

Johannes Thema

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

Supervision:

Prof. Dr. Wolfgang Irrek

Hochschule Ruhr West (bis Juli 2010: Wuppertal Institut)

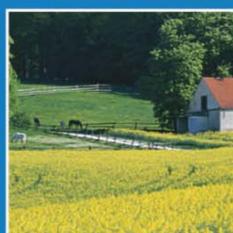
Mit Unterstützung von:

Gerhard Wohlauf und Dominic Wittmer

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

Umwelt- und Ressourcenaspekte einer verstärkten Nutzung von Leuchtdioden (LED)

Kurzexpertise zu Arbeitspaket 14 des Projekts
„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRess)



Wuppertal, Dezember 2010

ISSN 1867-0237

Kontakt zu den Autoren:

Johannes Thema
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
42103 Wuppertal, Döppersberg 19
Tel.: +49 (0) 202 2492 -186, Fax: -198
Mail: johannes.thema@wupperinst.org

Prof. Dr. Wolfgang Irrek
Hochschule Ruhr West (bis Juli 2010: Wuppertal Institut)
Campus Bottrop
Postfach 10 07 55, 45407 Mülheim an der Ruhr
Tel.: +49 (0)208 88254-838
Mail: wolfgang.irrek@hs-ruhrwest.de

„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes) – Projekt im Auftrag des BMU | UBA

Projektlaufzeit: 07/2007 – 12/2010

Projektleitung:

Dr. Kora Kristof / Prof. Dr. Peter Hennicke

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
42103 Wuppertal, Döppersberg 19

Tel.: +49 (0) 202 2492 -183 / -136, Fax: -198 / -145

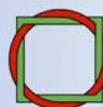
Mail: kora.kristof@wupperinst.org
peter.hennicke@wupperinst.org

© Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

Weitere Informationen zum Projekt
„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes)
finden Sie unter www.ressourcen.wupperinst.org

Gefördert wird das Vorhaben im Rahmen des UFOPLAN
durch das BMU und das UBA, Förderkennzeichen: 3707 93 300

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung
liegt bei den Autor(inn)en.



Wuppertal Institut
für Klima, Umwelt, Energie
GmbH

Wuppertal Institut in Kooperation mit

BASF
Borderstep
CSCP
Daimler
demea – VDI / VDE-IT
ECN
EFA NRW
FhG IAO
FhG UMSICHT
FU Berlin
GoYa!
GWS
Hochschule Pforzheim
IFEU
Institut für Verbraucherjournalismus
IÖW
IZT
MediaCompany
Ökopol
RWTH Aachen
SRH Hochschule Calw
Stiftung Warentest
ThyssenKrupp
Trifolium
TU Berlin
TU Darmstadt
TU Dresden
Universität Kassel
Universität Lüneburg
ZEW



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

**Umwelt
Bundes
Amt**
Für Mensch und Umwelt

Umwelt- und Ressourcenaspekte einer verstärkten Nutzung von LED

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Leuchtdioden und Ökodesign	8
2.1	Produktdefinition und -typen	8
2.2	LED in der Ökodesign-Richtlinie	10
2.3	Energieverbrauchskennzeichnung	13
2.4	Weitere Produktkennzeichnungen	14
3	Verwendete Materialien und Umweltauswirkungen	16
3.1	Aufbau von LED und verwendete Materialien	16
3.2	Produktionsumfang / statische Reichweite der verwendeten Materialien	17
3.3	Toxizität und Umweltbelastungen	19
3.4	Lebensdauer: Determinanten und Konsequenz	21
3.5	Kühlung	21
3.6	Energieverbrauch über den Lebenszyklus	22
3.7	Licht und Zirkadianer Rhythmus	23
3.8	Wartung	24
3.9	Lebenszykluskosten / Wirtschaftlichkeit	25
3.10	Recycling	25
4	Perspektiven	28
4.1	Erwartete Effizienzentwicklung	28
4.2	Preisentwicklung	29
4.3	Abschätzung der Wirkung eines etwaigen vollständigen Umstiegs auf LED-Technologie auf den Verbrauch der verwendeten Halbmetalle	31
5	Fazit	36
	Literatur	37

Abbildungen

Abb. 1:	Aufbau eines SMD-Moduls _____	8
Abb. 2:	Kostenvergleich und Amortisation LED vs. Leuchtstofflampe _____	25
Abb. 3:	Erwartete LED-DIE-Effizienzentwicklung (EU-Kommission und US-Energieministerium) _____	28

Tabellen

Tab. 1:	Mindesteffizienzanforderungen: Maximale Leistungsaufnahme bei gegebenem Lichtstrom _____	12
Tab. 2:	In der Vorstudie zu Los 19b vorgeschlagene Energieeffizienzklassen für Lampen. _____	13
Tab. 3:	Technisch bedeutsame LED-Halbleiterverbindungen _____	16
Tab. 4:	Produktion, Reserven, Reichweite und Konzentration relevanter Stoffe ____	18
Tab. 5:	Erwartete Effizienzentwicklung _____	29
Tab. 6:	Erwartete Preisentwicklung für LED in \$/klm _____	30
Tab. 7:	Rohstoffeinsatz von Halbleitermetallen in InGaN-LED _____	31
Tab. 8:	Schätzung der erzeugten Lichtmenge und Ersatzmenge von LED-Lampen in Deutschland _____	32
Tab. 9:	Aufwand seltener Metalle für deutsche LED-Beleuchtung nach 2015 ____	34
Tab. 10:	Energieeinsparungspotenziale durch LED-Technologie _____	35

Executive Summary

Within the framework of the Ecodesign Directive¹, the EU Commission has been analysing and evaluating energy-related products for more than four years. This lays the foundation for so-called Implementing Measures – requirements on energy use, material design and information standards which have to be met by producers and retailers when offering these products in the European market. Additionally, mandatory labelling is being developed, introduced and updated.

One of the recent Implementing Measures has been especially recognised and debated by media and the public: Minimum energy efficiency standards in the lighting sector and the subsequent phasing-out of incandescent lamps. Against the background of market developments and the probable rise of Light Emitting Diodes (LEDs) as leading technology, discussions so far have not sufficiently taken into account possible environmental and resource aspects of augmented LED market shares.

Therefore, the German Federal Environment Agency commissioned the Wuppertal Institute for Climate, Environment, Energy to investigate potential dangers – especially substances, environmental and health issues of LED production. This paper summarises the findings of this research.

The short analysis found a large variety of technical LED design options and modes of application. The focus lies on the main differences to other technologies, especially on the light-emitting semiconductors. For their production, the semimetals indium and gallium are of certain importance. These elements exist only in very low concentrations in some metal ores. Thus, they are only obtained as by-products of the metallurgical processes of metals such as zinc, aluminium or copper. Due to high production costs, there are few smelters equipped with the technology by now, but there is development potential with rising prices. The semimetals are little toxic or only in very high concentrations, other substances needed for LED production, like arsenic or phosphides, are irritant or toxic though.

Another possible environmental impact might be the effect special wavelengths of light have on the circadian rhythms (biorhythm) of humans, animals and plants. However, research remains to be executed on the topic and there is few information available as to secured effects.

As LED lighting is still a niche, no experiences with recycling are available yet. According to available information, recycling of the core semimetals is not economically viable, whereas components such as heat sinks or electronic parts is.

A short evaluation of expected energy efficiency developments of LED technology demonstrates impressive potentials: From 2010 to 2015, luminous efficiency is ex-

¹ Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products (recast)

pected to increase by 30–60 %, prices to fall about 40–75 %. This is likely to render LEDs to be tomorrow's lighting choice.

Finally, the amount of additionally needed semimetals when opting for complete LED illumination of the German household and office sectors is estimated. This gives a total plus of 8–13 tons of gallium and 9–15 tons of indium for stock build-up, representing about 12 % of total gallium world production 2009 and 2.5 % indium respectively. However, in practice, this shift will not happen within one year and not lead to a full cover of lighting demand by LED, which will substantially reduce the yearly demand for these resources. Consequent stock preservation in household and office sector would require about 200 - 600 kg indium/gallium annually, i.e. about 1 % of each 2009 world production. If the street lighting sector, lighting in retail and industry sector, or similar shifts in lighting technology towards LED in other countries within or outside Europe were additionally taken into account, this would add to this resource problem.

Increasing demand due to intensified LED illumination will probably lead to price raises of the semimetals. This, in turn, will probably render many production potentials economic and stimulate production capacities of the necessary semimetals. Still, especially in the short run, shortages are possible as the demand for other applications (e.g. in LCD-displays or photovoltaic panels) may rise simultaneously. These pressures might be relaxed if organic LEDs (OLEDs) become a sustainable and economically viable long-term solution, sidestepping scarce and costly semimetals.

Kurzfassung

Seit mehr als vier Jahren lässt die Europäische Kommission im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie² energieverbrauchsrelevante Produkte in Europa anhand umweltrelevanter Kriterien untersuchen und bewerten. Hierauf aufbauend legt sie im Rahmen sogenannter Durchführungsmaßnahmen Anforderungen fest, die Hersteller und Importeure bei Inverkehrbringen der betroffenen Produkte beachten müssen. Vornehmlich geht es dabei bislang um Anforderungen an den Energieverbrauch der Produkte, zum Teil aber auch um weiter gehende Umwelanforderungen sowie Informationspflichten der Hersteller. Parallel wird für einige Produktgruppen auch die Energieverbrauchskennzeichnung (Energieetikett) verpflichtend eingeführt oder existierende aktualisiert.

Ein in den Medien besonders beachtetes Beispiel für Mindestenergieeffizienzanforderungen an Produkte unter der Ökodesign-Richtlinie sind die Anforderungen an Lampen für den Haushaltsbereich, für Büros und Straßenbeleuchtung, die zu zahlreichen Diskussionen geführt haben. Im Rahmen der Untersuchungen und Diskussionen wurde bislang vernachlässigt, welche über den Energieverbrauch hinaus gehenden Umwelt- und Ressourcenaspekte eine verstärkte Nutzung von Leuchtdioden (LED als Abkürzung der englischen Bezeichnung „Light Emitting Diodes“) als Alternative zu herkömmlichen Lampen hat.

Vor diesem Hintergrund hat das Umweltbundesamt das Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie beauftragt, insbesondere die bei LED verwendeten Materialien und die mit ihrer Produktion einhergehenden Umwelt- und Gesundheitsbelastungen näher zu prüfen. Die vorliegende Kurzexpertise zu Arbeitspaket 14 des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ fasst die Ergebnisse dieser Analyse zusammen.

Dabei wurde deutlich, dass es ein breites Spektrum an technischen Möglichkeiten, Bautypen und Einsatzarten für LED gibt. Mit Blick auf den zukünftig möglicherweise deutlich verstärkten Einsatz von LED-Beleuchtung in der Praxis untersucht die Kurzstudie in der Produktion verwendete Materialien mit Fokus auf LED-Halbleiterchips. Dabei sind seltene Halbmetalle, vor allem Indium und Gallium, von besonderer Bedeutung. Sie kommen mit einer geringen Häufigkeit in der Erdkruste vor und sind Nebenprodukte der Erzverhüttung anderer Metalle wie Zink, Aluminium, Kupfer und werden daher bisher nur in geringem Umfang gewonnen. Derzeit gibt es weltweit nur wenige Produzenten dieser Halbmetalle, es besteht jedoch noch Produktionspotenzial. Die Metalle selbst sind nur schwach oder in hohen Konzentrationen giftig, welche für LED nicht relevant sein dürften (außer möglicherweise in der Produktion). Weitere für die Halbleiterproduktion benötigte Stoffe wie Arsen und Phosphide sind jedoch reizend oder giftig und können ein Problem während der Produktion darstellen.

Ein weiterer Umwelteinfluss ist bei Lampen durch das Licht gegeben, das den Biorhythmus von Tieren und Menschen beeinflussen kann. Diese durch bestimmte Wel-

² Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte.

lenlängen von Licht möglichen Störungen des zirkadianen Rhythmus sind jedoch bislang nur ungenügend erforscht.

Mit Recycling von LED-Lampen bestehen bisher noch keine Erfahrungen. Nach gegenwärtigem Kenntnisstand ist die Rückgewinnung der seltenen Metalle in dieser Anwendung nicht wirtschaftlich, andere Komponenten sind jedoch recycelbar (Kühlkörper, Elektronik).

Eine kurze Einschätzung der künftigen technischen Entwicklung zeigt eine weiterhin enorme Dynamik. So dürfte die Lichtausbeute der Halbleiterchips um rund 30 – 60 % von 2010 – 2015 steigen, der Preis gleichzeitig um 40 – 75 % fallen. Damit wird LED-Beleuchtung in den kommenden Jahren voraussichtlich in vielen Bereichen zur realen Beleuchtungsoption werden.

Abschließend wurde eine grobe Abschätzung des zusätzlichen Bedarfs an seltenen Metallen bei einem vollständigen Umstieg der Haushalts- und Bürobeleuchtung auf LED-Technologien vorgenommen. Für eine solche Komplett-Umrüstung der Privathaushalte und Büros in Deutschland auf dem zu erwartenden technologischen Stand im Jahr 2015 sind insgesamt etwa 8 – 13 Tonnen Gallium und 9 – 15 Tonnen Indium erforderlich. Dies entspricht etwa 12 % der weltweiten Jahresproduktion von Gallium in 2009 und 2,5 % derjenigen von Indium. Der Umstieg auf LED wird in der Praxis jedoch nicht innerhalb eines Jahres und vermutlich nicht zu 100 % erfolgen, was den Anteil der jährlichen Ressourceninanspruchnahme für LED-Technologie in Haushalten und Büros deutlich verringern dürfte. Der laufende Erhalt dieser auf LED-Technologien umgerüsteten Beleuchtung würde jährlich rund jeweils 200 – 600 kg Gallium und Indium benötigen, was jeweils etwa 1 % der Weltproduktion im Jahr 2009 entspricht. Würde zusätzlich der Umstieg auf LED in anderen Sektoren wie Handel, Industrie oder in der Straßenbeleuchtung oder ein ähnlicher Umstieg auf LED in anderen europäischen oder außereuropäischen Ländern einkalkuliert, würde sich das Ressourcenproblem verstärken.

Selbst wenn der Umstieg nicht kurzfristig geschieht, ist mit Preisanstiegen durch steigende Nachfrage zu rechnen. Ebenfalls ist bei steigenden Preisen jedoch zu erwarten, dass die Gewinnung der Nebenprodukte auch in anderen Hütten rentabel wird und das Angebot damit steigt. Knappheiten bei den Halbmetallen Gallium und Indium sind nicht auszuschließen, insbesondere da auch die Nachfrage nach anderen Produkten steigt, die sie verwenden. Klare Aussagen über die Reichweiten sind jedoch schwierig, da die Kapazitäten der Nebenproduktion ausgeweitet werden könnten. Langfristig könnte auch der Umstieg auf organische LED (OLED) aus Nachhaltigkeitssicht entlastende Wirkungen haben.

1 Einleitung

Seit mehr als vier Jahren lässt die Europäische Kommission im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie (2009/125/EG, vormals 2005/32/EG) energieverbrauchsrelevante Produkte in Europa anhand umweltrelevanter Kriterien untersuchen und bewerten. Hierauf aufbauend legt sie im Rahmen sogenannter Durchführungsmaßnahmen Anforderungen fest, die Hersteller und Importeure bei Inverkehrbringen der betroffenen Produkte beachten müssen. Vornehmlich geht es dabei bislang um Anforderungen an den Energieverbrauch der Produkte, zum Teil aber auch um weiter gehende Umwelanforderungen sowie Informationspflichten der Hersteller. Parallel wird für einige Produktgruppen auch die Energieverbrauchskennzeichnung (Energieetikett) verpflichtend eingeführt oder existierende aktualisiert.

Ein in den Medien besonders beachtetes Beispiel für Mindestenergieeffizianz Anforderungen an Produkte unter der Ökodesign-Richtlinie sind die Anforderungen an Lampen für den Haushaltsbereich, für Büros und Straßenbeleuchtung, die zu zahlreichen Diskussionen geführt haben. Beispielsweise bedeuten die Energieeffizienzgrenzwerte für das Inverkehrbringen von Haushaltslampen in der Praxis, dass der Verkauf von Glühlampen schrittweise eingestellt wird und diese nach und nach durch andere Lampen, wie z.B. effiziente Halogenlampen, Leuchtstofflampen oder LED ersetzt werden.

Vor diesem Hintergrund hat das Umweltbundesamt das Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie beauftragt, weiter gehende Umwelt- und Ressourcenaspekte einer verstärkten Nutzung von Leuchtdioden (LED) zu untersuchen, die im Analyse-, Diskussions- und Umsetzungsprozess im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie bislang vernachlässigt wurden. Die vorliegende Kurzexpertise zu Arbeitspaket 14 des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ fasst die Ergebnisse dieser Analyse zusammen.

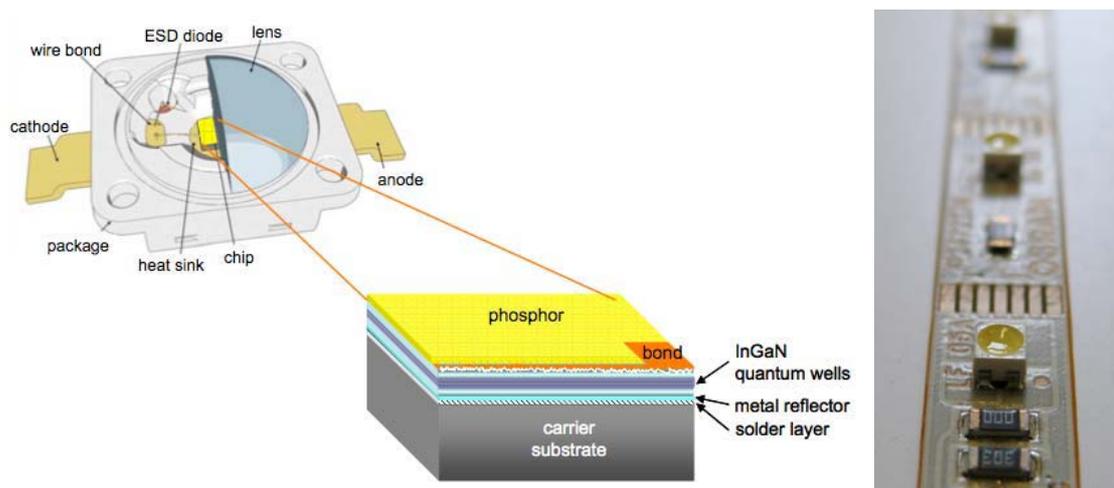
Abschnitt 2 erläutert den grundlegenden technischen Aufbau von LED und ihre Verortung in den Umsetzungsprozessen zur Ökodesign-Richtlinie, Abschnitt 3 geht auf die verwendeten Materialien und ihre Umweltauswirkungen ein. Dabei werden insbesondere die verwendeten seltenen Metalle, deren Toxizität und andere Umweltauswirkungen sowie Recyclingmöglichkeiten untersucht. Abschnitt 4 analysiert die Entwicklungspotenziale von LED sowohl hinsichtlich der Energieeffizienz als auch der Herstellungskosten bzw. Preise und versucht eine Abschätzung des Bedarfs an für die LED-Produktion relevanten, seltenen Metallen, sollte die Bundesrepublik im Haushalts- und Bürobereich ab 2015 vollständig auf LED-Beleuchtungstechnologie umsteigen.

2 Leuchtdioden und Ökodesign

2.1 Produktdefinition und -typen

Leuchtdioden (LED, Light Emitting Diodes) sind Halbleiterkristalle, die durch Anlegen von Spannung Photonen emittieren, d.h. leuchten (Elektrolumineszenz). Anders als Glühlampen, die eine Glühwendel auf bis zu 2.500 °C erhitzen, arbeiten LED mit Betriebstemperaturen von maximal 120 °C, woraus sich Vor- und Nachteile ergeben. Anorganische LED bestehen im Kern aus einem Halbleiterkristall, der auf einem Metallreflektor (meist Aluminium) angebracht ist. Über den Reflektor (Kathode) und einen Anschlussdraht auf der Oberseite wird der LED-Chip (auch DIE genannt) mit Strom versorgt. Ggf. wird darüber noch eine weitere Schicht zur Farbkorrektur (z.B. Phosphor) aufgebracht (siehe Abb. 1).

Abb. 1: Aufbau eines SMD-Moduls



Quelle: Osram Opto Semiconductors (2009, 11), Foto: Johannes Thema.

LED produzieren farbiges Licht direkt; die Farbe ist abhängig vom verwendeten Halbleitermaterial (siehe hierzu auch Tab. 3). Daher gibt es keine Effizienzverluste durch Filter bei der Produktion farbigen Lichts (FGL 2010, 18-19). Weißes Licht kann durch zwei Techniken emittiert werden: entweder durch blaues Licht, das eine darüber angebrachte Phosphorschicht zur Lumineszenz anregt, die dann gelbes Licht emittiert. Die Mischung blau/gelb ergibt weiß (alle Töne möglich). Die zweite Möglichkeit ist Mischung von farbigem Licht durch drei RGB (Rot/Grün/Blau)-Dioden. Mit dieser Anordnung ist eine stufenlose Farbmischung und -änderung möglich, was neue Anwendungsmöglichkeiten eröffnet.

Je nach Anwendungsgebiet existieren verschiedene Bautypen für LED. Die seit Jahrzehnten bekannte, v.a. für Anzeigenelemente verwandte bedrahtete LED besteht aus einem Chip, der in einer abgerundeten Kunststoffhülle (meist mit einem Durchmesser

von 3 – 5 mm) verkapselt ist. So genannte *Surface Mounted Devices* (SMD) sind extrem kleine leistungsstarke Standardprodukte, die ebenfalls bereits industriell in Massenfertigung produziert werden. Dabei werden die LED-Chips in kleine Gehäuse gepasst, die sich über Steck- oder Lötverbindungen zu weiteren Modulen verbinden lassen. Diese Technik wird bereits serienmäßig z.B. in der Automobilproduktion genutzt. *Chip On Board* (COB)-LED sind ebenfalls kleine leistungsstarke Chips, die direkt auf eine Leiterplatte aufgebracht werden, was weitere Platzersparnis und verbesserte Abwärme ermöglicht.³ Diese Module werden zudem von Herstellern oder anderen Betrieben zu LED-Lampen weiterverarbeitet, die direkt in bestehenden Standard-Lampensockeln wie E14, E27, GU4, GU5.3 oder GU10 einsetzbar sind.

Die LED-Lampen werden üblicherweise mit Gleichspannungen bis max. 24 Volt betrieben (Kleinspannungsbereich). Dazu benötigen sie eine spezielle Betriebselektronik, die u.a. in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur einen Betrieb der LED-Lampe mit konstantem Lichtstrom sowie einen zusätzlichen Überhitzungsschutz gewährleistet. Diese Betriebselektronik kann (bei Austauschlampen für 230V-Lampen s.u.) direkt in das jeweilige LED-Modul integriert sein. Im Gegensatz zum Konstantspannungskonzept arbeiten die meisten LED-Spannungsversorgungen überwiegend mit Konstantstrom-Regelungen (constant current control). Als Standard-Sekundärspannungen für die LED-Beleuchtungssysteme setzen sich am Markt zunehmend 24 V und 12 V durch, wobei die meisten der 12 V LED-Austauschlampen üblicherweise schon bei etwa 10 V ihren Nennlichtstrom erreichen (s.a. Heinz 2010, S. 99). Insbesondere zum Ersatz von Niedervolt-Halogen-Lampen in bestehenden Akzentbeleuchtungen mit „Downlights“ und sonstigen dekorativen Leuchten (z.B. Möbeleinbauleuchten) mit den bekannten Standardsockeln: G4, GU 5.3 werden am Markt derzeit LED-Lampen für eine typische Betriebsspannung von 12 V AC/DC bzw. auch solche für einen Betrieb an 12 V DC angeboten.

Unter Einhaltung einer nicht zu unterschreitenden Mindestleistung (typisch: ca. 30-40 %) der installierten Spannungsversorgungen (50 Hz-Trafo mit 12 V-AC bzw. Elektroniknetzteil mit 11,5 V DC) können daher auch viele der LED-Lampen für 12 V AC/DC in die entsprechenden Niedervolt-Halogen-Altleuchten eingesetzt werden. Mit Blick auf die vermeidbaren Leerlauf- bzw. Standby-Verluste bei Beibehaltung der bisherigen 12 Volt-Trafos, (weniger bei Elektroniknetzteilen) empfiehlt sich aber in den meisten Fällen eine komplette Neuinstallation mit passenden systemoptimierten LED-Komponenten.

Insbesondere für den Haushalts- und Gewerbebereich werden am Markt LED-Tauschlampen (230 V/50 Hz) auch für Leuchten mit den haushaltüblichen Standardsockeln E 14 und E 27 (Glühlampen/Energiesparlampen) bzw. auch für Leuchten mit Hochvolt-Halogenlampen (Sockel GU 10, GX 53) angeboten. Da diese LED-Lampen derzeit noch rund 20-30 Euro kosten, dürfte für diese – trotz der Vorteile wie lange Lebensdauer bis 40.000 h, deutliche Energieeinsparung – vorerst die Nachfrage noch

³ Zum Aufbau von LED-Modulen siehe z.B. FGL (2010, 21), Osram Opto Semiconductors (2009, 11).

verhalten sein. Spezielle Typen dieser E 14/ E 27 LED-Lampen sind über spezielle LED-Dimmer auch schon in einem weiten Helligkeitsbereich (ca. 5 – 100 %) dimmbar.

Bei vergleichbarer Helligkeit und reduzierter Leistungsaufnahme der LED-Lampen sowie mit deutlich reduzierten Lampenwechselkosten aufgrund der sehr viel längeren Lebensdauer (30-50.000 h anstelle von meist nur 2.000 h der Halogenlampen) ergeben sich im Haushaltbereich und Gebäudebestand der Nichtwohngebäude meist sehr wirtschaftliche Sanierungslösungen mit typischen Stromeinsparungen von bis zu 80 %. Wie von verschiedenen Akteuren (Installateure, Lichtplaner) zu erfahren war, entwickelt sich derzeit der LED-Markt sehr dynamisch, so dass es auch dem Beleuchtungsexperten / der Beleuchtungsexpertin schwer fällt, den Überblick über die laufenden Entwicklungen und die resultierende Produktvielfalt zu behalten.

Weiter werden seit einigen Jahren organische Halbleiter entwickelt, die in Zukunft anorganische LED ersetzen könnten. Diese „OLED“ sind organische Halbleiter aus kleinen (smOLED) oder großen Molekülketten wie Polymeren (pOLED), die auf einer Kathodenschicht (auch hier meist Aluminium) aufgebracht werden. Die Anode ist hier meist eine Indiumzinnoxid-Schicht. OLED könnten große Innovationen in der Beleuchtungstechnik hervorrufen, da mit ihnen auch großflächige und durchsichtige Lichtquellen möglich sind, so dass etwa Wände und Dächer tagsüber als Fenster und nachts als elektrische Lichtquelle verwendet werden könnten. Bisher liegen OLED in der Lichtausbeute⁴ (gemessen in lm/W) jedoch noch deutlich hinter LED zurück.

LED werden von einer Vielzahl von Unternehmen für verschiedene Bestimmungen produziert. Unter den Produzenten finden sich die großen Leuchtmittelproduzenten wie Osram und Philips, große Halbleiterproduzenten wie Toshiba und Cree und eine Vielzahl weiterer Unternehmen wie Trilux, VS Optoelectronics. Eine große Zahl kleiner und mittelständischer Betriebe bietet darüber hinaus Spezialanwendungen wie Fassaden-, Büro- oder Straßenbeleuchtungen an.

2.2 LED in der Ökodesign-Richtlinie

Generell sind LED-Lampen energieverbrauchsrelevante Produkte und werden damit von der Ökodesign-Richtlinie erfasst. Da LED vielseitig einsetzbar sind und sowohl als Leuchtmittel für vorhandene Fassungen (Retrofit) als auch für völlig neuartige Beleuchtungen konzipiert werden können, kommen sie in fast allen Anwendungsbereichen und damit diversen Regulierungsbereichen in Betracht: Büro- und Straßenbeleuchtung (Ökodesign-Richtlinie, Vorstudien zur Verordnung (EG) 245/2009, sogenannte Lose⁵ 8

⁴ Die Lichtausbeute, im Folgenden oft auch als Effizienz η bezeichnet, wird für Lampen gemessen in Lumen pro Watt. Sie entspricht der Inversen der Energieintensität der Lichtbereitstellung gemessen in Watt pro Lumen.

⁵ Die Nummerierung ergibt sich aus den Losen der Ausschreibung der Vorstudien. Diese Nummern sind als Bezeichnung für die Produktgruppen üblich.

und 9), sowie im Haushaltsbereich (Vorstudie zur Verordnung (EG) 244/2009, sogenanntes Los 19a/b⁶).

Da die Datenlage zu LED zum Zeitpunkt der Erstellung der ersten Vorstudien und Wirkungsabschätzungen (Impact Assessments) unklarer war als heute und die Effizienz der LED weniger weit fortgeschritten, wurde die Technologie zunächst nicht als aktuelle Politikoption, sondern als beste, aber noch nicht verfügbare Technologie (BNAT) in Los 8/9 behandelt (Tichelen u. a. 2007a, 169)(Tichelen u. a. 2007b, 204). Während Vorstudie und Impact Assessment zu Los 19a noch keine Szenarioanalyse für LED durchführte, beinhaltet die aktuellste Vorstudie zu Los 19a/b ein BNAT-Szenario für die LED-Technologie, die dementsprechend bis zu 70 % Energie, CO₂- und Quecksilberemissionen einsparen könnte.

Bei der Regulierung der Bürobeleuchtung werden LED nicht explizit erwähnt (EU-Kommission 2009). Generell werden für Lampen Mindesteffizienzanforderungen (lm/W) sowie Anforderungen für Lampen-Lichtstromerhaltungsfaktoren (LLMF) und Lampenüberlebensfaktoren (LSF) gestellt. Die Anforderungen sind jedoch typspezifisch und LED werden nicht gesondert aufgeführt. Auch die Netzteile werden reguliert. Für Büro- und Straßenbeleuchtung wäre eine Überarbeitung der Regulierung 245/2009/EG mit Berücksichtigung der technologischen Entwicklungen im LED-Bereich wünschenswert.

Die Vorstudie zu Los 19, Teil II (gerichtete Beleuchtung) behandelt LED umfangreicher. Dort sind LED für allgemeine Beleuchtung noch „Best Not Available Technology“ (BNAT, beste nicht verfügbare Technik)(bio, Energy Piano, und Kreios 2009, 510). Der Ersatz von gerichteten Glühlampen durch LED-Strahler wird in Los 19 jedoch als die „beste Option“ herausgearbeitet, da sie sowohl die geringsten Lebenszykluskosten aufweisen als auch die „beste verfügbare Technologie“ seien (bio, Energy Piano, und Kreios 2009, 529).

Mindesteffizienzanforderungen

Die Verordnung (EG) 244/2009 für Haushaltslampen mit ungerichtetem Licht macht auch Vorgaben für Leuchtdioden und LED-Lampen und stellt gestufte Effizienzanforderungen. Diese Mindesteffizienzanforderungen sowie die Anforderungen an die Produktinformation gelten auch für LED.

Die Mindesteffizienzanforderungen sind in zwei Anforderungsstufen festgelegt (siehe Tab. 1). Danach dürfen Haushaltslampen für jede gegebene Lichtleistung Φ nur noch eine maximale Leistungsaufnahme P_{\max} haben. Stufe 1⁷ trat im September 2009 in

⁶ Die Vorstudie wurde in zwei Stufen verfasst. Zunächst 19a für ungerichtete Haushaltslampen als Vorbereitung zur Verordnung (EG) 244/2009. Es folgte danach die Ergänzung für gerichtete Haushaltslampen (Teil II bzw. 19b). Die Studie liegt nun insgesamt als Vorstudie zu Los 19 vor.

⁷ Für die Stufen 1 bis 3 gelten noch Ausnahmen bei klaren Lampen, gestuft nach Lichtstrom der Lampe. Dies führt zu einem gestuften Glühlampenausstieg.

Kraft, Stufe 6 gilt ab September 2016. LED-Lampen mit externem Netzteil wird dabei ein weiterer Korrekturfaktor von $P_{\max}/1,1$ zugestanden.⁸

Tab. 1: Mindesteffizienzanforderungen: Maximale Leistungsaufnahme bei gegebenem Lichtstrom

Application date	Maximum rated power (P_{\max}) for a given rated luminous flux (Φ) (W)	
	Clear lamps	Non-clear lamps
Stages 1 to 5	$0,8 * (0,88\sqrt{\Phi}+0,049\Phi)$	$0,24\sqrt{\Phi}+0,0103\Phi$
Stage 6	$0,6 * (0,88\sqrt{\Phi}+0,049\Phi)$	$0,24\sqrt{\Phi}+0,0103\Phi$

Quelle: EU-Kommission (2009).

Daraus ergibt sich für eine LED-Lampe mit der Leuchtkraft einer 60-W-Glühlampe (normiert auf 806 lm) ein Maximum von 16 W für matte Lampen und 56 W für klare Lampen bzw. 42 W ab 2016. Bisher erfüllen erst wenige Retrofit-LED-Lampen die Anforderungen für matte Lampen (*Non-clear lamps*). Mit den zu erwartenden Effizienzsteigerungen werden jedoch in den kommenden Jahren die meisten Produkte den Markt betreten können.

Produktinformationen

Für die zweite, in Vorbereitung befindliche Regulierung von Haushaltslampen (Los 19b, gerichtete Lampen), hat die Vorstudie wichtige Handlungsfelder identifiziert: Energieverbrauch in der Nutzungsphase, Emissionen, Recycling, Lampenperformanz, Informationsanforderungen und Energieverbrauchskennzeichnung (Energieetikett). So sind im Los 19b für die gängigsten Lampentypen funktionelle Anforderungen vorgesehen, die insbesondere Kompatibilität zu anderen Systemen/Fassungen betreffen. LED sind hiervon ausgenommen. Jedoch müssen auch Hersteller von LED-Lampen folgende Informationen auf ihren Packungen bereitstellen:

- Wird die Nennleistungsaufnahme der Lampe getrennt vom Energieetikett nach Richtlinie 98/11/EG angegeben, so ist der Nennlichtstrom ebenfalls getrennt anzugeben, und zwar in einer Schrift, die mindestens doppelt so groß ist wie die für die Angabe der Nennleistungsaufnahme verwendete Schrift;
- Nennlebensdauer der Lampe in Stunden (nicht größer als die Bemessungslbensdauer);
- Zahl der Schaltzyklen bis zum vorzeitigen Ausfall;
- Farbtemperatur (auch als Zahlenwert in Kelvin angegeben);
- Anlaufzeit bis zur Erreichung von 60 % des vollen Lichtstroms (die Angabe „keine“ ist zulässig, wenn diese Zeit kürzer als 1 s ist);

⁸ In der Vorstudie zu Los 19b wird ein Korrekturfaktor für LED-Spots von 1/1,2 vorgeschlagen (bio, Energy Piano, und Kreios 2009, 548).

- f) ein entsprechender Hinweis, wenn eine Lichtstromsteuerung der Lampe nicht oder nur mit einer bestimmten Art von Steuerung möglich ist;
- g) ein entsprechender Hinweis, wenn die Lampe für Betrieb unter anderen als den Normbedingungen optimiert ist (z. B. Umgebungstemperatur $T_a \neq 25\text{ °C}$);
- h) Abmessungen (Länge und Durchmesser) in Millimetern;
- i) wird auf der Verpackung die Leistungsaufnahme einer äquivalenten herkömmlichen Glühlampe (auf 1 W gerundet) angegeben, so gelten die in der Verordnung festgelegten Äquivalenzwerte.

Quelle: Verordnung (EG) Nr. 244/2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG.

2.3 Energieverbrauchskennzeichnung

Weiterhin empfiehlt die Vorstudie zu Los 19 die bestehende Energieverbrauchskennzeichnung für Lampen zu erweitern. Als Formel für die Einteilung in Energieeffizienzklassen wird aufbauend auf der derzeit für die Kennzeichnung gültigen Formel vorgeschlagen:

$$P_{\max} = Y \times (0,88\sqrt{\Phi_R} + 0,049\Phi_R) \text{ bzw. } \eta_{\text{source}} = \frac{\Phi}{P_{\text{System}}} = \frac{\Phi}{Y \times (0,88\sqrt{\Phi_R} + 0,049\Phi_R)}$$

Die Mindestanforderung zur Einstufung in eine Effizienzkategorie kann demnach in Leistung (P_{\max}) oder Effizienz (η bzw. lm/W) ausgedrückt werden. Für die Klasse A ergibt sich damit eine geringfügige Abweichung von der bisher gültigen Formel. Dieser Vorschlag sieht eine Kennzeichnung für Lampen (einschließlich LED) mit Effizienzklassen von A+++ bis G vor. Der Korrekturfaktor nach Verordnung 244/2009, der LED mit externem Netzteil bisher eine zusätzliche Leistungsaufnahme von 10 % erlaubt, wird hier nicht angewendet.

Tab. 2: In der Vorstudie zu Los 19b vorgeschlagene Energieeffizienzklassen für Lampen.

Label	Y	Lm (Bsp.)	P_{\max} (W)	η_{\min} (lm/W)
A+++	0,11	806,00	7,29	110,62
A++	0,18	806,00	11,48	70,23
A+	0,21	806,00	13,48	59,81
A	0,23	806,00	14,51	55,56
B+	0,40	806,00	25,79	31,25
B	0,60	806,00	38,69	20,83
C	0,80	806,00	51,58	15,63
D	0,95	806,00	61,25	13,16
E	1,10	806,00	70,93	11,36
G	1,30	806,00	83,82	9,62

Quelle: (Ökopool und Wuppertal Institute 2010, 16), eigene Berechnung für 60W-äquivalente LED-Lampe (806lm).

Die Vorstudie gibt an, dass LED-Retrofit-Lampen 2010 bereits allgemein Klasse „A“ erfüllen (bio, Energy Piano, und Kreios 2009, 507). Bei der Klassifizierung der verfügbaren Produkte muss allerdings differenziert werden zwischen verschiedenen Gruppen. Die effizientesten bereits auf dem Markt verfügbaren Retrofit-LED-Lampen (*Best Available Technology*, BAT) sind als „A+“ klassifiziert.

Für Strahler gilt eine veränderte Einstufung: Um die Effizienzklassen nicht gerichteter Lampen mit Lampen gerichteten Lichts (darunter LED-Strahler) vergleichbar zu machen, wird der emittierte Lichtstrom korrigiert. Da durch den Reflektor ca. 20 % Licht verloren gehen, wird der gemessene Lichtstrom im 90°-Kegel mit dem Faktor 1,25 multipliziert (bio, Energy Piano, und Kreios 2009, 549).

Die in der Vorstudie untersuchten LED-Retrofit-Strahler fallen damit in die Klassen B+⁹ bis B (bio, Energy Piano, und Kreios 2009, 490). Handelt es sich um Modelle, die mit einem externen Netzteil betrieben werden, gilt ein Korrekturfaktor von 1,1. Einbauleuchten, die als Ersatz für konventionelle Halogeneinbaustrahler (*Downlights*) betrieben werden, hatten in der Vorstudie bis zu 51 lm/W (bio, Energy Piano, und Kreios 2009, 495), die damit „A+“ bis „A++“ erreichen.

Die Studie zu Los 19b (Lampen mit gerichtetem Licht) schlägt vor, dass LED eine Mindestlebensdauer¹⁰ von 10.000 Stunden aufweisen sollen. Retrofit-LED-Lampen, welche als Ersatz für Glühlampen oder Halogenlampen angeboten werden, sollen zudem nur warmweißes Licht abstrahlen (Farbtemperatur maximal 3300 K und in weiteren Stufen Absenkung auf 3000K) und sie sollen einen guten Farbwiedergabeindex (CRI) von mindestens 80 aufweisen (bio, Energy Piano, und Kreios 2009, 552). Zudem wird von den Autoren für Lampen mit gerichtetem Licht eine Mindesteffizienzklasse von B oder A vorgeschlagen (bio, Energy Piano, und Kreios 2009, 617).

Die Vorstudie empfiehlt, nach 4 Jahren die Verordnungen für Haushaltslampen mit besonderem Augenmerk auf die Entwicklung der LED-Technologie zu überprüfen. Umwelt- oder Ressourcenauswirkungen der LED-Technologie abseits von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen wurden nicht untersucht. Besonders erwähnt wird die Gefahr eines starken Rebound-Effektes bei der Einführung neuer, effizienterer Technologien wie LED (bio, Energy Piano, und Kreios 2009, 294).

2.4 Weitere Produktkennzeichnungen

Blauer Engel

In Deutschland können besonders umweltverträgliche Produkte den Blauen Engel, eines der ältesten Umweltzeichen der Welt, erhalten. Besonders energieeffiziente Lam-

⁹ Die Klasse B+ ist in der Vorstudie zu Los 19 vorgeschlagen und wird hier als solche beschrieben. Es ist jedoch fraglich, ob die neue Einteilung der Energieeffizienzklassen so umsetzbar ist. Die Energieverbrauchskennzeichnungsrichtlinie ermöglicht die Einführung von „Plus-Klassen“ lediglich als A+, A++ und A+++.

¹⁰ Hier definiert als L₇₀F₅₀ - siehe Abschnitt 3.4.

pen können ebenfalls – freiwillig – ausgezeichnet werden. Dafür gelten strenge Kriterien über die Effizienz der Lichtquelle hinaus.

So werden bestimmte Testkriterien vorgeschrieben, die das Produkt nach definierten Schaltzyklen und Betriebsdauern einhalten muss, um die Kennzeichnung zu erlangen. Die Effizienzbetrachtung erfolgt immer bezüglich des Gesamtsystems („Bilanzgrenze des Aufwandes“), berücksichtigt also alle elektronischen Bauteile, Netzteile etc. und den Energieaufwand, der nötig ist, um dem Anwender einen bestimmten Endnutzen bereitzustellen („Bilanzgrenze des Nutzens“)(UBA 2010, 5).

Vorgaben gelten bezüglich der Farbtemperatur, der Farbwiedergabe, der Beständigkeit (Lebensdauer, Ausfallrate und Lichtstromerhalt in der Nutzungsphase) sowie der Effizienz („Wirkleistung“)(UBA 2010, 8-11). Für den Farbwiedergabeindex Ra gilt ein Mindestwert von 80, für den Lichtstromerhalt 85 % nach einer Brenndauer von 6.000 Stunden (in Abschnitt 3.4 bezeichnet als L_{85}). Nach dieser Zeit und 20.000 Schaltzyklen müssen mindestens 50 % der Lampen überleben (in Abschnitt 3.4 bezeichnet als F_{50}).

Die Effizianzorderungen orientieren sich an der o.g. Gleichung aus der Verordnung 244/2009/EG, legen diese jedoch etwas strenger aus, da nicht der Anfangswert des Lichtstromes Φ , sondern dessen Mittel über die Mindestnutzdauer zugrunde gelegt wird (UBA 2010, 12).

Weitere Anforderungen betreffen elektromagnetische Felder, Stromschlagsicherung, UV-Strahlung und den Quecksilbergehalt. Letzterer ist für LED-Lampen nicht relevant, da sie kein Quecksilber enthalten. Die effizienten Modelle aktueller LED-Produkte (sowohl Retrofit- als auch anderer Systeme) erfüllen die Kriterien und könnten damit mit dem Umweltzeichen „Blauer Engel“ ausgezeichnet werden.

VDE-Gütesiegel

Der Verband der Deutschen Elektroindustrie (VDE) vergibt ein Gütesiegel „Quality Tested“. Kernanforderungen der Kennzeichnung für LED-Lampen sind eine Mindestlebensdauer von 30.000 Stunden, eine Farbtemperatur von max. 3000 K und eine Mindesteffizienz von 40 lm/W. Die ersten beiden Kriterien sind damit strenger als die in der EU-Verordnung 244/2009/EG, jedoch von den meisten LED-Produkten problemlos zu erfüllen. Das Effizienzkriterium entspricht einer Mindesteffizienzklasse von „B+“. Anforderungen an elektromagnetische Verträglichkeit, photobiologische Sicherheit und technische Gebrauchseigenschaften sind bereits teilweise in IEC-Normen festgelegt.

3 Verwendete Materialien und Umweltauswirkungen

3.1 Aufbau von LED und verwendete Materialien

Eine LED-Lampe enthält mehrere Bauteile: 1) den Licht emittierenden Halbleiter selbst, 2) einen Kühlkörper 3) ein elektronisches Netzteil ggf. mit Farbregelung und 4) evtl. optische Teile zur Strahlenbündelung oder -diffusion. An dieser Stelle wird insbesondere auf die Bauteile 1 und 2 eingegangen, Bauteil 3 wird in Abschnitt 3.6 behandelt.¹¹ Bauteil 4 ist für alle Alternativleuchtmittel gleich relevant und dürfte keine besonderen Umweltauswirkungen oder Knappheitsprobleme aufweisen, da die optischen Teile meist aus Glas oder Kunststoff bestehen. In der Ökodesign-Vorstudie werden die Komponenten weiter aufgeschlüsselt (bio, Energy Piano, und Kreios 2009, 491).

Zunächst werden im Folgenden die für die Halbleiterverbindungen verwendeten Halbmatalle im Hinblick auf ihre Verfügbarkeit, ihre Reichweite sowie mögliche Umweltauswirkungen bzw. Toxizität untersucht.

Tab. 3: Technisch bedeutsame LED-Halbleiterverbindungen

Halbleitermetalle	Abkürzung	Erzeugtes Licht
Indium Galliumnitrid	InGaN	Grün, Blau (Weiß)
Aluminium Indium Gallium Phosphid	AlInGaP	Rot, Orange, Gelb
Aluminium-Galliumarsenid	AlGaAs	Rot
Galliumarsenid Phosphid	GaAsP	Rot, Orange, Gelb

Quelle: FGL (2010, 19).

Die wichtigsten für Halbleiterkristalle verwendeten Verbindungen sind in Tab. 3 zusammengefasst. Je nach gewünschter Lichtfarbe kommen darin verschiedene der seltenen Metalle zum Einsatz. Da hier eine Trägerschicht mit nur wenigen Halbmetallatomen ausgestattet („dotiert“) wird, beläuft sich der Einsatz jedoch auf einen äußerst geringen Anteil von unter 30 µg Ga/In pro LED-Chip.

Der Halbleiterchip selbst ist bei Hochleistungs-LED meist ca. 1 mm² groß, bei Standardprodukten regelmäßig mit Kantenlängen unter 300 µm. Produziert werden diese in verschiedenen Verfahren in 2 oder 5 Zoll (ca. 5–13 cm) großen „Wafern“, die anschließend in Chips geschnitten werden. Aus typischen 2 Zoll-Wafern werden etwa 8.000-10.000 Standard-LED geschnitten. Der Schnittstaub wird nur teilweise rezykliert, was einen Materialverlust von meist über 50 % und damit großes Recyclingpotenzial bedeutet. Bei Hochleistungs-LED ist der Verlust mit 1.500 geschnittenen (größeren) Chips pro Wafer geringer (Dadgar 2010).

¹¹ Für Betriebsgeräte größerer Bauart siehe auch die EU-Ökodesignrichtlinie (Los 2, Transformatoren).

3.2 Produktionsumfang und statische Reichweite der verwendeten Materialien

Aluminium wird in großem Umfang produziert. Die Halbmetalle Indium, Gallium und Arsen, die in Halbleitern eingesetzt werden, sind Nebenprodukte der Gewinnung anderer Metalle. Die oft nur in relativ geringen Konzentrationen in den Erzen enthaltenen Halbmetalle können von vielen Hütten verfahrenstechnisch nicht isoliert werden, weshalb noch Ausbaupotenzial bei der Produktion liegt.

Die Konzentration von Indium in der Erdkruste ist äußerst gering, geringfügig höher als jene von Silber: ca. 0.05 ppm. Gewonnen wird Indium meist als Nebenprodukt v.a. der Zinkproduktion, mit einer Konzentration von ca. 100 ppm (Mikolajczak 2009, 1).¹² Eine klare Einschätzung der Produktionskapazitäten und damit der statischen Reichweite sowie der Reservenbasis¹³ ist schwierig: Nach Berechnungen im Jahr 2007 auf Basis des Indiumanteils in Zinkerzen betragen die Schätzungen zu Lagerstätten 2.800-6.000 t (Behrendt und Scharp 2007, 17). Die Produktion beträgt 450 t/Jahr, wobei bei steigenden Preisen mit einem leicht ausbaubaren Abbau von 500 t/Jahr¹⁴ gerechnet werden kann. Die Reserven betragen 50.000 t (Mikolajczak 2009, 1).¹⁵ Auch konservativere Schätzungen stiegen in den vergangenen Jahren an: 2008 bewertete USDI die chinesischen Reserven neu, wodurch die von USDI geschätzten Weltreserven von 2.800 auf 11.000 t stiegen (USDI 2010). Für die LED-Produktion kommen jedoch aktuell nur ca. 4 % der globalen Produktion zum Einsatz, ein Großteil der Indiumproduktion wird für Dünnfilmbeschichtungen z.B. in LCD-Displays oder Photovoltaikmodulen verwendet.

Die statische Reichweite (Reichweite der gegenwärtig bekannten und wirtschaftlich abbaubaren Ressourcen bei gegenwärtigem Produktionsumfang) liegt für Indium damit in einem äußerst breiten Korridor, abhängig von den Quellen. Insbesondere aufgrund des Nachfrageanstiegs in Alternativverwendungen könnte es aufgrund mangelnder Produktionskapazitäten auch kurzfristig zu Verknappungen kommen.

Gallium wird ebenfalls als Nebenprodukt gewonnen, und zwar bei der Aluminiumproduktion. Obwohl in den vergangenen Jahren hier eine extrem hohe Preisvolatilität herrschte aufgrund drohenden Nachfrageüberhangs und konsequenten Vorratskäufen, damit steigenden Preisen und resultierender Überproduktion, was wiederum zu historischen Preistiefs führte, ist nicht von einer langfristigen Knappheit auszugehen

¹² Für eine detaillierte Analyse der Produktionsprozesse siehe „Indium“ in Wittmer u.a. (2010).

¹³ Als Reserven sind definiert jener Teil der Lagerstätten, der zum Zeitpunkt der Datenerhebung wirtschaftlich abbaubar wäre. Als Reservebasis wird jener Teil der Ressourcen (sämtliche Vorkommen) eines Stoffes definiert, der bestimmte physische und chemische Kriterien erfüllt (etwa Konzentration, Qualität und Tiefe der Lagerstätte), so dass er potenziell abgebaut werden könnte. Sie enthalten die gegenwärtig wirtschaftlich abbaubaren Ressourcen (Reserven) und die unwirtschaftlichen (USDI 2010, 189-190).

¹⁴ Nur ca. 500 t von 1500 t indiumhaltigen Metalls werden von Schmelzereien verarbeitet, die Indium isolieren können (Mikolajczak 2009, 2), daher werden hier potenzielle Kapazitäten nicht genutzt.

¹⁵ Mikolajczak spricht zwar von „reserves“, angesichts der USDI-Schätzungen von 16 kt scheinen jedoch diese Zahlen eher die Reservebasis darzustellen.

(Mikolajczak 2009, 3-4), da Gallium grundsätzlich als Nebenprodukt von Aluminium gewonnen werden kann.¹⁶

Für manche Dioden wird zudem Germanium als Trägersubstrat in vergleichsweise großen Mengen verwendet. Dies ist jedoch kaum für LED und nur in besonderen Anwendungen der Fall, und es ist davon auszugehen, dass es mittelfristig durch Träger wie Kupfer oder Silizium ersetzt werden wird (Dadgar 2010).

Auch Germanium und Arsen sind Nebenprodukte der Metallverhüttung. Germanium wird v.a. aus Zink- und Bleierzen gewonnen, Arsen bei der Verhüttung von v.a. Kupfer, Gold und Blei, kann jedoch auch aus Pyriten und anderen Mineralien gewonnen werden. USDI schätzt die gegenwärtig wirtschaftlich auszubeutenden Reserven auf die ca. 20-fache Weltjahresproduktion, die Reservebasis jedoch auf das über 200-fache, was bei steigenden Preisen eine Versorgung ermöglichen dürfte (USDI 2010). Weitere Aussagen hierzu benötigen tieferegehende Analysen, die in dieser Arbeit nicht vorgesehen sind.

Tab. 4: Produktion, Reserven, Reichweite und Konzentration relevanter Stoffe

Metall / Stoff	Jahresproduktion in 10 ³ t	Reserven in 10 ³ t	Reservenbasis in 10 ³ t	Statische Reichweite in Jahren	Preissteigerung erwartet
Indium	0,6	3 – 50 ² 11 ³	6 ¹ 16 ³	6 – 13 100 ²	x
Gallium	0,078		15.000	Abh. v. Bauxitförderung	(x) ²
Arsen ⁸	53,5	1000	11.000	> 20	(x)
Aluminium	36.900	Keine Knappheit in LED-Quantitäten		Keine Knappheit	

Quellen: wenn nicht anders vermerkt, Zahlen für 2009 USDI (2010), sonst: 1 (Behrendt und Scharp 2007), 2 Mikolajczak (2009), 3 USDI (2008, 2), 4 (Elsner u. a. 2009, 6), 5 (Angerer u. a. 2009, 324).

Aluminium wird weltweit in großen Quantitäten gewonnen, bei der LED-Produktion jedoch nur als Dotierungsmetall sowie für den Reflektor und daher in kleinsten Mengen benötigt. Eine Knappheit bei der Produktion der Halbleiter ist daher auszuschließen. Sollten große Kühlkörper für LED-Lampen jedoch auch in Zukunft und in damit in größerer Zahl erforderlich sein (s. Abschnitt 3.4) und dafür vorwiegend Aluminium verwendet werden, könnte Aluminium durchaus ein Produktionskosten- und damit Endpreisfaktor sein.

Insgesamt ist nicht zu erwarten, dass die statische Reichweite und Produktionskapazität der seltenen Metalle konstant bleibt, da sie stark von der Fördermenge der Primärmetalle abhängt sowie von den Entwicklungen der Weltmarktpreise bzw. der schwer abschätzbaren Nachfrage für verschiedene Produktgruppen. Der US Geological Survey, eine bedeutende Informationsquelle vieler Ressourcenanalysen, veröffent-

¹⁶ Für eine detaillierte Analyse der Produktionsprozesse siehe „Gallium“ in Wittmer u.a. (2010).

licht seit 2009 daher auch keine Reserven und damit Reichweiten mehr (USDI 2010, 58-59, 74-75).

Abschnitt 4.3 schätzt grob ab, welchen Umfang eine vollständige Umstellung der Haushalts- und Bürobeleuchtung in Deutschland auf LED hätte, und dies in Relation zur Produktion und zu den Reichweiten der seltenen Metalle zu setzen.

3.3 Toxizität und Umweltbelastungen¹⁷

Die Dotierungselemente Indium und Germanium sind in metallischer Form nicht als toxisch eingestuft. Aus der Halbleiterindustrie sind keine Berichte zu den Halbmetallen bekannt („Indium“ in Wittmer u.a. 2011), Verbindungen könnten jedoch schädlich sein (s.u.). Indium als Pulver ist leichtentzündlich, gesundheitsschädlich beim Einatmen (H332), verursacht schwere Augenreizung (H319), kann die Atemwege reizen (H335) und verursacht Hautreizungen (H315). Gallium verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden (H314), die letale Dosis liegt bei ca. 50 mg/kg Körpergewicht. Eine Galliumvergiftung ist in der Nutzungsphase von LED aufgrund der äußerst geringen verwendeten Mengen jedoch nahezu ausgeschlossen („Gallium“ in Wittmer u.a. 2011).

Galliumphosphid wird in der Gefahrstoffkennzeichnung als „reizend“ (H319, H335, H315) eingestuft, Indiumphosphid als „kann vermutlich Krebs erzeugen“ (H351). Gallium wird auch medizinisch verwendet, hier mit dem Zusatz „leberschädigend“. Die Verbindung Galliumarsenid ist (aufgrund des Arsenanteils): giftig bei Verschlucken (H301), giftig bei Einatmen (H331) und sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung (H410).

Arsen ist giftig bei Einatmen (H331), giftig bei Verschlucken (H301) und sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung (H410), was potenziell in der LED-Produktion relevant sein könnte. Das US-Innenministerium weist auf Studien hin, die ein erhöhtes Diabetesrisiko nach Kontakt mit Arsen zeigen. Trotz WHO-Grenzwerten von 10 ppb existieren keine Regulierungen und verbindlichen Grenzwerte für Arsenkonzentrationen in Nahrungsmitteln. Lediglich in der EU und den USA existieren Grenzwerte für Konzentrationen im Trinkwasser (USDI 2010). In LED wird es als Metallverbindung eingesetzt. Gallium- und Indiumarsenid sind – wie Arsen selbst – giftig bei Einatmen (H331), giftig bei Verschlucken (H301) und sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung H410.

Studien wiesen im Labor bei Ratten Schädigungen des Immunsystems durch Indium- und Galliumarsenid nach (Bustamante u. a. 1997), sowie Fruchtbarkeitseinschränkungen durch Schädigung der Spermien (Omura u. a. 1996). Weitere Studien in Japan fanden zunächst (auch für Phosphide) bei Aufnahme über die Atemwege im Labor an

¹⁷ Neben den Literaturangaben wurde die Einstufung der Stoffe ermittelt über die GESTIS-Stoffdatenbank <http://www.dguv.de/ifa/de/gestis/stoffdb/index.jsp> und über Anhang VII der Verordnung 1272/2008 übertragen in Gefahrenhinweise (H-Sätze). Besonderen Dank an Ines Öhme für ihren Beitrag.

Hamstern Einschränkungen der Lungenfunktion durch Entzündungen (Yamazaki u. a. 2000), in einer Untersuchung von Arbeitern in der Halbleiterindustrie bei geringeren Konzentrationen jedoch keine signifikanten Auswirkungen (Asakura u. a. 2008). Eine Life Cycle Analyse aus den USA von LED-Straßenbeleuchtungen erwähnt kanzerogene Stoffe im Produktionsprozess, benennt diese jedoch nicht näher (Hartley, Jurgens, und Zatcoff 2009, 27).

Diese Studienergebnisse dürften allerdings maßgeblich für die Halbleiterproduktion relevant sein (Arbeitsschutz), da die Konzentration der Metalle und Verbindungen dort höher ist. Mit gesundheitlichen Gefährdungen durch LED in der Betriebsphase ist nach gegenwärtigem Kenntnisstand nicht zu rechnen, da die Stoffe in fester Form vorliegen, die Bauteile in der Regel verkapselt sind und kaum Bruchrisiko besteht (Dadgar 2010). Leuchtmodule enthalten sehr geringe Mengen dieser Stoffe: unter 30 µg Gallium (Ga) bzw. unter 30 ng Indium (In) pro LED-Chip, wobei eine Lampe meist mehrere Chips enthält.¹⁸ Für das Produktlebensende siehe Abschnitt 3.10.

Der große Vorteil von LED gegenüber Leuchtstoffröhren, Kompaktleuchtstofflampen und Metalldampflampen ist weiter, dass sie nach derzeitigem Kenntnisstand bisher kaum Schwermetalle enthalten (z.B. Quecksilber).¹⁹ Große Hersteller wie Osram oder Cree weisen ihre LED-Produkte auch als RoHS- und REACH-konform aus. Dies stellt einen erheblichen Vorteil gegenüber anderen Beleuchtungstechnologien dar, der auch die Position von LED als BNAT in der Vorstudie zu Los 19, Teil II begründet.

Alle seltenen Metalle belasten die Umwelt im Produktionsprozess durch relativ hohen Energieverbrauch (s. auch MEEuP-Methodologie, Tab. 29). Bei Indium ist dies insbesondere das Rösten von Rückständen aus Zinkproduktion und die Raffination durch Elektrolyse/Vakuum-Destillation. Zusätzlich sind weitere Belastungen möglich: bei Indium Abwasserbelastung bei der Schwermetallabtrennung durch Cadmium, Arsen, Thallium, Ammoniumsalze, Schwermetalle (siehe Tabelle 2 zu Indium in Wittmer u.a. 2011). Bei Gallium kann es zum Säureeintrag in Abwässer bei der Gewinnung und Verarbeitung kommen. In der LED-Produktion besteht das Risiko von Luftbelastungen

¹⁸ Eine typische LED-Lampe (lichtstromäquivalent zu einer 60W-Glühbirne), die zur Abschätzung des Materialverbrauchs in Abschnitt 4.3 verwendet wurde, enthielt 6 Hochleistungs-LED-Chips. Diese dürfte entsprechend <180 µg Ga und <180 ng In enthalten. Selbst eine LED-Lampe mit 20 x 1mm² Hochleistungs-Chips dürfte <600 mg Ga und <600 ng In enthalten.

¹⁹ Die RoHS-Richtlinie erlaubt seit 2010 (und zunächst bis 2014) für eine Spezialanwendung den Einsatz von max. 10µg Cadmium pro mm² Licht emittierende Fläche in LED. Das Schwermetall wird hier zur Effizienzsteigerung durch Umwandlung von blauem in andersfarbiges Licht genutzt. Allerdings ist das Schwermetall in LED vergleichsweise stark gebunden und verkapselt, so dass die Gefahr von Freisetzung (etwa durch Bruch) gering ist. Trotzdem könnte dies den Verlust eines wichtigen Vorteils der LED gegenüber KLL bedeuten. Dies ist jedoch unwahrscheinlich, da die konventionelle Farbkonversion durch Phosphor für die meisten Anwendungen ausreicht.

Insbesondere bei der Verwendung von aufgelöteten SMD-LED-Bauteilen und Elektronik besteht zudem die Gefahr, dass bleihaltige Lote verwendet werden. Problematisch ist der höhere Schmelzpunkt bleifreier Lote, der nur ein kleines Temperaturfenster für den Lötprozess bis zur Beschädigung der LED lässt. Nach Angabe eines großen Herstellers ist jedoch die Verwendung bleifreier Lote im „Reflow-Prozess“ seit 2006 Standard (Osram Opto Semiconductors 2010, 1).

durch eingesetzte Arsenwasserstoffe sowie Gallium- und Arsen-Stäube (toxisch/kanzerogen).

Stärkere Umweltauswirkungen bei der Nutzung von Indium, Gallium und Germanium sind nicht bekannt, da sie nicht wasserlöslich oder flüchtig sind und nur in äußerst geringen Mengen freigesetzt werden („Indium“ in Wittmer u.a. 2011).

3.4 Lebensdauer: Determinanten und Konsequenz

Da LED selten vollständig ausfallen, sondern über die Zeit der Lichtstrom abnimmt, wird die Lebensdauer definiert als Zeit bis Erreichen von x % des ursprünglichen Lichtstroms, für Notbeleuchtung 80 % (L_{80}), oder für Normalbeleuchtung bis 70 % (L_{70}) oder 50 % (L_{50}). Zu dem Abfall an Effizienz über den Lebenszyklus kommt es aufgrund von Störstellen im Halbleiterkristall. Sie sind ausgleichbar (in der Lichtstärke) durch zusätzliche Leistungsaufnahme, wenn eine konstante Lichtleistung wichtig ist. Die in diesen Kategorien gemessene Lebensdauer auf dem Markt verfügbarer LED beträgt bereits heute 50.000 Stunden (FGL 2010, 20).²⁰ In der Vorstudie zur Ökodesign-Richtlinie Los 19, Teil II wird ein L_{95} für die ersten 6.000 und L_{85} für die ersten 25.000 als „gute Qualität“ bezeichnet (bio, Energy Piano, und Kreios 2009, 415). Diese dürfte in den kommenden Jahren weiter steigen.

Die Lichtstärke (und damit indirekt die Lebensdauer) einer LED hängt negativ von der Betriebstemperatur ab. Die maximale Betriebstemperatur beträgt 100-120°C, je kühler die Halbleiter sind, desto geringer ist jedoch ihr Leistungsabfall (Veitl 2010). Damit wird zum einen die Kühlung, zum anderen die Umgebungstemperatur für einen effizienten Betrieb extrem wichtig. Auch zeigt dies die besonders gute Einsetzbarkeit von LED in Kühl- und Gefriergeräten.

3.5 Kühlung

Heute bestehen die Kühlkörper von LED-Lampen regelmäßig aus Aluminium (vgl. die Produkte der großen Anbieter Philips, Osram, Cree). Eine mögliche Alternative wäre Keramik. Rubalit und Alunit etwa haben gegenüber Aluminium als Kühlkörpermaterialien den Vorteil, sich in gleichem Maß wie Halbleiter auszudehnen, elektrisch zu isolieren (was bei direkter Aufbringung der zu kühlenden Komponente auch die Kühlleistung steigert) und extrem lang haltbar zu sein (Highlight 2010b, 45), so dass bei intelligentem Produktdesign selbst eine industrielle Wiederverwendung möglich sein könnte. Zudem kann damit der Einsatz des sehr energieintensiven Aluminiums reduziert werden.²¹

²⁰ Diese Lebensdauer entspricht etwa 6 Jahren Dauerbetrieb, 12 Jahren Halbtagsbetrieb und 18 Jahren typischen Bürobetriebs (nach konservativer Schätzung der EU-Impact Assessments von 11h an 250 Tagen/Jahr). Siehe dazu z.B. FGL (2010, 20).

²¹ Für einen Vergleich zwischen verwendeten Materialien in verschiedenen Retrofit-Lampen siehe (bio, Energy Piano, und Kreios 2009, 491).

Ein großes Problem für LED stellen aufgrund ihrer geringen Effizienz-Betriebstemperatur höhere Umgebungstemperaturen dar. So führte in einer Studie aus dem Jahr 2004 etwa eine Erhöhung der Temperatur von 41 auf 69°C zu einem Leistungsabfall auf 75 % statt auf 88 % nach 1.000h Betrieb (Narendran und Hong 2004, 4). Eine Studie von 2007 untersucht verschiedene LED-Produkte in verschiedenen Umgebungen (belüftet, halbbelüftet und unbelüftet). Während die Auswirkungen der Chiptemperatur auf die Lebensdauer klar erkennbar sind, lässt nach der (für LED kurzen) Beobachtung von 1.000h bei der Simulierung der Umgebungen nur eines der beiden Produkte klaren und schnellen Leistungsabfall erkennen (Narendran, Gu, und Jayasinghe 2007, 3-4).

Auch die Vorstudie zu Lot 19, Teil II behandelt das Thema Temperatur. Hier wird angemerkt, dass zur Messung der Lebenszeit und zum Test von LED keine einheitlichen Verfahren existieren (bio, Energy Piano, und Kreios 2009, 417). Dies ist u.a. relevant für die Regulierung im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie, die Lampenlichtstromfaktoren (*lamp-lumen maintenance factors*, LLMF) festlegt, welche dementsprechend bei LED stark von der Temperatur und damit der Kühlung abhängen.

Die Ergebnisse für den Belüftungszustand dürften zudem auch auf Klimazonen übertragbar sein, was den Betrieb von LED in südlichen Ländern potenziell ineffizient machen könnte. Dazu sind jedoch weitere tiefer gehende Analysen nötig.

3.6 Energieverbrauch über den Lebenszyklus

Der Energieverbrauch von LED lässt sich in die drei Phasen des Lebenszyklus einteilen und hat dort jeweils unterschiedliche Umweltauswirkungen, beispielsweise Treibhausgasemissionen, Eutrophierungs- und Versäuerungspotenzial und Ressourcenkonsum (Osram Opto Semiconductors 2009), aber auch Lichtverschmutzung (indirekt) oder gesundheitsschädliche Wirkungen.

Die LED-Produktion ist vergleichsweise energieintensiv: eine 8 W-LED-Lampe benötigt ca. 9,9 kWh Produktionsenergie, eine 40 W-Glühlampe hingegen nur ca. 0,61 kWh, eine Kompaktleuchtstofflampe (KLL) ca. 4 kWh. Berücksichtigt man jedoch, dass für die Lebenslichtleistung einer LED 25 Glühlampen bzw. 2,5 KLL benötigt würden, liegt die für diese nötige gesamte Produktionsenergie bei ca. 15,3 bzw. 10,2 kWh und damit über jener für LED (Osram Opto Semiconductors 2009, 14). Es ist zudem zu erwarten, dass im Zuge einer Serienfertigung die Produktionsenergie pro Stück bis 2020 um etwa 75-80 % sinken wird (Müller 2010).

Für den Energieverbrauch während des Betriebs ist zum einen der Effizienzgrad der LEDs relevant, zum anderen jener der elektrischen Vorschaltgeräte, die benötigt werden. Bereits heute ist die Lichtausbeute (lm/W) von LEDs so hoch, dass sich die Anschaffungskosten nach ca. 3,8 Jahren amortisieren können (s. Trotz ihres relativ hohen Anschaffungspreises (aufgrund noch hoher Produktionskosten und geringer Stückzahlen) ist es wegen der langen Lebensdauer und geringen Wartungsanfälligkeit nach einigen Quellen bereits heute wirtschaftlich, LED zur Beleuchtung einzusetzen. Die FGL

erwartet mit Blick auf die Gesamtkosten eine Amortisation nach 3,8 Jahren (s. Lebenszykluskosten / Wirtschaftlichkeit in Abb. 2) (FGL 2010, 9).

Abb. 2). Dennoch sind viele LED-Produkte heute noch weit unterhalb der mit anderen Technologien²² erzielbaren Lichtausbeute. Zu den erwarteten Entwicklungen der Lichtleistung siehe auch Abschnitt 4.1.

Die Netzteile für LED müssen eine bautypgerechte stabile Energieversorgung bereitstellen. Diese dient der optimalen Ausnutzung der LED über die Lebenszeit. Ggf. ist je nach Bauart auch eine Steuerung von Lichtstärke und -farbe möglich. Die Geräte können als externe konzipiert oder direkt in das Leuchtmittel eingebaut sein. In diesem Fall kann weiter unterschieden werden zwischen integrierten Netzteilen, die nicht ohne Zerstörung aus einer Leuchte entfernt werden können und Einbaugeräten, die zu entfernen bzw. austauschbar sind. Technisch wird weiterhin zwischen spannungsgesteuerten Geräten unterschieden, die Dimmung nur über „Pulsen“ erlauben, und Konstantstromgeräten, die für eine beliebige Anzahl „in Reihe geschalteter“ LED-Module einen konstanten Betriebsstrom bereitstellen (bis zur Leistungsgrenze des Betriebsgeräts). Dies ist für eine effiziente Ausnutzung der Lebensdauer vorteilhaft, da keine Effizienzverluste durch Bauteile zur Strombegrenzung erlitten werden (FGL 2010, 40).²³

Einige Autoren argumentieren, dass Netzteile bzw. Vorschaltgeräte auch für Leuchtstofflampen benötigt würden und daher für die Entscheidung zwischen den Beleuchtungstechnologien nicht relevant sind (Hartley, Jurgens, und Zatcoff 2009). Die Geräte sind jedoch unterschiedlicher Bauart und die Entwicklung ihrer Effizienz für die Gesamteffizienz durchaus wichtig (s. Daten in Tab. 5). Aus diesem Grund wird auch in der Ökodesign-Richtlinie die gesamte Lampe in die Effizienzberechnung einbezogen (bio, Energy Piano, und Kreios 2009, 431). Ebenso von Bedeutung ist eine effiziente Kühlung der Halbleiter, da diese extrem wärmeempfindlich sind (s. Abschnitt 3.4). Wichtig für die Gesamteffizienz und damit den Energieverbrauch sind auch die optischen Verluste, die bei LED vergleichsweise gering ausfallen (Etter u. a. 2009, 2); Kuhn 2009, 9).

Für den Energieverbrauch in der Lebensendphase/Recycling sind bisher keine Daten verfügbar (s. Abschnitt 3.6), trotzdem schreibt etwa Osram LED für die Lebensendphase einen „Energiekredit“ zu, der aus „Verbrennung“ resultiert (Osram Opto Semiconductors 2009, 20). Können die Lampen künftig recycelt werden, dürfte dies jedoch die Produktionsenergie senken.

3.7 Licht und Zirkadianer Rhythmus

Studien zeigen, dass der Zirkadiane Rhythmus, natürliche „Biorhythmus“, von Licht beeinflusst wird. Dies kann dann relevant werden, wenn etwa Straßenbeleuchtung mit größerer Leistung oder anderer Farbtemperatur eingesetzt wird. So wurde etwa ge-

²² Dies trifft speziell auf einige Typen von Hochdruckentladungslampen zu.

²³ Zur Dimmbarkeit verschiedener Netzteile s. (Highlight 2010a, 67).

zeigt, dass die Ausschüttung verschiedener für die Fruchtbarkeit relevanter Hormone durch zusätzliches Licht erhöht wird und so den natürlichen Biorhythmus verändert, jedoch sind Aussagen über Langzeitauswirkungen noch nicht möglich (Kripke u. a. 2010). Rea u.a. konnten zudem zeigen, dass ein weiteres für den menschlichen Zirkadianen Rhythmus wichtiges Hormon, Melatonin, stark von Licht beeinflusst wird (Rea u. a. 2010). Zusätzlich zeigen sie, dass Melatonin besonders auf Licht kurzer Wellenlängen, d.h. UV- bis blaues (auch „kaltes“) Licht reagiert (Rea, Figueiro, Bierman, und Bullough 2010, Fig. 3), also gerade jene Farbtemperaturen bei welchen LED hohe Wirkungsgrade erzielen.

Weiterhin bestehen Befürchtungen, dass diese höheren Farbtemperaturen auch Pflanzen und Tiere beeinflussen. Aus diesem Grund hat etwa die Stadt San Diego (USA) eine maximale Farbtemperatur für Beleuchtung von 5.500 K festgelegt, da tatsächliche Effekte noch nicht bekannt sind (Hartley, Jurgens, und Zatzoff 2009, 38).

Andererseits sind kühlere Farbtemperaturen für das menschliche Auge im Dämmerlicht besser sichtbar (mesopisches Sehen), so dass bei gleicher Sichtbarkeit die Lichtemission und damit sowohl Energieverbrauch und Lichtverschmutzung reduziert werden können (Morante 2008, 2). Zudem strahlen LED bauartbedingt nur in eine Richtung ab, was eine stärkere Lichtlenkung mit geringeren Verlusten ermöglicht.

Weitere Untersuchungen zur Bedeutung von Licht für den Zirkadianen Rhythmus und das mesopische Sehen sind nötig, um ihre Relevanz bestimmen zu können.

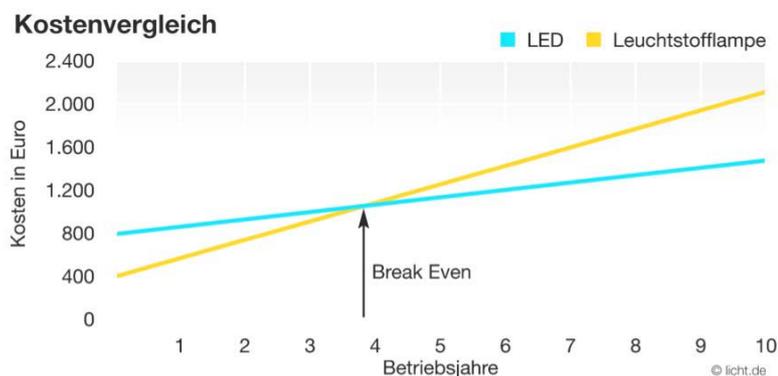
3.8 Wartung

Während des Betriebs ist ein Ausfall von LED-Lampen höchst unwahrscheinlich, da sie keine verschleißenden Teile enthalten. Somit entfällt eine Wartung nahezu vollständig; lediglich müssen die Leuchtmittel ausgetauscht werden, wenn sie an ihrem Lebensende angelangt sind, welches wie bereits dargestellt bei LED als Anteil des ursprünglichen Lichtstroms definiert ist.

3.9 Lebenszykluskosten / Wirtschaftlichkeit

Trotz ihres relativ hohen Anschaffungspreises (aufgrund noch hoher Produktionskosten und geringer Stückzahlen) ist es wegen der langen Lebensdauer und geringen Wartungsanfälligkeit nach einigen Quellen bereits heute wirtschaftlich, LED zur Beleuchtung einzusetzen. Die FGL erwartet mit Blick auf die Gesamtkosten eine Amortisation nach 3,8 Jahren (s. Lebenszykluskosten / Wirtschaftlichkeit in Abb. 2) (FGL 2010, 9).

Abb. 2: Kostenvergleich und Amortisation LED vs. Leuchtstofflampe



Quelle: FGL (2010, 9)

Dies ist jedoch noch stark produktabhängig. Andere schlagen vor, den Umstieg nicht heute, sondern in wenigen Jahren durchzuführen, da die Effizienz- und damit auch die Wirtschaftlichkeitszuwächse derzeit noch sehr hoch sind und die Vorteile in kurzer Zeit erheblich höher sein werden (Hartley, Jurgens, und Zatcoff 2009, 44)(Tsao u. a. 2010, 6). Die Ökodesign-Vorstudie zu Los 19b etwa diagnostiziert Strahler-LED im Jahr 2009 Lebenszykluskosten im Mittelfeld des Vergleichs zwischen Beleuchtungsalternativen (bio, Energy Piano, und Kreios 2009, 522). Sie kommt jedoch zu dem Ergebnis, dass LED trotzdem die beste Alternative zum Base-Case sind, da sie fast alle Umweltauswirkungen am stärksten reduziert (bio, Energy Piano, und Kreios 2009, 529).

3.10 Recycling

Erfassung

Generell fallen LED unter die Richtlinie 2002/96/EG (WEEE, in Deutschland umgesetzt über das Elektroggesetz²⁴). Demnach müssen sie recycelt werden. Zu Recyclingmöglichkeiten gibt es bisher widersprüchliche Angaben. Da LED-Lampen erst seit kurzem im Handel erhältlich sind, gibt es zu konkreten Recyclings- und Verwertungsmöglich-

²⁴ Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten vom 16. März 2005.

keiten von Massenprodukten noch keine Erfahrungen. Wegen der langen Lebensdauer gibt es nur sehr vereinzelt Rücklauf. Bisher erfolgt die Sammlung mit den Leuchtstofflampen, ein gesondertes Recyclingverfahren für LED-Lampen ist jedoch nicht bekannt (Brehm 2010). Dies bestätigt die Lightcycle GmbH, eine Non-Profit-Organisation gegründet 2006 von Lampenherstellern. Sie organisiert das Rücknahmesystem für Leuchtstoff- und Metaldampfdrucklampen und soll künftig auch LED aller Bauarten zurücknehmen.

In welcher Form LED und LED-Lampen wiederverwendet oder recycelt werden können, bleibt unklar. Der Leuchtmittelhersteller Osram gesteht ihnen in einer Lebenszyklusanalyse Energieverbrauchsgutschriften durch das Recycling zu (Osram Opto Semiconductors 2009, 20). Welche Komponenten von LED-Chips oder LED-Lampen jedoch recycelt werden können oder einen signifikanten Brennwert darstellen, wird nicht dargelegt.

Rückgewinnung der seltenen Metalle

Das Recycling von LED-Chips und damit die Rückgewinnung der verwendeten seltenen Metalle ist aufgrund der äußerst geringen Mengen pro Stück und der damit zu hohen Stückkosten auf absehbare Zeit nicht wirtschaftlich (Bröhl-Kerner 2010). So entspricht der Galliumwert in einer LED etwa 0,03 ct, jener für Indium ist noch geringer.

Derzeit existiert etwa Indium-Recycling nur in Japan (Behrendt und Scharp 2007, 7). Bis zu 50 % des Galliums im Markt stammt aus Recycling, jedoch v.a. aus industriellen Quellen (Seeking Alpha 2010). Es handelt sich also um Material, das bei der Produktion anderer Güter (oder auch von LED) anfällt und wieder in den Markt gespeist wird. Ähnliches gilt für Germanium (bis zu 60 % aus Recycling), auch hier wird jedoch primär aus der Industrie stammendes Metall recycelt (MMTA 2005).

Die Wiederverwertung benötigt große Mengen an Chemikalien. Für 1 kg Galliumarsenid-Abfall werden für den Aufschluss 10 l Salzsäure, 10 l Wasserstoffperoxid und 9 l Wasser benötigt, die nicht im Kreislauf geführt werden können. Für die Extraktion der Elemente Gallium, Arsen, Indium und Phosphor werden weiter 100 l Methylisobutylketon, 100 l Salzsäure und 25 l Wasser benötigt (Kreislaufführung möglich). Dabei besteht die Gefahr der Wasserbelastung durch Säuren und Arsen sowie durch Entstehen hochtoxischen Arsenwasserstoffs (siehe Kap. „Gallium“ in Wittmer u.a. 2011). In einer Ökobilanz aus den USA wird darauf verwiesen, dass Teile der Elektronik ggf. nicht recycelbar sind, wie Trägerplatinen (Hartley, Jurgens, und Zatcoff 2009).

Werden – wie angenommen – die seltenen Metalle aus LED nicht rückgewonnen, müssen diese einer sicheren Entsorgung zugeführt werden. Nicht ordnungsgemäß entsorgte LED werden über den Hausmüll weitgehend in Verbrennungsanlagen landen.²⁵ Aufgrund der Verkapselung der Chips und der geringen Menge pro Stück sowie

²⁵ Sollten LED in Ländern, in denen dies möglich ist, in großen Mengen auf Hausmülldeponien gelangen, kann die Freisetzung von Gallium und Arsen ein Problem darstellen.

des zu erwartenden Anteils im Hausmüll ist eine Überschreitung problematischer Konzentrationen nicht zu erwarten.

Ein weiteres Recyclingproblem könnten künftig die großen Kühlkörper darstellen. Aluminium benötigt große Mengen Energie im Recycling, Keramik ist zwar Jahrzehnte lang haltbar, jedoch nicht stofflich verwertbar.

Größeres Recyclingpotenzial als jenes der Endprodukte besteht bei der Produktion. Da bei der Chipsegmentierung bis zu 50 % des Substrats als Sägeverschnitt abfällt, könnte der Materialverbrauch in Zukunft hier weiter gesenkt werden (Dadgar 2010).

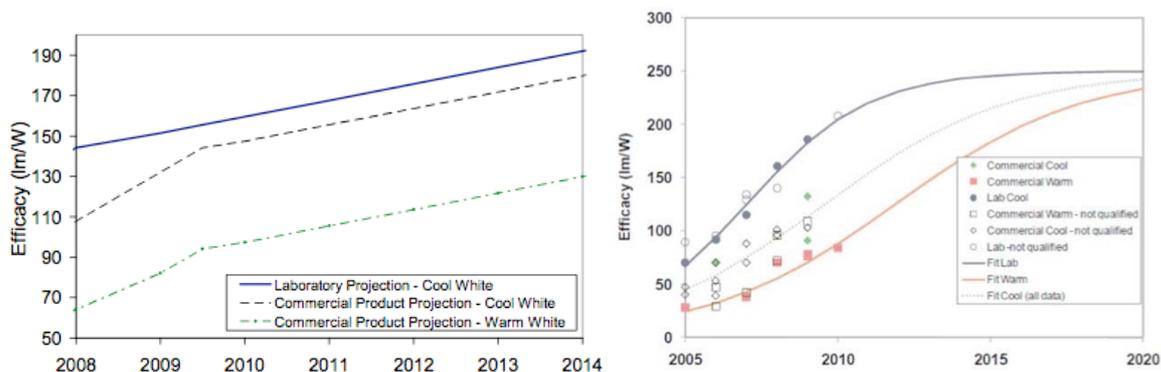
4 Perspektiven

4.1 Erwartete Effizienzentwicklung

Die Lichtausbeute der Halbleiterkristalle und ihre Leistung haben in den vergangenen Jahrzehnten exponentiell zugenommen. Während sie in den 1990er Jahren noch so gering war, dass LED fast ausschließlich für Signalfunktionen zum Einsatz kamen, haben sie Glühlampen nun überholt und die effizientesten Bautypen reichen bereits heute an Metalldampflampen heran.²⁶ Die Lichtausbeute von LED wird jährlich stark weiterentwickelt. Welche Ausbeute in einigen Jahren erreicht werden wird ist jedoch unklar. Generell ist bei der Lichtausbeute und der Beurteilung der Effizienz zwischen Kaltem Licht (*cool white*) und Warmem Licht (*warm white*)²⁷ sowie zwischen LED-Chips und LED-Lampensystemen zu unterscheiden.

Warmlicht-LED haben meist etwa nur die halbe Lichtausbeute, für Anwendungen wo die Farbtemperatur nicht ausschlaggebend ist, wäre demnach ein Einsatz der effizienteren Kaltlicht-LED sinnvoll. So prognostiziert Osram beispielsweise, dass LED 150 lm/W für warmes weißes Licht und sogar 180 lm/W für kaltes weißes Licht erzeugen könnten. Unter Berücksichtigung der Verluste der elektronischen Netzteile, thermischer und optischer Verluste könnte dies letztlich 100 lm/W bedeuten (konservative Schätzung)(Osram Opto Semiconductors 2009, 22).

Abb. 3: Erwartete LED-DIE-Effizienzentwicklung (EU-Kommission und US-Energieministerium)



Quelle: links bio u.a. (2009, 507); rechts US DOE (2010b, 67).

²⁶ LED erreichen heute eine Lichtausbeute von 20-120 lm/W und sind damit bereits effizienter als Glühlampen (ca. 15-20 lm/W) und Halogenlampen (ca. 18-30 lm/W). Die max. Lichtausbeute von Metalldampflampen (ca. 60-140 lm/W) werden sie serienmäßig vsl. jedoch erst in ca. 5 Jahren überschreiten (FGL 2010, 19).

²⁷ Für die kalt-/warm-Farbtemperatur von weißem Licht gibt es verschiedene Definitionen. So definiert etwa das US-DOE kaltes Licht als 4746-7040 K und warmes Licht als 2580-3710 K.

Die Lichtausbeute gängiger LED-Lampenmodelle liegt bei ca. 45-55 lm/W. Nach der Ökodesign-Vorstudie Los 19 wird dies künftig stark auf rund 80 lm/W bis 2015 ansteigen. Das US-Energieministerium geht von einer deutlichen Reduzierung der Verluste von ca. 33 % auf 10 % aus, so dass die Lichtausbeute für Kaltlichtlampensysteme von dort 86 lm/W im Jahr 2010 auf 219 lm/W 2020 gesteigert werden könne.

Die europäische Lampenvereinigung (siehe Los 19b-Vorstudie) und die deutsche „Fördergemeinschaft Gutes Licht“ gehen von einem Potenzial von bis zu 180 lm/W aus, das US Department of Energy rechnet gar mit bis zu 219 lm/W im Jahr 2020.²⁸ Laut eceee werden noch im Jahr 2010 zwei Unternehmen in der Lage sein, Kaltlicht-LED mit einer Lichtausbeute von 160 lm/W zu produzieren, die von Lampenproduzenten bereits 2012 oder 2013 auf den Markt gebracht werden könnten (eceee 2010, 9). Bei Angaben zur Effizienz von LED ist zu beachten, dass schon die theoretisch maximale Lichtausbeute von der Farbtemperatur abhängt. Bei einer Wellenlänge von 555 nm sind demnach theoretisch maximal 683 lm/W möglich (100 % Wirkungsgrad). Für Effizienzvergleiche ist daher eine standardisierte Farbtemperatur nötig, jedoch selten gegeben.

Tab. 5: Erwartete Effizienzentwicklung

Quelle	Erwartete Entwicklung	2010	2012	2015	2020
Europäische Lampenproduzenten (ca.)	Effizienz LED-Chip (Kaltes Licht) in lm/W	145	160	185	
	Effizienz LED-Chip (Warmes Licht) in lm/W	100	115	140	
	Effizienz Warmlicht-Retrofit-Lampe	48	60	78	
US-Energieministerium	Effizienz LED-Chip (Kaltes Licht) in lm/W	134	173	215	243
	Thermische Effizienz	89%	92%	95%	98%
	Effizienz elektr. Betriebsgerät	87%	89%	92%	96%
	Effizienz der FIXTURE	83%	87%	91%	96%
	Resultierende Gesamteffizienz	64%	71%	80%	90%
	Resultierende Nettolichtausbeute LED-Lampe in lm/W	86	121	172	219

Quelle: (bio, Energy Piano, und Kreios 2009, 507), (US DOE 2010b, 70).

Dies entspricht in etwa auch der Einschätzung der Industrie. Zumtobel Lighting geht von 30 bis 60 % Effizienzgewinn bis 2015 aus (Duenschede 2010), Trilux erwartet noch weitaus mehr (Müller 2010). Für die Entwicklung der Gesamteffizienz von LED-Lampen ist wie beschrieben jedoch auch die Effizienz der Kühlung, der elektrischen Netzteile sowie der Verkapselung und des Gesamtmoduls relevant (s. Tab. 5).

4.2 Preisentwicklung

Mit steigender Lichteffizienz (lm/W) sowie größeren Skalen und Effizienzen in der Halbleiterproduktion ist von einer kontinuierlichen Senkung der Stückpreise für LED

²⁸ Dies entspricht etwa dem von der FGL definierten theoretischen Maximum (FGL 2010, 19). Die vom DOE angegebene Lichtausbeute von 243 lm/W liegt etwa darüber (dies liegt wahrscheinlich an unterschiedlichen zugrunde liegenden Farbtemperaturen).

auszugehen. Zumobel Lighting geht von starken Preissenkungen in den kommenden Jahren aus: bis 2013 könnten die Preise um bis zu 40 % fallen (Duenschede 2010).

Das US Department of Energy schätzt die Kostenanteile bei LED-Lampen für die bereits in Abschnitt 3.1 dargestellten Produktkomponenten folgendermaßen ein: LED-Leuchtmittel 40 %, Kühlkörper 30 %, Netzteil 20 %, Optik 5 % und Montage 5 % (US DOE 2010a, 9). Die zu erwartende Kosten- und damit Endpreisentwicklung hängt damit von vielen Einzelkomponenten ab, von Effizienzsteigerungen der LED-Chips, kleineren Bauteilen, Materialentwicklungen, Skaleneffekten in der Produktion und von der Marktentwicklung (ecee 2010, 13). Die Ökodesign-Vorstudie zu Los 19b erwähnt die Gefahr eines nur moderaten Preisrückgangs für LED, da diese knappe und teure Metalle verwenden (bio, Energy Piano, und Kreios 2009, 294).

In der Industrie wird bis 2013 für blaue LED von einer Preisreduktion um jährlich ca. 15 % ausgegangen (Duenschede 2010), dies entspräche insgesamt etwa 40 %, einige Anbieter gehen von langfristig höheren Reduktionspotenzialen aus: über 60 % bis 2020 (Müller 2010). Dies weist in eine ähnliche Richtung wie die Schätzungen des US Department of Energy, das für 2010 bis 2015 von einer stärker negativen Preisentwicklung von 13 auf 2 US\$/klm bei kaltem Licht und von 25 auf 3 US\$ bei warmem Licht ausgeht. Effizientere LED-Chips (DIEs) könnten so u.a. auch die Kosten für Kühlkörper reduzieren. Sollten diese Effizienzsteigerungen nicht schnell genug technisch umsetzbar sein, müssen mehr LED pro Lampe verarbeitet werden, um die benötigte Leistung zu erhalten, was wiederum die Kosten für Kühlkörper erhöht.

Tab. 6: Erwartete Preisentwicklung für LED in \$/klm

	2010	2012	2015
LED-Preis (warmes Licht)	25	11	3
LED-Preis (kaltes Licht)	13	6	2
Preis LED-Lampe	101	61	28

Quelle: (US DOE 2010a, 11).

Die LED selbst trägt 40 % zu den Kosten einer LED-Lampe bei, jedoch entfallen bei den LED-Produktionskosten lediglich zu ca. 1/3 auf die Produktion des Halbleiters,²⁹ 2/3 entfallen auf die Anschlüsse und Verkapselung des Chips. Daher dürfte die weitere Entwicklung der „DIE“-Weiterverarbeitung eine besondere Rolle für die Kostenentwicklung spielen, sie ist jedoch auch abhängig von der Entwicklung neuer und effizienterer DIEs (US DOE 2010a, 10).

²⁹ 11 % auf das Substrat, 11 % auf das Halbleiterkristallwachstum, 12 % auf die Wafer-Weiterverarbeitung und 2 % auf Beschaffungskosten für Phosphor (US DOE 2010a, 10).

4.3 Abschätzung der Wirkung eines etwaigen vollständigen Umstiegs auf LED-Technologie auf den Verbrauch der verwendeten Halbmetalle

LED benötigen nur ca. 4 % der Weltproduktion von Indium, aber auch die Entwicklung des LED-Marktes ist unklar. So kommt eine Studie für das Bundeswirtschaftsministerium zu einer Einschätzung des künftigen Rohstoffbedarfs mit großer Bandbreite. Basierend auf verschiedenen Szenarien der Weltmarktentwicklung für LED wurde hier für 2006 – 2030 ein Anstieg des Indiumbedarfs für LED von 3 auf 14 – 46 t und für Gallium von 9 auf 44 – 143 t errechnet (Angerer, Marscheider-Weidemann, Erdmann, Handke, und Marwede 2009, 94-97).

Diese Berechnungen beruhen auf Angaben von 2008 (0,17 mg Indium/LED und 0,53 mg Gallium/LED) (Angerer, Marscheider-Weidemann, Erdmann, Handke, und Marwede 2009, 95). Auf Basis neuerer Daten werden etwas geringere Mengen der verwendeten seltenen Metalle abgeschätzt (s. Tab. 7).

Tab. 7: Rohstoffeinsatz von Halbleitermetallen in InGaN-LED

Halbleitermetall	Metallanteil pro 2"-Wafer	Enthalten in 1mm ² -Chip	Aufwand pro 1mm ² -Chip	Wirkungsgrad
Germanium		530 µg		
Gallium	300-600 mg	17-25 µg	0,23-0,46 mg	< 50 %
Indium	300-700 mg	28 ng	0,23-0,54 mg	< 0,1 %

Quelle: Eigene Berechnung auf Angaben von Dadgar (2010).

Hier wird nun auf diesen Mengenangaben aufbauend eine Abschätzung versucht, welche Mengen der seltenen Metalle bei einem fiktiven vollständigen Umstieg auf LED-Beleuchtungstechnologie im Jahr 2015 im Haushalts- und Bürobeleuchtungsbereich in Deutschland maximal für den Ersatz des Bestands und seinen Erhalt nötig wären. Diese Abschätzung erfolgt in zwei Schritten:

1. Schätzung des Lichtmengenbedarfs und der für die Produktion dieser Lichtmenge benötigten LED bei einem vollständigen Umstieg auf LED-Technologien in Haushalten und Büros;
2. Schätzung der für die Produktion dieser Menge erforderlichen seltenen Metalle, aufgeteilt nach:
 - a. Ressourcenverbrauch durch den erstmaligen Umstieg bestehender Beleuchtung auf LED-Technologie bei gleichzeitigem allgemeinem Anwachsen des Beleuchtungsbedarfs;
 - b. weiter gehender Ressourcenverbrauch bei notwendigem Lampenersatz (Bestandserhalt).

Schätzung der erzeugten Lichtmenge

Der Berechnung liegen Beleuchtungsdaten aus einer Studie von 2006 zugrunde, die von der Lichtleistung von Glühlampenäquivalenten im Haushaltsbereich und Leuchtstofflampen im Bürobereich ausgeht (Barthel u. a. 2006). Diese Angaben wurden mit der jeweiligen Beleuchtungseffizienz auf die installierte Lichtleistung hochgerechnet und in einem letzten Schritt abgeschätzt, wie viele LED zum Ersatz nötig wären.

Zudem wurden die Bandbreite der erwarteten Effizienz- und Preisentwicklungen bis zum Jahr 2015 berücksichtigt. Die Ergebnisse sind stark von verschiedenen Faktoren abhängig, die z.T. nicht zuverlässig geschätzt werden können. So ist etwa der technische Fortschritt der LED unklar (s. vorangegangene Kapitel). LED haben gegenüber anderen Lichtquellen den Vorteil nur in eine Richtung abzustrahlen. Dies erhöht ihren Wirkungsgrad im Vergleich erheblich (Kuhn 2009, 9).

Tab. 8: Schätzung der erzeugten Lichtmenge und Ersatzmenge von LED-Lampen in Deutschland

Beleuchtung	Einheit	Haushalt	Büro	LED 2010	Entwicklung ^{erw} →	LED 2015 (kons.)	LED 2015 (prog.)
		GL 60W	2x T8				
Lichtleistung Lampe	lm	806,00	10.400,00	450,00	5 bis 10%/J	574,33	724,73
Betriebswirkungsgrad (Durchschnitt über Lebenszyklus)	η_B	0,70	0,70	0,80		0,85	0,90
Lichtstrom Leuchte	lm	564,20	7280,00	360,00		488,18	652,26
Elektr. Leistung	W	60,00	116,00	8,00		8,00	8,00
Energieintensität Beleuchtung	W/lm	0,11	0,02	0,02		0,02	0,01
Effizienz	lm/W	9,40	62,76	56,25		61,02	81,53
Preis	€	-		30,00	min. 15%/J bis 2013	18,42	18,42
Bestand (2006)	Mio.	968,00	278,50				
Lichtleistung ges.	Tlm	546,14	2.027,48				
	Tlm	Σ	2.573,62		Annahme: 1 - 3%/J	2.983,53	2.704,90
LED-Lampen für Ersatz	Mio.	1.517	5.631	7.148		6.111,58	4.147

Quelle: Beleuchtungsdaten aus (Barthel, Bunse, Irrek, und Thomas 2006) und Herstellerangaben, erwartete Entwicklungen aus (Duenschede 2010) und (Tsao, Saunders, Creighton, Coltrin, und Simmons 2010).

Zudem ist ein Rebound-Effekt bei der Beleuchtung einzukalkulieren. Tsao u.a. zeigen historisch, dass der Lichtkonsum seit der Industrialisierung exponentiell zugenommen hat und dass bis in die 1970er Jahre jede neue verfügbare Lichttechnologie nicht zur Energie- und Ressourceneinsparung, sondern zu einer weiteren exponentiellen Ausweitung der Beleuchtungsintensität geführt hat (Tsao, Saunders, Creighton, Coltrin, und Simmons 2010, 2). Dies wird zwar den Umstieg auf die neue Technologie nicht verhindern (sie sehen eine Kostenäquivalenz ca. ab 2012, siehe Tsao u.a. 2010, 6),

könnte jedoch den Ressourcen- und Energiebedarf weniger als erwartet sinken oder sogar steigen lassen.

Sie argumentieren, dass auch Industrieländer noch weit von einer Sättigung des Lichtbedarfs entfernt sind und die Beleuchtung bzw. der Lichtkonsum proportional zur Wirtschaftsleistung steigt (Tsao, Saunders, Creighton, Coltrin, und Simmons 2010, 12). Daran angelehnt wird hier ein Anstieg des Beleuchtungsbedarfs um 1 – 3 % pro Jahr inklusive Rebound-Effekte angenommen.

Die hier durchgeführte Modellrechnung zeigt hypothetisch, welche Menge an LED-Retrofit-Lampen benötigt werden würde, um 100 % dieser Beleuchtungsleistung zu ersetzen. Nicht berücksichtigt werden dabei alternative LED-Applikationen wie etwa professionelle Bürobeleuchtungen, die in den kommenden Jahren auf den Markt kommen werden oder etwa ineffiziente Heim-Lösungen mit schlechter Lichtausbeute und hohem Ressourcenbedarf. Die tatsächliche Marktentwicklung ist völlig ungewiss. Einschätzungen reichen von großer Skepsis gegenüber der Technologiedurchsetzung (Bröhl-Kerner 2010) über die zeitnahe Entwicklung einzelner Sektoren wie Straßen-, Museums- und Schaufensterbeleuchtung bis hin zur vollständigen Umstellung auf LED-Technologien innerhalb der nächsten 10 – 15 Jahre (Müller 2010). Aus der hier vorgenommenen Schätzung einer vollständigen Umstellung nur der Bereiche Haushalt und Büro ergibt sich ein geschätzter Gesamtbedarf von 4,1 – 6,1 Mrd. LED-Lampen.

Schätzung der benötigten Menge seltener Metalle

Zur Abschätzung des Rohstoffbedarfs für eine entsprechend große Umstellung auf LED-Beleuchtung wurde der Metallbedarf pro LED-Lampe mit der grob abgeschätzten Gesamtzahl der erforderlichen Lampen multipliziert. Referenzprodukt war hierfür eine OSRAM-Parathom, die 6 „Dragoneye“ LED-Hochleistungschips enthält. Für die zu erwartende jährliche Erneuerung verbrauchter Leuchtmittel (Bestandserhalt) wurde die lange und nach bisherigen Erwartungen weiter steigende Lebensdauer von LED-Lampen berücksichtigt. Zudem wurden typische Brenndauern für Büro- und Haushaltsbeleuchtung aus den Ökodesign Impact Assessments zugrunde gelegt.

Da Germanium heute kaum für LED verwendet wird, in Zukunft voraussichtlich vollständig durch andere Metalle ersetzt wird und eine Abschätzung nicht sinnvoll erscheint, wird Germanium hier nicht berücksichtigt. Derzeit liegt der Wirkungsgrad in der LED-Produktion (% des Metalleinsatzes im Endprodukt) unter 40 % für Gallium und unter 0,1 % für Indium (Dadgar 2010). Hier wird für die Szenarioberechnung bis 2015 angenommen, dass die Effizienz um 5-8 % pro Jahr zunimmt. Dies ist eine *worst case* Szenario-Berechnung da sie auch mögliches industrielles Recycling nicht beinhaltet. Tatsächlich dürfte der technische Fortschritt sogar deutlich schneller sein.³⁰

Die vorliegende Rechnung geht vom derzeitigen Stand der Technik aus, berücksichtigt Erwartungen von Experten aus Forschung und Industrie, und gibt zwei mögliche Sze-

³⁰ Von 2008 – 2010 stieg die Produktionsausbeute von 1 mm²-LED pro Wafer um über 10 % jährlich von 900 auf 1300.

narien wieder, die eine Bandbreite an Möglichkeiten darstellen, je nach Entwicklung der Technik und des Marktes. Sie stellt jedoch keine gesicherte Schätzung dar, da sowohl die angebots- als auch die nachfrageseitige Entwicklung völlig unklar ist, als Referenzprodukt nur eine marktreife LED-Lampe und eine Expertenaussage dient und künftig etwa günstige, aber ressourcenineffiziente Produkte auf den Markt kommen könnten, die zu anderen, ressourcenintensiveren Entwicklungen führen könnten. Nach dieser Schätzung wären für die Umrüstung des Beleuchtungsbestands in deutschen Büros und Haushalten auf dem zu erwartenden technologischen Stand im Jahr 2015 etwa 8 – 13 Tonnen Gallium und 9 – 15 Tonnen Indium notwendig. Der Erhalt dieses Bestands würde jährlich jeweils rund 200 – 600 kg Gallium und Indium benötigen.

Tab. 9: Aufwand seltener Metalle für deutsche LED-Beleuchtung nach 2015

	Einheit	Haushalt	Büro	Tech. 2010	Entwicklung →	Kons. 2015	Optim. 2015	Quelle
Ressourcen								
LED/Lampe	Stk.	6,00	6,00	6,00	Effizienzsteigerung: Annahme 5-8 %/Jahr	6,00	6,00	Osram parathom Dadgar, Extrapolation Dadgar, Extrapolation Dadgar: Ersatz Ger
Ga/Chip	mg	0,46	0,46	0,46		0,36	0,30	
In/Chip	mg	0,54	0,54	0,54		0,42	0,36	
Ger/Chip	mg							
Metalle für Bestandsaufbau nach 2010								
Ga	t	4,19	15,54	19,73		13,05	7,54	
In	t	4,92	18,25	23,16		15,32	8,86	
Bestandserhalt								
Lebensdauer	H	25000	25000			30000	50000	Kataloge, licht.de Vorstudie, Annahme
Nutzdauer	h/J	500,00	1200,00	1051,45		1200,00	1051,45	
Lebensdauer	J	50,00	20,83	23,78		25,00	47,55	
Ersatzrate	Er/J	0,02	0,05	0,04		0,04	0,02	
Mio. Stück	/J	30,34	270,33	300,67		244,46	87,21	
Metalle für Bestandserhalt pro Jahr								
Ga/J	t	0,08	0,75	0,83		0,52	0,16	
In/J	t	0,10	0,88	0,97		0,61	0,19	

Kons. = Konservatives Szenario; Optim. = Optimistisches Szenario

Quelle: Eigene Berechnung auf Basis von (Barthel, Bunse, Irrek, und Thomas 2006); Dadgar (2010); Kuhn (2009); (Duenschede 2010).

Der Bedarf zur Umrüstung des Bestands in Verhältnis zur Gesamtproduktion der Metalle entspricht etwa 12 % der weltweiten Jahresproduktion von Gallium 2009 und 2,5 % derjenigen von Indium. Der Bestandserhalt entspräche max. etwa 1 % der Weltproduktion von 2009. Ceteris paribus wäre eine dementsprechende Verkürzung der Reichweite der Metalle die Folge.

Tab. 10: Energieeinsparungspotenziale durch LED-Technologie

	Ein- heit	Haus- halt	Büro	Gesamt Tech. 2010	Kons. 2015	Optim. 2015	
		GL 60W	2x T8				
kWh/Jahr/Stück	kWh	30,00	139,20				
Gesamt Base Case	TWh	29,04	38,77				
		Σ		67,81	Annahme: 1- 3 %/J	78,61	71,27
LED							
Nutzdauer/Jahr	h	500,00	1200,00	1051,45	1218,92	1105,09	
kWh/Jahr/Stück	kWh	4,00	9,60	8,41	9,75	8,84	
Gesamtverbrauch LED	TWh	6,07	54,07	60,13	51,41	34,88	
Einsparpotenzial	%			0,11	0,35	0,51	

Kons. = Konservatives Szenario; Optim. = Optimistisches Szenario

Quelle: Eigene Berechnung.

Wird das hier zugrunde gelegte Modell verwendet, lassen sich auch die Energieeinsparpotenziale berechnen. Als *Base Case* dient hier also ein Modell der Haushaltsbeleuchtung (vollständig mit Glühlampen) und der Büros (mit effizienten T8-Röhren). Gegenüber ersteren haben LED auch heute bereits ein großes Einsparpotenzial, gegenüber letzteren wird dies frühestens 2015 der Fall sein (s. Tab. 8).

Die hier verwendeten Zahlen sind demnach nicht als reelle Einsparpotenziale zu verstehen, da die Verfügbarkeit von Kompakt-Leuchtstofflampen und die bestehende Regulierung durch die Ökodesign-Richtlinie Glühlampen bis 2015 ohnehin weitestgehend verdrängt haben werden. Das absolute Potenzial hängt somit von der genauen Höhe und Dynamik des technischen Fortschritts in der LED-Produktion ab und müsste in weiteren Arbeiten anhand anderer Szenarien etwa aus den Ökodesign-Vorstudien berechnet werden.

5 Fazit

Die vorliegende Analyse untersuchte Umwelt- und Ressourcenaspekte von Beleuchtung durch Licht emittierende Dioden (LED). Während im Ökodesign-Richtlinienprozess Energieeffizienz-Aspekte bei Lampen im Vordergrund standen und stehen, lag der Fokus der vorliegenden Kurzstudie auf den in der LED-Technologie verwendeten Materialien und der mit den Materialien zusammen hängenden Toxizität.

Dabei sind seltene Halbmetalle, vor allem Indium und Gallium, von besonderer Bedeutung. Diese sind Nebenprodukte der Erzverhüttung anderer Metalle wie Zink, Aluminium und Kupfer. Derzeit gibt es weltweit nur wenige Produzenten und es besteht noch größeres Produktionspotenzial.

Zu berücksichtigen ist in diesem Kontext, dass mit Recycling von LED-Lampen bisher noch keine Erfahrungen bestehen und nach gegenwärtigem Kenntnisstand die Rückgewinnung der seltenen Metalle nicht wirtschaftlich ist, andere Komponenten jedoch recycelbar erscheinen (Kühlkörper, Elektronik).

Eine grobe exemplarische Abschätzung des zusätzlichen Bedarfs an seltenen Metallen bei einem vollständigen Umstieg der Haushalts- und Bürobeleuchtung in Deutschland auf LED-Technologien ergab, dass dafür auf dem zu erwartenden technologischen Stand im Jahr 2015 etwa 8 – 13 Tonnen Gallium und 9 – 15 Tonnen Indium notwendig sein werden. Dies entspricht etwa 12 % der weltweiten Jahresproduktion von Gallium 2009 und 2,5 % derjenigen von Indium. Der Erhalt der auf LED-Technologien umgerüsteten Beleuchtung würde jährlich rund jeweils 200 – 600 kg Gallium und Indium benötigen, was etwa 1 % der Weltproduktion des Jahres 2009 entspricht.

Selbst wenn der Umstieg nicht kurzfristig geschieht, ist mit einem Preisanstieg der Rohstoffe durch steigende Nachfrage auch nach Produkten in alternativer Anwendung der seltenen Halbmetalle zu rechnen. Ebenfalls ist bei steigenden Preisen jedoch zu erwarten, dass die Gewinnung der Nebenprodukte auch in anderen Hütten rentabel wird und das Angebot damit steigt. Langfristig könnte der Umstieg auf OLED aus Nachhaltigkeitssicht hier entlastende Wirkungen haben.

Literatur

- Angerer, G. u. a. (2009): Schlussbericht: Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.
- Asakura, K. u. a. (2008): "Oral Toxicity of Indium in Rats. Single and 28-Day Repeated Administration Studies." *Journal of Occupational Health* (50): 471-479.
- Barthel, C. u. a. (2006): Optionen und Potenziale für Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen. Wuppertal: Wuppertal Institut.
- Behrendt, S., und M. Scharp (2007): Seltene Metalle. Maßnahmen und Konzepte zur Lösung des Problems konfliktverschärfender Rohstoffausbeutung am Beispiel Coltan. Dessau: Umweltbundesamt.
- bio, Energy Piano, und Kreios (2009): Final Report Lot 19b: Domestic lighting.
- Brehm, C. (2010): "LED-Rücknahme. Email vom 29.07.2010."
- Bröhl-Kerner, H. (2010): "RE: Recycling LED. Email vom 22.10.2010."
- Bustamante, J u. a. (1997): "The semiconductor elements arsenic and indium induce apoptosis in rat thymocytes." *Toxicology* 118(2-3): 129-36.
- Dadgar, A. (2010): "Re: Metalle in LED. Email vom 30.09.2010."
- Duenschede, E. (2010): "RE: Ihre Bitte um Unterstützung seitens ZUMTOBEL zum Thema LED als Lichtquelle der Zukunft. Email vom 15.09.2010."
- eceee. (2010): "Technological prospects for directional lamps."
http://www.eceee.org/Eco_design/products/directional_lighting/Directional_lamp_technology_prospects.pdf (Zugegriffen Juli 23, 2010).
- Elsner, H. u. a. (2009): "Elektronikmetalle. Zukünftig steigender Bedarf bei unzureichender Versorgungslage?." *BGR Commodity Top News* (33).
- Etter, U. u. a. (2009): "Strassenbeleuchtung. LED und Energieeffizienz." www.topten.ch/sb (Zugegriffen August 27, 2010).
- EU-Kommission (2009): Product Fiche Tertiary Sector Lighting.
- FGL, Fördergemeinschaft Gutes Licht (2010): "LED: Das Licht der Zukunft." *licht.wissen* (17).
- Hartley, D., D. Jurgens, und E. Zatcoff (2009): Life Cycle Assessment of Streetlight Technologies. Pittsburgh: University of Pittsburgh.
- Highlight (2010a): Highlight. Rüthen: Highlight Verlagsgesellschaft.
- Highlight (2010b): 1/2010 Light.Event+Architecture. Rüthen: Highlight Verlagsgesellschaft.
- Kripke, D. u. a. (2010): "Weak evidence of bright light effects on human LH and FSH." *Journal of Circadian Rhythms* 8(1): 5.
- Kuhn, G. (2009): "LED. Beleuchtung für die Kommunen. Präsentation auf dem IHK-Workshop LED-Leitmarkt gemeinsam entwickeln."
- Mikolajczak, C. (2009): "Availability of Indium and Gallium." http://www.indium.com/_dynamo/download.php?docid=552 (Zugegriffen Juli 12, 2010).

- MMTA. (2005): "Germanium. Minor Metals Trade Association." http://www.mmta.co.uk/uploaded_files/GermaniumMJ.pdf (Zugegriffen Juli 12, 2010).
- Morante, P. (2008): Mesopic Street Lighting Demonstration and Evaluation Final Report. Troy: Rensselaer Polytechnic Institute.
- Müller, S. (2010): "AW: Trilux-Einschätzung LED. Email vom 21.10.2010."
- Narendran, N., Y. Gu, und L. Jayasinghe (2007): "Long-term performance of white LEDs and systems." Proceeding of First International Conference on White LEDs and Solid State Lighting, Tokyo November 2007: 174-179.
- Narendran, N., und E. Hong (2004): "White LED performance." In Ferguson, Narandran, Den-Baars, CarranoFourth International Conference on Solid State Lighting, Proceedings of SPIE 5530, Bellingham: International Society of Optical Engineers, p. 119-124.
- Ökopol, und Wuppertal Institute (2010): Fiche General Lighting; "Domestic Lighting" Lot 19 - Part 2: Directional Lamps and Household Luminaires. Update 2nd June.
- Omura, M. u. a. (1996): "Testicular toxicity of gallium arsenide, indium arsenide, and arsenic oxide in rats by repetitive intratracheal instillation." Toxicological Sciences 32(1): 72.
- Osram Opto Semiconductors (2009): "Life Cycle Assessment of Illuminants. A Comparison of Light Bulbs, Compact Fluorescent Lamps and LED Lamps."
- Osram Opto Semiconductors (2010): Weitere Hinweise zum bleifrei Reflow-Löten von LEDs. Application Note.
- Rea, M. u. a. (2010): "Circadian light." Journal of Circadian Rhythms 8(1): 2.
- Seeking Alpha (2010): "Gallium: The Slippery Metal." <http://seekingalpha.com/article/117894-gallium-the-slippery-metal> (Zugegriffen Juli 12, 2010).
- Tichelen, P. van u. a. (2007a): Final Report Lot 8: Office lighting.
- Tichelen, P. van u. a. (2007b): Final Report Lot 9: Public street lighting.
- Tsao, J. u. a. (2010): "Solid-state lighting: an energy-economics perspective." Journal of Physics D: Applied Physics 43(35): 354001.
- UBA, Umweltbundesamt (2010): Grundlagen und Anleitung für Anträge zum Blauen Engel RAL UZ-151 für Lampen.
- US DOE (2010a): Solid-State Lighting Research and Development: Manufacturing Roadmap. Washington D.C. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_manufacturing_roadmap_july2010.pdf (Zugegriffen Juli 26, 2010).
- US DOE (2010b): Solid-State Lighting Research and Development: Research and Development.
- USDI (2008): "Indium." <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/indium/mcs-2008-indiu.pdf> (Zugegriffen Juli 12, 2010).
- USDI (2010): Mineral Commodity Summaries 2010. US Geological Survey. US Department of the Interior.
- Veitl, A. (2010): "Keramik vereinfacht das thermische Management, elektroniknet - E-Mechanik." http://www.elektroniknet.de/e-mechanik/technik-know-how/waerme-management/article/28397/0/Keramik_vereinfacht_das_thermische_Management/ Zugegriffen August 2, 2010).

Wittmer,, D.; u.a. (2011): Abschlussbericht MaRes AS 2.1. Umweltrelevante metallische Rohstoffe.

Yamazaki, K. u. a. (2000): "Long term pulmonary toxicity of indium arsenide and indium phosphide instilled intratracheally in hamsters." *Journal of Occupational Health* 42(4): 169–178.