfältigen Umsetzungen wird gearbeitet.

7. Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung bei der Beleuchtung

7.1.1. Etablierte gesetzliche Regulierung im Jahr 2006

Im Jahr 2006 hatten nur der US amerikanische Bundesstaat Kalifornien und die Republik Korea gesetzliche Regulierungen zur Energieeffizienz bei Lampen etabliert. Die geforderte Effizienz bewegte sich in beiden Fällen in einem Rahmen, in dem Glühlampen grundsätzlich weiter am Markt erlaubt waren, jedoch wurden die ineffizientesten Modelle ausgeschlossen. Als Resultat dieser Maßnahmen wird eine Energieeinsparung von einigen wenigen Prozent erwartet, was die enge Bandbreite der Energieeffizienz bei Standardglühlampen mit Schraubsockel widerspiegelt.

7.1.2. Chronologie der internationalen Entwicklungen seit 2006

Das U.S. Department of Energy stellte im Mai 2006 die Weichen für die Entwicklung von Standards für Glühlampen, Reflektorglühlampen und Leuchtstofflampen für den allgemeinen Gebrauch. Der vereinbarte Zeitrahmen sieht eine Erstellung eines vorläufigen Entwurfs bis November 2007 und die fertige Richtlinie bis Juni 2009 vor. Diese soll 2012 in Kraft treten.

Um den Anteil der Glühlampen in Haushalten in Kuba innerhalb kurzer Zeit zu reduzieren, wurde ein Tauschprogramm gegen kompakte Leuchtstofflampen durchgeführt. Kuba war das erste Land, das ein Verkaufsverbot von Allgebrauchsglühlampen im Jahr 2007 einführte. Zehn weitere karibische Länder und Venezuela folgen diesem Beispiel und arbeiten an der Umsetzung von Richtlinien.

Auch die Lampenindustrie reagierte im Dezember 2006 auf diese Entwicklungen. Philips, der weltweit größte Lampenhersteller, hielt eine Pressekonferenz zur Zukunft der Energieeffizienz in der Beleuchtung in Brüssel ab. Der globale Ausstieg aus der Glühlampentechnologie in den nächsten 10 Jahren unter gleichen Voraussetzungen für alle Spieler am Markt wurde darin begrüßt.

Am 30. Jänner 2007 wurde der Ausstieg aus der Glühlampentechnologie in Kalifornien bis zum Jahr 2012 bekannt gegeben.

Im Februar 2007 wurde im Beisein von politischen Entscheidungsträgern und Industrie ein Workshop der Internationalen Energie Agentur und der Europäischen Kommission zum Thema „*Quality and Strategies to Phase-out Incandescent*

7. Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung bei der Beleuchtung

Lighting“ abgehalten. Weitere große Lampenproduzenten¹ gaben dort ihre Unterstützung beim Ausstieg aus dem Glühlampengeschäft bekannt.

Australien übernahm im Kampf für energieeffiziente Beleuchtung eine internationale Vorbildfunktion, als im Februar 2007 der stufenweise Ausstieg aus ineffizienten Glühlampen bekannt gegeben wurde. Laut Expertenschätzungen beträgt das Einsparpotential hinsichtlich elektrischer Beleuchtung bei Australiens Treibhausgasemissionen rund 800.000 Tonnen pro Jahr [AE01] in einem Zeitraum von 2008 bis 2012. Im Oktober 2008 traten Standards für Minimalanforderungen der Energieeffizienz von $20 \frac{\text{lm}}{\text{W}^2}$ in Kraft, die den Import von sehr ineffizienten Glühlampen verbieten. Der Verkauf dieser wird ab Oktober 2009 verboten sein. Bis 2015 werden die Energieeffizienzanforderungen schrittweise erhöht. Ab diesem Zeitpunkt sind die meisten Glühlampen³ von dieser Vorschrift betroffen [Bou07]. Die Regierung Neuseelands sicherte Australien volle Unterstützung bei der Beleuchtungspolitik zu. Entsprechende Regelungen und Gesetze werden harmonisiert.

Am 9. März 2007 rief der Rat der Europäischen Union die europäische Kommission auf, Regulierungen bezüglich der Beleuchtung mit Glühlampen bis 2009 im Rahmen der bereits bestehenden EuP-Richtlinie⁴ zu etablieren.

Am 12. März 2007 gab die britische Regierung bekannt, dass bis zum Jahr 2011 der Ausstieg aus der Glühlampentechnologie vollbracht sein soll, auch wenn das den EU-Plänen vorgreifen sollte. Dies soll sowohl mittels freiwilligen Vereinbarung mit Lampenherstellern und -verkäufern, als auch mit Zuschüssen beim Kauf hochqualitativer kompakter Leuchtstofflampen bewerkstelligt werden. Einige große Wiederverkäufer gaben bereits bekannt, keine Allgebrauchsglühlampen mehr nachzukaufen.

Die Republik Irland, Portugal, Belgien und die Niederlande kündigten an das

¹Die Mehrheit der verkauften Lampen in OECD Ländern wird von Philips, Osram-Sylvania und General Electric hergestellt.

²Dieser Wert gilt für eine Lampe mit 1200 Lumen(60W). Die genauen Anforderungen lassen sich in einer Kurve über die Lichtleistung angeben.

³Diese umfassen Allgebrauchsglühlampen in allen Ausführungsformen(auch Reflektorlampen, Warn- und Sicherheitslampen, als auch Kühlschrank- und Backrohrbeleuchtung) und Halogenglühlampen mit und ohne Reflektor für Netzspannung und in Niederspannungsausführung.

⁴Richtlinie 2005/32/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energiebetriebener Produkte (EuP)

7. Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung bei der Beleuchtung

britische System zu übernehmen.

Kanadas Bekanntmachung gesetzliche Verordnungen zur Energieeffizienz in der Beleuchtung mit dem Ziel bis 2012 keine Glühlampen mehr am Markt zuzulassen, erfolgte im April 2007. Der Standard wurde ähnlich zur australischen Vereinbarung angekündigt. Dieser definiert die minimale Energieeffizienz von Lampen mittels einer über die Lichtleistung aufgetragenen Effizienzkurve⁵. Der Standard erfordert etwa eine 50% Verbesserung der Effizienz gegenüber existierenden Allgebrauchsglühlampen. Weiters sieht er eine zweite Phase vor, in der ab 2015 die Anforderungen weiter erhöht werden.

Am 5. Juni 2007 veröffentlichte die Vereinigung europäischer Lampenhersteller⁶ eine freiwillige Ankündigung zum Ausstieg aus der Glühlampentechnologie. Sie sieht vor, dass 85% des 2,1 Milliarden Lampen umfassenden traditionellen Glühlampenmarkts der EU bis zum Jahr 2015 neue Effizienzstandards erfüllen muss. Dieses Ziel soll durch eine stufenweise Einführung von Effizienzanforderungen erfolgen. Diese freiwillige Vereinbarung soll bei der Erarbeitung der EU-Richtlinien bis spätestens zum Jahr 2009 berücksichtigt werden.

Der Schweizer Energieeffizienzaktionsplan wurde im August 2007 veröffentlicht. Dieser fordert ein Verkaufsverbot von Glühlampen, die weniger als Energieeffizienzklasse E⁷ ab 2008 aufweisen.

Im September 2007 hielt der US Senat eine Anhörung zum Thema Beleuchtung ab. Die Forderungen umfassten einen minimalen Energieeffizienzstandard für Lampen mit Schraubgewinde, der etwa 28% Effizienzsteigerung zu heutigen Standardglühlampen im Zeitraum 2012 bis 2014 fordert. Ab 2020 ist eine Energieeffizienzgrenze von $45 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ für alle Lampen mit Schraubgewinde vorgesehen. Beide Forderungen wurden bereits im Senat bestätigt.

Auch Staaten, die nicht der OECD angehören, reagierten auf die internationalen Entwicklungen. Thailand und Ghana kündigten Programme zum Ausstieg aus der Glühlampentechnologie an. Ägypten, Indien, Indonesien, Südafrika und Vietnam verstärkten nationale Förderprogramme für kompakte Leuchtstoffröhren. Weitere Länder, wie Brasilien und Mexiko, initiierten ebenfalls erfolgreich

⁵Lampen mit niedrigeren Lichtleistungen haben im Regelfall niedrigere Effizienzen.

⁶ELC FED: European Lamp Companies Federation

⁷Energieeffizienzklasse E der Energieeffizienzbezeichnung der EU schreibt eine Mindesteffizienz von $11,2 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ für eine Lampe mit 750lm vor.

7. Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung bei der Beleuchtung

groß angelegte Förderprogramme.

Auch China hat die Wichtigkeit der Energieeffizienz in der Beleuchtung erkannt und prüft Schritte in Richtung eines Verbots von Glühlampen. [Wai07]

7.2. Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung bei Beleuchtung in der EU

In der EU gibt es mehrere Richtlinien und Programme, die direkt oder indirekt auf die Energieeffizienz von Beleuchtung einwirken. Diese werden in den folgenden Abschnitten charakterisiert.

7.2.1. Gebäuderichtlinie

Am 16. Dezember 2002 wurde die RICHTLINIE 2002/91/EG über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden des europäischen Parlaments und des Rates beschlossen. Das Ziel dieser Richtlinie ist es, die Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden in der Gemeinschaft unter Berücksichtigung der jeweiligen äußeren klimatischen und lokalen Bedingungen sowie der Anforderungen an das Innenraumklima und der Kostenwirksamkeit zu erzielen. In der Richtlinie bezeichnet der Ausdruck „Gesamtenergieeffizienz eines Gebäudes“ die Energiemenge, die tatsächlich verbraucht oder veranschlagt wird, um den unterschiedlichen Erfordernissen im Rahmen der Standardnutzung des Gebäudes (u. a. etwa Heizung, Warmwasserbereitung, Kühlung, Lüftung und Beleuchtung) gerecht zu werden [Das03a].

In dieser Richtlinie wird das Thema Beleuchtung nicht explizit behandelt. Sie wirkt sich bei Neubau oder Renovierung eines Gebäudes durch Anforderungen an die Gesamtenergieeffizienz jedoch auch auf die Wahl des Beleuchtungssystems aus.

7.2.2. Umweltrichtlinien

In einigen Lampentypen werden Schwermetalle aus technologischen Gründen (siehe Kapitel 3) eingesetzt. Deshalb wurden Richtlinien zur Beschränkung der einge-

7. Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung bei der Beleuchtung

setzten Mengen, als auch zur Entsorgung der Lampen erlassen.

Richtlinie 2002/95/EG zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (WEEE)

Die Richtlinie beschränkt die in Lampen eingesetzten Quecksilbermengen [Das03b].

- Quecksilber in kompakten Leuchtstofflampen in einer Höchstmenge von 5mg je Lampe
- Quecksilber in stabförmigen Leuchtstofflampen für allgemeine Verwendungszwecke in folgenden Höchstmengen:
 - 10 mg in Halophosphatleuchtstofflampen
 - 5 mg in Triphosphatleuchtstofflampen mit normaler Lebensdauer
 - 8 mg in Triphosphatleuchtstofflampen mit langer Lebensdauer

Richtlinie 2002/96/EC über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (RoHS)

Diese Richtlinie zielt darauf ab, gefährliche Stoffe im Abfall zu reduzieren. Sie ist seit dem 13. August 2005 wirksam und soll helfen, Abfall generell zu vermeiden, ihn wieder zu verwerten und sicher zu entsorgen. Sie gilt unter anderem für alle Gasentladungslampen, Leuchtstofflampen, Leuchten (außer denen, die im privaten Haushalt eingesetzt werden) einschließlich Vorschaltgeräte, die zum Zeitpunkt der Entsorgung Bestandteil einer Leuchte sind. Bei Gasentladungslampen ist eine Wiederverwendungs- und Recyclingquote für Bauteile, Werkstoffe und Stoffe von mindestens 80% des Gewichts der Lampen zu erreichen [Das03c]. Betroffene Produkte sind mit dem Symbol der „durchgestrichenen Abfalltonne auf Rädern“ gekennzeichnet.

Auflistung der Produkte, die im Sinne dieser Richtlinie zu berücksichtigen sind:

- Leuchten für Leuchtstofflampen mit Ausnahme von Leuchten in Haushalten
- Stabförmige Leuchtstofflampen
- Kompaktleuchtstofflampen

7. Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung bei der Beleuchtung

- Entladungslampen, einschließlich Hochdruck-Natriumdampflampen und Metaldampflampen
- Niederdruck-Natriumdampflampen
- Sonstige Beleuchtungskörper oder Geräte für die Ausbreitung oder Steuerung von Licht mit Ausnahme von Glühlampen

7.2.3. Energieeffizienzanforderungen

Minimale Energieeffizienzanforderungen für Lampen und deren Vorschaltgeräte gesetzlich festzuschreiben ist einer der wichtigsten Schritte zu Energieeffizienter Beleuchtung.

Richtlinie 2000/55/EG über Energieeffizienzanforderungen an Vorschaltgeräte für Leuchtstofflampen

Mit dieser Richtlinie soll der Energieverbrauch von Vorschaltgeräten für Leuchtstofflampen gesenkt werden, und zwar durch einen schrittweisen Übergang von den weniger effizienten zu den effizienteren Vorschaltgeräten, die außerdem weit reichende Energiesparfunktionen, wie beispielsweise Dimmen, aufweisen können [Das00]. Gemäß der Richtlinie dürfen bestimmte Grenzwerte der Gesamtleistungsaufnahme bei im Handel befindlichen Vorschaltgeräten nicht überschritten werden.

Richtlinie 2005/32/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energiebetriebener Produkte (EuP)

Im Rahmen der EuP-Richtlinie wird im Moment an einer vorbereitenden Studie zu Haushaltsbeleuchtung gearbeitet. Die Endberichte der vorbereitenden Studien zu Straßen- und Bürobeleuchtung liegen bereits vor. In allen Sektoren sollen Mindestanforderungen an neu installierte Beleuchtungssysteme bzw. Lampen gestellt werden. Die für den Käufer ersichtlichen und verfügbaren Daten sollen verbessert und standardisiert werden. In weiterer Folge wird nur auf den Haushaltssektor genauer eingegangen.

7. Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung bei der Beleuchtung

Im Vorfeld zur vorbereitenden Studie zu Haushaltsbeleuchtung wurde von der European Lamp Companies(ELC) Federation ein Plan zum stufenweisen Ausstieg aus der Glühlampentechnologie veröffentlicht. Dieser sieht ein Verkaufsverbot von Lampen mit einer Leistung über 100W mit den Energieeffizienzklassen E, F und G für das Jahr 2009 vor. Bis zum Jahr 2017 sollen verkaufte Lampen über 25W mindestens Energieeffizienzklasse C aufweisen (siehe Abbildung 7.2). Je nach Leistung der Lampen entspricht das verschiedenen Effizienzwerten(siehe Abbildung 7.1).

Lamp Category	Phase 1 2009	Phase 2 2011	Phase 3 2013	Phase 4 2015	Phase 4+ 2017
>100W	ABCD EFG	ABC DEF			
75W+		ABCD EFG	ABC DEF		
60W+			ABCD EFG	ABC DEF	
25W+				ABCD EFG	ABC DEF

Abbildung 7.1.: Plan der European Lamp Companies Federation zur stufenweisen Verbesserung der Energieeffizienz bei Beleuchtung. Der Verkauf von Lampen, die die rot gestrichenen Energieeffizienzklassen aufweisen, soll ab dem jeweiligen Jahr verboten werden. Quelle: [ELC07b]

Lamp Category	Phase 1 2009	Phase 2 2011	Phase 3 2013	Phase 4 2015	Phase 4+ 2017
>100W	18 lm/W	20 lm/W			
100W		14 lm/W	17 lm/W		
75W		14 lm/W	16 lm/W		
60W			13 lm/W	15 lm/W	
40W				11 lm/W	14 lm/W
25W				10 lm/W	12 lm/W

Abbildung 7.2.: Plan der European Lamp Companies Federation zur stufenweisen Verbesserung der Energieeffizienz bei Beleuchtung. In jeder Phase werden für die verschiedenen Lampenkategorien jeweils Mindestanforderungen der Energieeffizienz gefordert. Quelle: [ELC07b]

7. Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung bei der Beleuchtung

Im Rahmen der EuP-Richtlinie soll von der Klassifizierung in Energieeffizienzklassen von Lampen mit A bis G auf eine zahlenbasierte Kennzeichnung übergegangen werden. Dies ist nötig, da der Schritt von Klasse A zu B zu groß ist. Außerdem sind mittlerweile Lampen am Markt erhältlich, die Effizienzklasse A bei weitem übertreffen. Abbildung 7.3 zeigt die neu definierten Lampeneffizienzklassen. In Abbildung 7.4 ist ein Vergleich der Effizienzklassen dargestellt. Zu jeder neuen Klasse wird jeweils ein Lampenbeispiel angeführt.

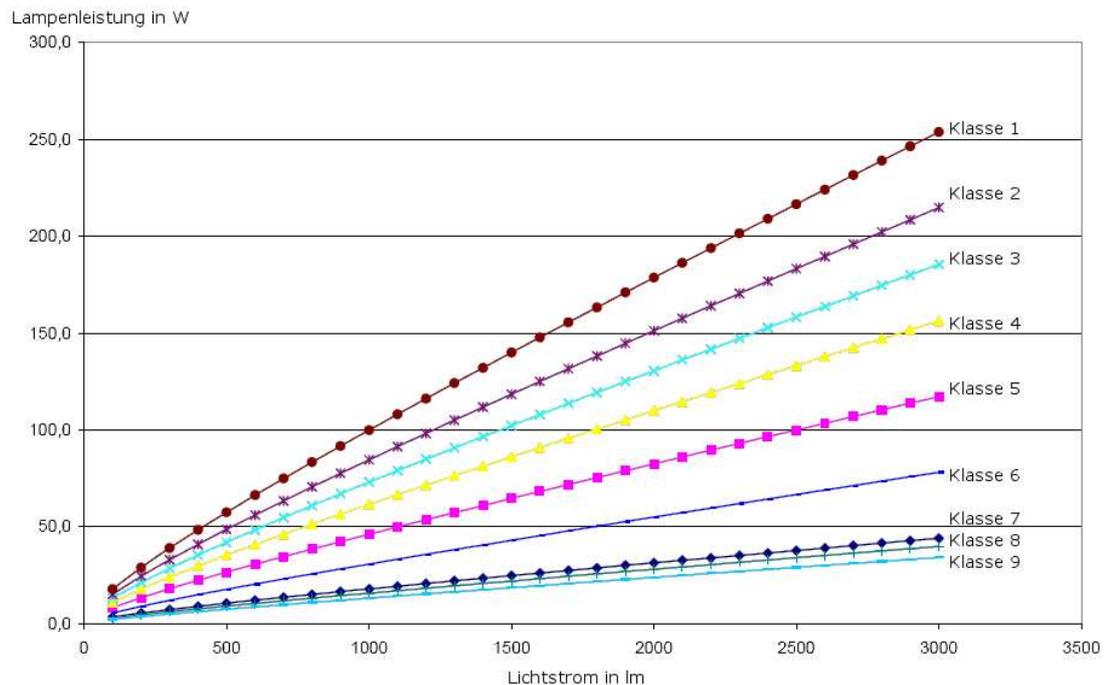


Abbildung 7.3.: Neu definierte Energieeffizienzklassen für Lampen. Quelle: [VT08c]

Die vorbereitende Studie der EuP-Richtlinie über Haushaltsbeleuchtung sieht eine auf den Plan der European Lamp Companies Federation gestützte Umsetzung von Minimalanforderungen der Energieeffizienz bei Lampen vor. Diese soll im Wesentlichen⁸ alle Lampen am EU-Markt einschließen, unabhängig von Lampentechnologie und Verwendungszweck. Ein erster Entwurf der vorbereitenden

⁸Ausgenommen sind Lampen, die weniger als 100lm Licht geben und Hochvolt-Halogenlampen mit R7 Sockel und Leistungen im Bereich von 150W bis 300W. Erstere werden für Allgemeinbeleuchtung nicht eingesetzt, da sie zu wenig Licht geben. Für Hochvolt-Halogenlampen mit R7 Sockel in diesem Leistungsbereich existieren im Moment keine zufrieden stellenden Alternativen. Hier soll die beste am Markt verfügbare Technologie den Effizienzstandard vorgeben. Dies entspricht im Moment der Klasse 4.

7. Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung bei der Beleuchtung

Neue Effizienzklasse	Alte Effizienzklasse	Lampenbeispiel
1	F	Glühlampe
2	E	Hochvolt-Halogenglühlampe
3	D	Hochvolt-Halogenglühlampe
4	C	Niedervolt-Halogenglühlampe
5	B	Niedervolt-Halogenglühlampe ^a
6	B	Kompakte Leuchtstofflampe ^b
7	A	Kompakte Leuchtstofflampe ^c
8	A	Kompakte Leuchtstofflampe ^d
9	A	Leuchtstofflampe ^e
10	A	bisher nicht am Markt

^amit infrarot-reflektierender Beschichtung

^bmit elektromagnetischem Vorschaltgerät

^cmit integriertem elektronischem Vorschaltgerät

^dmit externem elektronischem Vorschaltgerät

^ebeste im Moment am Markt erhältliche Technologie

Abbildung 7.4.: Gegenüberstellung der alten und der neuen Effizienzklassen für Lampen

Studie sieht eine zeitliche Unterteilung von 3 Phasen vor. Die ersten Effizienzanforderungen für verkaufte Lampen sollen 2009 in Kraft treten. Die weiteren Schritte sind für 2011 und 2013 geplant, wie in Abbildung 7.5 zu sehen ist.

	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Inkrafttreten	2009	2011	2013
Lichtstrom in lm	minimale Effizienzklasse ^a		
bis 450	2	3	6 (5)
450 - 1000	4	5	7 (5)
ab 1000	6	7 (6)	6 (6)

^aDie Werte in Klammern sind die minimalen Effizienzanforderungen für Lampen die bestimmte Kriterien, wie zum Beispiel exzellente Farbwiedergabe, erfüllen.

Abbildung 7.5.: Phasenplan zur Einführung von Mindesteffizienzanforderungen für Lampen. Quelle: [VT08c]

Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Richtlinie ist das Setzen von Qualitätsstandards. Es sollen sowohl die minimale Lebensdauer, als auch der Lichtstrom-

7. Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung bei der Beleuchtung

rückgang über die Lebensdauer reglementiert werden. Weiters werden Vorgaben über die Start- und Einschaltzeiten gemacht. Der Quecksilbergehalt darf je nach Lampenlebensdauer gewisse Grenzwerte nicht überschreiten. Die für den Kunden am Verkaufsort verfügbaren Informationen sind ebenfalls zu verbessern. Dies soll im Rahmen der Richtlinie 98/11/EG Energieetikettierung für Haushaltslampen (siehe Kapitel 7.2.4) geschehen.

Die Umsetzung dieser Richtlinie erfolgt auf nationaler Ebene durch Energieeffizienzaktionspläne. Diese befassen sich mit Energieeffizienz in allen Bereichen. Eine erste Begutachtung der Energieeffizienzaktionspläne durch die europäische Kommission ergab sehr große nationale Unterschiede, die von sehr ambitionierten Maßnahmen bis hin zu einer im Grunde gleich bleibenden Politik, jede Schattierung aufwies [Kom08]. Der 1. Energieeffizienzaktionsplan der Republik Österreich vom Juni 2007 [Aus07] sieht schon einige Maßnahmen zum Thema Beleuchtung vor, so soll zum Beispiel der öffentliche Sektor eine Vorbildfunktion übernehmen⁹. Die vorbereitenden Studien der EuP-Richtlinie zu Straßen-, Büro- und Haushaltsbeleuchtung konnten in diesem Plan nicht berücksichtigt werden, da sie zu diesem Zeitpunkt erst in der Entstehung begriffen waren.

7.2.4. Kennzeichnung

Eine einheitliche und übersichtliche Kennzeichnung der wichtigsten Lampendaten ist von entscheidender Wichtigkeit für die Verbreitung von effizienter Beleuchtung [Zis07]. Aus diesem Grund wurde schon 1998 eine dementsprechende Richtlinie erlassen, die 2001 in österreichisches Recht umgesetzt wurde. Darüber hinaus gibt es die Möglichkeit der freiwilligen Kennzeichnung mit einem EU-weiten Umweltlabel oder verschiedenen nationalen Labels, die hier jedoch nicht aufgeführt werden.

Richtlinie 98/11/EG zur Energieetikettierung für Haushaltslampen

Die Richtlinie 98/11/EG zur Energieetikettierung für Haushaltslampen schreibt sowohl den Inhalt als auch die Form des Energielabels für Lampen vor (siehe Abbildung 7.6). Es müssen die Energieeffizienzklasse, der Lichtstrom, die Leistung

⁹Die Vorbildfunktion des öffentlichen Sektors in allen Bereichen der Energieeffizienz wurde im 1. Energieeffizienzaktionsplan der Republik Österreich stark betont.

7. Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung bei der Beleuchtung

und die Lebensdauer der Lampe auf der Verpackung aufgeführt werden. Ausgenommen von dieser Kennzeichnungspflicht sind Niedervolt-Halogenlampen und Reflektorlampen.

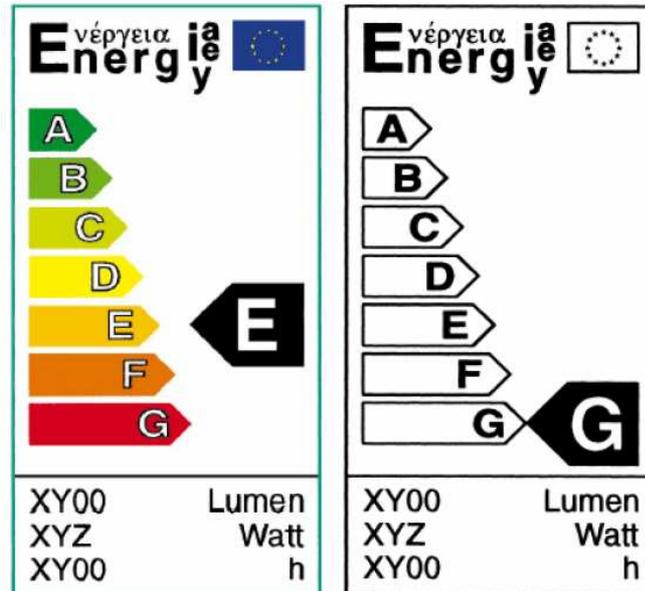


Abbildung 7.6.: Energielabel für Lampen. Quelle: [Ber07a]

Die EU-weite Kennzeichnungspflicht soll im Rahmen der EuP-Richtlinie auf alle Lampentechnologien und um viele Informationen erweitert werden.

Das neuen Lampenlabel soll diese Informationen enthalten:

- Lampenleistung
- Lichtstrom
- Lebensdauer
- Energieklasse
- Farbwiedergabeindex
- entsprechende Glühlampenleistung¹⁰

¹⁰Die entsprechende Leistung einer Glühlampe mit Klarglaskolben muss für alle Lampen angegeben werden.

7. Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung bei der Beleuchtung

- Startzeit
- Anlaufzeit zu einem Lichtstrom von 80%
- Quecksilbergehalt
- Anweisungen über die richtige Vorgehensweise bei Zubruchgehen der Lampe für Lampe die Quecksilber enthalten
- Lichtstrom am Ende der Lampenlebensdauer
- Entsorgungsvorschriften

Euroblume

Glühlampen können dieses Qualitäts- und Umweltlabel nicht erlangen, da sie nicht ausreichend energieeffizient sind. Die Kennzeichnung von Energiesparlampen mit der Euroblume (siehe Abbildung 7.7) ist bisher nur wenig verbreitet.



Abbildung 7.7.: Die Euroblume ist ein Qualitäts- und Umweltlabel für Lampen.
Quelle: [Eco07]

Eine Auszeichnung mit der Euroblume erfordert folgende Kriterien:

- Energieeffizienzklasse A (bzw. B für Lampen mit Stiftsockel)
- Lebensdauer von mindestens
 - 10.000 Stunden (Lampen mit Stiftsockel, Kompaktleuchtstofflampen)
 - 12.500 bzw. 20.000 Stunden (beidseitig gesockelte Lampen mit normaler bzw. langer Lebensdauer)

7. Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung bei der Beleuchtung

- Lichtstrom von mindestens
 - 70% bzw. 80% des Anfangswertes bei 10.000 Betriebsstunden (Lampen mit Stiftsockel bzw. Kompaktleuchtstofflampen)
 - 90% bei 12.500 bzw. 20.000 Betriebsstunden (beidseitig gesockelte Lampen mit normaler bzw. langer Lebensdauer)
- Quecksilbergehalt von maximal
 - 4,0 mg (Lampen mit Stiftsockel, Kompaktleuchtstofflampen)
 - 5,0 mg bzw. 8,0 mg (beidseitig gesockelte Lampen mit normaler bzw. langer Lebensdauer)
- Farbwiedergabeindex von mindestens $R_a=80$
- Verbot bestimmter Stoffe in Kunststoffteilen ab 5 g (z.B. flammhemmende Substanzen, als krebserzeugend eingestufte Stoffe)
- Verpackung ohne Lamine und Verbundkunststoffe
- Produktinformation inklusive Hinweise zur umweltfreundlichen Verwendung (z.B. Umweltfreundlichkeit durch elektronisches Hochfrequenzvorschaltgerät optimierbar).

CFL Quality Charter

Die European Quality Charter für Energiesparlampen ist 1998 auf Initiative der Europäischen Kommission und Eurelectric entwickelt worden. Die CFL Quality Charter soll einen hohen Qualitätsstandard von Energiesparlampen gewährleisten und bei den Kunden das Vertrauen in diese umweltfreundliche Technologie steigern. Die CFL Quality Charter ist eine Zusammenstellung von Kriterien, die von der Europäischen Kommission in Zusammenarbeit mit privaten und öffentlichen Organisationen erarbeitet wurde.

Um eine Auszeichnung mit der CFL Quality Charter zu erhalten, müssen erhöhte Ansprüche in folgenden Kategorien erfüllt werden:

- Sicherheit
- Energieeffizienz (Klasse A)

7. Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung bei der Beleuchtung



Abbildung 7.8.: Die CFL Quality Charter ist ein Qualitätslabel für Lampen. Quelle: [Ber07a]

- Alterung (Die Lichtleistung nach 2.000 Stunden muss mindestens 88% der Anfangsleistung betragen.)
- Startvorgang (60% der maximalen Lichtausbeute müssen nach 60 Sekunden erreicht werden.)
- Schaltfestigkeit (Die Anzahl der Schaltvorgänge muss mindestens der Lebensdauer in Stunden entsprechen.)
- Farbwiedergabe (Farbwiedergabeindex mindestens $R_a=80$)
- Lebensdauer (mindestens 6.000 Stunden)

7.2.5. Initiativen und Förderprogramme

Auf nationaler Ebene gibt es zahlreiche Förderprogramme für energieeffiziente Beleuchtung. Diese richten sich meist an Haushalte und kleine und mittlere Unternehmen. Meist wird ein Umstieg von Glühbirnen zu kompakten Leuchtstofflampen angestrebt. Ein Erfolg dieser Programme ist schwer messbar.

Auf EU Ebene gibt es einen Design-Wettbewerb für energieeffiziente Leuchten. „Lights of the Future“ findet jährlich statt und kürt in mehreren Kategorien, von Studentenprojekten bis hin zu professionellen Designs von Lampen- und Leuchtenherstellern, innovative und effiziente Leuchten.

8. Zukunftsperspektiven für Energieverbrauch und Steigerung der Effizienz der Beleuchtung

Die Zukunft der Beleuchtung ist schwer vorherzusagen. Einerseits liegen sehr wenige Informationen zum aktuellen Beleuchtungsstand vor und andererseits ist der Markt gerade im Umbruch. Das Auftauchen neuer Technologien für die Allgemeinbeleuchtung und das politische Interesse lassen Hoffnung für effiziente Beleuchtung aufkommen. Dieses Kapitel wagt einen Ausblick auf Beleuchtung in Österreichs Haushalten im Jahr 2015 und widmet sich zukunftssträchtigen Technologien.

8.1. Österreich

Die hier durchgeführte Analyse des Österreichischen Haushaltsbeleuchtungsmarktes identifizierte das öffentliche Interesse als ein Haupthindernis für effiziente Beleuchtung (siehe Kapitel 6.2). Zur Jahreswende von 2006 auf 2007 wurde die Aufmerksamkeit international auf das Thema Beleuchtung fokussiert (siehe Kapitel 7.1). Diese Tatsache spiegelt sich in den Lampenverkaufsdaten mit einem Rückgang von Glühlampen und einem Anstieg von kompakten Leuchtstofflampen wider.

Der Trend lässt eine klassische Substitution der alten durch die neuere Technologie vermuten. Dies wurde zur Erstellung eines Modells herangezogen. Die folgenden vier Szenarien stellen eine logistische Substitution von Glühlampen durch kompakte Leuchtstofflampen dar, wobei die Geschwindigkeit dieser Markttransformation durch den Parameter „Öffentliches Interesse“ variiert wird. Der Anteil an Halogenglühlampen wurde als gleichmäßig wachsend, beruhend auf den Daten der letzten acht Jahre, angenommen. Der Marktanteil von Leuchtstofflampen wurde konstant beibehalten. Leuchtdioden spielen aufgrund der trägen Marktentwicklung nur eine untergeordnete Rolle. Ein Anstieg der momentanen 0,2% auf 1% der verkauften Lampen bis zum Jahr 2015 wurde hier modelliert.

8. Zukunftsperspektiven für Energieverbrauch und Steigerung der Effizienz der Beleuchtung

8.1.1. Szenario BAU 06

Dieses Szenario stützt sich auf Lampenverkaufsdaten der Jahre 2001 bis 2006. Der Umbruch am Ende des Jahres 2006 wurde hier nicht berücksichtigt. Es stellt somit ein „Business as usual“ Szenario ohne öffentliches Interesse dar. Es zeigt einen möglichen Entwicklungspfad des Marktes unter der Annahme, dass keine gesetzlichen Maßnahmen umgesetzt werden. Außerdem wird angenommen, dass sich das Interesse an effizienter Beleuchtung wieder legt.

8.1.2. Szenario BAU 07

Dieses Szenario bezieht die Lampenverkäufe im Jahr 2007 mit ein. Es stellt daher ein „Business as usual“ Szenario mit öffentlichem Interesse dar. Es werden keine gesetzlichen Maßnahmen getroffen.

8.1.3. Szenario Amb 80

Die gesetzliche Umsetzung von Maßnahmen zur Effizienzsteigerung bei Beleuchtung in Österreichischen Haushalten ist eine Grundvoraussetzung für dieses ambitionierte Szenario. Die hier getroffene Annahme sieht eine 80% Substitution von Glühlampen durch kompakte Leuchtstofflampen im Jahr 2015 vor.

8.1.4. Szenario Amb 95

Dieses Szenario folgt dem Plan der European Lamp Companies Federation. Bis zum Jahr 2015 soll hiermit ein der Verkauf der heute erhältlichen Glühlampen verboten werden. Die getroffene Annahme unterstellt eine Substitution von Glühlampen durch kompakte Leuchtstofflampen zu 95%.

8.1.5. Ergebnisse der Analyse

Abbildung 8.1 zeigt die Entwicklung des Österreichischen Lampenmarkts bis 2015 der vier Szenarien. Die Bandbreite der Szenarien ist sehr groß und reicht von einem Marktanteil für Glühlampen im Jahr 2015 von 3,7% für Amb95 bis zu

8. Zukunftsperspektiven für Energieverbrauch und Steigerung der Effizienz der Beleuchtung

58,5% für BAU06. Die beiden ambitionierten Szenarien, Amb80 und Amb95, gehen ebenso wie die beiden BAU Szenarien von einem stetigen Anstieg der Halogenleuchtstofflampen aus.

Eine denkbare Entwicklung wäre jedoch eine stärkere Verbreitung der Halogenleuchtstofflampe im Zuge von minimalen Effizienzstandards. Diese Möglichkeit wird hier nicht berücksichtigt, da hierfür keinerlei Erfahrungswerte vorliegen.

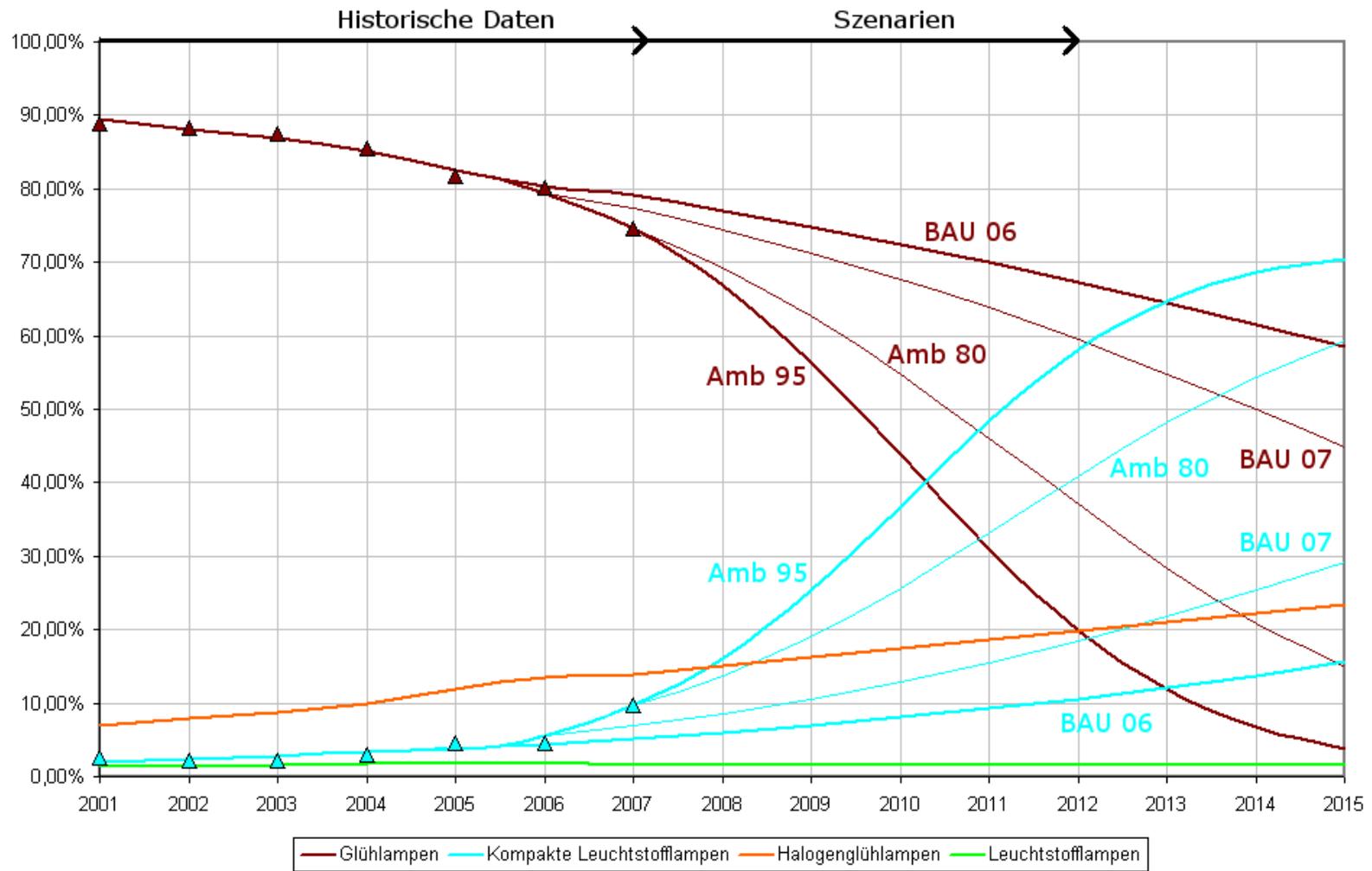


Abbildung 8.1.: Szenarien: Anteile verschiedener Technologien am Österreichischen Lampenmarkt bis zum Jahr 2015

8.2. Zukunftsweisende Technologien

Leuchtdioden und organische Leuchtdioden werden in Fachkreisen seit einiger Zeit als die Zukunft der Beleuchtung gehandelt. Die Technologie und die dahinter stehende Industrie haben davor jedoch noch einige Hindernisse zu überwinden.

Die theoretischen Grenzen der Energieeffizienz von elektrischer Beleuchtung liegen bei $348 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ für eine perfekte kaltweiße Lichtquelle und bei $683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ für monochromatisches gelb-grünes Licht [VT08b].

8.2.1. Leuchtdioden

Fehlende Standards zur Messung und Kennzeichnung von LEDs machen vergleiche zwischen verschiedenen Herstellern so gut wie unmöglich. Dies stellt für Leuchten- und Lampendesigner ein großes Problem dar. Die Farbeigenschaften von weißen Leuchtdioden stellen die Entwickler im Herstellungsprozess noch vor viel Arbeit. Es lassen sich zwar weiße LEDs mit guter Farbwiedergabe erzeugen, aber je besser das abgestrahlte Licht wird, desto schlechter mehr geht die Effizienz zurück. Es gibt außerdem eine große Streuung der Farbeigenschaften innerhalb des gleichen Herstellungsprozesses. Weiters verändert sich die Farbtemperatur der Leuchtdiode über die Lebensdauer.

Diese Probleme stellen für Nischenmärkte, wie die Hintergrundbeleuchtung von Bildschirmen, Signalleuchten für den Straßenverkehr, Betonung von Gebäudecharakteristika und Autobeleuchtung, keine Barrieren dar. Hier zählen hauptsächlich die geringen Wartungsanforderungen und hohen Lebensdauern. Auch in der Straßenbeleuchtung ist eine Anwendung denkbar. Lichtverschmutzung kann sich durch die gute Lenkbarkeit des ausgestrahlten Lichts auf ein Minimum reduzieren lassen. Obwohl LEDs noch geringere Effizienz aufweisen als andere in der Straßenbeleuchtung eingesetzte Technologien, können durch intelligentes Lichtmanagement hiermit Einsparungen erzielt werden. Stufenlose Dimmbarkeit, das Fehlen von Start-, Einschalt- und Abkühlzeiten machen dies möglich. Die sehr hohen Lebensdauern reduzieren Wartungsarbeiten und somit den Preis des Beleuchtungssystems. Dieser ist dennoch eine sehr große Einstiegsbarriere in diese Technologie.

Leuchtdioden bieten ein großes Potential als Ersatz von treibstoffbetriebenen

8. Zukunftsperspektiven für Energieverbrauch und Steigerung der Effizienz der Beleuchtung

Lampen, wie Öllampen. Sie geben besseres Licht bei geringeren Kosten für die Nutzer. Verschiedene Projekte engagieren sich in Dritt-Welt-Ländern um LED-Beleuchtung nachhaltig zu verbreiten. Die für den Betrieb nötige Energie wird mit regenerativen Energiequellen, wie zum Beispiel Kleinwasserkraft¹ oder Photovoltaik², generiert.

In der Allgemeinbeleuchtung werden Leuchtdioden in Zukunft mit Sicherheit eine Rolle spielen. Realistisch betrachtet werden diese Lampen in einigen Jahren an die Effizienz der besten heute verfügbaren Technologien herankommen (siehe Abbildung 8.2). Die Probleme liegen dann noch im hohen Anschaffungspreis und in der sehr langsamen Markttransformation. Die prognostizierte Effizienz für weiße LED-Leuchtmittel reicht bis $200 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ [Poh07] und liegt somit über allen heute verfügbaren Technologien, wann diese erreicht wird ist jedoch fraglich.

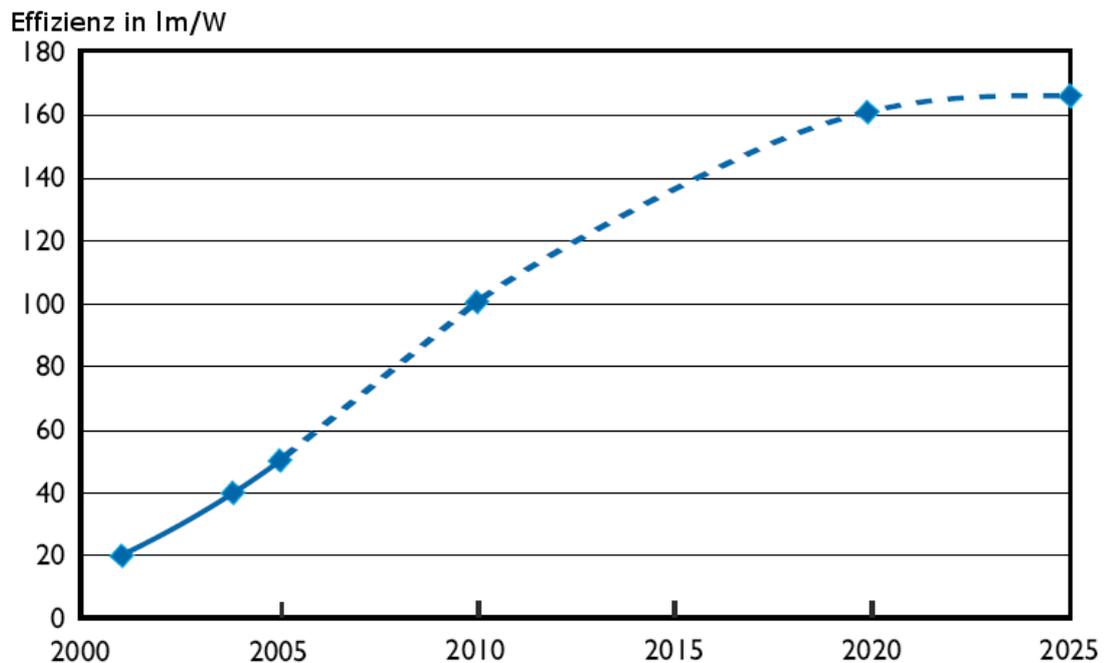


Abbildung 8.2.: Entwicklung der Effizienz von kommerziell erhältlichen Leuchtdioden. Quelle: [Int06]

Als dekorative Lichtquellen findet man schon heute so manche LED in Österreichs Haushalten. Ein Ersatz von Niedervolt-Halogenglühlampen ist durch heute

¹z.B.: in Nepal

²meist in Äquator-Nähe

8. Zukunftsperspektiven für Energieverbrauch und Steigerung der Effizienz der Beleuchtung

im Handel erhältliche LED-Lampen möglich. Die Probleme bestehen jedoch noch im sehr hohen Kaufpreis und in der geringen Lichtausbeute. Zukünftige Standards und Richtlinien können hier für bessere Vergleichbarkeit sorgen.

8.2.2. Organische Leuchtdioden

Die Entwicklung der organischen Leuchtdioden verläuft rasend schnell. Sie stellen flächige Lichtquellen dar und werden zukünftig vielfältig einsetzbar sein. Wir stehen allerdings heute einer Technologie gegenüber die noch in den Kinderschuhen steckt. In Nischenmärkten, wie bei Bildschirmen von Mobiltelefonen, finden sich die ersten kleinen kommerziellen Anwendungen.

Die heutige Effizienz von maximal $64 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ [VT08b] unter Laborbedingungen ist noch zu niedrig für die Allgemeinbeleuchtung und der Preis liegt weit über anderen Technologien. Auch Themen wie Farbtemperatur und Farbwiedergabe erfordern noch einiges an Entwicklungsarbeit.

Erste architektonische Anwendungen von organischen Leuchtdioden werden vermutlich in fünf bis zehn Jahren in der Gebäudebeleuchtung auftauchen [Poh07]. Auch ein Einzug in heimische Wohnzimmer wäre durchaus attraktiv, da sich enorme gestalterische Möglichkeiten, wie zum Beispiel Fototapeten, bieten. Wann dies passiert, ist im Moment aber noch nicht abschätzbar.

9. Schlussfolgerungen

Die in dieser Arbeit durchgeführte Analyse verschiedener Lichterzeugungstechnologien zeigt die Diversität des Beleuchtungssektors. Je nach Anwendung werden verschiedene Lampen eingesetzt, die sehr oft nicht dem aktuellen Stand der Technik entsprechen.

Daten zu installierten Lampentypen und deren Leistungen wurden für Österreich bisher nicht erfasst, was eine Abschätzung der aktuellen Beleuchtungsstruktur sehr schwierig macht. Eine auf Lampenverkaufsdaten basierende Analyse der im Moment in österreichischen Haushalten installierten Lampen wurde im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt. Hier zeigt sich, dass Glühlampen, obwohl sie energetisch, ökologisch und wirtschaftlich keine optimale Lösung darstellen, die meist verbreitete Beleuchtungstechnologie im Haushaltssektor sind. Ein EU-weiter Vergleich der aktuell installierten Lampen bekräftigt dieses Ergebnis.

Kompakte Leuchtstofflampen, auch Energiesparlampen genannt, stellen eine praktikable Alternative zu Glühlampen für Haushalts- und Dienstleistungssektor dar. Betrachtet man den gesamten Lebenszyklus der Lampen, so ermöglicht eine Substitution Energieeinsparungen von über 75% bei gleicher Lichtleistung. Eine Analyse von ökologischen Aspekten, wie dem viel diskutierten Quecksilbergehalt von kompakten Leuchtstofflampen, zeigt auch in diesem Gebiet eine deutliche Überlegenheit gegenüber Glühlampen, sofern die CFLs nach ihrer Lebensdauer einem Recyclingprozess zugeführt werden. Ist dies nicht der Fall, so halten sich die Quecksilberemissionen von Glühlampen und kompakten Leuchtstofflampen, die sowohl durch die Stromerzeugung¹ für den Betrieb als auch durch das technisch notwendige in Leuchtstofflampen enthaltene Quecksilber erzeugt werden, die Waage. Wirtschaftlich schneiden Energiesparlampen ebenfalls besser ab. Sie weisen nur 27% der auf Lebensdauer und Lichtausbeute bezogenen Lebenszykluskosten von Allgebrauchsglühlampen auf. Investitionen in energieeffiziente Beleuchtung haben in der Regel sehr kurze Amortisationszeiten und

¹berechnet mit einem EU-27 Strommix

9. Schlussfolgerungen

bieten sowohl eine Verbesserung der Beleuchtungsqualität, als auch reduzierten Energieverbrauch.

Die noch immer sehr weit reichende Verbreitung von ineffizienten Lichttechnologien begründet sich einerseits auf einer historisch gewachsenen Leuchteninfrastruktur. Andererseits liegen einige gravierende Markthindernisse vor. Mangelndes Interesse von Entscheidungsträgern und Vorurteile gegenüber einigen Technologien verzögern eine Markttransformation. Auch Qualitätsmängel, wie geringe Lebensdauern oder niedriger Lichtstrom bei Billigprodukten, und schlechte Produktkennzeichnung sind der Verbreitung von effizienten Lampen nicht zuträglich. Die natürliche Entwicklung des Beleuchtungsmarktes geht sehr langsam von statten, da es sich hauptsächlich um einen Ersatzteilemarkt handelt. Gesetzliche Maßnahmen sind unumgänglich, um eine Markttransformation zu Gunsten energieeffizienter Technologien in absehbarer Zeit herbei zu führen. Nationale Anstrengungen und Förderprogramme haben hier nur einen begrenzten Einflussbereich, weswegen EU-weite Richtlinien nötig und bereits in Vorbereitung sind. Diese Maßnahmen sollen in den Sektoren Haushalt und Büro zu einer Markttransformation zu Gunsten von energieeffizienter Beleuchtung führen. Stufenweise Verkaufsverbote für Lampen mit sehr niedriger Effizienz sind in der EU in den nächsten fünf Jahren geplant.

Neue Technologien, wie Leuchtdioden, haben sich in Nischenmärkten schon einen festen Platz erobert. In den Bereich der Allgemeinbeleuchtung dringen sie jedoch nur langsam vor, da sie momentan sowohl im Hinblick auf Energieeffizienz, als auch in wirtschaftlicher Sicht noch nicht mit klassischen Technologien, wie beispielsweise Leuchtstofflampen, konkurrenzfähig sind. Erste architektonische Anwendungen von organischen Leuchtdioden werden vermutlich in fünf bis zehn Jahren in der Gebäudebeleuchtung auftauchen. Auch ein Einzug in heimische Wohnzimmer wäre durchaus attraktiv, da sich enorme gestalterische Möglichkeiten, wie zum Beispiel Fototapeten, bieten. Wann dies passiert, ist im Moment aber noch nicht abschätzbar.

A. Glossar

a	Jahr
CELMA	Verband der nationalen Verbände der Hersteller von Leuchten und elektrotechnischen Komponenten für Leuchten in der EU
CFL	Compact Fluorescent Lamp
ELC	European Lamp Companies Federation
EU	Europäische Union
GWP	Global Warming Potential
HID	High Intensity Discharge
HTL	Hole transport layer
IRC	Infra Red Coated
LED	Light Emitting Diode
lm	Lumen
Mlmh	Mega-Lumen-Stunde
MEPS	Minimum Efficiency Performance Standards
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OLED	Organic Light Emitting Diode
PEDOT	Polyethylenedioxythiophen
PSS	Polystyrolsulfonat
R_a	Farbwiedergabeindex
REMODECE	Residential Monitoring to Decrease Energy Use and Carbon Emissions in Europe
TWh	Terra-Watt-Stunde

Abbildungsverzeichnis

2.1. Lichtinsel einer Straße mit Ölbeleuchtung zu Beginn des 19. Jahrhunderts. Quelle: [Abe95]	5
2.2. Nachfüllen einer Straßenlaterne mit Öl im 18. Jahrhundert. Quelle: [Abe95]	5
2.3. Erster öffentlicher Beleuchtungsversuch mit handregulierten Lichtbogenlampen auf der Place de la Concorde in Paris, 1844. Quelle: [Abe95]	7
2.4. Historische Preisentwicklung von Gas-, Kerosin- und elektrischer Beleuchtung in England. Die Preise sind umgerechnet auf das Preisniveau des Jahres 2000. Sie sind in Euro pro Millionen Lumen-Stunden ($\frac{\text{€}}{\text{Mlm h}}$) angegeben. Quelle: [Fou06]	9
2.5. Zeitreihe der geschichtlichen Entwicklung der elektrischen Lichttechnologien	10
3.1. Lichtfarben und dazugehörige Wellenlängen (in nm) des sichtbaren Lichtspektrums	11
3.2. Wahrnehmung der Farbtemperatur. Rot steht für warmes und blau für kaltes Licht.	11
3.3. Relative spektrale Dichteverteilung von Temperaturstrahlern. Quelle: [Bae06]	12
3.4. Vergleich der Strahldichteverteilungen von Leuchtstofflampen mit Farbwiedergabeindex $R_a > 80$ (obere Abbildung) und $R_a = 98$ (untere Abbildung). Quelle: [Bae06]	17
3.5. Strahldichteverteilung einer Quecksilberdampf-Hochdrucklampe in Standardausführung. Quelle: [Bae06]	22
3.6. Strahlungsverteilungen von Halogen-Metaldampflampen mit Quarzbrenner(obere Abbildung) und Keramikbrenner(untere Abbildung). Quelle: [Bae06]	23

Abbildungsverzeichnis

3.7. Spektrale Energieverteilung einer Natriumdampf-Hochdrucklampe mit ausgeprägten Anteilen im Bereich von 550 bis 650nm. Quelle: [Bae06]	25
3.8. Spektrale Verteilung der wichtigsten LED Farben. Quelle: [Bae06]	26
3.9. Spektrale Verteilungen von weißem Licht erzeugt mit einer blauen LED mittels Leuchtstoff(obere Abbildung) und mittels Kombination von verschiedenen LEDs(untere Abbildung). Quelle: [Bae06] .	27
3.10. Effizienz, Lebensdauer und Farbwiedergabeindex verschiedener Technologien zur elektrischen Lichterzeugung	30
3.11. Effizienzvergleich der Lichttechnologien	31
4.1. Bilanzierung einer Glühlampe	34
4.2. Bilanzierung einer Hochvolt-Halogenglühlampe mit niedriger Leistung	35
4.3. Bilanzierung einer Hochvolt-Halogenglühlampe mit hoher Leistung	36
4.4. Bilanzierung einer Niedervolt-Halogenglühlampe	37
4.5. Bilanzierung einer kompakten Leuchtstofflampe	39
4.6. Vergleich von bezogenem Energieverbrauch, bezogener Quecksilberemission, bezogenem Treibhauspotential und bezogenen Lebenszykluskosten verschiedener im Haushaltssektor relevanter Lampen	40
4.7. Bezogener Gesamtenergieverbrauch auf Lichtausbeute und Lebensdauer (Referenztechnologie Glühlampe entspricht 100%)	41
4.8. Bezogene Quecksilberemissionen auf Lichtausbeute und Lebensdauer (Referenztechnologie Glühlampe entspricht 100%)	42
4.9. Bezogenes Treibhauspotential auf Lichtausbeute und Lebensdauer (Referenztechnologie Glühlampe entspricht 100%)	42
4.10. Bezogene Lebenszykluskosten auf Lichtausbeute und Lebensdauer (Referenztechnologie Glühlampe entspricht 100%)	43
5.1. Jahresgangkennlinie der Beleuchtung eines Haushalts in Frankreich im Jahr 2002. Quelle: eigene Darstellung; Datenquelle: [REM08] .	45
5.2. Prozentuelle Aufteilung der Lampentechnologien in verschiedenen Bereichen eines Haushalts. Quelle: [Alm07]	46
5.3. Durchschnittliche Beleuchtungsdauern in portugiesischen Haushalten. Quelle: [Alm07]	47
5.4. Täglicher Energiebedarf für Beleuchtung in portugiesischen Haushalten. Quelle: [Alm07]	47

Abbildungsverzeichnis

5.5.	Prozentueller Anteil von CFLs an den Lichtpunkten pro Haushalt in der EU-25. Quelle: [Ber07a]	48
5.6.	Prozentuelle Anteile der verkauften Lampen in Österreich für den Haushaltssektor.	50
5.7.	Schätzung der prozentuellen Anteile des Lampenbestands in Österreich für den Haushaltssektor.	51
5.8.	Schätzung der prozentuellen Anteile des Lampenbestands in Österreich für den Haushaltssektor. Annahme: Gleiche Brenndauern für alle Technologien	51
5.9.	Lampenverkäufe in Europa. Quelle: [VT07a]	54
5.10.	Entwicklung des Leuchtstofflampen- und Vorschaltgerätemarktes. Quelle: [CEL07]	55
5.11.	Überblick über die Anteile verschiedener Lichterzeugungstechnologien am EU-25 Lampenmarkt für Straßenbeleuchtung im Jahr 2004. Quelle: [VT07b]	57
7.1.	Plan der European Lamp Companies Federation zur stufenweisen Verbesserung der Energieeffizienz bei Beleuchtung. Der Verkauf von Lampen, die die rot gestrichenen Energieeffizienzklassen aufweisen, soll ab dem jeweiligen Jahr verboten werden. Quelle: [ELC07b]	72
7.2.	Plan der European Lamp Companies Federation zur stufenweisen Verbesserung der Energieeffizienz bei Beleuchtung. In jeder Phase werden für die verschiedenen Lampenkategorien jeweils Mindestanforderungen der Energieeffizienz gefordert. Quelle: [ELC07b]	72
7.3.	Neu definierte Energieeffizienzklassen für Lampen. Quelle: [VT08c]	73
7.4.	Gegenüberstellung der alten und der neuen Effizienzklassen für Lampen	74
7.5.	Phasenplan zur Einführung von Mindesteffizienzanforderungen für Lampen. Quelle: [VT08c]	74
7.6.	Energielabel für Lampen. Quelle: [Ber07a]	76
7.7.	Die Euroblume ist ein Qualitäts- und Umweltlabel für Lampen. Quelle: [Eco07]	77
7.8.	Die CFL Quality Charter ist ein Qualitätslabel für Lampen. Quelle: [Ber07a]	79
8.1.	Szenarien: Anteile verschiedener Technologien am Österreichischen Lampenmarkt bis zum Jahr 2015	83

Abbildungsverzeichnis

8.2. Entwicklung der Effizienz von kommerziell erhältlichen Leuchtdioden. Quelle: [Int06] 85

Literaturverzeichnis

- [Abe95] ABELE, Johannes: *Die Lichtbogenlamoe*. Deutsches Museum München, 1995
- [AE01] APEC-ESIS. *A Global Movement toward Phasing out Energy Inefficient Light Bulbs is Emerging!* URL, <http://www.apec-esis.org/whatsnew.php?id=100146>. 2001
- [Alm07] DE ALMEIDA, Anibal. *Residential monitoring to decrease energy use and carbon emissions in Europe*. ECEEE 2007 Summer Studies. 2007
- [Aus07] AUSTRIAN ENERGIE AGENCY: *1. Energieeffizienzaktionsplan der Republik Österreich*. Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, 2007
- [Bae06] BAER, Roland: *Beleuchtungstechnik*. HUSS-MEDIEN GmbH, 2006
- [Bau07] BAUMGARTNER, Erwin: *PI-LED Technologie, Schonend ins rechte Licht gerückt - LED Technologie für Museen*. Lumitech GmbH, 2007
- [Ber07a] BERTOLDI, Paolo: *Electricity Consumption and Efficiency Trends in the Enlarged European Union - Status Report 2006*. Joint Research Center, Institute for Environment and Sustainability, 2007
- [Ber07b] BERTOLDI, Paolo: *Residential Lighting Consumption and Saving Potential in the Enlarged EU*. Joint Research Center, 2007
- [Bie94] BIERMAYR, Peter: *Der Anteil des Beleuchtungssektors am Gesamtstromverbrauch der Haushalte*. Institut für Energiewirtschaft, TU Wien, 1994
- [Bou07] BOUGHEY, David: *Final Technical Report (2007/18): Phase-Out of Inefficient Incandescent Lamps and Standards for Compact Fluorescent Lamps*. The Australian Greenhouse Office, 2007

Literaturverzeichnis

- [CEL07] CELMA. *Guide for the application of Directive 2000/55/EC on energy efficient requirements for ballasts for fluorescent lighting, Issue 3.1*. URL, http://www.celma.org/archives/temp/CELMA_Ballast_Guide.pdf. 2007
- [Coo07] COOREMANS, Catherine. *Strategic fit of energy efficiency (Strategic and cultural dimensions of energy-efficiency investments)*. ECEEE 2007 Summer Studies. 2007
- [D'A06] D'ANDRADE, Brian: *Lighting: White phosphorescent LEDs offer efficient answer*. Nature Photonics 1, 33 - 34, 2006
- [Das00] DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION. *RICHTLINIE 2000/55/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 18. September 2000 über Energieeffizienzanforderungen an Vorschaltgeräte für Leuchtstofflampen*. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften vom 1.11.2000. 2000
- [Das03a] DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION. *RICHTLINIE 2002/91/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 16. Dezember 2002 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden*. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften vom 4.1.2003. 2003
- [Das03b] DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION. *RICHTLINIE 2002/91/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 27. Januar 2003 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten*. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften vom 13.2.2003. 2003
- [Das03c] DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION. *RICHTLINIE 2002/96/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 27. Januar 2003 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte*. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften vom 13.2.2003. 2003
- [Eco07] ECO-LABEL. *Das Umweltzeichen für Lampen*. URL, www.eco-label.com. 2007

Literaturverzeichnis

- [ELC07a] ELCFED: *Lighting Specific Template*. European Lamp Companies Federation, 2007
- [ELC07b] ELCFED: *Make the Switch - The ELC Road-Map for Deploying Energy Efficient Lighting Technology across Europe*. European Lamp Companies Federation, 2007
- [Fle06] FLESCH, Peter: *Light and Light Sources - High Intensity Discharge Lamps*. Springer-Verlag, 2006
- [Fou06] FOUQUET, Roger: *Seven Centuries of Energy Services: The Price and Use of Light in the United Kingdom (1300-2000)*. Energy Journal, Vol. 27(1), 2006
- [Fre06] FREYSSINIER, Jean P.: *Reducing lighting energy use in retail display windows*. Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, 2006
- [GFK08] GFK. *Verkaufszahlen der GFK Paneelmarktstudie für Lampen zur Verfügung gestellt von Philips*. 2008
- [Haa07] HAAS, Reinhard: *Literaturstudie über Energieeffizienzmaßnahmen betreffend der EU-Richtlinie zur Endenergieeffizienz und Energiedienstleistung*. Energy Economics Group, TU Wien, 2007
- [Hal06] HALONEN, Lisa: *IEA ECBCS ANNEX 45 - Energy Efficient Electric Lighting for Buildings*. Lighting Engineering Proceedings 2006, 2006
- [Hei06] HEINZ, Roland: *Grundlagen der Lichterzeugung, 2. erweiterte Auflage*. HIGHLIGHT Verlagsges. mbH, 2006
- [Hen02] HENTSCHEL, Jürgen: *Licht und Beleuchtung*. Hüthig GmbH&Co., 2002
- [Int06] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY: *Light's Labours Lost*. OECD/IEA, 2006
- [Kom08] KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFT: *Über die erste Bewertung der durch die Richtlinie 2006/32/EG - Über Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen vorgeschriebenen nationalen Energieeffizienz-Aktionspläne*. Kommission der europäischen Gemeinschaft, 2008

Literaturverzeichnis

- [Mil02] MILLS, Evan: *The \$230-billion Global Energy Bill*. International Association for Energy-Efficient Lighting and Lawrence Berkeley National Laboratory, 2002
- [Mj07] MJØS, Tor. *Intelligent street lighting in Oslo, Norway*. ECEEE 2007 Summer Studies. 2007
- [Mül06] MÜLLEN, Klaus: *Organic Light-Emitting Devices*. Wiley-VCH Verlag GmbH&Co KGaA, 2006
- [Nil06] NILSSON, Mats: *Red light for Green Paper: The EU policy on energy efficiency*. Luled University of Technology, Economics, 2006
- [Per07] PERTOLA, Peter: *Possible Energy Savings of Electric Lighting by Using Redirected Daylight*. E3Light Newsletter 2/2007, 2007
- [Poh07] POHL, Wilfried: *Trends in Lamps*. E3Light Newsletter 1/2007, 2007
- [REM08] REMODECE: *Lighting in France (2002-2003)*. URL, <http://www.isr.uc.pt/~remodece/>. 2008. – siehe Datenbank
- [Ver07] VERHAAR, Harry: *The untapped potential of energy efficient lighting technologies*. ECEEE 2007 Summer Study Proceedings, 2007
- [VT07a] VAN TICHELEN, P.: *Preparatory Studies for Eco-design Requirements of EuPs Final Report, Lot 8: Office lighting*. VITO, 2007
- [VT07b] VAN TICHELEN, P.: *Preparatory Studies for Eco-design Requirements of EuPs Final Report, Lot 9: Public street lighting*. VITO, 2007
- [VT08a] VAN TICHELEN, P.: *Preparatory Studies for Eco-design Requirements of EuPs Final Report, Lot 19: Domestic lighting, Draft Interim Task Report, Task 5: Definition of Base-case*. VITO, 2008
- [VT08b] VAN TICHELEN, P.: *Preparatory Studies for Eco-design Requirements of EuPs Final Report, Lot 19: Domestic lighting, Draft Interim Task Report, Task 6: Technical Analysis BAT*. VITO, 2008
- [VT08c] VAN TICHELEN, P.: *Preparatory Studies for Eco-design Requirements of EuPs Final Report, Lot 19: Domestic lighting, Draft Interim Task Report, Task 8: Scenario-Policy-Impact and Sensitivity Analysis*. VITO, 2008

Literaturverzeichnis

- [Wai07] WAIDE, Paul: *Global Efforts to Phase-Out Incandescent Lamps*. IEA Open Energy Technology Bulletin, Issue No. 45, 2007
- [Wik07a] *Leuchtdiode*. URL, <http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtdiode>. 2007
- [Wik07b] *OLED*. URL, <http://de.wikipedia.org/wiki/OLED>. 2007
- [Wil05] WILLIAMS, Bill. *A History of Light and Lighting*. URL, <http://www.mts.net/~william5/history/hol.htm>. 1990-2005
- [Zis07] ZISSIS, G.: *Estimating the impact of labelling high quality compact fluorescent lamps on the energy consumption for lighting in the residential sector*. ECEEE 2007 Summer Study Proceedings, 2007
- [Zum01] ZUMTOBEL. *Litec_deFarbwiedergabe*. URL, http://www.zumtobel.com/light-dictionary/de/Litec_deFarbwiedergabe.html. 2001