

Ökologische Bewertung von Lichtsystemen im Hinblick auf Anforderungen der EuP-Richtlinie

Von der Fakultät für Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik der Brandenburgischen
Technischen Universität Cottbus zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Diplom-Biologin
Małgorzata Kroban
aus Słupsk

Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Ertel

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Tag der mündlichen Prüfung: 25. Juni 2007

Gewidmet meiner geliebten Großmutter Helena

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit in den Jahren 2001-2005 als freie Mitarbeiterin in der Abteilung „Environmental Affairs & Technical Safety“ der Firma OSRAM in München entstanden. In dieser Zeit war ich als eine externe Doktorandin an der Brandenburgischen Technischen Universität an der Fakultät „Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik“, Institut für Umwelttechnik immatrikuliert worden.

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen Personen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Ertel herzlichen Dank für seine großzügige Unterstützung dieser Arbeit, ständige Gesprächsbereitschaft, zahlreichen Anregungen, wertvolle Hinweise, das Korrekturlesen und die Übernahme des Hauptberichts.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt danke ich für die Bereitschaft zur Übernahme des Zweitgutachtens.

Frau Monika Greczmiel gilt mein besonderer Dank für die Betreuung dieser Arbeit, langjährige Unterstützung und das entgegengebrachte Vertrauen. Ihre fachkundigen Kommentare, Durchführung der Diskussionen und zahlreiche Inspirationen und Anregungen haben im weitesten Sinne zur Fertigstellung dieser Arbeit beigetragen. Auch für das freundliche Korrekturlesen dieser Arbeit möchte ich mich bedanken.

Herrn Dr. Ralf M. Criens herzlichen Dank für die Betreuung der Arbeit. Danke vor allem für die Überlassung eines interessanten Themas, die Bereitstellung des Arbeitsplatzes sowie Möglichkeit der Nutzung von Ökobilanzierungssoftware „Umberto“. Weiterhin bedanke ich mich für die fachliche Beratung hinsichtlich der Methodik der Ökobilanzierung, inhaltliche Ratschläge bezüglich der Thematik dieser Arbeit sowie großzügige Unterstützung.

Herrn Dr. Michael Kaweckı möchte ich für seine Hilfsbereitschaft bei der Zusammenstellung der betrieblichen Daten sowie viele fachliche Hinweise und Korrekturen bezüglich der Vorabversion der Arbeit danken.

Frau Doris Siegl danke ich für die Hilfe bei der Bearbeitung von Bildern und Zeichnungen.

Allen weiteren Mitarbeitern der Abteilung „Environmental Affairs & Technical Safety“ OSRAM GmbH danke ich für die freundliche Unterstützung dieser Arbeit sowie ständige Hilfsbereitschaft bei vielen Fragen.

Herrn Günter Rodax, Herrn Andreas Hackl, Herrn Marcus Donie danke ich für die Auskunft über die Betriebsdaten und großzügige fachkundige Unterstützung. Ihre Bereitschaft zur Zusammenarbeit, das entgegengebrachte Vertrauen und die offenen Gespräche haben den Grundstein für diese Arbeit gelegt.

Herrn Herbert Knüttel vielen Dank für die Bereitstellung von Bildern.

Zahlreichen Mitarbeitern der OSRAM GmbH sowie auch Kollegen aus anderen Unternehmen, die zur Anfertigung dieser Arbeit beigetragen haben, sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Frau Susann Handke und Frau Julia Herr vielen herzlichen Dank für die stilistischen und orthografischen Korrekturen dieser Arbeit.

Herrn Manfred Fischer, Mitarbeiter der Siemens AG, möchte ich besonders herzlich danken. Ohne seine Hilfe hätte die Arbeit nicht einmal angefangen werden können.

Ein besonderes Dankeschön geht an meine Familie, die mich über die lange Zeit meiner Promotion auf vielseitige Weise unterstützt hat. Danke nicht nur für die ständige Motivationen und Aufmunterungen, sondern vor allem für die große Unterstützung bei der Betreuung meines Sohnes. Dafür möchte ich meinen Eltern, meinem Ehemann Marek, meiner Schwester Magdalena sowie weiteren Familienangehörigen, die mir bei jeder Gelegenheit geholfen haben, vielmals danken. Bei meinem Sohn Maximilian möchte ich mich an dieser Stelle für die Zeit bedanken, in welcher er aufgrund meiner aufwändigen Tätigkeit oft auf die Betreuung durch seine Mutter verzichten musste.

Kurzfassung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist eine vergleichende Ökobilanz in der Produktgruppe „Beleuchtung“. Im Rahmen dieser Untersuchung ist eine Modellierung des gesamten Produkt-Lebenszykluses aller Komponenten zweier unterschiedlicher Lichtsysteme, bestehend aus Leuchtstofflampe, Vorschaltgerät und Leuchte, vorgenommen worden. Um die ökologischen Auswirkungen aller Komponenten des Lichtsystems zu ermitteln, wurden alle Umweltauswirkungen während der gesamten Herstellungs- und Nutzungsphase erfasst und bewertet.

Die Darstellung der Umweltauswirkungen über alle Lebenszyklusphasen ist mithilfe der Wirkungskategorien realisiert. Bei der Auswertung zeigte sich, dass im Produktlebenszyklus der ökologische Einfluss der Nutzungsphasen mit über 99% dominierend ist. Dieses Ergebnis hat zu der Aussage geführt, dass die künftigen Verbesserungsmaßnahmen in der Beleuchtungsbranche vor allem verstärkt mit dem für die Nutzungsphase relevanten Produktdesign verbunden werden müssen. Das wichtigste Kriterium dabei ist die Energieeffizienz.

In einem weiteren Schritt der Arbeit wurde aufgrund der Ökobilanzierungsergebnisse eine Reihe von Kriterien entwickelt, die für die Beurteilung von Lichtsystemen von Bedeutung sind. Da aufgrund der Ergebnisse dieser Studie die Gebrauchsphase für die Umweltrelevanz der Lichtsysteme die wichtigste Rolle spielt, spiegeln die Bewertungsparameter diese Phase im Produktlebenszyklus wieder. Gleichzeitig erfolgte die Erstellung der Bewertungsmethode unter Berücksichtigung der Anforderungen der Richtlinie „Eco-design requirements for Energy using Products“. Die vorgestellte Bewertungsmethode dient damit als Werkzeug für die Erstellung der Produktumweltinformation und bietet gleichzeitig Entscheidungshilfen bei der Auswahl der Systemkomponenten. Mithilfe dieser Bewertungsmethodik ist es gelungen einen eindeutigen Weg bei der Auswahl von energieeffizienten Komponenten des Lichtsystems zu schaffen. Die modulare Bewertung, die in dieser Arbeit entwickelt und erprobt worden ist, unterstützt positiv einen bisher vernachlässigten Punkt - die Kundenentscheidung bei der Energieeffizienzproblematik. Durch den modularen Aufbau kann der Kunde sein Lichtsystem gestalten und auf einfache Weise bewerten.

Ein weiteres Ziel der Arbeit war die Erstellung der Rahmenbedingungen für das Öko-Profil im Hinblick auf die EuP-Richtlinie. Da die zentrale Anforderung dieser Richtlinie die Verringerung des Energieverbrauches ist, sollte ein Werkzeug vorgestellt werden, das

ermöglicht, Umweltbelastungen deutlich zu machen und Minimierungspotentiale aufzuzeigen. Durch die in dieser Arbeit vorgeschlagene Bewertungsmethode kann der Kunde auf einfache Weise unterscheiden, welche Produkte eine geringere Energieeffizienz und daraus resultierend schlechte Systemausbeute besitzen sowie welche die „best in class“ sind. Darüber hinaus ist der Weg für die Produktumweltdeklaration geschaffen, die ein unersetzliches Werkzeug bei Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz bildet.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Dissertation selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt zu haben. Bei der Verfassung der Dissertation wurden keine anderen als die im Text aufgeführten Hilfsmittel verwendet. Ein Promotionsverfahren zu einem früheren Zeitpunkt an einer anderen Hochschule oder bei einem anderen Fachbereich wurde nicht beantragt.

München, den 15.07.2007

Malgorzata Kroban

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Kurzfassung	III
Eidesstattliche Erklärung	V
Inhaltsverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	XII
Tabellenverzeichnis	XVI
Abkürzungs- und Formelverzeichnis	XVII
1 Problemdarstellung	1
2 Zielsetzung der Arbeit	3
3 Nachhaltigkeit im Hinblick auf die neuen gesetzlichen Regelungen der EU	5
3.1 Nachhaltigkeit (Sustainability).....	5
3.2 Neue Gesetzgebung der EU unter Berücksichtigung einer Umsetzung des Konzeptes der Nachhaltigkeit im Hinblick auf die Lichtindustrie.....	5
3.2.1 IPP-Konzept	5
3.2.2 EuP-Richtlinie.....	7
3.2.3 WEEE-Richtlinie.....	8
3.2.4 RoHS-Richtlinie	9
3.2.5 Emissionshandel	10
3.2.6 BREF-Novellierung des untergesetzlichen Regelwerks und Nutzung der BVT-Merkblätter.....	12
3.2.7 EPER (European Pollutant Emission Register).....	13
3.3 Einfluss der gesetzlichen Auflagen	13
4 EuP-Richtlinie als Herausforderung für die Produktgestaltung	15
4.1 Charakteristika der EuP-Richtlinie.....	15
4.2 Ziele der EuP-Richtlinie.....	16
4.3 Durchführungsmaßnahmen.....	17
4.4 Ökodesign-Anforderungen	18
4.5 Aktivitäten der Lampenindustrie im Hinblick auf die EuP in der Zusammenarbeit mit dem Europäischen Lampenverband.....	20
4.6 Zusammenfassung von Auswirkungen der EuP-Richtlinie auf die Beleuchtungsindustrie.....	22
5 Methodik der Lebenswegsbilanz	24
5.1 Einleitung.....	24

5.2 Anforderungen an die Ökobilanzmethodik.....	25
5.3 Ökobilanz als Instrument zur umweltorientierten Unterstützung bei der Produktentwicklung.....	26
5.4 Bewertungskriterien aus Verbrauchersicht in Zusammenhang mit Ökobilanzergebnissen.....	27
5.5 Struktur der Ökobilanz.....	29
5.5.1 Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens.....	29
5.5.2 Sachbilanz.....	30
5.5.3 Datenqualität als Hauptproblem der Ökobilanzierung.....	30
5.5.4 Wirkungsabschätzung (Impact Assessment).....	33
5.5.5 Auswertung (Interpretation).....	35
6 Ökobilanzierung in der Lampenindustrie.....	36
6.1 Bedeutung der Lichttechnik.....	36
6.1.1 Lichtquellen und die Geschichte ihrer Entwicklung.....	37
6.1.2 Lichttechnische Begriffe.....	39
6.1.3 Licht, Lebensdauer und Energieverbrauch der am häufigsten eingesetzten Lichtquellen.....	40
6.2 Leuchtstofflampen.....	42
6.2.1 Eigenschaften der Leuchtstofflampen.....	42
6.2.2 Prinzip der Funktion der Leuchtstofflampe.....	43
6.3 Energieeffiziente Beleuchtung.....	44
6.3.1 Möglichkeit der Energieeffizienz im Beleuchtungssektor.....	47
6.3.2 Wirtschaftlichkeit der Beleuchtungsanlagen.....	50
6.3.2.1 Anforderungen an Lampen.....	50
6.3.2.1.1 Vorteile der Dreibanden-Leuchtstofflampen.....	51
6.3.2.2 Anforderungen an Vorschaltgeräte.....	51
6.3.2.3 Anforderungen an Leuchten.....	54
6.4 Schwerpunkte und Besonderheiten der Ökobilanzierung von Lichtsystemen.....	56
6.4.1 Vorgehensweise bei der Bilanzierung der Leuchtstofflampe.....	58
6.4.1.1 Aufbau der Leuchtstofflampe.....	58
6.4.1.2 Bilanzgrenzen des Untersuchungsbereiches und Datenqualität.....	59
6.4.1.3 Funktionelle Einheit.....	59
7 Lebenszyklusmodellierungen von Komponenten der Leuchtstofflampe.....	61
7.1 Glas in der Lampenindustrie.....	61

7.1.1 Systembeschreibung (Systemgrenze).....	62
7.1.2 Kolbenglas (Bestandteile des Natronkalkglases).....	63
7.1.2.1 Technologie der Herstellung von Glaskolben.....	65
7.1.3 Pumpstängel und Teller Glas.....	66
7.1.4 Umweltaspekte der ganzheitlichen Bilanzierung von Glas.....	67
7.2 Leuchtstoff.....	69
7.2.1 Eigenschaften und Funktionen des Leuchtstoffs.....	69
7.2.1.1 Halophosphate.....	70
7.2.1.2 Dreibandenleuchtstoffe.....	70
7.2.2 Systembeschreibung.....	71
7.2.3 Technologie der Leuchtstoffherstellung.....	72
7.3 Elektrodenwendel.....	73
7.3.1 Wolfram-Eigenschaften und Herstellungsverfahren.....	73
7.3.1.1 Technologie der Wolframdrahtherstellung.....	74
7.3.1.2 Aufbereitung von Wolframpulver.....	74
7.3.1.2.1 Dotierungsprozess.....	75
7.3.1.2.2 Pressen und Sintern.....	76
7.3.1.2.3 Hämmern, Walzen und Ziehen.....	76
7.3.2 Molybdän-Eigenschaften und Herstellungsverfahren.....	77
7.3.2.1 Technologie der Molybdändrahtherstellung.....	78
7.3.3 Technologie der Wendelherstellung.....	79
7.4 Sockelkitt.....	82
7.4.1 Funktionen des Sockelkitts.....	82
7.4.2 Systembeschreibung und Herstellungsschritte von Kitt.....	82
7.5 Metalle im Lampenbau.....	83
7.5.1 Sockelhülse.....	83
7.5.2 Stromzuführungen, Mittelstütze und Kontaktstifte.....	83
7.5.3 Emitter.....	84
7.5.3.1 Eigenschaften und Funktion des Emitters.....	84
7.5.3.2 Technologie der Emitterherstellung.....	84
7.5.4 Quecksilber im Lampenbau.....	84
7.5.4.1 Funktionen des Quecksilbers.....	84
7.5.4.2 Eigenschaften des Quecksilbers und deren Vorkommen.....	86
7.5.4.3 Toxizität der Quecksilberverbindungen.....	86
7.5.4.4 Quecksilber in der Umwelt.....	87

7.5.4.5 Quecksilber - ein lokales und kein globales Problem.....	88
8 Ökobilanz der Leuchtstofflampe	90
8.1 Technologie der Herstellung von Leuchtstofflampen.....	90
8.2 Sachbilanz.....	91
8.2.1 Modellierung der Herstellungsphase von Leuchtstofflampen [Systemgrenze].....	91
8.3 Wirkungsabschätzung der gesamten Herstellungsphase von T5- und T8-Leuchtstofflampen im Vergleich.....	93
8.3.1 Vergleichende Betrachtung der Herstellungsphase von zwei unterschiedlichen Leuchtstofflampentypen (bezogen auf Lampenstückzahl).....	93
8.3.2 Vergleichende Betrachtung der Herstellungsphase von zwei Leuchtstofflampentypen mit der Einbeziehung von Produktkomponenten (bezogen auf die Lampenstückzahl).....	94
8.3.3 Vergleichende Betrachtung der Herstellungsphase von zwei Leuchtstofflampentypen mit der Einbeziehung von Produktkomponenten (bezogen auf die funktionelle Einheit).....	95
8.3.4 Ganzheitliche Betrachtung der Herstellungsphase zur Nutzungsphase der Leuchtstofflampen im Vergleich.....	97
8.4 Zusammenfassung.....	98
9 Ökobilanz der Vorschaltgeräte	99
9.1 Sachbilanz.....	99
9.1.1 Modellierung der Herstellungsphase von Vorschaltgeräten [Systemgrenze].....	99
9.1.2 Datenermittlung.....	101
9.1.3 Ergebnisse der Sachbilanzen.....	103
9.2 Wirkungsabschätzung.....	105
9.2.1 Wirkungsabschätzung der gesamten Herstellungsphase von zwei Vorschaltgeräten im Vergleich.....	105
9.2.2 Vergleichende Betrachtung der Herstellungsphase von zwei Vorschaltgeräten mit der Einbeziehung von Produktkomponenten (bezogen auf die Produktstückzahl).....	106
9.2.3 Vergleichende Betrachtung der Herstellungsphase von zwei Vorschaltgeräten mit der Einbeziehung von Produktkomponenten (bezogen auf die funktionelle Einheit).....	107
9.3 Zusammenfassung.....	109

10 Ökobilanz der technischen Leuchte	110
10.1 Sachbilanz.....	110
10.1.1 Modellierung der Herstellungsphase der technischen Leuchte Leuchte [Systemgrenze] und Datenermittlung.....	110
10.1.2 Ergebnisse der Sachbilanzen.....	113
10.2 Wirkungsabschätzung.....	115
10.2.1 Wirkungsabschätzung der gesamten Herstellungsphase von zwei technischen Leuchten im Vergleich.....	115
10.2.1.1 Vergleichende Betrachtung der Herstellungsphase von zwei technischen Leuchten mit der Einbeziehung von Produktkomponenten (bezogen auf die Produkt- stückzahl).....	115
10.2.1.2 Vergleichende Betrachtung der Herstellungsphase von zwei technischen Leuchten mit der Einbeziehung von Produktkomponenten (bezogen auf die funktionelle Einheit).....	117
10.3 Zusammenfassung.....	118
11 Entsorgung von Komponenten des Lichtsystems	120
11.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen.....	120
11.2 Stoffliches Recycling der Leuchtstofflampe.....	121
11.2.1 Kapp-Trenn-Verfahren.....	122
11.2.2 Shredderverfahren.....	123
11.3 Entsorgung von Leuchten und Vorschaltgeräten.....	124
12 Ganzheitliche Betrachtung der Lichtsysteme	127
12.1 Vergleichende Darstellung definierter Wirkungskategorien der gesamten Herstellungsphase aller Komponenten der Lichtsysteme (bezogen auf die funktionelle Einheit).....	127
12.2 Vergleichende Darstellung definierter Wirkungskategorien der gesamten Herstellungsphase und der Nutzungsphase von T8- und T5-Lichtsystemen im Vergleich.....	131
13 Bewertungsmodell der Lichtsysteme unter der Berücksichtigung von Anforderungen der EuP-Richtlinie	134
13.1 Anforderungen an die Bewertungsmethode für die Lichtsysteme.....	134
13.2 Anforderungen der EuP-Richtlinie an das Ökodesign von energiebetriebenen Produkten.....	135
13.3 Aufzeichnung der potentiellen Verbesserungsmöglichkeiten in der	

Lichtsystem-Produktgruppe im Hinblick auf die Anforderungen der EuP-Richtlinie - Kriterien der Bewertung von Komponenten des Lichtsystems.....	136
13.3.1 Kriterien der Bewertung von Lichtsystemen.....	137
13.3.2 Erstellung der Rahmenbedingungen eines Öko-Profiles für die Lichtsysteme.....	138
14 Zusammenfassung und Ausblick.....	142
15 Literaturverzeichnis.....	146
16 Anhang.....	156
1. Kumulierter Energieaufwand.....	157
2. Treibhauseffekt.....	158
3. Photooxidantienbildung.....	160
4. Eutrophierung.....	162
5. Versauerung.....	164
6. Feinstaub - PM10.....	165

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Durchgestrichene Mülltonne.....	9
Abbildung 3-2: Kyoto-Ziele bis 2008/2012 im Vergleich zur 1990 bis 2000 erreichten Reduktion.....	11
Abbildung 4-1: Details der Festlegung einer Durchführungsmaßnahme.....	18
Abbildung 4-2: Mitglieder und Logo des European Lamp Companies Federation (ELC).....	20
Abbildung 4-3: Umfang der EuP-Rahmenrichtlinie.....	22
Abbildung 6-1: Das elektromagnetische Spektrum des sichtbaren Lichtes.....	36
Abbildung 6-2: Westosteuropäischer Markt der Lichtquelle.....	41
Abbildung 6-3: Die Verbesserungen an Lichtausbeute von verschiedenen Lampentypen in der Zeit ihrer Entwicklung.....	42
Abbildung 6-4: Funktionsprinzip der Leuchtstofflampe.....	44
Abbildung 6-5: Einsparung der elektrischen Energie in der Dienstleistungsbranche in der Zeitpanne von 19 Jahren durch den Einsatz von energieeffizienten Technologien.....	47
Abbildung 6-6: Darstellung der Durchmesser der T8- und T5-Leuchtstofflampe.....	48
Abbildung 6-7: Einsparungsmöglichkeiten beim Einsatz von modernen Lichtsystemen.....	49
Abbildung 6-8: Vergleich des Lichtstromsverhaltens über die Lebensdauer von Lumilux- und Basic-Leuchtstofflampen.....	51
Abbildung 6-9: Einfluss von Vorschaltgeräten auf die Lebensdauer der Lampe.....	53
Abbildung 6-10: Miniaturisierung der Leuchten bei T5-Leuchtstofflampen.....	56
Abbildung 6-11: Aufbau vom Lichtsystem.....	56
Abbildung 6-12: Darstellung des gesamten Bilanzierungssystems unter Einbeziehung von der Art der Datenermittlung.....	57
Abbildung 6-13: Aufbau der Leuchtstofflampe.....	58
Abbildung 6-14: Lichtstrom.....	59
Abbildung 7-1: Technik der Glaskolbenherstellung.....	66
Abbildung 7-2: Herstellung von Dreibandenleuchtstoff.....	73
Abbildung 7-3: Herstellung von Wolframdraht.....	74
Abbildung 7-4: Herstellung von W-Kern BSD-schwarzen Drähten und W-Kern BSD blanken Drähten.....	77
Abbildung 7-5: Herstellung von Molybdän-Kern Draht.....	78
Abbildung 7-6: Einfachwendel.....	79

Abbildung 7-7: Doppelwendel	79
Abbildung 7-8: Dreifachwendel	79
Abbildung 7-9: Herstellung der Flachstabwendel und Bild der Flachstabwendel	81
Abbildung 7-10: Herstellung der Triplewendel und Bild der Triplewendel	81
Abbildung 7-11: Herstellung von Sockelkitt	82
Abbildung 7-12: Minimierung des Quecksilbersgehalts in Leuchtstofflampen	85
Abbildung 7-13: Möglichkeiten der Quecksilberdosierung in der Leuchtstofflampe	85
Abbildung 7-14: Globaler und Europäischer Verbrauch an Quecksilber im Jahr 2000	88
Abbildung 8-1: Gestelle auf dem Produktionsband	90
Abbildung 8-2: Schematische Darstellung der Herstellungsphase von Leuchtstofflampen	91
Abbildung 8-3: Die Systemgrenze der Fertigung von Leuchtstofflampen	92
Abbildung 8-4: Kumulierter Energieaufwand der Leuchtstofflampen- komponenten zur Herstellung einer T8- und T5-Leuchtstofflampe im Vergleich bezogen auf die Produkteinheit (je eine Leuchtstofflampe und unter Berücksichtigung des Mehrverbrauches in der Leuchtstofflampenherstellungsphase)	95
Abbildung 8-5: Parameter der Wirkungsabschätzung der T8- und T5- Leuchtstofflampe im Vergleich bezogen auf die funktionelle Einheit (150 Mlmh)	96
Abbildung 8-6: Parameter der Wirkungsabschätzung der T8- und T5- Leuchtstofflampe im Vergleich bezogen auf die funktionelle Einheit (150 Mlmh)	96
Abbildung 8-7: Kumulierter Energieaufwand der Herstellungs- und Nutzungs- phase zweier Leuchtstofflampentypen (T8 und T5) im Vergleich bezogen auf die funktionelle Einheit (150 Mlmh)	97
Abbildung 9-1: Die Systemgrenze der Fertigung von Vorschaltgeräten	101
Abbildung 9-2: Bestückte Leiterplatte	101
Abbildung 9-3: Ausschnitt aus dem Materialdatenblatt (EPCOS AG)	102
Abbildung 9-4: Die Materialzusammensetzung der QTP-Vorschaltgeräte	105
Abbildung 9-5: Die Materialzusammensetzung der QT-FH-Vorschaltgeräte	105
Abbildung 9-6: Vergleich zwischen den KEA für die Fertigung der Vorschaltgeräte- komponenten und Fertigung der Vorschaltgeräte	106
Abbildung 9-7: Parameter der Wirkungsabschätzung der gesamten Herstellungsphase von QTP- und QT-FH-Vorschaltgeräten im	

Vergleich (je Vorschaltgerät).....	107
Abbildung 9-8: Parameter der Wirkungsabschätzung der gesamten Herstellungsphase von QTP- und QT-FH-Vorschaltgeräten im Vergleich (je Vorschaltgerät).....	107
Abbildung 9-9: Parameter der Wirkungsabschätzung der gesamten Herstellungsphase von QTP- und QT-FH-Vorschaltgeräten im Vergleich bezogen auf die funktionelle Einheit (150 Mlmh).....	108
Abbildung 9-10: Parameter der Wirkungsabschätzung der gesamten Herstellungsphase von QTP- und QT-FH-Vorschaltgeräten im Vergleich bezogen auf die funktionelle Einheit (150 Mlmh).....	109
Abbildung 10-1: Die Architekturleuchte.....	111
Abbildung 10-2: Systemgrenze der Herstellung der technischen Leuchte.....	112
Abbildung 10-3: Die Materialzusammensetzung der Leuchte (T8-Lichtsystem).....	113
Abbildung 10-4: Die Materialzusammensetzung der Leuchte (T5-Lichtsystem).....	113
Abbildung 10-5: Parameter der Wirkungsabschätzung der gesamten Herstellungsphase von Leuchten des T8- und T5-Lichtsystems im Vergleich (je Leuchte).....	116
Abbildung 10-6: Parameter der Wirkungsabschätzung der gesamten Herstellungsphase von Leuchten des T8- und T5-Lichtsystems im Vergleich (je Leuchte).....	116
Abbildung 10-7: Parameter der Wirkungsabschätzung der gesamten Herstellungsphase von Leuchten des T8- und T5-Lichtsystems im Vergleich bezogen auf die funktionellen Einheit (150 Mlmh).....	117
Abbildung 10-8: Parameter der Wirkungsabschätzung der gesamten Herstellungsphase von Leuchten des T8- und T5-Lichtsystems im Vergleich bezogen auf die funktionellen Einheit (150 Mlmh).....	118
Abbildung 11-1: WEEE-Kundeninformationen Lampen, Anteil der Entsorgungskosten.....	121
Abbildung 11-2: Recycling der Leuchtstofflampen/Entladungslampen.....	123
Abbildung 11-3: Darstellung des Entsorgungswegs von Lampen	124
Abbildung 11-4: Konzept zur Bestimmung von WEEE-konformen Recycling- und Verwertungsquoten und Darstellung der zugeordneten Prozesse.....	125
Abbildung 12-1: Kumulierter Energieaufwand der Herstellungsphase von Komponenten der T8- und T5-Lichtsysteme bezogen auf die funktionelle Einheit.....	127
Abbildung 12-2: Treibhauspotential in kg CO ₂ der gesamten Herstellungsphase von	

Komponenten der T8- und T5-Lichtsysteme bezogen auf die funktionelle Einheit.....	128
Abbildung 12-3: Photooxidantienbildung in kg Ethen der gesamten Herstellungsphase von Komponenten der T8- und T5-Lichtsysteme bezogen auf die funktionelle Einheit.....	128
Abbildung 12-4: Photooxidantienbildung in kg NO _x der gesamten Herstellungsphase von Komponenten der T8- und T5-Lichtsysteme bezogen auf die funktionelle Einheit.....	128
Abbildung 12-5: Versauerungspotential in kg SO ₂ der gesamten Herstellungsphase von Komponenten der T8- und T5-Lichtsysteme bezogen auf die funktionelle Einheit.....	128
Abbildung 12-6: Eutrophierungspotential in kg PO ₄ der gesamten Herstellungsphase von Komponenten der T8- und T5-Lichtsysteme bezogen auf die funktionelle Einheit.....	128
Abbildung 12-7: Summe PM10-Äquivalenten der T8- und T5-Lichtsysteme bezogen auf die funktionelle Einheit.....	128
Abbildung 12-8: Prozentueller Anteil an Wirkungsparametern der Herstellungsphase von Komponenten des T8-Lichtsystems bezogen auf die funktionelle Einheit (150 Mlmh).....	130
Abbildung 12-9: Prozentueller Anteil an Wirkungsparametern der Herstellungsphase von Komponenten des T5-Lichtsystems bezogen auf die funktionelle Einheit (150 Mlmh).....	131
Abbildung 12-10: KEA der Herstellung und Nutzungsphase der T8- und T5-Lichtsysteme im Vergleich bezogen auf die funktionelle Einheit (150 Mlmh).....	132
Abbildung 12-11: GWP (100) der Herstellung und Nutzungsphase der T8- und T5-Lichtsysteme im Vergleich bezogen auf die funktionelle Einheit (150 Mlmh).....	132
Abbildung 12-12: Vergleich des Beitrages zur Herstellung und Nutzung des gesamten T8-Lichtsystems.....	133
Abbildung 12-13: Vergleich des Beitrages zur Herstellung und Nutzung des gesamten T5-Lichtsystems.....	133
Abbildung 13-1: ZVEI Ökodesignparameter.....	136
Abbildung 13-2: Grafische Darstellung der Bewertung der Lichtsysteme	141

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1: Auswahl an Softwaresystemen zur Unterstützung des Life Cycle Assessments	32
Tabelle 5-2: Ausgewählte Wirkungsindikatoren [nach der SETAC-Liste]	35
Tabelle 6-1: Der Farbwiedergabe-Index	40
Tabelle 6-2: Struktur des Stromverbrauchs bei der Beleuchtung	45
Tabelle 6-3: Änderung des Anteils der Beleuchtung am Verbrauch der elektrischen Energie	46
Tabelle 6-4: Einsparungsmöglichkeiten bei dem Einsatz von modernen Lichtsystemen	49
Tabelle 6-5: Basis der Umrechnung für die Bilanzierung der Lichtsysteme	60
Tabelle 7-1: Natürliche und Synthetische Glasrohstoffe	64
Tabelle 7-2: Herkunft der Emissionen der Glasindustrie	68
Tabelle 9-1: Beispiele der Werte von Kumuliertem Energieaufwand der Materialien der Vorschaltgerätekompenten	103
Tabelle 13-1: Die Energieeffizienz-Klassen für Vorschaltgeräte	138
Tabelle 13-2: Kriterien der Bewertung von Lichtsystemen	139
Tabelle 13-3: Gesamtbewertung der Lichtsysteme	141
Tabelle 15-1: GWP-Werte	159
Tabelle 15-2: POCP-Werte	161
Tabelle 15-3: EP-Werte	163
Tabelle 15-4: AP-Werte	164
Tabelle 15-5: PM10-Werte	166

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

A	Jahr
a_i	Wärmeadsorptionskoeffizient
Al	Aluminium
Al_2O_3	Aluminiumoxid
AP	Acidification Potential (Versauerungspotential)
APT	Ammoniumparawolframat-Tetrahydrat
APW	Ammoniumparawolframat
$BaCO_3$	Bariumcarbonat
BAM	Bariummagnesiumaluminat
BaO	Bariumoxid
BAT	best available techniques
BREF	BAT reference document
BSD-Wolfram	Bettersea doped-Wolfram
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
BVT	beste verfügbare Techniken
bzw.	beziehungsweise
°C	Grad Celsius
ca.	zirka
CaO	Kalziumoxid
CAT	Cermagnesiumaluminat
cd	Candela
Ce	Cer
CE	Communautés Européennes (Abkürzung für Europäische Gemeinschaften)
CELMA	Federation of National Manufacturers Associations for Luminaires and Electrotechnical Components for Luminaires in the European Union (Verband der nationalen Verbände der Hersteller von Leuchten und elektrotechnischen Komponenten für Leuchten in der Europäischen Union)
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique (Europäische Komitee für elektrotechnische Normung)
CH_4	Methan
c_i	Konzentration des Gases
Co	Kobalt

CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
Cut Off-Technik	das Abschalten der Wendelheizung nach Erreichen der Betriebstemperatur
d.h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EEE	Directive on the impact on the environment of electrical and electronic equipment (EEE) (Richtlinie über Umweltauswirkungen von elektrischen und elektronischen Geräten)
EEl	Energy Efficiency Index
EER	Directive on the energy efficiency requirements (EER) (Energieeffizienz Anforderungsrichtlinie)
EG	Europäische Gemeinschaft
ELC	European Lamp Companies Federation
EP	Eutrophication Potential (Eutrophierungspotential)
EPER	European Pollutant Emission Register
ETP	Ecotoxicity Potential (Ökotoxizitätspotential)
EU	Europäische Union
EUA	Europäische Umweltagentur
EuP	Eco-design requirements for Energy using Products
EVG	Elektronisches Vorschaltgerät
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
FH (HE)	Fluorescent High (High Efficiency)
FKW	Fluorkohlenwasserstoffe
FQ (HO)	Fluorescent Quintron (High Output)
g	Gramm
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotential)
GWP100	Global Warming Potential (Treibhauspotential mit einer angenommenen Lebensdauer der Gase von 100 Jahren)
h	Stunde
H-FKW	teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
H ₂ O ₂	Wasserstoffperoxid
Hg	Quecksilber
HTP	Human toxicity Potential (Humantoxizitätspotential)

Hz	Hertz
ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
IM	implementing measures
IMDS	Internationalen Material Daten System (Materialdatenbank der Automobilienindustrie)
inch	Zoll
incl.	inclusive
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPP	Integrierte Produktpolitik
IRC	Infrarotbeschichtung
ISO TR	International Organisation of Standardization -Technical Report
IT	information technology (Informationstechnologie)
IVU	Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung
K	Kelvin
K ₂ CO ₃	Kaliumcarbonat (Pottasche)
K ₂ O	Kaliummonoxid
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KEA _E	Kumulierter Energieaufwand für die Entsorgung
KEA _H	Kumulierter Energieaufwand zur Herstellung
KEA _N	Kumulierter Energieaufwand für die Nutzung
kg	Kilogramm
kHz	Kilohertz
kJ	Kilojoule
KVG	Konventionelles Vorschaltgerät
KWh	Kilowattstunde
L-Lampen	Leuchtstofflampen
L 581	Yttrium-/Europiumoxid
LCA	Life Cycle Assessment
LED	light emitting diodes
LLP	Leuchtstofflampen
lm	Lumen
lx	Lux
m	Meter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
mA	Milliamper

max.	Maximum
mg.	Milligramm
MgO	Magnesiumoxid
M _i	Molmasse
Mio.	Millionen
MJ	Megajoul
Mlmh	Megalumenstunden
mm	Millimeter
MnO ₂	Mangandioxid
MW	Megawatt
n-Leitung	Elektronenleitung
Na ₂ O	Sodium Oxide (Soda)
Na ₂ SiO ₃	Natriumsilikat
Na ₂ SO ₄	Natriumsulfat
NH ₃	Ammoniak
NH ₄ ⁺	Ammonium-Ion
nm	Nanometer
NMVOOC	non methane volatile organic compounds (flüchtige Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe)
N ₂ O	Distickstoffmonoxid (Lachgas)
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickstoffoxide
NP	Nutrication Potential (Eutrophierungspotential)
NS	Non Sag-Wolfram
O ₂	Sauerstoff
O ₃	Ozon
ODP	Ozon Depletion Potential (Stratosphärischer Ozonabbaupotential)
Pa	Pascal
PAN	Peroxiacetylnitrat
Pb	Blei
PBB	Polybromierte Biphenyle
PBDE	Polybromierte Diphenylethe
PbO	Blei(II)-oxid
Pb ₃ O ₄	Mennige, Blei(II)-orthoplumbat
PbS	Blei(II)-sulfid (Bleiglanz)
PM10	Feinstaub mit einer Korngröße der Staubpartikel

	von maximal 10 Mikrometer Durchmesser
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential (Bildung von Photooxidantien)
PO_4^{3-}	Phosphat
QT-FH	Quicktronic für FH-(T5/ Ø 16mm) Leuchtstofflampen
QTP	Quicktronic für T8 (Ø 26mm) Leuchtstofflampen
Quicktronic	Elektrische Vorschaltgeräte (EVG) für den Betrieb von Leuchtstofflampen und Kompaktleuchtstofflampen
R134a	Tetrafluorethan
R_a	Farbwiedergabeindex
RoHS	Restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten)
SCNR	selektive nichtkatalytische Reduktion
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SF_6	Schwefelhexafluorid
Si	Silicium
SiO_2	Siliciumdioxid
SMD	Surface Mounted Devices (oberflächenmontierte Bauelemente)
SO_2	Schwefeldioxid
SO_3	Schwefeltrioxid
SO_4	Schwefeltetraoxid
SPOLD	Society for the Promotion of Life-Cycle Assessment Development
SrO	Strontiumoxid
t	Tonne
T	tube
T5-Lampen	Leuchtstofflampen mit Rohrdurchmesser von 16 mm
T8-Lampen	Leuchtstofflampen mit Rohrdurchmesser von 26 mm
T12-Lampen	Leuchtstofflampen mit Rohrdurchmesser von 38 mm
u.a.	unter anderem
UBA	Umweltbundesamt
UNCED	United Nations Conference on Environment and Development
UV	Ultraviolettstrahlung
UVB	Ultraviolett-B-Strahlung
V	Volt
VDEW	Verband der Elektrizitätswirtschaft e.V.

VVG	Verlustarmes Vorschaltgerät
W	Watt
W-Draht	Wolfram-Draht
WEEE	Directive 2002/96/EC on waste electrical and electronic equipment (Richtlinie über Elektro- und Elektronik-Altgeräte)
WHO	World Health Organization
WO ₃	Wolframoxid
Y	Yttrium
z.B.	zum Beispiel
Zn	Zink

1. Problemdarstellung

Die Umweltbelastung in den Industrieländern ist direkt oder indirekt auf die gesteigerte Nutzung von Konsumprodukten zurückzuführen. Jedes Produkt oder jede Dienstleistung verursacht über den gesamten Lebenszyklus eine bestimmte Menge von Umweltbelastungen. Um diese möglichst zu minimieren, steigt die Tendenz zur Entwicklung ressourcensparender Produkte durch Verbesserung der technischen Effizienz. Dies führt zu einem konsequenten Verbesserungsprozess der jeweiligen Produkte und somit potentiell zu einem Wettbewerbsvorteil.

Um die Umweltauswirkungen eines Produktes oder einer Produktgruppe beurteilen zu können, muss vor allem eine geeignete Methodik vorhanden sein. Der Fokus soll auf eine einfache Beurteilung innerhalb ähnlicher Produktgruppen gelegt werden, sodass es dem Verbraucher ermöglicht wird, das umweltgerecht gestaltete Produkt auszuwählen. Erst dann, wenn Produkte auf einer einheitlichen Basis bewertet werden können, ist ein wichtiger Schritt geschaffen, die Herausforderungen des modernen produktbezogenen Umweltschutzes anzunehmen und umzusetzen.

Die ökologische Produktanalyse und -bewertung stellen eine große Herausforderung für die Hersteller dar. Diese resultieren jeweils aus den politischen Forderungen sowie Kundenansprüchen. Die Anforderungen der EU-Gesetzgeber bezüglich Verbesserungen der Produktverträglichkeit werden immer höher gestellt. Eine ganze Reihe an Umwelt-Richtlinien befindet sich gerade in der Umsetzungsphase. Wie aber die Industrie auf die kommenden Richtlinien reagieren wird, ist derzeit noch nicht abschließend geklärt.

Mittlerweile ist es nachgewiesen, dass zwei von drei Lebensphasen eines Produktes, nämlich Nutzungs- und Entsorgungsphase, hauptsächlich vom Verbraucher und seinem Verhalten beeinflusst werden können. Der Hersteller hat bei Produktauswahl und produktgerechter Entsorgung geringe bis keine Einflussmöglichkeiten. Besonders bei energiebetriebenen Produkten ist die Nutzungsphase von größter Bedeutung, d. h. mit dem größten Auswirkungspotential auf die Umwelt alleine durch den Energieverbrauch begründet. Um dies dem Verbraucher bewusst zu machen, sollte Kommunikation zwischen Hersteller und Verbraucher auf einer einfachen und verständlichen Basis erfolgen.

Im Hinblick auf die eingangs angesprochene Problematik werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit unter Berücksichtigung der Anforderungen der EuP-Richtlinie zwei

Lichtsysteme, bezogen auf ökologische und technische Aspekte, analysiert. Das Gesamtobjekt, das aus Lampe, Leuchte und Vorschaltgerät besteht, soll gezielt über den gesamten Lebensweg untersucht und bewertet werden. Die Ergebnisse werden zu einer abschließenden Aussage und damit zu weiteren Handlungsempfehlungen führen. Auf diesem Weg soll die Zielsetzung der Entwicklung neuer Lichtsysteme optimiert und die Einflussmöglichkeiten des Anwenders aufgezeigt werden.

2. Zielsetzung der Arbeit

Modellierungen und Optimierungen vom Lebenszyklus bezogenen Prozessen werden heute in vielseitiger Weise für Verfahrensverbesserung und Schwachstellenanalyse in Wirtschaft und Technik eingesetzt. Um Verbesserungspotentiale beim Produkt sowie bei der Produktion zu identifizieren, muss der Prozess systematisch untersucht und bewertet werden.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Modellierung des Lebenszyklus von Lichtsystemen im Vergleich. Das Erkennen von Verbesserungspotentialen in der Beleuchtungsindustrie ist am Beispiel von Lichtsystemen realisiert. Konkrete Vorschläge für die Erstellung von Durchführungsmaßnahmen der Rahmenrichtlinie „Eco-design requirements for Energy using Products“ im Bezug auf Lichtsysteme sollen in dieser Arbeit als Ergebnis dargestellt werden.

Um das Ziel dieser Arbeit zu erreichen, wird die Ökobilanzierungsmethode nach DIN EN ISO 14040, 14041, 14042, und 14043 angewendet. Die Erstellung einer Ökobilanz ermöglicht das transparente Aufzeigen von Umweltaspekten und potentiellen Umweltauswirkungen der Lichtsysteme über den gesamten Lebensweg einschließlich aller Vorprodukte, die zur Herstellung von Lampe, Vorschaltgerät und Leuchte benötigt werden. Ermittelt wird, welche Aspekte bei der Betrachtung von Lichtsystemen die wichtigste Rolle spielen. Die systematische Erstellung von Umweltzielen, deren Quantifizierung und die konsequente Verfolgung sind Meilensteine einer nachhaltigen umweltbewussten Produktentwicklung und Produktion. Aufgrund der Ökobilanzergebnisse ist es möglich, für neue Lichtsysteme spezifische Schwerpunkte zu ermitteln, und damit Spielraum für neue Entscheidungsstrategien zu gewinnen.

Der bedeutendste Bestandteil einer Ökobilanz ist die Wirkungsabschätzung, mit dem Ziel, die verschiedenen Umwelteinträge hinsichtlich ihrer Auswirkungen zu bestimmen und zu klassifizieren. Die Darstellung der potentiellen Umwelteinwirkungen wird in Form von Wirkungskategorien zusammengefasst. Es ist bereits eine breite Zahl unterschiedlicher Wirkungskategorien für die Anwendung in der Wirkungsbilanz entwickelt worden. Die Gewichtung der Wirkungskategorien dient zur Abschätzung der relativen Bedeutung verschiedener Wirkungsfelder. Je nach Produkt ergeben sich spezifische Bedürfnisse hinsichtlich ökologischer und ökonomischer Anforderungen, die durch vorhandene Bewertungsmodule nicht immer zur Zufriedenheit von Herstellern und Verbrauchern geführt haben. Aus industrieller Sicht ist eine enge Verkettung von optimiertem Ressourcen-

verbrauch, effizienter Produktion und Kundenanforderungen zu verknüpfen. Rein ökologische Betrachtungen sind im Sinne der internationalen Wettbewerbsfähigkeit nicht immer zielführend. In der vorliegenden Arbeit sollen eine Reihe von Kriterien entwickelt werden, die speziell für das untersuchte Objekt Lichtsystem geeignet sind.

Die Methode soll die Ergebnisse der Sach- und Wirkungsbilanz sowie die Gewichtung der ausgewählten Kategorien widerspiegeln. Dabei wird auch die Bedeutung der unterschiedlichen Ergebnisse analysiert. Im Vordergrund soll die Erkenntnis über die entstehenden Umweltauswirkungen stehen. Die Erstellung eines Bewertungsmodells für die Lichtsysteme erfolgt unter der Berücksichtigung von Anforderungen der EuP-Richtlinie. Die Darstellung der Umweltrelevanz der untersuchten Systeme ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung von einem zu untersuchenden Produkt oder System. Ziel der Untersuchung ist die Erstellung von Rahmenbedingungen eines Öko-Profiles für die Lichtsysteme im Sinne der EuP-Richtlinie.

3. Nachhaltigkeit im Hinblick auf die neuen gesetzlichen Regelungen der EU

3.1 Nachhaltigkeit (Sustainability)

Nachhaltige Entwicklung ist ein Leitbild, das immer mehr in der heutigen Gesellschaft an Bedeutung gewinnt und eine große Herausforderung darstellt. Eine Definition nach „Brundtland-Bericht“ 1987 [1] stellt fest, dass die Nachhaltige Entwicklung eine dauerhafte Entwicklung ist, die „den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen“. Im Juni 1992 haben sich 178 Staaten bei der Großkonferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung (UNCED) in Rio de Janeiro auf das neue Leitbild verständigt. Das Prinzip Nachhaltigkeit wurde durch Dokumente wie die Agenda 21 und das Kyoto-Protokoll konkretisiert. Die Agenda 21 stellt fest, dass Verantwortung und wirtschaftliche Leistungsfähigkeit zusammen gehören, um für künftige Generationen eine lebenswerte Zukunft zu sichern. Das Kyoto-Protokoll ist für die Industriestaaten mit einer strategischen CO₂ Emissionsentwicklung bzw. für hoch industrialisierte Länder mit der verbindlichen Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen verbunden. Im Jahr 2002 hat die bis jetzt größte Konferenz der Vereinten Nationen über Nachhaltigkeit in Johannesburg stattgefunden. Bei diesem zweiten Weltgipfel sind weitere Ziele des Leitbildes der Nachhaltigkeit festgestellt worden. Neben sozialen Themen wie Armut und Bildungsmöglichkeiten, ist eine Minimierung gesundheits- und umweltschädlicher Auswirkungen bei der Produktion bis zum Jahr 2020 zu erfüllen. In der Thematik der ganzheitlichen Produktgestaltung und Produktion sind alle drei Dimensionen - Ökologie, Ökonomie und Soziales - gleich zu gewichten.

3.2 Neue Gesetzgebung der EU unter Berücksichtigung einer Umsetzung des Konzeptes der Nachhaltigkeit im Hinblick auf die Lichtindustrie

3.2.1 IPP-Konzept

Der zentrale Gedanke der Integrierten Produkt Politik greift bewusst das Ziel der Nachhaltigen Entwicklung auf. Die IPP [2] verfolgt das Ziel, Umweltauswirkungen von Produkten während ihres gesamten Lebenszyklus vom Abbau der Rohstoffe, über Herstellung, Vertrieb, Nutzung bis hin zur Abfallentsorgung zu verringern. Die ökologischen Verbesserungen von Produkten und Dienstleistungen können nur dann erreicht werden, wenn die Kommunikation und Kooperation über die ganze Akteurskette gestaltet beziehungsweise optimiert wird. Der Dialog zwischen Zulieferern, Herstellern, Verbrauchern

und Entsorgern ermöglicht die Auswirkungen eines Produkts zu erfassen, die Verbesserungspotentiale aufzudecken, und damit auf eine umweltgerechte Produktgestaltung Einfluss zu nehmen. Die Verfügbarkeit von Produkten mit geringerer Umweltauswirkung, längerer Lebensdauer und niedrigeren Kosten während des Produktlebenszyklus muss nach dem grundlegenden Gedanken der IPP als Vorteil verstärkt kommuniziert werden. Damit ist die Forderung der gesamtheitlichen Betrachtung von Produkten die wichtigste Zielsetzung. Die IPP weist auf die Ökobilanz als effektives Instrument zur Klärung der Umweltrelevanz hin. Im Hinblick auf die IPP-Ziele erscheint die Durchführung von Ökobilanzen mit dem Ziel einer zukünftigen Produktoptimierung als geeignete Methode zur Verbesserung der Umweltrelevanz von Produkten.

Umweltschutz der Zukunft soll vor allem stark ressourcenschonend sein. Für hoch industrialisierte Länder, die den größten Teil der auf dem Markt verfügbaren Ressourcen für ihre Produktion verbrauchen, werden die Ressourcen immer knapper und die Preise immer höher. So führte z. B. der Stahlboom in China, ausgelöst durch ein explosionsartig gestiegenes Produktions- und Bauvolumen, zu einer deutlichen Verknappung des für die Stahlherstellung erforderlichen Schrotts. Die wichtigste Ressource für unsere Wirtschaft ist Energie. Nach Prognosen wird sich der Gesamtbedarf in den kommenden Jahrzehnten beträchtlich erhöhen, und zwar in den kommenden 30 Jahren weltweit insgesamt um 70 % [3].

Steigende Bedürfnisse in Entwicklungsländern, schlechtes Energiemanagement und uneffektive Energienutzung führen zu Engpässen. So kommt es bei der Gewinnung der Energieträger wie Erdöl und Erdgas sowie bei der Energieerzeugung in den Kraftwerken und Bereitstellung zu hohen Verlusten. Der durchschnittliche elektrische Wirkungsgrad fossiler Kraftwerke liegt bei ca. 40 %, d. h. von 100 % eingesetzter Primärenergie werden 40 % in Strom umgewandelt und 60 % gehen im Prozess und auf dem Weg zum Verbraucher verloren [4]. Betrachtet man die Quote der geförderten fossilen Energieträger zu den tatsächlich zur Verfügung stehenden Mengen zur Energieerzeugung wird klar, dass Missmanagement, schlechte Wartung und Instandhaltung der Förder- und Transportsysteme dringend verbessert werden müssen. Wenn kein Umdenken erfolgt, und nicht verstärkt regenerative Energieträger ins System Energieversorgung integriert und gefördert werden, ist die Energieversorgung von Europa sowie den USA in naher Zukunft gefährdet. Die Verfügbarkeit von fossilen Energieressourcen, insbesondere Erdöl und Erdgas, hat seine Grenzen erreicht. Damit ist die Verstärkung der Bemühungen um die Steigerung der Energieeffizienz in allen beteiligten Sektoren sowie die Suche nach alternativen Energiequellen dringend erforderlich.

3.2.2 EuP-Richtlinie

Die zentrale Forderung der Integrierten Produkt Politik, Verbesserungen von Produkten entlang des Lebenswegs, ist auch der grundlegende Gedanke der „Eco-design requirements for Energy using Products“ [5]. Die EuP-Richtlinie ist aus zwei Richtlinienentwürfen entstanden, aus der EEE-Richtlinie (Richtlinie über Umweltauswirkungen von elektrischen und elektronischen Geräten) [6] und der EER-Richtlinie (Energieeffizienzanforderungsrichtlinie) [7]. Aus den Aspekten beider Richtlinien ist die EuP-Richtlinie hervorgegangen und am 1. August 2003 von der Kommission verabschiedet worden. Die Richtlinie wurde im Mai 2005 vom Rat angenommen und ist mit Veröffentlichung im Amtsblatt der Europäischen Union am 20. Juli 2005 in Kraft getreten. Ab Inkrafttreten der Richtlinie haben die Mitgliedstaaten 24 Monate Zeit, sie in das nationale Recht umzusetzen. Als Rahmenrichtlinie regelt sie spezifische Verfahren, ist aber nicht direkt wirksam. Erst die Durchführungsmaßnahmen (Implementing Measures) legen konkrete Anforderungen für betroffene Produkte fest. Im Laufe des Jahres 2007 wird das Verabschieden der Durchführungsmaßnahmen durch die Kommissionen erwartet.

Die EuP-Richtlinie soll durch eine Harmonisierung der produktbezogenen Umweltschutzanforderungen Kriterien festlegen, nach denen bestimmte energiebetriebene Produkte auf den EU-Binnenmarkt gebracht werden dürfen. Die Produkte müssen in großer Stückzahl vertrieben werden und erhebliche Umweltauswirkungen besitzen. Mit dieser Richtlinie soll „durch eine Minderung der potenziellen Umweltauswirkungen energiebetriebener Produkte ein hohes Umweltschutzniveau erreicht werden“ [5]. Der Ansatz zur Energiereduzierung in der EuP-Richtlinie rührt von Klimaschutzbemühungen und den Verpflichtungen aus dem Kyoto-Protokoll her [8]. Die im Protokoll vereinbarten Ziele sollen jetzt innerhalb der EU erfolgreich umgesetzt werden.

Die in der EuP-Richtlinie enthaltenen Gedanken bezüglich Verbesserung von Produkten, gehen aber weit über den Ansatz der Energieeffizienz hinaus. Das Potential zur Reduzierung von Umweltauswirkungen soll durch die technisch-wirtschaftliche Untersuchungen ermittelt werden, dabei vor allem durch interne Lebenszyklusanalysen. Mit einem Life Cycle Assessment kann jeder Aspekt innerhalb des Produktlebenszyklusses vom Design bis hin zum Ende der Lebensdauer verfolgt werden. Relevante Produkteigenschaften sollen in den so genannten Öko-Profilen dargestellt werden und als Maßstab für die entsprechenden Produkt-Familien gelten. Diese sollen unter anderem umweltrelevante Produkteigenschaften, den messbaren Energie- und Ressourcenverbrauch und gegebenenfalls Lebensdauer sowie

Emissionen und Abfälle enthalten. Im Fokus sind dabei Faktoren, die durch das Produktdesign wesentlich beeinflusst werden können und damit zu einer Verbesserung der Umweltauswirkungen des Produkts beitragen. Dabei spielt nicht nur die ökologische Ausrichtung des Produktes eine Rolle. Bei Unternehmen, die sich schon mit der Integration von Umweltaforderungen bei der Produktgestaltung beschäftigt haben, ist eindeutig festzustellen, dass das frühzeitige Erkennen von Verbesserungspotentialen die meisten (Wettbewerbs-) Vorteile mit sich bringt. Auch der sparsame Umgang mit Ressourcen bei Produktion und Nutzung ist nicht nur ökologisch, sondern auch ökonomisch sinnvoll.

3.2.3 WEEE-Richtlinie

Mit der Veröffentlichung im Amtsblatt der EU am 13. Februar 2003 ist die EU-Richtlinie zur Entsorgung gebrauchter Elektro- und Elektronik-Altgeräte in Kraft getreten und muss in nationales Recht aller EU Staaten umgesetzt werden. Danach müssen ab dem 13. August 2005 Geräte der betroffenen 10 Produktkategorien vom Hersteller zurückgenommen werden [9]. Ab diesem Datum dürfen nur Geräte in Verkehr gebracht werden, deren Aufbau eine Wiederverwendung oder -verwertung nicht verhindert.

Hauptziel der WEEE-Richtlinie ist die Verringerung von zu beseitigendem Abfall. Dies wird erreicht, indem der Hersteller die finanzielle Verantwortung für die Entsorgung übernimmt und damit die Reduzierung des Abfalls sowie eine effiziente Organisation der Rücknahme, d.h. Sammlung und Recycling der Altgeräte im ureigensten Interesse des Herstellers liegt. Darüber hinaus ist er verpflichtet, nachzuweisen, dass der von ihm ausgewählte Entsorgungsweg die ökologischen Standards erfüllt. Dies wird durch die Erfüllung einer gruppenspezifischen Verwertungs-/Recyclingquote dokumentiert. „Einführung der Herstellerverantwortung in dieser Richtlinie ist eines der Mittel, mit denen die Konzeption und die Produktion von Elektro- und Elektronikgeräten gefördert werden sollen, bei denen Reparatur, mögliche Nachrüstung, Wiederverwendung, Zerlegung und Recycling“ möglich ist [9].

Zu den betroffenen Produktkategorien gehört eine ganze Reihe von Elektro- und Elektronikgeräten wie Haushaltsgroßgeräte, Haushaltskleingeräte, IT und Telekommunikationsgeräte und weitere. Die Liste betroffener Produkte der Gruppe Leuchtstofflampen setzt sich wie folgt zusammen: Entladungslampen (Ausnahmen Glüh-/Halogenlampen), Leuchten für Leuchtstofflampen (Ausnahmen Leuchten in Haushalten), Kompaktleuchtstofflampen, Entladungslampen einschließlich Hochdruck-Natriumdampf und Metalldampf-

lampen, Niederdruck-Natriumdampflampen, sonstige Beleuchtungskörper oder Geräte für die Ausbreitung oder Steuerung von Licht.

Ab 13.08.2005 muss die Richtlinie innerhalb der Europäischen Union umgesetzt werden. Die zur Entsorgung stehenden Geräte werden in historische Altgeräte (vor dem 13.08.2005 in Verkehr gebracht) und in neue Altgeräte (nach dem 13.08.2005 in Verkehr gebracht) unterteilt. Für die „historischen“ Altgeräte werden die Kosten von allen Herstellern/Importeuren entsprechend ihrer heutigen Marktanteile getragen. Bei neuen Altgeräten werden die Kosten von allen Herstellern/Importeuren entsprechend der aktuell in Verkehr gebrachten Mengen berechnet. Die Neugeräte sind mit dem Symbol der durchgestrichenen Mülltonne mit Balken [Abbildung 3-1] gekennzeichnet. „Dieses Symbol ist sichtbar, erkennbar und dauerhaft anzubringen“ [10].

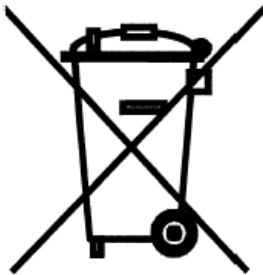


Abbildung 3-1: *Durchgestrichene Mülltonne*
Quelle: [10]

Alle Komponenten, der in dieser Arbeit betrachteten Lichtsysteme (Leuchtstofflampe, Vorschaltgeräte und Leuchten) sind von der WEEE-Richtlinie betroffen.

3.2.4 RoHS-Richtlinie

Ab dem 01.07.2006 ist aufgrund der RoHS-Richtlinie (Restriction of Hazardous Substances) [11] der Einsatz von bestimmten Stoffen in der EU verboten. Hauptziel ist „die Verringerung des Risikos für die Gesundheit und die Umwelt durch diese Substanzen“. Die betroffenen Stoffe müssen durch andere Stoffe mit geringerer Umweltrelevanz ersetzt werden.

Verboten ist der Einsatz von:

Blei,

Chrom VI,

Quecksilber,

Polybromierte Diphenylether (PBDE), Polybromierte Biphenyle (PBB)

in Konzentrationen >0,1%,

Cadmium > 0,01% jeweils im homogenen Material.

„Die eingeschränkte Verwendung dieser gefährlichen Stoffe wird voraussichtlich die Möglichkeiten für das Recycling von Elektro- und Elektronik-Altgeräten verbessern, seine wirtschaftliche Rentabilität erhöhen und die schädlichen Auswirkungen auf die Gesundheit der Beschäftigten von Recyclingbetrieben verringern“ [11]. Die Einschränkungen in der Lampenindustrie konzentrieren sich auf die Reduzierung der Quecksilbermenge in Leuchtstofflampen und auf den Ersatz von Bleiglas und Bleilot.

Die erlaubten Mengen Quecksilber in stabförmigen Leuchtstofflampen sind:

Halophosphat-Leuchtstofflampen max. 10 mg,

3-Banden-Leuchtstofflampen und Kompaktleuchtstofflampen max. 5 mg

3-Banden-Leuchtstofflampen mit langer Lebensdauer max. 8 mg

Bei den Lampen für spezielle Anwendungen sind keine Einschränkungen vorhanden.

3.2.5 Emissionshandel

Mit der Richtlinie 2003/87/EG [12] über ein System für den Handel mit Treibhausgas-Emissionszertifikaten sollen die Anforderungen des Kyoto-Protokolls umgesetzt werden. Die Senkung der CO₂-Emissionen in der EU muss im Zeitraum von 2008 bis 2012 acht Prozent betragen, bezogen auf die Gesamtemissionen von 1990. Die Mitgliedsländer tragen in unterschiedlichem Maße zu der Reduktion bei. Für Deutschland wird eine Verringerung der CO₂-Emissionen um 21 % angestrebt.

Die Emissionshandels-Richtlinie ist am 16.02.2005 in Kraft getreten und soll in zwei Ebenen umgesetzt werden. Die erste Ebene betrifft die globale Kyoto-Protokoll-Verpflichtung der Staaten zur Reduzierung von Treibhausgas-Emissionen. Die zweite Ebene beinhaltet die

Anforderungen der Europäischen Union, in der die Last der Reduktionsmaßnahmen auf eine Zahl von bestimmten Emittenten konzentriert ist. Auf dieser Ebene sind Sanktionen zu erwarten, sobald der Betreiber gegen die Verpflichtungen verstößt. Nach der Richtlinie sollen die Sanktionen „wirksam, verhältnismäßig und abschreckend sein“ [13]. So werden die Namen von Betreibern veröffentlicht, die Verpflichtungen des Emissionshandels nicht einhalten. Zu den weiteren Sanktionen gehören Geldstrafen, die nach dreijähriger Übergangsfrist in der Höhe von 100 Euro für jede von der Anlage ausgestoßene Tonne Kohlendioxidäquivalent liegen, für die der Betreiber keine Zertifikate zur Verfügung hat. Die einzelnen Länder tragen in einem unterschiedlichen Ausmaß zu der Reduktion bei. Die nationalen Unterschiede bezüglich dieser Pflicht sind groß. Während Deutschland sowie andere hoch industrialisierte Staaten die Emissionen drastisch verringern müssen, haben Länder wie Griechenland, Portugal, Spanien noch Emissionszuwachsraten [Abbildung 3-2].

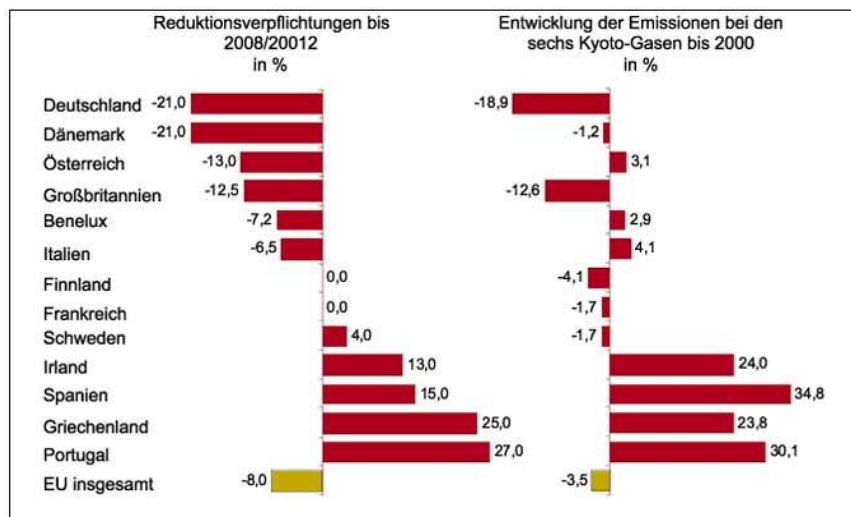


Abbildung 3-2: Kyoto-Ziele bis 2008/12 im Vergleich zur 1990 bis 2000 erreichten Reduktion
Quelle: RWE Rheinbraun AG

Das EU-Emissionshandelssystem beschränkt sich auf energieintensive Industrien. Konkret betroffen sind: Strom- und Wärmeenergieerzeugung mit fossilen Energieträgern ab 20 MW, Mineralö Raffinerien, Kokereien, Anlagen zur Eisenmetallerzeugung und -verarbeitung, Anlagen für die Herstellung von Roheisen oder Stahl sowie Anlagen zur Herstellung von Zementklinker, Kalk, Glas einschließlich Glasfasern, keramischen Erzeugnissen, Zellstoff, Papier und Pappe. Am Emissionshandel nehmen insgesamt 1849 Anlagen von rund 1200 Unternehmen der Energiewirtschaft und der energieintensiven Industrie teil.

Mit der Einführung des Emissionshandels, hat die Industrie nicht nur mit eventuellen Strafmaßnahmen bei Überschreitung der Emissionen zu rechnen. Die gesamten Kosten für Erstellung der Dokumentationen und Berichten sowie eine Begutachtung der Projektumsetzung sind vom betroffenen Unternehmen zu tragen. In der deutschen Glasindustrie geht man von einer gesamten jährlichen Mehrbelastung von ca. 2,5 Mio. € aus.

In einem Land wie Deutschland ist die Produktion in jedem Zweig der Industrie aufgrund der steigenden Energiekosten schon weitgehend optimiert. Eine Verringerung der Emissionen ist entweder durch hohe Investitionen oder durch Verringerung der Produktionsmengen möglich. Aus dieser Problematik resultiert die Gefahr, dass energieintensive Industriezweige ins Ausland verlagert werden, wo keine Sanktionen bezüglich des Ausstoßes von Emissionen vorhanden sind. So verfügen beispielsweise Entwicklungsländer über ein hohes, auf Zuwachs ausgerichtetes CO₂ Potential. Gerade hier ist der Ausstoß von Emissionen hoch und wächst ständig, was auch in Anbetracht häufig eingesetzter veralteter Technologien und uneffektiver Energienutzung aber auch der zunehmenden Industrialisierung und Produktionssteigerung, langfristig schwer zu ändern ist. Ein Export von energetisch effizienten Technologien könnte hier aber bis zu einem gewissen Grad Abhilfe schaffen.

3.2.6 BREF-Novellierung des untergesetzlichen Regelwerks und Nutzung der BVT-Merkblätter

Mit der IVU-EU-Richtlinie („Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) [14] ist die Genehmigung besonders umweltrelevanter Industrieanlagen geregelt. Überwachungsbedürftige Anlagen sollen nur Genehmigungen erhalten, die dem Konzept der **besten verfügbaren Techniken** (BVT oder BAT: „best available techniques“) entsprechen.

Die „integrierte Genehmigung“ soll sich auf die umfassenden Auswirkungen der Industrieanlage beziehen wie Emissionen in Luft, Wasser und Boden, Abfallentstehung, Einsatz der Rohstoffe, Lärm, Störfallvermeidung etc. Umweltrelevante Daten sollen in Form eines BVT-Merkblatt oder BREF (BAT reference document) erfasst werden. Da bei manchen Anlagen mit der Einführung der Richtlinie mit hohen Kosten zu rechnen ist, besteht eine Übergangsfrist von elf Jahren seit Inkrafttreten. Die Richtlinie ist am 30.10.1996 in Kraft getreten.

3.2.7 EPER (European Pollutant Emission Register)

Die EG-Richtlinie 96/61/EG [14] soll einen allgemeinen Rahmen mit Grundsätzen zur integrierten Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung festlegen. Ziel dieser Richtlinie war der Aufbau eines Europäischen Schadstoffemissionsregisters (EPER-European Pollutant Emission Register). Nach § 24 [14] kann ein Verzeichnis der wichtigsten Emissionen und der dafür verantwortlichen Quellen als ein bedeutendes Instrument angesehen werden, das insbesondere einen Vergleich der verschmutzenden Tätigkeiten in der Gemeinschaft ermöglicht. Die Emissionsdaten von meldepflichtigen Anlagen sollen alle drei Jahre von den Betreibern gesammelt und den regionalen Behörden zur Verfügung gestellt werden. Diese Daten stehen jedoch nicht nur der Verwaltung zur Verfügung. Auch die interessierte Öffentlichkeit kann sich über die Umweltauswirkungen der Anlagen informieren. Die auf dieser Basis europaweit veröffentlichten Daten sind seit 2004 über das Internet zugänglich [EPER 2004] und beziehen sich auf 15 „alte“ EU-Mitglieder sowie Norwegen und Ungarn, die freiwillig an dem Projekt teilnehmen [15].

Mit EPER soll durch Zugang zu Informationen das Umweltbewusstsein der Öffentlichkeit gestärkt werden. Aufgrund der Offenlegung der Daten soll außerdem der Wettbewerb zwischen verschiedenen Anlagen gestärkt werden. Darüber hinaus stellt sich jedoch die Frage, wie die europäischen Anlagen mit denen aus Asien oder Amerika, deren Produkte auch auf dem europäischen Markt zugänglich sind, zu vergleichen sind.

3.3 Einfluss der gesetzlichen Auflagen

Nachdem die Maßnahmen des konventionellen Umweltschutzes, Minderung des Schadstoffeintrags und Reduzierung der Emissionsquellen in weiten Teilen der EU durchgeführt wurden, sind nun die Weichen für einen „produktbezogenen Umweltschutz“ gestellt. Dies zeigt sich auch an der immer größer werdenden Zahl der EU-Richtlinien zu diesem Thema. Mit der Verschärfung der EU-Gesetzgebung im Bereich des Umweltschutzes sollen bestimmte Qualitätsziele erreicht werden.

Die Umsetzung eines Konzeptes des ganzheitlichen produktbezogenen Umweltschutzes in der Industrie wird in den neuen europäischen Richtlinien gefordert. Die Hersteller sind nun zur kostenlosen Rücknahme von Altgeräten verpflichtet, was im allgemeinen die Entwicklung von recyclingfreundlichen Produkten fördert. Gleichzeitig muss durch das Verbot bestimmter Substanzen bei der Herstellung von elektronischen Geräten die Einführung von

entsprechenden Ersatzstoffen umgesetzt werden. Die unterschiedlichen Regelungen bei der Zuteilung von Emissionszertifikaten innerhalb der verschiedenen EU-Länder können zu den negativen Auswirkungen im Hinblick auf Wettbewerb zwischen Unternehmen der gleichen Produktbranchen führen. Der freie Zugang zum Europäischen Schadstoffregister macht jedem Bürger die Informationen über die umweltrelevanten Daten der großen Industrieanlagen zugänglich. Diese Art der Information erzeugt einen quasi gläsernen Betrieb, führt aber auch zu einer Verzerrung des Wettbewerbs. Die unterschiedliche Behandlung der Gesetzgebung und damit Offenlegung von Daten schon innerhalb der EU, ganz abgesehen von Asien, bietet hier einige Kritikpunkte.

Auch die Thematik des Ökodesigns bedeutet eine ernsthafte Auseinandersetzung mit der Zielsetzung der EU-Gesetzgebung. Durch die Auswirkungen der EuP-Richtlinien wird auf die gesamte Industrie Druck ausgeübt, ständig den Energieverbrauch von Produkten weiter zu reduzieren sowie die Herstelltechnologien zu verbessern. Bereits bei der Entwicklung von Produkten müssen die Unternehmen die Anforderungen des Ökodesigns in Einklang bringen. Wie bereits erwähnt ist die EuP-Richtlinie im Gegenteil zu RoHS und WEEE eine Rahmenrichtlinie und damit nicht direkt wirksam, jedoch werden die Durchführungsmaßnahmen in Form von Gesetzen national umgesetzt. Die Vielzahl der umzusetzenden Parameter bedeutet eine Herausforderung für Industrie sowohl in personeller, finanzieller als auch struktureller Hinsicht. Gerade in Zeiten starker Konkurrenz durch asiatische Hersteller können die EU-Anforderung zu einer Verschiebung der Marktsituation führen.

4. EuP-Richtlinie als Herausforderung für die Produktgestaltung

4.1 Charakteristika der EuP-Richtlinie

Im Rahmen des Kyoto-Protokolls hat sich die EU verpflichtet, ihre CO₂-Emissionen bis zum Jahre 2010 um 8 %, bezogen auf 1990, zu senken. In diesem Zusammenhang wird eine CO₂-Senkung bis 2020 von 20 % im Vergleich zu 1990 angestrebt. Die zentrale Forderung der Richtlinie „Eco-design requirements for Energy using Products“ ist die Verbesserung der Energieeffizienz von energiebetriebenen Produkten. Diese Richtlinie soll durch eine Harmonisierung der produktbezogenen Umweltschutzanforderungen Bedingungen festlegen, nach denen bestimmte energiebetriebene Produkte auf den EU-Binnenmarkt gebracht werden dürfen. „Bestimmte Produkte“ heißt, dass diese in großer Stückzahl vertrieben werden und erhebliche Umweltauswirkungen besitzen sowie ein wesentliches Verbesserungspotential ihrer Umweltverträglichkeit aufweisen. Mit dieser Richtlinie soll durch die Minderung der potenziellen Umweltauswirkungen energiebetriebener Produkte ein hohes Umweltschutzniveau erreicht werden. Das bedeutet, Produkte sind derart zu gestalten, dass ihre Umweltauswirkungen auf ein Minimum reduziert werden. Alle von den ersten Durchführungsmaßnahmen betroffenen Produkte sind auf einer Prioritätsliste enthalten.

Unter den Produktbereichen, die vor allem mit Durchführungsmaßnahmen rechnen müssen, befindet sich die private und öffentlich-gewerbliche Beleuchtung. Das Einsparungspotential in der Beleuchtungsbranche wurde mit 24 Mio. t CO₂ festgelegt, was 15 % des heutigen Verbrauchs entspricht. Dies kann zum einen mittels Energieeinsparungen geschehen und zum anderen durch verbesserte Energieeffizienz. Der Begriff „Energieeffizienz“ bedeutet, dass Produkte bei gleicher Leistung weniger Energie verbrauchen. Die Forderung nach energieeffizienten Produkten ist das Hauptziel der EuP-Richtlinie. Dadurch sind die Hersteller gezwungen, ihre Produkte energieeffizienter zu gestalten.

Die Forderungen nach Energieeffizienz sollen mit Hilfe des Ökodesigns erfolgen. Die EuP-Richtlinie erweitert alle schon wirksamen Richtlinien wie WEEE und RoHS. Mit der Umsetzung dieser Richtlinien soll die Industrie einen weiteren Beitrag im Umweltschutz leisten. In der Vergangenheit haben nur einige EU-Länder gesetzliche Regelungen zur Energieeinsparung erlassen. Erst durch die Eu-Richtlinie erfolgt eine Harmonisierung für alle EU-Länder und einheitliche Anforderungen an Produkte der Elektro- und Elektronikunternehmen können gestellt werden. Die in der EuP-Richtlinie enthaltenen Ansätze bezüglich der Verbesserung von Produkten, gehen aber weit über den Ansatz der Energie-

effizienz hinaus. Das Potential zur Reduzierung von Umweltauswirkungen soll durch technisch-wirtschaftliche Untersuchungen ermittelt werden, dabei vor allem durch interne Lebenszyklusanalysen. Die erforderlichen Standards der Produktgruppen werden in so genannten „Öko-Profilen“ definiert. Bei den von der Richtlinie betroffenen Produkten sollen bereits in der Phase des Produktdesigns die wesentlichen Faktoren so beeinflusst werden, dass zu einer Minimierung der Umweltauswirkungen des Produkts beigetragen wird. Somit können Wettbewerbsvorteile erlangt werden, die Europa im Rahmen der Bemühungen der Lissabon Agenda unterstützen [16].

4.2 Ziele der EuP-Richtlinie

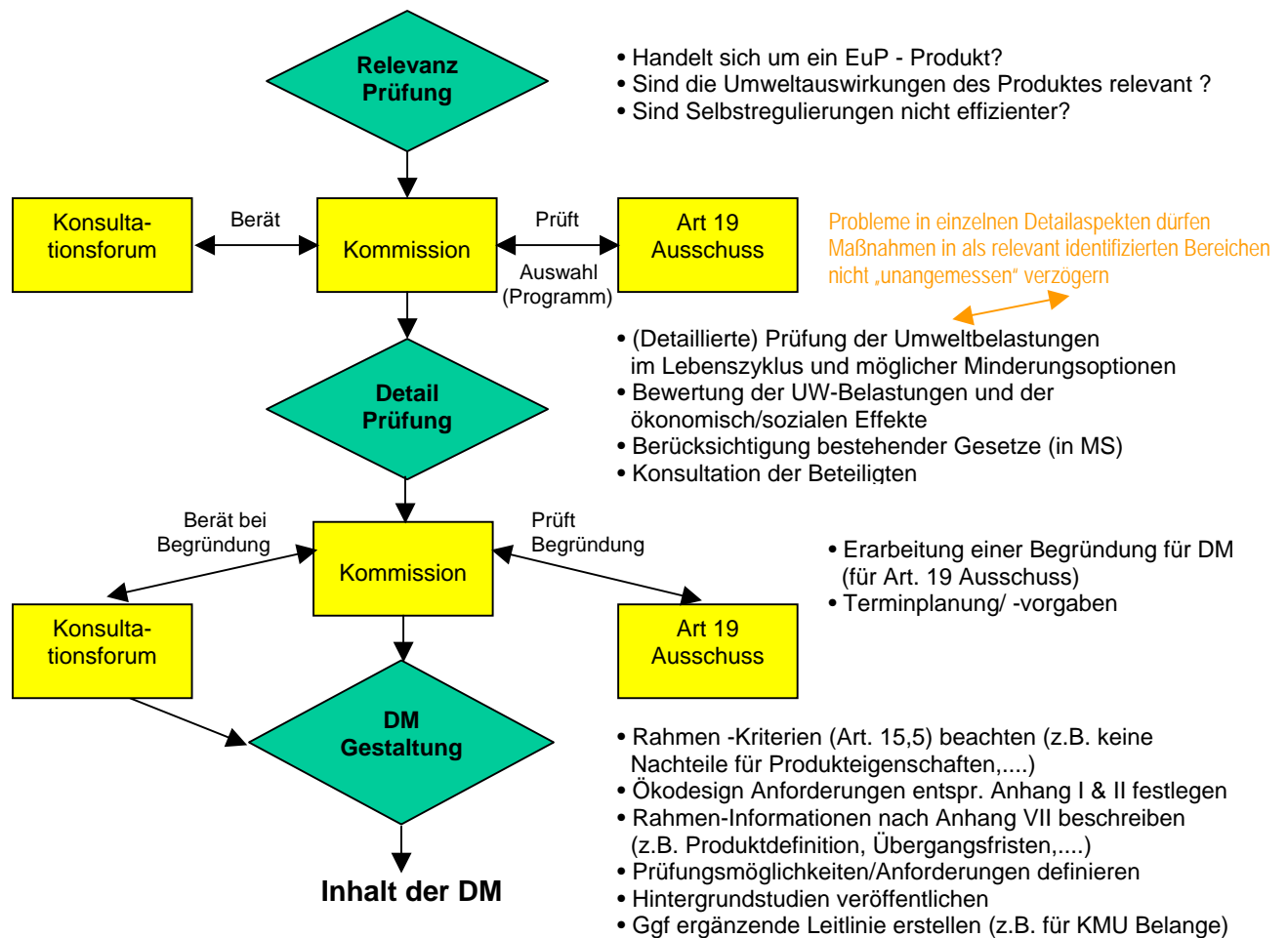
Das Hauptziel der EuP-Richtlinie ist die Verbesserung der Energieeffizienz, was einen reduzierten Energieverbrauch über den Lebensweg des Produktes bedeutet. Schon in der Entwicklungsphase soll die Verminderung von Umweltauswirkungen mit berücksichtigt werden. Das Potential der Reduzierung von Umweltauswirkungen kann durch die ökologische Betrachtung eines oder mehrerer Phasen im Produktlebenszyklus erkannt und optimiert werden. Hier greifen ökologische und ökonomische Faktoren direkt ineinander. Durch ein Life Cycle Assessment kann jede Umweltauswirkung innerhalb des Produktlebenszyklusses vom Design bis hin zum Ende der Lebensdauer verfolgt werden. Auch die Erstellung von „Öko-Profilen“, die nach der EuP-Richtlinie umweltrelevante Eigenschaften von Produkten wie Energie, Ressourcen-Verbrauch, Lebensdauer, Emissionen und Abfälle über alle Phasen des Produktlebenszyklus beinhalten sollen, ist ohne Durchführung von Lebenszyklus-Analysen nicht möglich. Laut EuP-Richtlinie ist eine LCA die Basis zum Erstellen von Öko-Profilen. Aufgrund der Erkenntnis über die Umweltschwerpunkte von Produkten, lassen sich „ökologische Brennpunkte“ darstellen und somit auch Verbesserungsmöglichkeiten der gesamten Produktgruppe aufdecken. Die resultierte Ergebnisse dienen der Verbesserung der Umweltverträglichkeit der Produkte. Auch die Durchführungsmaßnahmen der EuP basieren auf den Gedanken der Ökobilanzierung von Produkten laut der EN ISO 14040 [17]. Sogar die Begriffsbestimmungen der EuP-Richtlinie sind aus der ISO 14040 übernommen worden. Die Umsetzung von Zielen soll unter der Berücksichtigung technischer, funktionaler und wirtschaftlicher Erfordernisse erfolgen. Dafür ist auch die Lebenszyklus-Analyse im Bezug auf technische, wirtschaftliche und ökologische Aspekte durchzuführen. Die EuP-Richtlinie definiert Bedingungen, Kriterien und Verfahren, die von der Kommission bei der Auswahl von Produkten für die Durchführungsmaßnahmen erlassen werden sollen. Für die Hersteller entstehen zunächst keine gesetzlichen Verpflichtungen.

4.3 Durchführungsmaßnahmen

Die Durchführungsmaßnahmen werden in Abstimmung mit Fachkomitees von der Kommission vorgeschlagen. Die Fachkomitees bestehen aus dem Regulatory Committee und dem Consultation Forum, das alle interessierten/betroffenen Kreise/Stakeholder einbindet. In der Umsetzungsphase sollen erst nur Produkte betrachtet werden, die in großen Stückzahlen (über 200 000 Stück im Jahr) vertrieben werden. Für die späteren Maßnahmen stehen die ausreichenden Potentiale für die Verbesserung der Umweltauswirkungen sowie hohe Umweltrelevanz der Produkte als die Hauptkriterien fest. Das weitere Kriterium ist der ganzheitliche Ansatz, was heißt, dass die Verbesserungspotentiale aufgrund einer Lebenszyklus- Analyse entdeckt werden sollen. Die Prioritätsprodukte, unter anderem die Beleuchtung, sollen auf ihre Umweltrelevanz über den gesamten Lebenszyklus untersucht werden. Für sie werden in den so genannten „Durchführungsmaßnahmen“ spezifische oder generische Anforderungen zum Ökodesign der Produkte festgelegt [Abbildung 4-1].

Eine wichtige Voraussetzung ist, dass die Wettbewerbsfähigkeit der Hersteller bei der Umsetzung von Anforderungen der Richtlinie nicht beeinträchtigt wird. Auch die positive Produktweiterentwicklung, der Marktzugang sowie die Kosten und die Nutzung von Produkten müssen berücksichtigt werden. Durchführungsmaßnahmen dürfen laut der Richtlinie keine übermäßige administrative Belastung für den Hersteller bedeuten. Gleichzeitig sollen sich auch dem Nutzer gegenüber keine nachteiligen Auswirkungen auf die Funktionsweise des Produktes insbesondere Sicherheit, Umwelt und Gesundheit ergeben. Der zeitliche Rahmen für die Durchführungsmaßnahmen beträgt zwei Jahre. Um die Möglichkeiten für die Umsetzung der Richtlinie darstellen zu können, sind 14 Studien beauftragt worden, davon zwei über Beleuchtung.

Details der Festlegung einer Durchführungsmaßnahme (DM) (Art.15)



Dr. Birgit Grahl, Dipl.-Ing. D. Jepsen

Abbildung 4-1: Details der Festlegung einer Durchführungsmaßnahme
Quelle: Ökopol [18]

4.4 Ökodesign-Anforderungen

Nach der EuP-Richtlinie haben die spezifischen Ökodesignanforderungen das Ziel, die Umweltaspekte der ausgewählten Produkte zu verbessern. Aus den Anforderungen geht hervor, dass durch die Festlegung der wichtigsten Ökodesign-Parameter eine künftige Verbesserung der Umweltverträglichkeit erzielt wird. Die Top-Produkte können durch die Bewertung ihrer Umweltauswirkungen definiert werden.

Das Ökodesign stellt eine Reihe von Anforderungen. Für energiebetriebene Produkte sind wesentliche Umweltaspekte zu berücksichtigen: Auswahl und Einsatz von Rohmaterial, Fertigung, Verpackung, Transport, Vertrieb, Nutzung und Ende der Lebensdauer. In allen

Phasen des Lebenszyklusses müssen außer Energieverbrauch auch weitere Indikatoren wie Wasser, Emissionen und Abfälle mitberücksichtigt werden. Die Information des Verbrauchers soll folgende Aspekte enthalten:

- Umweltrelevante Parameter, die bei der nachhaltigen Nutzung des Produkts eine Rolle spielen
- Das ökologische Profil

Der Verbraucher hätte damit die Möglichkeit, verschiedene Produkte der gleichen Produktgruppe gegenüber zustellen. Zu dem Informationspaket können außer Informationen über Umweltrelevanz noch weitere Daten gehören, wie z. B., dass das Produkt mit möglichst geringer Umweltbelastung zu installieren, zu nutzen und zu warten ist, wie eine möglichst hohe Lebensdauer erreicht werden kann und welchen Entsorgungsweg das Produkt gehen soll. Dem Verbraucher könnten noch weitere Informationen zur Verfügung gestellt werden wie der Zeitraum der Verfügbarkeit von Ersatzteilen oder die Nachrüstung der Geräte.

Es stellt sich aber die Frage, wie weit der Verbraucher an den detaillierten Informationen Interesse hat. Für viele Kunden ist die Information über die Nutzungsphase mit den entstehenden Kosten und ggf. Verfügbarkeit von Ersatzteilen oder Nachrüstbarkeit meist ausreichend. Eine weitere Möglichkeit der Kommunikation bietet die Umweltproduktinformation. Erfahrungen mit solchen Umweltproduktinformationen sind bis jetzt in den Skandinavischen Ländern gemacht worden. Dort gilt die so genannte Produktumwelterklärung als ein Instrument zur Beschreibung von Umweltaspekten unterschiedlicher Produkte z. B. Fahrzeuge, Motoren, Lampen. Die Anforderungen von Produktumwelterklärung sind in der ISO TR 14025: 2000 [19] beschrieben. Das ist ein „Technical Report“ und als solches eine Handlungsempfehlung. Hier sind der Energieverbrauch des Produktes, die Beschreibung der Funktion, Entsorgungsweg und weitere Informationen über Aufbau und optimale Nutzung des Produktes enthalten.

Um die Ziele der EuP-Richtlinie zu erreichen, sollen sogenannte Öko-Profile aufgestellt werden. Diese enthalten Minimum Standards hinsichtlich ökologischer Auswirkungen und sollen im Rahmen von Durchführungsmaßnahmen Voraussetzung fürs Erteilen des CE-Kennzeichens werden. Durch das Erstellen von Minimum Standards können die Produkte mit schlechter Energieeffizienz festgestellt werden. Wenn ein Produkt den Minimum Standard nicht erfüllt, soll das CE-Kennzeichen nicht erteilt und somit der Verkauf innerhalb der EU verboten werden. Gleichzeitig sollen Produkte mit hoher Energieeffizienz gefördert werden.

Ein gutes Beispiel für die Umsetzungsmaßnahmen ist die Beleuchtungsindustrie. Das Öko-Profil beinhaltet bereits Minimum Standards für Lebensdauer und Energieeffizienz [Lumen/Watt]. Es bezieht sich auf eine Produktgruppe. Die Vorgaben sind das Ergebnis eines Konsens auf Verbandsebene im Fall von Lampen der ELC. Energieeffiziente Produkte erfüllen diese Standards bereits heute. Weitere Kriterien werden als Ergebnisse dieser Studie ausgearbeitet.

4.5 Aktivitäten der Lampenindustrie im Hinblick auf die EuP in der Zusammenarbeit mit dem Europäischen Lampenverband

Der Europäische Lampenverband (European Lamp Companies Federation, ELC) [20] vertritt 95 % der europäischen Lampenhersteller [Abbildung 4-2]. Der Verband wurde im Jahr 1985 gegründet und hat seinen Sitz in Brüssel. Die Hauptziele der ELC basieren im Allgemeinen auf der Förderung von effizienter Lichtnutzung zur Steigerung des menschlichen Wohlbefindens, der Gesundheit und der Sicherheit. In diesem Zusammenhang berät und kooperiert der ELC mit dem EU-Gesetzgeber bei der Entwicklung von Richtlinien, die für die Lampenindustrie Relevanz haben. Auch die Umsetzung der EuP-Richtlinie wird durch Kooperation zwischen den Lampenherstellern und dem ELC Verband gefördert.



Abbildung 4-2: Mitglieder und Logo des European Lamp Companies Federation (ELC)
Quelle: [20]

Die EuP-Richtlinie selbst ist keine gesetzliche Verpflichtung für die Hersteller. Nur die von der Kommission erlassenen Durchführungsmaßnahmen sind verpflichtend. Das europäische Parlament hat keine Möglichkeit der Festlegung von Anforderungen an das Ökodesign. Nur

die entsprechenden Fachkomitees in Zusammenarbeit mit der Industrie können die Anforderungen an das Ökodesign festlegen. Die Durchführungsmaßnahmen werden von der Kommission verabschiedet. Im Bezug auf die Durchführungsmaßnahmen („implementing measures“ IM) sieht die Industrie noch Diskussionsbedarf. Sowohl die Umsetzung in nationales Recht als auch die eigentlichen Maßnahmen sind noch nicht geklärt [Abbildung 4-3].

Laut der EuP-Richtlinie werden anhand der Phase im Lebenszyklus mit der höchsten Umweltrelevanz die so genannten Öko-Profile erstellt. Mit den Durchführungsmaßnahmen können zwei Möglichkeiten verfolgt werden, entweder sollen generische Vorgaben die Umweltverträglichkeit erhöhen oder es werden konkrete, d. h. messbare Eigenschaften des Produktes wie Energieverbrauch während der Nutzung vorgegeben. Da die Marktakzeptanz für die energieeffizienten Produkten aus unterschiedlichen Gründen bis jetzt, nicht wie seitens der Industrie erhofft wurde, eingetreten ist, begrüßt die Lampenindustrie die neue Richtlinie und engagiert sich hier auch auf Verbandsebene proaktiv. Als Basis für die Durchführungsmaßnahmen der Richtlinie sind neben den Öko-Profilen auch die so genannten *Procurement Guides* zu erstellen. Die Öko-Profile geben für alle durch die Mitglieder vertriebenen Produkte Minimum Standards vor. *Procurement Guides* enthalten im Gegensatz zu Öko-Profilen den aktuellen, maximalen Produkt-Standard. Die Aufstellung von den *Procurement Guides* hat zum Ziel, so genannte „best in class“ Produkte zu erkennen und herauszustellen, und damit (öffentlichen) Kunden eine Einkaufshilfe für effiziente Beleuchtung zu bieten. Diese werden zusammen mit den Ökopprofilen der Kommission überreicht und als fachliche Grundlage zum Erlassen der Durchführungsmaßnahmen bilden.

Die ELC hat erreicht, dass sich bei der Vorbereitungsstudie für die Durchführungsmaßnahmen zwei der 14 Produktbereiche mit Beleuchtung (Straßenbeleuchtung und Bürobeleuchtung) befassen. Im professionellen Bereich beträgt das geschätzte Einsparungspotential an Energie 70-80 %. Diese Einsparungspotentiale lassen sich u.a. durch folgende von der ELC geforderten und geförderten Maßnahmen realisieren: a) den konsequenten Einsatz von elektronischen Vorschaltgeräten, T5-Leuchtstofflampen bei der Büro- und Industriebeleuchtung sowie b) das Ausphasen der Quecksilberdampflampen in der Straßenbeleuchtung. Im privaten Bereich soll die Förderung von Kompaktleuchtstofflampen sowie Lampen mit Infrarotbeschichtung (IRC) erfolgen.

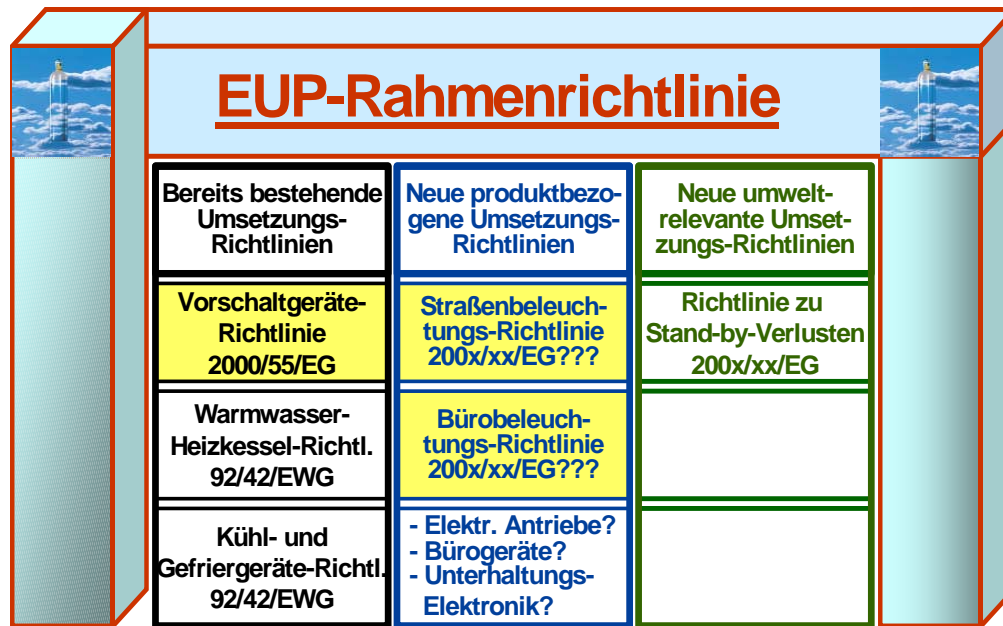


Abbildung 4-3: Umfang der EuP- Rahmenrichtlinie (Stand 17.11.2005)
Quelle: [21]

4.6 Zusammenfassung von Auswirkungen der EuP-Richtlinie auf die Beleuchtungsindustrie

Die mit der EuP-Richtlinie verbundenen Auswirkungen auf die Beleuchtungsindustrie bieten Chancen für Hersteller und Verbraucher. Das Ziel der EuP ist, Verbesserungspotentiale durch die Ermittlung von Umweltauswirkungen innerhalb des gesamten Lebenszyklus zu erkennen, und mit dem Verbraucher zu kommunizieren. Die von der EuP-Richtlinie vorgeschlagene Methodik der Produktbewertung ist jedoch zu aufwendig und spiegelt das Verbraucherinteresse nur eingeschränkt wieder. Außerdem wird die Wettbewerbsfähigkeit der Hersteller in der EU nachhaltig negativ beeinflusst. Darüber hinaus müssen geeignete Bewertungsmethoden ausgearbeitet werden, mit Hilfe derer Prioritätsprodukte bewertet werden können. Die Bemühungen von den Herstellern um eine so genannte Ökoeffizienz von Produkten über alle Phasen des Produktlebenszyklusses muss verstärkt werden. Um Produkte der gleichen Produktgruppe im Nachhinein untereinander vergleichen zu können, muss ein dafür geeigneter Maßstab vorhanden sein. Durch das Erstellen von Öko-Profilen die umweltentscheidende Parameter von Produkten enthalten und die Mindestanforderungen des Ökodesign erfüllen, könnte man „best in class“ Produkte herausstellen. Diese Produkte, werden mit einem „erweiterten“ CE-Kennzeichen* versehen. Die Maßnahme ist positiv zu beurteilen. Ohne Kennzeichnung von wenig energieeffizienten Produkten wird auch kein

Marktzugang zu dem EU-Markt möglich sein. Allerdings bedarf es hier einer starken und geregelten Marktüberwachung. Diese wurde laut der Richtlinie an die Mitgliedsstaaten übertragen und ist dort derzeit - zumindest in Deutschland - noch nicht ausreichend geregelt.

Durch die Umsetzung der EuP-Richtlinie wird ein gesteigerter Absatz der energieeffizienten Produkte möglich werden. Ein langfristiges Produktverbot, d. h. das Ausphasen von Produkten mit schlechter Energieeffizienz, führt zu einer besseren Beleuchtungsqualität sowie Energiekosteneinsparung. Die bisherigen Anreize zum Kauf von energieeffizienten Produkten im Bereich Beleuchtung liegen leider weit unter den von Erwartungen der Lampenindustrie. Diese verfügt nämlich seit langem über eine Vielzahl von energieeffizienten Produkten. Schon bei der Einführung von ersten Energiesparlampen 1985 im privaten Bereich wurde gehofft, vom nachhaltigen Denken durch den Verbraucher belohnt zu werden. Aus diesem Grund ist eine verstärkte Marktdurchdringung in diesem Bereich ohne entsprechende Unterstützung der Gesetzgeber schwer vorstellbar. Die Durchführung von Anforderungen der EuP-Richtlinie wird künftig einen großen Einfluss auf die gesamte Beleuchtungsindustrie haben. Die Durchführungsmaßnahmen für die EuP müssen dringend ausgearbeitet werden. Die Unterstützung durch gesetzliche Regelungen sind in der Beleuchtungsbranche notwendig, um die möglichen Einsparziele realisieren zu können.

* Erweitertes CE-Kennzeichen beinhaltet neben den Sicherheitsaspekten auch die Anforderungen der jeweils geltenden Durchführungsmaßnahmen.

5. Methodik der Lebenswegsbilanz

5.1 Einleitung

Die ganzheitliche Betrachtung von Produkten, Technologien und Dienstleistungen gewinnt sowohl aus Sicht des Kunden als auch der Industrie an Bedeutung. Gängige Werkzeuge hierfür sind unter den Begriffen Ökobilanz und Life Cycle Assessment (LCA) bekannt. Beide Begriffe setzen auf die ganzheitliche Betrachtung, d. h. Beurteilung der Umweltauswirkungen von Produkten, Technologien und Dienstleistungen entlang des gesamten Lebenswegs im Rahmen vorhandener Normen. Anwendung finden die Normen ISO/EN/DIN 14040 [17], 14041 [22], 14042 [23], 14043 [24], 14044 [25].

Unter dem Begriff „Ökobilanz“ nach ISO/EN/DIN 14040 ist die Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potentiellen Umweltauswirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebenswegs zu verstehen. Der Unterschied zu anderen Bewertungsinstrumenten liegt vor allem im ganzheitlichen Ansatz und durch die Schaffung einer vergleichbaren Basis für vergleichende Bilanzierungen im Rahmen der international gültigen Normen. Je nach Anwendungsgebiet können Schwerpunkte variiert und Bewertungsinstrumente modifiziert werden.

Die LCA hat ihren Anfang in den 70er Jahren. Als erster Fokus der Bilanzierung wurde der energetische Aspekt der Produktion entdeckt. Die erste Energiekrise Anfang der 70er Jahre gab den Anstoß, den bis dahin scheinbar unbegrenzten Energiekonsum zu überdenken. Energie als begrenzte Ressource und als Kostentreiberin der Industrie erlangte eine neue Bedeutung [26]. In späteren Jahren wurden langsam weitere Komponenten wie Rohmaterial, Emissionen, Abfall in die ökologische Betrachtung miteinbezogen. Zu dieser Zeit wurden auch die ersten Untersuchungen von Getränkeverpackungen durchgeführt. Ziel war die Darstellung der Umweltauswirkungen von Einweg- und Mehrwegverpackungen bei Getränken [27]. In den 90er Jahren fand erstmalig eine übergreifende internationale Diskussion zum Thema Ökobilanzierung statt. Erste Methodenvorschläge wurden erarbeitet, die schließlich zu einer Standardisierung der Ökobilanzierung geführt haben. [CML 1991 [28], UBA 1992 [29], SETAC 1991 [30], SETAC 1992 [31], SETAC 1993 [32]]. Die erste Norm über die Prinzipien der Ökobilanzen wurde im Jahre 1997 veröffentlicht [ISO/EN/DIN 14040, 1997 [17]]. Ein Jahr danach folgte eine weitere Norm, die sich mit den konkreten Ansätzen bezüglich des Ziels sowie des Untersuchungsrahmens von Ökobilanzen beschäftigte [ISO/EN/DIN 14041, 1998 [22]]. Die Wirkungsabschätzung als die nächste Phase der Ökobilanzierung wird in der ISO/EN/DIN 14042, 2000 [23] definiert. Mit den

Empfehlungen hinsichtlich der Auswertung der Ökobilanzergebnisse befasst sich die ISO/EN/DIN 14043, 2000 [24]. Im Jahre 2005 folgte den Ökobilanzierungsnormen ein Entwurf der Norm E/ DIN/ EN/ ISO 14044, 2005 [25], die Umweltmanagement-Ökobilanz-Anforderungen definiert. Ziel ist die Integration ins Managementsystem und die damit verbundenen positiven Auswirkungen bei der Erstellung von Ökobilanzen.

5.2 Anforderungen an die Ökobilanzmethodik

An die Methodik der Ökobilanzierung werden hohe Anforderungen an Datenqualität und Zuverlässigkeit gestellt. Durch Modellierung strukturierter Systeme lässt sich feststellen, wo signifikante Umweltbelastungen zu erwarten oder Entlastungspotentiale vorhanden sind. Die aus dieser Methodik resultierenden Ergebnisse sollen eine zukunftsorientierte Produktentwicklung und Produktion unterstützen. Voraussetzung für eine Ökobilanz ist die Verfügbarkeit von Daten über die Beschaffung von Rohstoffen, Herstellung, Transport, Nutzung und Entsorgung, sowie eine ausreichende Zuverlässigkeit derselben. Detaillierte Kenntnisse über das zu untersuchende Objekt entlang des Produktlebenswegs sowie der Zugang zur Ökobilanzierungs-Software und Datenbanken sind erforderlich. Gerade eine lange Reihe detaillierter Anforderungen erschweren einen breiten Einsatz der Methodik in der Industrie. Zeit und Kosten sind heute Treiber der Industrie. In Zeiten starker internationaler Konkurrenz, geringer freier Personalkapazitäten und einer gewinnorientierten Unternehmensstrategie ist die Akzeptanz der vorhandenen Methoden gering einzuschätzen. Darüber hinaus ist die Kommunikation einer Ökobilanz mit der Öffentlichkeit wenig Ziel führend.

Die bis jetzt publizierten Ökobilanzen sind meist in Zusammenarbeit von Industrie und Forschungsinstituten durchgeführt worden [33, 34, 35, 36, 37, 38]. So konnte der Datenpool der Industrie und die Personalkapazität der Institute sinnvoll genutzt und kombiniert werden. Die Industrie braucht eine Methodik, die einen Vergleich von Produkten auf allen Stationen des Lebenswegs auf einfache Weise ermöglicht. Dies soll eine Herausforderung für die Wissenschaft sein, sich mit dieser Thematik zu befassen und schnelle aber zuverlässige Ergebnisse erarbeiten. Vor allem die Nutzung von Material- und Stoffdatenbanken zur Erstellung vergleichender Umweltauswirkungen eines Produkts auf einfache Weise, soll in Zukunft eine wichtige Rolle bei „Umweltverträglichkeit von Produkten“ spielen. Die integrierte Produktpolitik bildet hierfür die Basis, auch bei der Umsetzung neuer EU-Richtlinien (z. B. EuP) werden vergleichende Produkt-Parameter eine Rolle spielen.

5.3 Ökobilanz als Instrument zur umweltorientierten Unterstützung bei der Produktentwicklung

Eine Ökobilanz beschreibt die detaillierte Untersuchung eines Produktsystems, deren Schwerpunkte je nach Anforderung von Industrie oder Gesellschaft variabel sein können. Ein Ziel dabei ist das Aufzeigen systembedingter Schwachstellen. Dies ist für die Industrie besonders wichtig, zum Einen im Hinblick auf die aktuelle Gesetzgebung, zum Anderen wegen des Anreizes, durch kontinuierliche Verbesserungen an Produkt und Produktion eine Minderung der Umweltauswirkungen zu erzielen und damit auch ein Kosteneinsparpotential zu erzeugen. Die Ökobilanzierung kann sich in Unternehmen als Entscheidungshilfe bei Produkten gleicher Produktfamilien in unterschiedlichen Herstellverfahren, Produktionsstandorten oder Ressourcenverbrauch bewähren.

Auf Basis ökologischer Vergleiche kann man feststellen, wie weit sich Produkte voneinander hinsichtlich der Umweltauswirkungen unterscheiden und vor allem, welche Produkte die Vorreiter sind. Auch die Auswahl von Komponenten, Verpackungsmaterialien oder Technologien können mitberücksichtigt werden. Die aus der Untersuchung resultierenden Ergebnisse können in zukünftige Entwicklungsphasen des Produktes bzw. in die Produktion einbezogen werden. Darüber hinaus kann die Ökobilanzierung für die Industrie zur Unterstützung bei der Produktentwicklung dienen. Ziel der Industrie ist jedoch nicht, einem Ökobilanzierungszwang für Produkte ausgesetzt zu sein. Das ist vor allem mit einem enormen methodischen Aufwand bei der Durchführung der Ökobilanz auch wegen des eingeschränkten Zugriffs auf externe Datensätze verbunden. Besonders schwierig ist es, eine vergleichende Ökobilanz zu erstellen, wie z. B. die vorher erwähnte Ökobilanz der Getränkeverpackungen. Nur durch Datengenerierung eines unabhängigen Instituts im Sinne einer Kumulierung auf Branchenebene können Hersteller zur Herausgabe von Daten animiert werden. Die Scheu vor der Offenlegung von Interna im Positiven wie Negativen ist in der Industrie groß und ein ernstes Hindernis bei der Erstellung vergleichender Bilanzen.

Nicht nur die Generierung von produktionsspezifischen Daten, sondern auch die Auswahl von Datensätzen der Vorketten kann problematisch sein. Weltweite Produktion von Rohstoffen und die unterschiedlichen Umwelteinflüsse machen die Auswahl nicht leicht. Dazu kommt, dass in der Industrie häufig Rohstoffe aus mehreren Vorkommen eingesetzt werden. Ein Beispiel hierfür ist Aluminium. Der hohe Energieaufwand führt je nach Energieerzeugung zu einer unterschiedlichen Umweltrelevanz. Da Aluminium aus Norwegen überwiegend mit Energie aus Wasserkraft, in Frankreich aus Atomkraft und in Deutschland

mit einem Energiemix hergestellt wird, sind die Umwelteinflüsse je nach Bewertung unterschiedlich. Dazu kommt durch die Internationalisierung der Märkte, dass häufig nur nach Produktspezifikation und nicht nach Hersteller auf Spotmärkten gekauft wird. Und damit wird der eigentliche Ursprung für den Hersteller bzw. Bilanzierer nicht mehr nachvollziehbar.

Schon seit langer Zeit beschäftigen sich eine Reihe von Instituten mit der Erstellung von Stoff- und Materialdatenbanken [39, 40, 41]. Es existiert jedoch keine „zentrale“, stets aktualisierte Datenbank, mit Hilfe derer einheitliche Daten für eine breite Zahl an Rohstoffen sowie Prozessen eingesetzt werden könnten. Durch zukünftige EU-Gesetzgebung sind Richtungweisende Normen, Technische Standards und Richtlinien zu erwarten. Solange Ökobilanzen eine freiwillige Maßnahme der Industrie sind, werden sie als eine Unterstützung der ökologischen Optimierung von Produkten und sogleich für die Hervorhebung besonders „ökologischer“ Produkte gesehen.

5.4 Bewertungskriterien aus Verbrauchersicht in Zusammenhang mit Ökobilanzergebnissen

Ein wichtiges Thema im Rahmen des Produkt-Designs ist die immer wieder gestellte Anforderung, die Öffentlichkeit über Produktgestaltung durch Produktumwelterklärungen zu informieren. Einen wichtigen Beitrag zur Information der Verbraucher leistet ein freiwilliges Instrument der Umweltpolitik - die Umweltkennzeichen. Dieser Bereich der Verbraucherinformation ist der Gruppe der freiwilligen Informationen (neben verbindlichen Produktinformationen und verbrauchsbezogenen Instrumenten) zugeordnet [42]. Die umweltbezogenen Kennzeichnungen sind nach Normreihe DIN EN ISO 14020 ff. in drei Typen gegliedert [43]. Bei den drei bekanntesten Umweltkennzeichen [Blauer Engel (Deutschland, 1977), Nordischer Schwan (Dänemark, Norwegen, Schweden, Finnland, 1989) und Europäische Blume - Umweltzeichen der (EU 1992)] handelt es sich um Umweltzeichen des Typs I: Umweltzeichen im engeren Sinn. Umweltzeichen dieses Typs werden für Produkte vergeben, die nach ökologischen Kriterien zu den besten in ihrer Vergleichsklasse gehören. Sie sind so genannte "Label of excellence" für Produkte, denen auf dem Markt zum Durchbruch verholfen werden soll. Die Auszeichnung wird von einer externen Körperschaft vergeben und hat immer freiwilligen Charakter. Die Vergabekriterien für die einzelnen Produktgruppen beruhen auf dem Konzept der Lebenszyklusbewertung [44]. Die Aufgabe der Umweltkennzeichnung liegt also darin, diese Produkte auszuzeichnen, die in ihrer ganzheitlichen Betrachtung besonders umweltfreundlich sind und zugleich hohe Ansprüche

an den Gesundheits- und Arbeitsschutz sowie beim Gebrauch erfüllen. Durch diese Vorgehensweise wird den umweltbewussten Verbrauchern die Kaufentscheidung erleichtert. Es wurden Studien durchgeführt, die behaupten, 49 % der Bundesbürger achten beim Einkauf auf den „Blauen Engel“. Im Gegensatz zu ökologisch erzeugten Lebensmitteln, deren Kauf offenbar vom Haushaltseinkommen abhängt, findet sich bei Blauen Engel-Produkten kein Einkommenseffekt [45]. Durch diesen nachhaltigen Konsum profitiert die Industrie und hat somit mehr Anreiz optimierte Produkte herzustellen, um im Wettbewerb bestehen zu können.

Ein weiteres Beispiel dafür wie wichtig die sinnvolle Kennzeichnung von Produkten ist, stellt das „Energielabel“ dar. Das Zeichen ist gesetzlich vorgeschrieben (EU-Richtlinie 2003/66/EG) [46] der Kommission vom 3. Juli 2003 zur Änderung der Richtlinie 94/2/EG zur Durchführung der Richtlinie 92/75/EWG des Rates). Aufgrund dieser Richtlinie sowie der Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung [47] müssen alle Lampen für Haushaltsanwendungen mit dem Energy Label gekennzeichnet sein. Die Energieetikettierung stellt sich als besonders geeignete Methode zur Unterstützung bei der Kaufentscheidung dar. Eine Einteilung der Lampen in sieben Klassen der Energieeffizienz ermöglicht dem Kunden einen Überblick über die ganze Produktpalette. Die Klasse A steht für „sehr effizient“, die Klasse G für „weniger effizient“. Die Leuchtstofflampen sind in der Klasse A und B eingestuft worden, die Glühlampen überwiegend in den Klassen E und F. Die Berechnung der Energieeffizienz-Klassen setzt sich auf den gemessenen Werten des Lichtstroms und der Lampenleistung zusammen. Das Ziel solcher Kennzeichnung liegt vor allem darin, einen unnötigen Stromverbrauch aufzuzeigen und damit die Vermarktung von energieeffizienten Produkten zu unterstützen. Die Kommunikation des Energielabels ist damit eine geeignete Maßnahme, nicht optimierte Produkte vom Markt zu verdrängen. Den Kunden interessieren in der Regel nur Parameter, die in der Nutzungsphase für ihn ökonomisch oder ökologisch relevant sind. Weitere Informationen wie Inhaltdeklarationen, Konformitätserklärungen sind meist überflüssig.

Um ein Produkt ganzheitlich zu bewerten, muss eine breitere Zahl an Informationen beurteilt werden. Die Aussage darüber ist nur durch ein unabhängiges Gremium möglich. Die Ergebnisse der Bewertung von Produktgruppen sollen der Öffentlichkeit auf eine einfache Weise kommuniziert werden. Darüber hinaus soll die Vergabe des Umweltkennzeichens verstärkt werden.

5.5 Struktur der Ökobilanz

5.5.1 Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens

Nach DIN EN ISO 14040 (1997) [17] sind zu Beginn der Ökobilanz Ziel und Untersuchungsrahmen eindeutig festzulegen. Diese ersten beiden Schritte sind für den ganzen Verlauf der Studie von grundlegender Bedeutung. Die angesprochenen Zielgruppen und Adressaten des Studienergebnisses sollen definiert werden. Der Untersuchungsrahmen stellt fest, in wie weit das zu betrachtende System während der gesamten Ökobilanzierungsstudie analysiert wird und welche Kriterien die Hauptrolle spielen werden. Dies beinhaltet die Festlegung des Untersuchungsrahmens, der Systembeschreibung, der funktionellen Einheit, der Systemgrenze und der Datenqualität. Auch eine räumliche und zeitliche Systemgrenze sollte festgelegt werden.

Voraussetzung für eine vergleichende Ökobilanz ist die Schaffung gleicher Bezugsfunktionen für die zu untersuchenden Systeme. Die Vergleichseinheit in einer Ökobilanz nennt man eine funktionelle Einheit. Einer der Hauptzwecke einer funktionellen Einheit ist die Angabe einer Bezugsgröße, auf die Input- und Outputdaten normiert werden [22]. Diese Bezugsgröße soll als Vergleichsbasis dienen und gleichzeitig die Leistung des untersuchten Systems darstellen. Die Auswahl der funktionellen Einheit ist vor allem im Hinblick auf das Ziel der späteren Bewertung von Bedeutung, steht also mit dem Ziel der Ökobilanzstudie in engem Zusammenhang.

Eine LCA ist mit einer breiten Zahl von Daten, d. h. für den Produktlebenszyklus relevanter Informationen durchzuführen, wobei die Relevanz mit dem zuvor abgesteckten Betrachtungsrahmen übereinstimmen muss. Die Qualität der Daten (interne Daten, Auswahl der Datenbank), deren Genauigkeit und Vollständigkeit sind für die ganze Bilanz entscheidend. Auch vom Umweltbundesamt [48] wird darauf hingewiesen, dass insbesondere die Datenauswahl die Aussagemöglichkeiten eines angestrebten Vergleiches der betrachteten Produktvarianten unter ökologischen Gesichtspunkten einschränkt. Dieses Problem betrifft allerdings heute fast jede Ökobilanz, da nur in seltenen Fällen für eine Fragestellung repräsentative Daten aus systematischer Primärdatenerhebung für alle Subsysteme entlang des gesamten Lebensweges zur Verfügung stehen. Es existieren keine „lückenlosen“ Ökobilanzen. Ein Teil der Daten wird wahrscheinlich immer aus verschiedenen Gründen nicht zugänglich sein. Auch die in der Bilanzierung vorkommenden Abschätzungen sollten begründet und erläutert werden. Lücken, die in jeder Bilanz erhalten sind, erschweren Aussagen zur Wirkungsabschätzung und können die Bewertung in Frage stellen.

5.5.2 Sachbilanz

Eine Sachbilanz befasst sich mit Verfahren der Sammlung und Berechnung von Daten [Nach der Norm EN ISO 14041: 1998] [22]. In dieser Phase der Ökobilanz sollen die Daten entlang der gesamten Prozesskette über Rohstoffgewinnung, Transport, Produktion, Nutzung und Entsorgung erhoben und entsprechend auf die funktionelle Einheit normiert werden. In einer Phase der Sachbilanzen wird vor allem versucht, alle mit in Verbindung zum untersuchenden System stehenden Daten zu analysieren (Ressourcen, Emissionen, Abfälle). „Alle“ bedeutet aber auch, dass für jedes Material, das sich innerhalb der festgelegten Systemgrenze befindet, eine Vorkette herangezogen wird. Diese soll entweder auf Grund interner Daten oder wenn möglich und vertretbar aus herkömmlichen Datenbanken stammen. Die Ökobilanzierung „von der Wiege bis zur Bahre“ verlangt nicht nur nach von einem System direkt ermittelten Daten, sondern auch deren Vorketten (z. B. Stromerzeugung). Diese Vorgehensweise ermöglicht eine Bilanzierung, die bei der Gewinnung von Rohstoffen beginnt, und sich über alle Phasen der Herstellung von Vorprodukten, Produktion, Nutzungsphase und Entsorgung erstreckt. Aus diesem Grund ist die Erstellung der Sachbilanz ohne Unterstützung von Ökobilanzdatenbanken nicht möglich.

5.5.3 Datenqualität als Hauptproblem der Ökobilanzierung

Aufgrund der gerade angesprochenen Datenstruktur lassen sich die Daten in „interne“ und „externe“ unterordnen. Als „interne“ werden in dieser Arbeit die auf Grund der „eigenen Untersuchung“ gesammelten Produktions- und Materialdaten angesehen. Hierzu gehören alle Zwischenprodukte sowie das Endprodukt selbst, interne Produktionsdaten, Messprotokolle, Sicherheitsdatenblätter, interne Materialdatenbanken und betriebsinterne Informationen.

Bei der Erstellung von Datensätzen stellt sich das Problem des Produktionsausschusses. Abhängig von der Maschinenteknologie und des Herstellverfahrens können die Ausschusszahlen auch bei Herstellung gleicher Produkte stark schwanken. Die vorhandene Standardkalkulation ist hier kaum anwendbar, denn sie geht in der Regel von Datengleichheit für gleiche Produkte aus, meist ungeachtet der eingesetzten Produktionsmethodik. Produktionsspezifische Schwankungen bei der Herstellung gleicher Produkte können sich auf die Ergebnisse der gesamten Bilanz niederschlagen. Zur Bewertung werden im vorliegenden Fall nur die tatsächlich in das Produkte einfließenden Materialien einbezogen. Der Ausschuss bei der Herstellung von Vorprodukten beim Zulieferer bleibt unberücksichtigt.

Information über den Ausschuss unterliegen in der Regel der Geheimhaltung bei jeder Firma und sind für Dritte nicht verfügbar.

Die Zusammenstellung der internen Daten ist zeitintensiv und in einen normalen Produktionsablauf nicht einfach zu integrieren. Nicht die Daten der Produktbestandteile, sondern die im Produktionsverfahren eingesetzten Betriebs- und Fertigungshilfsmittel eines Produktes und deren Produktionsverfahren inklusive aller Vorprodukte entlang der gesamten Lebenszykluskette, sind schwierig zu ermitteln. Da gerade Betriebs- und Fertigungshilfsmittel nicht Produktionslinien spezifisch zugeordnet werden, ist die produktspezifische Quantifizierung nicht einfach ermittelbar. Wenn für die vollständige Darstellung des komplexen Lebenszyklus Daten fehlen, werden die so genannte Vorketten, als externe Daten, herangezogen. Die Vorketten sind in den speziell für die Ökobilanzierungszwecke entwickelten Datenbanken enthalten. Diese umfassen zwar eine große Zahl an Materialien, Fertigungsschritten und Produkten, sind jedoch nicht lückenlos. Es fehlt vor allem an Datensätzen für Elektronikprodukte. Diese Tatsache resultiert vor allem daraus, dass der Hauptzulieferer aller Elektronik-Komponenten der asiatische Markt ist und der Datenzugang dadurch erschwert oder überhaupt nicht möglich ist. Einen Beitrag in diesem Bereich leistet die bereits existierende IMDS Datenbank (Datenbank der Automobilindustrie) [50]. Diese Datenbank ist allerdings eine reine Stoffdatenbank und enthält keine Produktionsketten, die für die Erstellung einer Produktökobilanz notwendig sind. Ein weiteres Projekt, Ökobilanzierungsdaten für die breite Nutzung zur Verfügung zu stellen ist „ecoinvent 2000“. Das Schweizer Zentrum für Ökoinventare hat eine große Zahl an Datenbanken zusammengeführt. „Ziel dieses Projektes ecoinvent 2000 sind harmonisierte, generische Ökobilanzdaten hoher Qualität für die Bereiche Energie, Transport, Entsorgung, Bauwesen, Chemikalien, Waschmittelinhaltsstoffe, Papiere und Landwirtschaft, gültig für schweizerische und westeuropäische Verhältnisse“. Ecoinvent ist seit Herbst 2003 per Internet öffentlich zugänglich [50].

Ein weiteres Problem in der Thematik der Datenzusammensetzung ist die Erfassung der Daten im Bezug auf die Verwendung in der LCA-Software. Komplexe Bilanzen lassen sich ohne Nutzung einer speziellen Software nicht durchführen. Die Auswahl an Ökobilanzierungssoftware ist groß [Tabelle 5-1].

Tabelle 5-1: *Auswahl an Softwaresystemen zur Unterstützung des Life Cycle Assessments*
 Quelle: G. Jürgens [51]

Name	Hersteller	Land
Audit	AUDIT Softwareentwicklungs- und Handel GmbH	A
Boustead	Boustead Consulting	GB
Cumpan	debis Systemhaus Engineering GmbH	D
Eco Pro	sinum GmbH, Umweltbewusstes Management	CH
EDIP	Institut for Product Development, TU Denmark	DK
GaBi	IKP- Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde Universität Stuttgart, PE Produkt Engineering GmbH	D
GEMIS	Öko-Institut	D
LCAit	Chalmers Industriteknik	S
SimaPro	Product Ecology (Pré) Consultants	NL
Team	Ecobilan Group	F
Umberto	Ifeu- Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg Ifu- Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH	D

Diese Software-Produkte sind von vielen Instituten parallel entwickelt worden, und enthalten auch unterschiedliche Datenformate. Gerade aus diesen Gründen ist es erschwert, Daten aus verschiedenen Datenbanken zu nutzen, weil diese oft nicht kompatibel sind. Einen Versuch, den Datenaustausch zwischen verschiedenen Datenbanken zu ermöglichen, hat die Society for the Promotion of Life-Cycle Assessment Development (SPOLD) im Interesse von Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen unternommen. Die Hersteller der LCA- Datenbanken können in den Programmen eine Schnittstelle im SPOLD-Format schaffen. Die Import- und Export-Funktionen kann man mit dem SPOLD-Format in Umberto-Software, SimaPro5 und Ecobilan bereits nutzen. Um das Problem des Datenzugangs in der Zukunft zu lösen, wäre eine zentrale Datenbank mit standardisierten Beständen verschiedenen Industrieanbieter notwendig.

Ein Datenpool könnte nur in Zusammenarbeit mit der Industrie erfolgen. Die aus der Industrie stammenden Datensätze müssten weiter bearbeitet und standardisiert in den Datenpool integriert werden als typische Aufgabe von Forschungsinstituten. Wer sollte aber in dem Fall die Kosten dafür tragen? Wer kann schließlich durch den Zugang zu den

Datenbanken in der Zukunft profitieren? Ist die Offenlegung der Industriedaten in Europa erwünscht und der Zugriff auf Daten aus anderen Kontinenten überhaupt in größerem Maßstab möglich?

Mit Hilfe der genannten Beispiele lässt sich zeigen, dass im Bereich der Datenzugänglichkeit sowie des Datenaustauschs ein enormes Entwicklungs- und Umsetzungspotential besteht. Bis jetzt sind die Daten nur von einem begrenzten Teil an Materialien und Prozessen erfasst worden. Die ständige Aktualisierung der Datenqualität und der Zugang vor allem zu den nicht in Europa hergestellten Vorprodukten stellt sich als eine der größten zukünftigen Herausforderung der Ökobilanzierung dar. Ohne die Verbesserung der Datenqualität ist die Entwicklung von komplexen Ökobilanzen von Produkten nicht denkbar.

5.5.4 Wirkungsabschätzung (Impact Assessment)

Im Rahmen einer Sachbilanz werden alle Stoff- und Energieströme, die mit dem betrachteten System in der Verbindung stehen, zusammengefasst. Die Ergebnisse der Untersuchung liefern schon alleine nützliche Informationen zum Energieverbrauch oder Emissionen sowie resultierenden Verbesserungspotentialen. Aber nur mit Hilfe einer weiteren Methodik lassen sich die Auswirkungen auf die Umwelt des zu untersuchten Systems beurteilen. Die Zuordnung von Sachbilanzdaten zu Wirkungskategorien nennt man in der Ökobilanzierung eine Wirkungsabschätzung.

Die quantitativen Daten, in Form der Sachbilanzen gesammelt, werden in der Klassifizierung (Einteilung von Sachbilanzergebnissen) zu einzelnen Kategorien aggregiert, z. B. CO₂ zur Kategorie Treibhauseffekt, SO₂ zur Kategorie Versauerung. Die einzelnen Sachbilanzdaten werden entsprechend ihrer Wirkung den einzelnen Kategorien zugeschrieben. Wobei der gleiche Faktor nicht nur zu einer Wirkungskategorie beitragen kann, sondern mehrfach berücksichtigt werden muss, z. B. NO₂ Emissionen bei Versauerung, Eutrophierung und Photooxidantienbildung (siehe Anhang). Für die Qualität einer Ökobilanz ist wichtig, dass der tatsächliche Umwelteinfluss und seine Auswirkungen systematisch überprüft und bewertet werden.

Die Charakterisierung (Abschätzung) folgt auf die Wirkungsabschätzung. Hier erfolgt die Berechnung der Wirkungsindikatorergebnisse im Bezug auf die funktionelle Einheit des Systems. Die Aggregation zur Umweltwirkung erfolgt mit der Hilfe von Äquivalenzfaktoren.

Äquivalenzfaktoren spiegeln den zu erwartenden Umwelteinfluss unter Berücksichtigung aller ökologischer Belange wieder. Auch Äquivalenzfaktoren sollten keine immer währenden starren Einheiten darstellen. Der Einfluss von Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum, sowie die Erkenntnisse aus Wissenschaft und Forschung sollten langfristig einfließen. Das Ergebnis der Berechnung stellt sich als ein numerisches Indikatorergebnis dar. Die quantifizierbare repräsentative Darstellung einer Wirkungskategorie wird als Wirkungsindikator bezeichnet [23]. Als Grundlage der Wirkungsbilanz ist die Identifizierung mit dem zu untersuchenden System verbundenen Wirkungskategorien erforderlich. Die sind auf Basis der Stoff- und Energiebilanz ausgerechnet - der Zusammenhang zwischen Input in der Umwelt und der jeweiligen Wirkung muss wissenschaftlich nachgewiesen werden.

Es existiert keine „vollständige“ Liste von Wirkungskategorien und Indikatoren. Gerade die Indikatoren sind auch einem gewissen Zeitgeist unterworfen und durch Forschung und Entwicklung sowie auch durch die Wirtschaftsentwicklung und den verbundenen Umwelteinwirkungen beeinflusst. Indikatoren müssen den globalen Umwelteinflüssen und deren Auswirkungen Rechnung tragen und können langfristig keine starren Parameter darstellen. Darüber hinaus ist die Anpassung an nationale, humanitäre und ökologische Ziele erforderlich.

Die Liste der zu betrachteten Wirkungen sollte einerseits kompakt mit einer möglichst geringeren Zahl an Wirkungen ausgestaltet sein, um die wesentliche Aufgabe der Wirkungsbilanz - die Schaffung von Voraussetzungen für eine auch öffentlich nachvollziehbare Bilanzbewertung - zu erfüllen. Andererseits sollte sie möglich vollständig sein, um die in der Umweltschutzdiskussion allgemein anerkannten Zielsetzungen widerzuspiegeln [52].

Eine der Listen der WIRKUNGSKATEGORIEN ist die SETAC Liste.

Tabelle 5-2: *Ausgewählte Wirkungsindikatoren [nach der SETAC-Liste]*
Quelle: [53, 54]

A Inputbezogene Kategorien:

Bezeichnung	Bedeutung	Einheit
Regenerative Ressourcen	global	kg
Nichtregenerative Ressourcen	global	kg

B Outputbezogene Kategorien:

Bezeichnung	Bedeutung	Einheit
Treibhauseffekt (GWP)	global	kg CO ₂ -Äquivalent
Stratosphärischer Ozonabbau (ODP)	global	kg FCKW 11-Äquivalent
Humantoxikologische Wirkungen (HTP)	global, regional, lokal	mg/m ³ Luft
Ökotoxikologische Wirkungen (ETP)	global, regional, lokal	mg/m ³ Luft
Bildung von Photooxidantien (POCP)	regional, lokal	kg Ethylen -Äquivalent
Versauerung (AP)	regional, lokal	kg SO ₂ -Äquivalent
Eutrophierung (NP)	regional, lokal	kg PO ₄ ³⁻ -Ionen-Äquivalent
Gesundheitsgefährdung am Arbeitsplatz	lokal	mg/m ³ Arbeitsplatzgrenzwerte

5.5.5 Auswertung (Interpretation)

Die letzte Phase der LCA ist die so genannte Auswertung. Diese stellt sich als ein abschließender Teil der Untersuchung dar. Die Ergebnisse der Sachbilanzen sowie der Wirkungsabschätzung sollen in diesem Schritt zusammengestellt und interpretiert werden.

Die Auswertung ist in der Norm [DIN EN ISO 14043 (2000)] [24] als eine „Beurteilung, die die Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfungen berücksichtigt“, und als die Schlussfolgerungen, Empfehlungen und der Bericht über die signifikanten Parameter beschrieben.

Die Schlussphase einer Ökobilanz soll Erkenntnisse über mögliche zukünftige Entscheidungen darstellen. Durch das aus früheren Untersuchungen resultierende Erkenntnis, Sachbilanz und Wirkungsabschätzung, lässt sich nun der „reale“ Stand abbilden, was direkt zu Verbesserungspotentialen der untersuchenden Medien führen soll. Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung müssen auch auf ihre Relevanz für Produkt und Produktion überprüft werden.

6. Ökobilanzierung in der Lampenindustrie

6.1 Bedeutung der Lichttechnik

Licht bedeutet „eine sichtbare Strahlung - jede optische Strahlung, die unmittelbar eine Gesichtsempfindung hervorzurufen vermag. Es gibt keine genauen Grenzen für den Spektralbereich der sichtbaren Strahlung, da diese von dem Betrag der Strahlungsleistung, die die Netzhaut erreicht, und von der Augenempfindlichkeit des Beobachters abhängen. Die untere Grenze wird im Allgemeinen zwischen 360 nm und 400 nm, die obere Grenze zwischen 760 nm und 830 nm angenommen [Abbildung 6-1].

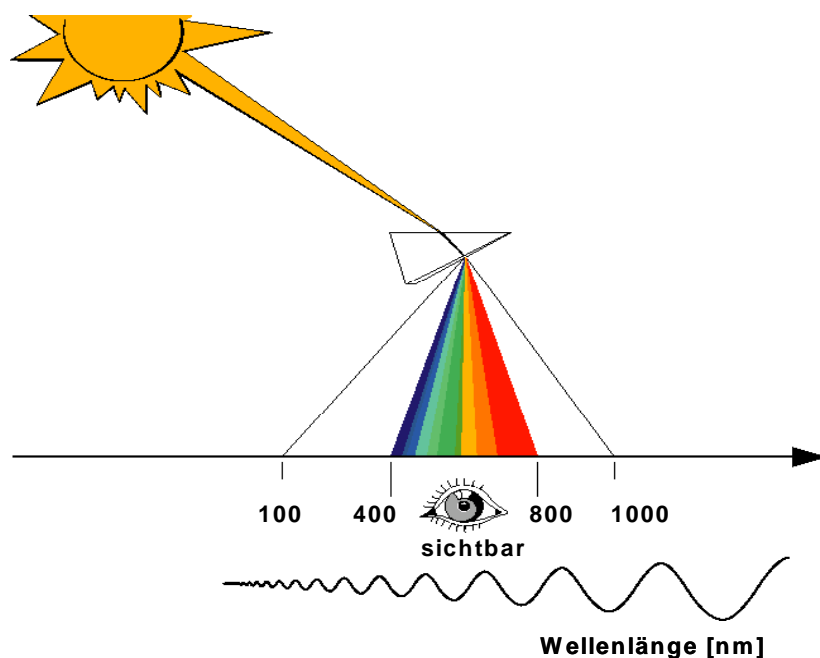


Abbildung 6-1: *Das elektromagnetische Spektrum des sichtbaren Lichtes*

Das Licht ist für die Menschen von einer besonderen Bedeutung - etwa 80 % aller aus der Umwelt erhaltenen Informationen sind optischer Natur. Aus diesem Grund ist die Qualität dieser Informationen sehr wichtig und hat mit der Sehfunktion der Augen sowie Eigenschaften der Lichtquelle (z. B. Helligkeit) zu tun. Die für die Menschen bedeutendste natürliche Lichtquelle ist die Sonne. Der natürliche Lebensrhythmus ist von ihrer Strahlung abhängig. Überall dort, wo das Sonnenlicht nicht ausreichend ist, werden künstliche Lichtquellen eingesetzt.

„Die Sehfunktion des Menschen erreicht ihren Maximalwert bei Beleuchtungsstärken von etwa 10 000 Lux, wie sie tagsüber im Freien vorkommen“ [55].

6.1.1 Lichtquellen und die Geschichte ihrer Entwicklung

Der Anfang des künstlichen Lichtes beginnt mit der Erfindung der Glühlampe (M. Goebel; 1854; erste Glühlampe zu Beleuchtungszwecken mit verkohlter Bambusfaser; Th. A. Edison; 1879, erste marktfähige Glühlampe mit Leuchtfaden aus verkohlter Bambusfaser). Seit dem der zerbrechliche Kohlefaden der Glühlampe durch einen Wolframdraht im Jahre 1906 ersetzt wurde (Patent auf die Herstellung gespritzter Wolframdrähte; Just, Hanaman 1906; Auer-Gesellschaft bringt Wolframfadenlampen auf den Markt), wurden die Glühlampen kontinuierlich verbessert und eine ganze Reihe von Lichtquellen entwickelt. Die rasche Entwicklung der neuen Lichtquellen wurde vor allem durch moderne Technologien sowie die neuen Werkstoffe möglich. Der Zusatz eines Halogens zum Füllgas der Glühlampe geht auf den I. Langmuir (1915)-General Electric Forschungslabor zurück. Die Idee ist aber erst in den 60er Jahren mit der Vermarktung der Halogenglühlampen weiter entwickelt worden. Der Unterschied des Funktionsprinzips zwischen Halogen- und Standard-Glühlampe besteht im so genannten Halogenkreisprozess, durch welche die Schwärzung des Kolbens verhindert wird (der Zusatz von Halogenen unterbindet die Verdampfung des Wolframs von der Wendel). Diese Eigenschaft ermöglicht, dass der Lichtstrom der Halogenlampe über die gesamte Lebensdauer konstant bleibt, die Lichtausbeute im Vergleich zur Glühlampe höher wird und die Lebensdauer bis zu vier Mal so hoch wie bei der Standardglühlampe.

Zu der Allgemein-Beleuchtung gehören auch die Entladungslampen. Die sind laut DIN 5039 [56] „elektrische Lampen, bei denen elektrische Entladungen feste, flüssige oder gasförmige Stoffe unmittelbar oder mittelbar zum Leuchten bringen“. Man unterscheidet zwischen Niederdruck und Hochdruckentladungslampen, die weiterhin in Quecksilber-Niederdrucklampen, Natrium-Niederdrucklampen, Quecksilber-Hochdrucklampen, Natrium-Hochdrucklampen, Halogen-Metallampflampen, Xenon-Hochdrucklampen unterteilt sind.

Die Geschichte der Entwicklung der Entladungslampen fängt Anfang des 20. Jahrhunderts an, wo schon zu dem Zeitpunkt die ersten Quarzglas-Hochdruckbrenner und Gasentladungsröhren hergestellt worden sind. Es handelte sich damals um Edelgas-Niederdruck-Entladung, z. B. mit Neon-Füllung, einem rot leuchtenden Edelgas. Die für Leuchtstofflampen manchmal noch benutzte Bezeichnung „Neon-Lampe“ weist auf die Herkunft hin. Die Gasentladungslampen können nicht direkt am elektrischen Netz angeschlossen werden. Ohne ein entsprechendes Vorschaltgerät ist der Betrieb der Lampen nicht möglich. In den zwanziger Jahren wurden die Untersuchungen an den Gasentladungslampen rasch voran getrieben. Zu dieser Zeit wurden die Reklamenröhren auf dem Markt

verbreitet. Im Jahr 1929 haben Pirani und Reger die Natrium-Dampflampe (Natriumröhre) zum Patent angemeldet. Die ersten Quecksilber-Hochdruckentladungs-Lampen und Natriumniederdrucklampen, haben Lichtausbeuten von 50-70 lm/W erreicht. Gleichzeitig, seit Anfang der 30er Jahre, wurde an der Entwicklung der Quecksilber-Niederdruckentladungslampen gearbeitet.

Es ist schwierig, das genaue Datum für die Erfindung der Leuchtstofflampe eindeutig anzugeben. Die Idee der Lampe geht bis in das Jahr 1867 zurück. In diesem Jahr beschreibt der Franzose A.E. Becquerel das Prinzip der Leuchtstofflampe. 1927 wurde von den Deutschen Friedrich Meyer, Hans Spanner und Edmund Germer eine Niederspannungs-Leuchtstofflampe in einer Patentschrift beschrieben. Anlässlich der Weltausstellung in Paris im Jahre 1937 wurden von der Firma OSRAM die ersten Hochspannungsleuchtstoffröhren, so genannte „SUPERLUX“- Röhren vorgestellt. Ein Jahr darauf, am 1. April 1938, wurden die ersten Leuchtstofflampen in der Form, wie wir sie heute kennen, bei Weltausstellungen in New York und San Francisco durch General Electric vorgestellt. Dieser Tag wurde dann offiziell als das Geburtstagdatum der Leuchtstofflampe bezeichnet.

Eine Alternative in der Beleuchtungsbranche sind die *light emitting diodes* (LED), die früher hauptsächlich als Lichtwerbung oder Effektbeleuchtung eingesetzt worden waren. LED sind schon seit den 60er Jahren auf dem Markt, aber erst seit kurzem können sie mit den anderen Lichtquellen der Allgemein-Beleuchtung konkurrieren. Es wird geschätzt, dass die LED-Lichtquellen in den nächsten ein bis zwei Jahrzehnten, die auf Glühbirnen aufbauenden Leuchtmittel weitgehend verdrängt haben [57]. Die Leuchtdioden basieren auf Halbleiterverbindungen, die elektrische Energie direkt in Licht umwandelt. Die bedeutenden Vorteile von LED sind der niedrige Energieverbrauch (LED benötigen nur eine geringe Betriebsspannung), eine sehr lange Lebensdauer (bis zu 100 000 Stunden bei der roten LED), hohe Robustheit, einstellbare Lichtverteilung. LED arbeiten bei niedrigen Temperaturen (erzeugen „kaltes“ Licht). Die effiziente Erzeugung des weißen Lichtes war aus technischen Gründen lange problematisch. In der letzten Zeit ist es aber gelungen, durch den Einsatz von Leuchtstoff, eine Alternative zur Allgemein-Beleuchtung auf den Markt zu bringen (Ostar Lighting - die bei 700 mA 200 Lumen erzeugt und damit eine wahre Konkurrenz in der Lampenbranche darstellt).

6.1.2 Lichttechnische Begriffe

Um die in dieser Arbeit angesprochene Problematik besser darzustellen, werden nun die wichtigsten lichttechnischen Begriffe wie Lichtausbeute, Lichtstrom und Farbwiedergabe beschrieben.

Lichtausbeute einer Quelle gibt an, mit welcher Wirtschaftlichkeit die aufgenommene elektrische Leistung in Licht umgesetzt wird.

Lichtstrom ist eine grundlegende Einheit der Messung. Als Lichtstrom bezeichnet man die gesamte von der einer Lichtquelle abgegebene Strahlungsmenge im sichtbaren Bereich. Die Einheit des Lichtstromes ist das Lumen (lm).

Lichtstärke ist eine Menge des Lichts, die in eine bestimmte Richtung abgestrahlt wird. Die Einheit der Lichtstärke ist Candela (cd).

Beleuchtungsstärke ist eine Menge des Lichtstroms, die auf eine bestimmte Fläche auftrifft. Die Einheit ist Lux (lx).

Farbwiedergabe einer Lampe kennzeichnet die farbliche Wirkung, die ihr Licht auf farbigen Gegenständen oder Personen hervorruft [58]. Je nach Einsatzort und Sehaufgaben sollte künstliches Licht eine korrekte Farbwahrnehmung wie bei natürlichem Tageslicht gewährleisten. Der Maßstab dafür ist die Farbwiedergabe.

Eine gute Farbwiedergabeeigenschaft der Lampe gewährleistet, dass die Farben im Raum und vor allem die Farbe der menschlichen Haut natürlich erscheinen und damit das Wohlbefinden gewährleisten. Der Maßstab für die Farbwiedergabe-Eigenschaften einer Lichtquelle wird in Stufen des „allgemeinen Farbwiedergabe-Index R_a “ ausgedrückt. „Er gibt an, wie natürlich Farben im Licht einer Lampe wiedergegeben werden. Der Farbwiedergabe-Index ist von acht häufig vorkommenden Testfarben abgeleitet. $R_a = 100$ steht für den besten Wert; je niedriger der Index, umso schlechter sind die Farbwiedergabeeigenschaften. Lampen mit einem R_a -Index kleiner als 80 sollten in Innenräumen, in denen Menschen für längere Zeit arbeiten oder sich aufhalten, nicht verwendet werden“ [58].

Tabelle 6-1: *Der Farbwiedergabe-Index*
 Quelle: [58]

R _a -Skala	R _a -Bereich	Beispiel typischer Lampen
100	90 und höher	Leuchtstofflampen „de Lux“ Glühlampen, Halogen-Glühlampen (230 V und Niedervolt)
90	80 bis 89	Dreibanden- und Kompaktleuchtstofflampen
80	70 bis 79	Standard-Leuchtstofflampen Universalweiß
70	60 bis 69	Standard-Leuchtstofflampen Heißweiß Halogen-Metaldampflampen
60	40 bis 59	Standard-Leuchtstofflampen Warmton, Quecksilberdampf-Hochdrucklampen
50		
40	20 bis 39	Natriumdampf-Hochdrucklampen
30		
20	Unter 20	Natriumdampf-Niederdrucklampen
10		

6.1.3 Licht, Lebensdauer und Energieverbrauch der am häufigsten eingesetzten Lichtquellen

Der Hauptanteil der auf dem Markt befindlichen Lampen besteht aus Glühlampen und Halogenleuchtstofflampen mit 78 % Marktanteil [59]. Darunter ist der Anteil von Glühlampen am höchsten und liegt bei 66 %. Gegenüber der Glüh- und Halogenlampensparte liegen die Entladungslampen bei 22 % Marktanteil. Wenn man jedoch die von diesen Lichtquellen erzeugte Menge der Strahlungsleistung betrachtet, wird deutlich, dass Glühlampen und Halogenleuchtstofflampen nur für einen kleinen Anteil von 5 % des erzeugten Lichtes verantwortlich sind. Diese Tatsache ist im schlechten Wirkungsgrad von Glühlampen begründet. 95 % der gesamten Lichtmenge werden von Entladungslampen erzeugt, was bei einem Marktanteil von nur 22 % ein erstaunlich hoher Wert ist. Darunter den höchsten Beitrag mit 47 % leisten die Leuchtstofflampen [Abbildung 6-2].

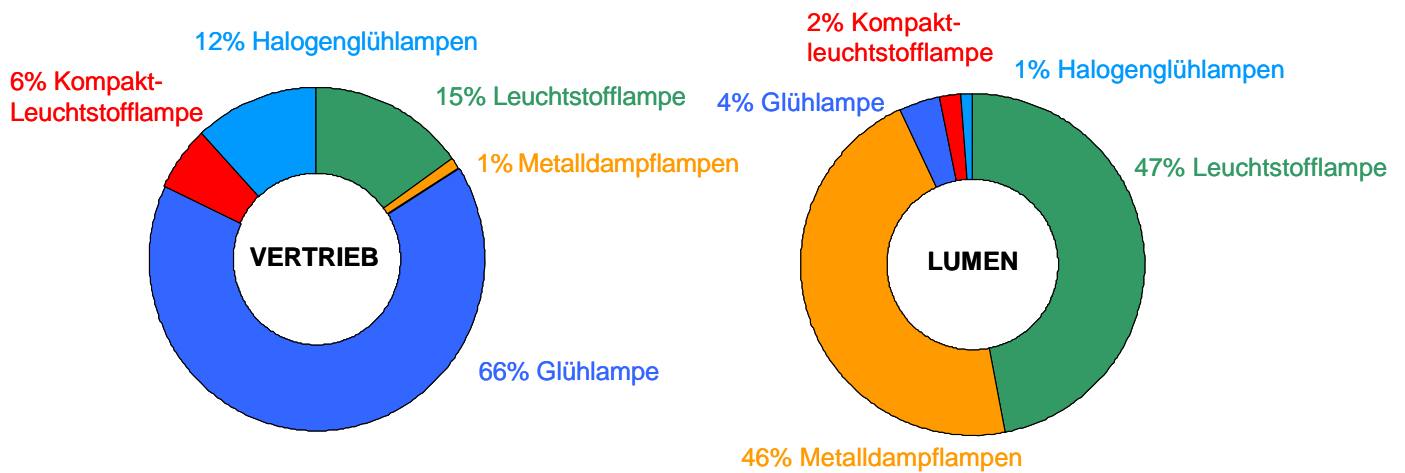


Abbildung 6-2: Westosteuropäischer Markt der Lichtquelle
Quelle: European Lamp Companies Federation [59]

Die Glühlampen und Halogenglühlampen dominieren im häuslichen Bereich, die Entladungslampen dafür in gewerblichen und industriellen Bereichen. Die schon 100-Jahre alte Glühlampe ist nach wie vor dank ihres warmen Lichts die am häufigsten eingesetzte Lichtquelle in den Haushalten. Die Funktion der Glühlampe ist folgende: Die aus Wolfram bestehende Wendel wird durch den elektrischen Strom zum Glühen und damit zum Leuchten gebracht. Bei diesem Prozess wird nur 5 % der elektrischen Energie zur Lichterzeugung verbraucht. Der Rest geht als Abwärme verloren. Die mittlere Lebensdauer von Glühlampen beträgt ca. 1 000 Stunden. Bei der Glühlampe besteht ein physikalisch bedingter direkter Zusammenhang zwischen der Lichtmenge und der Lebensdauer. Eine Erhöhung der Wendelbelastung bei höheren Wattagen der Lampe führt zu einer Verkürzung der Lebensdauer. Die Verdampfungsrate des Wolframs kann durch eine Gasfüllung stark reduziert werden wie bei Halogenlampen. Die Erhöhung des Druckes in der Lampe und der Zusatz von bestimmten Füllgasen reduzieren die Verdampfungsgeschwindigkeit und erhöhen damit die Lebensdauer einer Lampe. Die mittlere Lebensdauer einer Halogenlampe beträgt bis zu 4 000 Stunden pro Lebenszyklus, ist also bis zu vier Mal so hoch wie bei einer konventionellen Glühlampe.

Die Entladungslampen haben die höchste Lichtausbeute unter allen Lampen. Die beträgt bei Metalldampf lampen bis zu 150 lm/W (Vialox[®] - Natriumdampf-Hochdrucklampe). Die Leuchtstofflampen erreichen die Lichtausbeute bis zu 104 lm/W (FH T5-Leuchtstofflampe).

Wie sich die Lampeneffizienz innerhalb der Entwicklungszeit verbessert hat, ist in dem unteren Bild dargestellt [Abbildung 6-3].

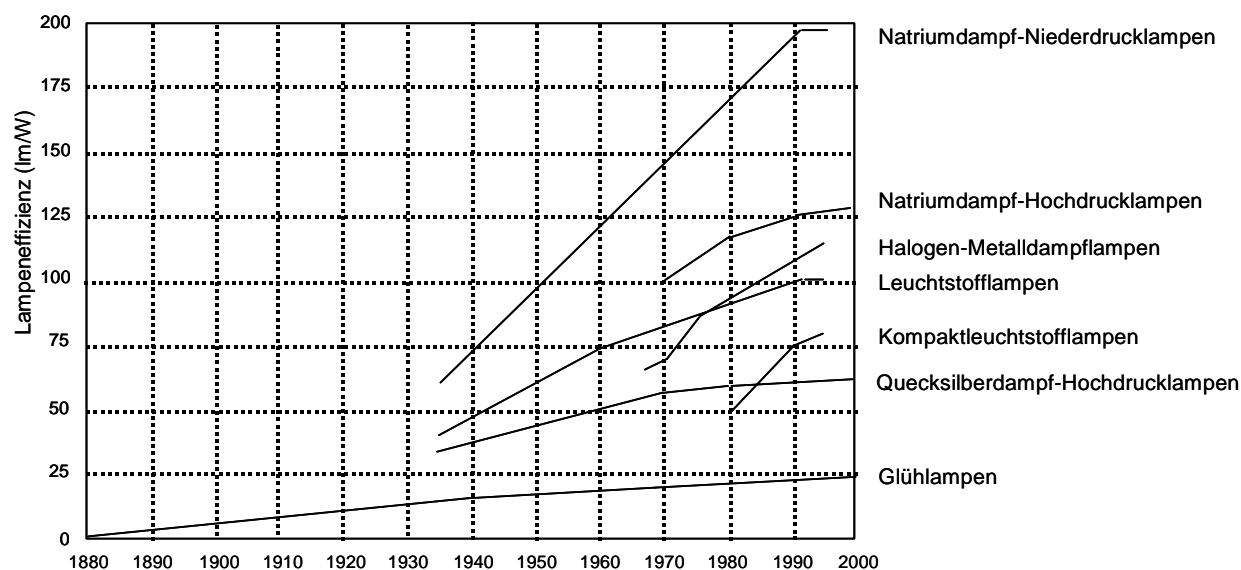


Abbildung 6-3: Die Verbesserungen an Lichtausbeute von verschiedenen Lampentypen in der Zeit ihrer Entwicklung
Quelle: OSRAM GmbH

6.2 Leuchtstofflampen

6.2.1 Eigenschaften der Leuchtstofflampen

Die größte Gruppe der Niederdruck-Entladungslampen besteht aus Leuchtstofflampen. Diese erzeugen weltweit 70 % des künstlichen Lichtes. Leuchtstofflampen sind Niederdruck-Gasentladungslampen, bei denen die im Entladungsraum erzeugte, für das menschliche Auge unsichtbare, ultraviolette (UV-) Strahlung mit Hilfe von Leuchtstoffen in sichtbare Strahlung (Licht) umgewandelt wird. Von der Form her wird zwischen stab-, ring- und U-förmigen Lampen sowie Kompakt-Leuchtstofflampen unterschieden. Die Lampen sind röhrenförmig und werden deswegen oft Leuchtstoffröhren genannt. Welche Eigenschaften machen die Leuchtstofflampe für eine so große Zahl an Verwendungsbereichen (Haushalt, Büro, Industrie, Straßen) und noch nach Jahrzehnten nach ihrer Entwicklung unersetzbar?

Vor allem haben Leuchtstofflampen eine hohe Lichtausbeute verbunden mit einer großen Energieeffizienz. Leuchtstofflampen benötigen ca. ein Fünftel des elektrischen Stromes; die Glühbirne verbraucht für die gleiche Lichtausbeute und die mittlere Lebensdauer bis zu 20-mal mehr. Ein weiterer Vorteil der Leuchtstofflampen liegt in der Unempfindlichkeit gegen

Spannungsschwankungen im Netz. Beim Betrieb von Leuchtstofflampen besteht eine geringe Blendungsgefahr. Außerdem ist die große Auswahl an Lichtfarben von Vorteil.

6.2.2 Prinzip der Funktion der Leuchtstofflampe

Das Funktionsprinzip der Leuchtstofflampen basiert auf der Gasentladung, die einen „Durchgang von elektrischem Strom durch Gase und Dämpfe durch Erzeugung und Transport geladener Teilchen unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes erzeugt. Die damit verbundene Abgabe elektromagnetischer Strahlung spielt eine entscheidende Rolle in der Anwendung der Beleuchtungstechnik“ [60].

Zur Anregung der Leuchtstofflampe dient eine Quecksilberdampfentladung beim Sättigungsdampfdruck des Quecksilbers bei der Temperatur der Rohrwand, in der Regel in der Umgebung der Zimmertemperatur von 25 °C, mithin zwischen 0,1 und 1 Pa. Zum Erleichtern der Zündung ist ein Edelgas, meist Krypton oder Argon, mit einem Druck von etwa 10^3 Pa zugesetzt. Um die Zündung der Entladung zu bewirken, werden die jeweils an zwei Sockelstifte angeschlossenen Wendeln über einen Heizstromkreis oder getrennte Heiztransformatoren vorgeheizt. Dabei wird die Emittersubstanz, die sich zwischen den Windungen der Wendel befindet, auf Emissionstemperatur von 600-800 °C erhitzt [61]. Von den Elektroden bilden sich Raumladungen aus, welche die Zündspannung der Lampe unter die Netzspannung herabsetzen. Die Lampe wird dann bei Anlegen der Spannung ohne weiteres gezündet oder es kann dies mittels eines Spannungsimpulses bis 1500 V erfolgen [62]. Bei dem Betrieb der Leuchtstofflampe ist deren Umgebungstemperatur von großer Bedeutung. Die Lichtausbeute der Lampe hängt mit der Veränderung des Quecksilberdampfdrucks zusammen. Dies ist bedingt durch das charakteristische Temperaturprofil des Quecksilber-Dampfdrucks in der Lampe. Bei tiefen Temperaturen ist er zu niedrig. Dadurch existieren zu wenige Atome, die angeregt werden können. Bei zu hohen Temperaturen führt der hohe Dampfdruck zunehmend zur Selbstabsorption der erzeugten UV-Strahlung. Bei einer Kolbenwandtemperatur von ca. 40 °C liegt das Maximum vor, bei dem die Lampen ihre max. Brennspannung und somit die höchste Lichtausbeute erreichen. Bei T5-Lampen mit 16 mm Durchmesser (FH, FQ) ist der Nennlichtstrom, wie bei Leuchtstofflampen generell, bei 25 °C festgelegt und der max. Lichtstrom liegt bei Temperaturen von 33-37 °C. D. h. der Vorteil der T5-Lampen ist in einem erhöhten Leuchtenwirkungsgrad für Leuchten mit einer höheren Gehäusetemperatur zu finden.

Für die Physik von L-Lampen hat noch die Zugabe der Edelgase eine große Bedeutung. „Bei Zimmertemperatur sind wenige Quecksilberteilchen im gasförmigen Zustand vorhanden.

Bei einer Entladung in reinem Quecksilberdampf ohne Puffergas würden Elektronen im Durchschnitt eine große Strecke zwischen zwei Stößen („mittlere freie Weglänge“) mit Gasatomen zurücklegen, und die Verluste von Ladungsträgern durch ambipolare Diffusion wären sehr hoch. Um genügend Ladungsträger (Elektronenstoßionisierung von Quecksilberatomen) zur Kompensation der Verluste zu erzeugen, wären in diesem Fall sehr große Elektronentemperaturen erforderlich. Durch Beimischen eines Puffergases, meist ein Edelgas wie z. B. Argon, wird die Anzahl der Gasteilchen erhöht. Die Ionen und Elektronen stoßen jetzt öfters auf Gasteilchen. Die somit verringerte Teilchenbeweglichkeit vermindert die ambipolare Diffusion zur Wand, und eine Quecksilberentladung ist schon bei niedrigeren Elektronentemperaturen möglich. Durch Anregung fluoreszierender Stoffe kann bei 253,7 nm die UV-Linie der Quecksilberentladung mit einer Quantenausbeute von nahezu 100 % in sichtbare Strahlung umgewandelt werden“ [63].

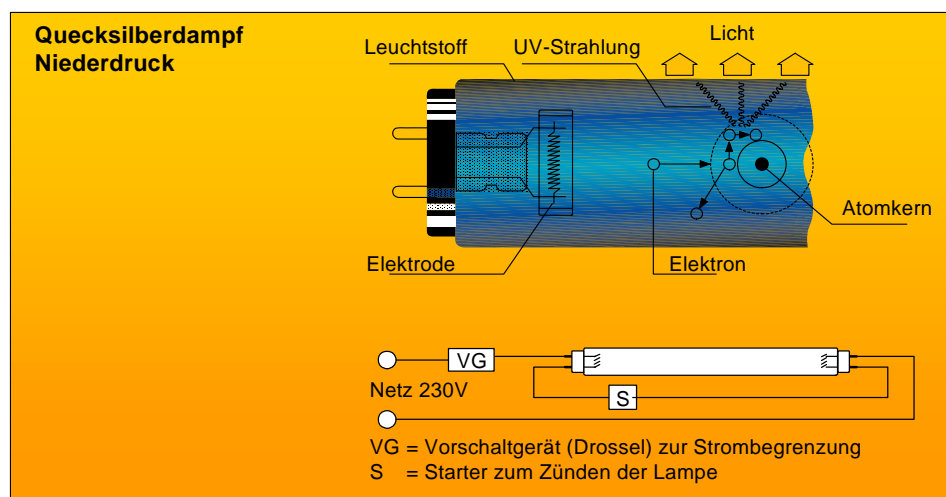


Abbildung 6-4: Funktionsprinzip der Leuchtstofflampe
Quelle: Fördergemeinschaft „Gutes Licht“ [58]

6.3 Energieeffiziente Beleuchtung

Effiziente Nutzung von Energie ist eine der wichtigsten Aufgaben der heutigen Gesellschaft. Laut der Prognosen [64] kann zu einer Verdoppelung des Energieverbrauches im kommenden Jahrhundert kommen. Nach den Prognosen für die Entwicklung des künftigen weltweiten Energiebedarfs zufolge, würde der künftige Bedarf an fossilen Brennstoffen vor allem durch den weiter steigenden Bedarf in den Entwicklungsländern weiter zunehmen. Damit würde die Freisetzung von Kohlendioxid aus Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas bis zur Mitte des kommenden Jahrhunderts um mehr als 50 Prozent zunehmen. Aber schon heute ist der Mangel an fossilen Ressourcen und die damit verbundenen steigenden

Energiekosten ein Zeichen dafür, dass Maßnahmen im Bereich Energieeffizienz schnellstmöglich eingesetzt werden müssen. Unter Energieeffizienz versteht man „die Reduktion der Energiemenge, die zur Befriedigung eines bestimmten Umfangs an energierelevanten Bedürfnissen benötigt wird“ [65]. Es ist dringend erforderlich, die Innovationen bezüglich der Energieeffizienz zu fördern. Und dies nicht nur wegen steigenden Energiekosten: die Einsparung an elektrischer Energie verfolgt zwei wichtige Ziele - Schonung der Ressourcen und Emissionsverminderung.

Die Aufgabe der Energieeffizienz liegt im Allgemeinen in der Ressourcen-Ausschöpfung sowie Verminderung von Emissionen. Nach dem VDEW [66] (VDEW-Jahresbericht 2004) setzten sich die Anteile der Energieträger an der netto Stromerzeugung der Stromversorger und privaten Betreiber in Prozent wie folgt zusammen: Kernenergie 30 %, Braunkohle 27,1 %, Steinkohle 21,7 %, Heizöl, Pumpspeicher und sonstige Energieträger 2,7 %, Erdgas 8,5 %, Erneuerbare Energien 10 %. Mit der Verbrennung von Kohle ist fast 50 % des Strommixes verbunden, ein weiterer Teil mit der Erdgasverbrennung, was direkt mit den Emissionen von Verbrennungsgasen (CO₂, CH₄) in Verbindung steht. Vom gesamten Stromverbrauch in Deutschland macht der Aufwand für die Beleuchtung einen bedeutenden Teil des Stromverbrauches aus. Nach Angaben des Verbands der Elektrizitätswirtschaft (VDEW), Berlin betrug der Endenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2002 rund zehn Prozent des gesamten Stromverbrauches für den Beleuchtungssektor. Und aus der gesamten Zahl sind GHD (Gewerbe, Handel und Dienstleistungen) mit dem Beitrag über 50 % des Verbrauches der Vorreiter [Tabelle 6-2]. Aus diesem Grund wäre vor allem in dieser Sparte der Einsatz von energieeffizienten Lichtsystemen sinnvoll.

Tabelle 6-2: *Struktur des Stromverbrauchs bei der Beleuchtung (Jahr 2002)*
Quelle: [66]

	Anteile in % Gesamt
Industrie	21,67
GHD	53,33
Haushalte	23,33
Verkehr	1,67
Gesamt	100

Eine interessante Darstellung über die Entwicklung der Energieeffizienz der Elektrogeräte (incl. Beleuchtung) in den letzten zwanzig Jahren sind aufgrund der Untersuchungen in der Schweiz und in Deutschland von der Schweizerischen Agentur für Energieeffizienz zusammengestellt und veröffentlicht worden [67]. In der Zeitspanne 1980 bis 2000 ist die Entwicklung des elektrischen Energieverbrauches in vier Sektoren (Haushalt, Dienstleistung, Industrie, Bahnen) dargestellt. In allen betroffenen Sektoren ist im Zeitraum von fast 20 Jahren eine große Zunahme des Elektrizitätsverbrauchs festgestellt worden. Im Bereich der Dienstleistung beträgt die Zahl 69 %, im Haushalt 39 %, in der Industrie 43 % und im Sektor Bahn 22 %. Die aus der Zusammenstellung resultierenden Ergebnisse sind in allen der untersuchten Bereiche auf verschiedene Ursachen zurückzuführen.

Die Ergebnisse der Studie weisen darauf hin, dass der Einfluss der Beleuchtung in Energieeffizienzbetrachtungen ein hoher Stellenwert zukommt. Das stärkste Wachstum an Energieverbrauch wurde in den Bereichen Haushalt (+55 %) und Dienstleistungen (+30 %) festgestellt. In der Industriesparte sowie im Sektor Bahn ist eine Zunahme von je 20 % registriert. Insgesamt beträgt der Zuwachs des Elektrizitätsverbrauches bei der Beleuchtung über alle Sektoren um 32 %. Hätte es in der Zeit von 1980 bis 1999 keinen technischen Fortschritt im Bereich der Beleuchtung durch gestiegene Lichtausbeute der Lampen, höheren Wirkungsgrad der Leuchten, höhere Energieeffizienz der EVGs sowie Möglichkeit der Lichtsteuerung gegeben, wäre der Elektrizitätsverbrauch insgesamt um 45 % gestiegen. Für die Thematik dieser Dissertation ist vor allem der Sektor Dienstleistung von Interesse. Wäre es im Bereich Beleuchtung zwischen den Jahren 1980 und 1999 nicht zu einer Steigerung des Einsatzes von energieeffizienten Technologien gekommen, hätte man mit einem um 11 % höheren Energieverbrauch alleine in diesem Bereich rechnen müssen [Abbildung 6-5].

Tabelle 6-3: *Änderung des Anteils der Beleuchtung am Verbrauch der elektrischen Energie in Jahren 1980 -1999*
Quelle: Eigene Darstellung aufgrund [67]

Jahr	Haushalte	Dienstleistung	Industrie
1980	9,5 %	35 %	7,2 %
1999	10,0 %	26 %	5,5 %

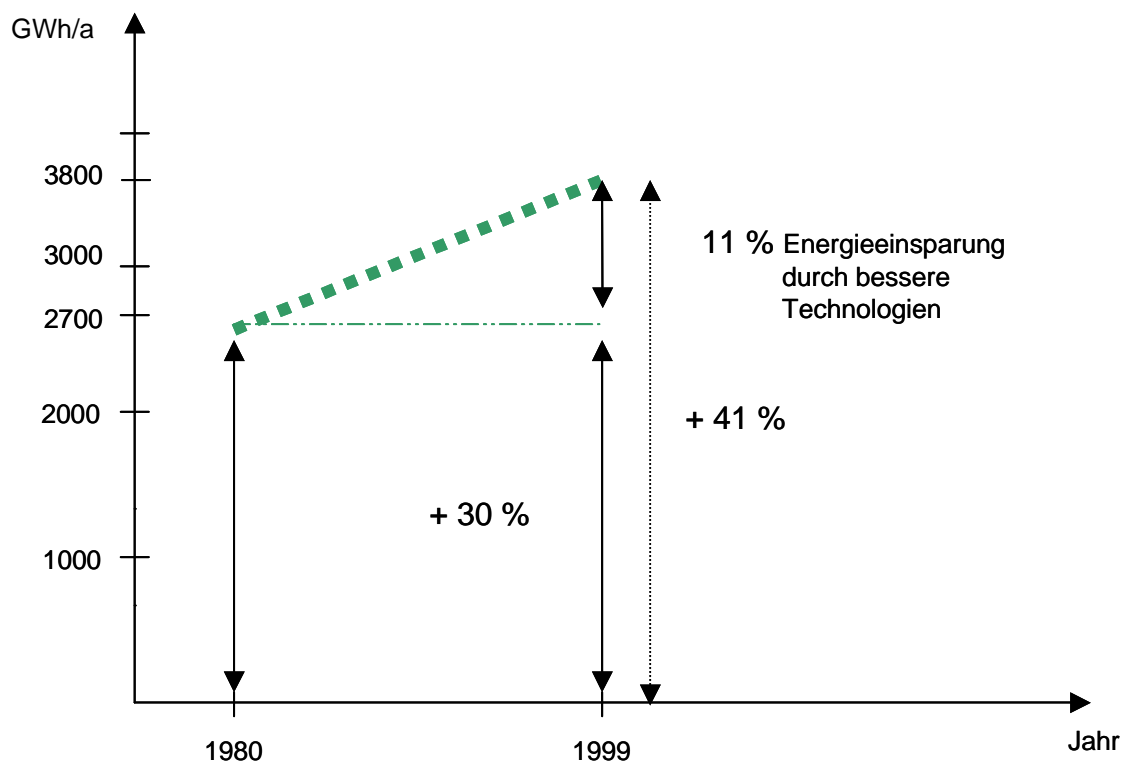


Abbildung 6-5: *Einsparung der elektrischen Energie in der Dienstleistungsbranche in der Zeitspanne von 19 Jahren durch den Einsatz von energieeffizienten Technologien*
 Quelle: Eigene Darstellung aufgrund [67]

6.3.1 Möglichkeiten der Energieeffizienz im Beleuchtungssektor

Nach Abschätzung des Wuppertal Institutes liegt die Einsparmöglichkeit des mit elektrischer Energie verbundenen Kohlendioxid-Ausstoßes bis 2010 bei den „privaten Haushalten“ bei 741 000 Tonnen CO₂ pro Jahr und in dem Programm Förderung effizienter Beleuchtungssysteme im Rahmen von „Green Light“ bei 240 000 t CO₂ pro Jahr. Von Klaus Heinloth [64] wurde folgende Aussage gemacht: „Als ein wesentlicher Teil des Bestands an verfügbarer Energie ist aber auch die Möglichkeit zu effizienterer, damit sparsamerer Nutzung von Energie anzusehen. In Deutschland beträgt die tatsächlich vom Verbraucher direkt und über Güter indirekt genutzte Energie immerhin schon etwa ein Drittel der eingesetzten Primärenergie. Bei gleichbleibendem Lebensstandard und gleichbleibender Bevölkerungszahl könnte die Effizienz der Energienutzung noch bis um etwa einen Faktor 2 gesteigert werden, damit der Bedarf am Primärenergie um diesen Faktor 2 vermindert wird“. Und gerade in dieser Beleuchtungssparte gibt es eine breite Zahl von Produkten, die Anforderungen der Lichteffizienz ausgezeichnet erfüllen. Die Marktzahlen jedoch zeigen, dass die Verbraucher immer noch zu alten Produkten greifen, deren Nutzungsphase kurz und energieintensiv ist. Der Grund dafür liegt vor allem in der fehlenden Information und

Aufklärung hinsichtlich der Vorteile von modernen Energiesystemen. Ohne ausreichende Informationen werden sich die Kunden weiterhin für Produkte entscheiden, dessen Anschaffungskosten niedriger sind, obwohl über die Nutzungsphase weitgehend mehr elektrische Energie eingespart werden kann. Bis jetzt sind jedoch Aktivitäten von Kommunikation und Gesetzgebung in diesem Bereich nicht ausreichend. Ein Beispiel für energieeffiziente Beleuchtung bilden die Leuchtstofflampen der neuen Generation. T5-Leuchtstofflampe 16 mm Durchmesser statt bisher 26 mm und gesteigerte Lichtausbeute sind das Ergebnis einer ganzheitlichen Entwicklung hinsichtlich Ressourcenverbrauch und Energieeffizienz [Abbildung 6-6]. Der Rohrdurchmesser der Leuchtstofflampe wird in der Lampenindustrie international in Verbindung mit dem Buchstaben T (tube) in Zoll (englisch inch, 1 inch = 25,4 mm) angegeben. Der Durchmesser T „x“ bedeutet „x“/Zoll [104].

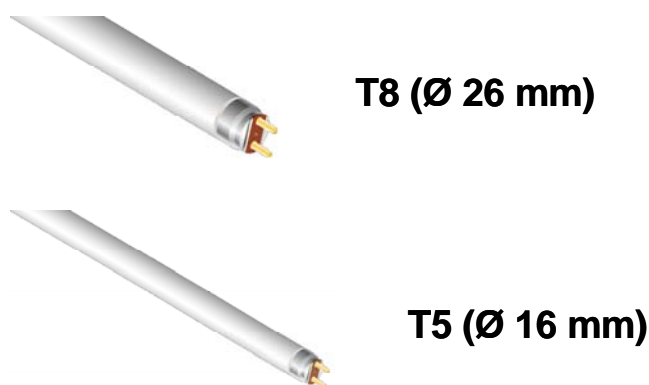


Abbildung 6-6: Darstellung der Durchmesser der T8- und T5-Leuchtstofflampe

Mit höherer Lichtausbeute und besserem Leuchtenwirkungsgrad zeichnet sich die T5-Leuchtstofflampe, die im HE (High Efficiency)-System mit Vorschaltgerät und Leuchte als Lichtsystem wegen ihrer ausgezeichneten Ersparnispotentiale hinsichtlich Energieverbrauch aus. Die T5-Leuchtstofflampe im System erreicht die höchste Lichtausbeute unter allen Leuchtstofflampen (104 lm/W). Das ist vor allem durch Erhöhung des Lichtoptimums von 25 °C auf 35 °C möglich. Weitere Energiesparpotentiale sind die geringere Eigenabschattung dank der schlankeren Lampe in der Leuchte sowie gleichzeitig ein höherer Leuchtenwirkungsgrad durch das auf 35 °C verschobene Lichtoptimum. Aus diesen Gründen ist das Umrüsten von Lichtanlagen immer von Vorteil, auch wenn die neuen Lampen in der Anschaffung teurer sind als die bisher verwendeten Typen. Wie hoch die ökologische und ökonomische Ersparnis beim Einsetzen von HE-Lichtsystemen sein kann, lässt sich an einem praxisbezogenen Beispiel gut darstellen. Ausgehend von einer Beleuchtungsstärke

von 500 Lux über eine Fläche von 270 m² (Einbauhöhe von 3 m, Betriebszeit von 12 Stunden täglich und 365 Tage pro Jahr) ist eine extrem hohe Ersparnis festzustellen. Die Ausstattung mit 36 T5 HE-Lichtsystemen senkt die Zahl an jährlichen Emissionen des Treibhausgases CO₂ um 39 % im Vergleich zu 59 T8 Standard-Lichtsystemen.

Tabelle 6-4: *Einsparungsmöglichkeiten bei dem Einsatz von modernen Lichtsystemen*

	Ökonomische Vorteile				Ökologische Vorteile	
Beleuchtungssystem mit EVG	Anschaffungskosten: Euro Einsparung		Energiekosten: Euro/ Jahr Einsparung		CO ₂ -Emission: Tonnen /Jahr Einsparung	
59 Leuchten mit Standard-Leuchtstofflampen Ø 26 mm	19 824	-	1 302		5,9	-
48 Leuchten mit Dreiband-Leuchtstofflampen Ø 26 mm	16 128	19 %	1 088	17 %	4,9	17 %
36 Leuchten mit Dreiband-Leuchtstofflampen Ø 16 mm	4 968	75 %	795	39 %	3,6	39 %

T 5 Lichtsystem: spart Kosten und Energie, senkt Quecksilber- und CO₂ -Emissionen

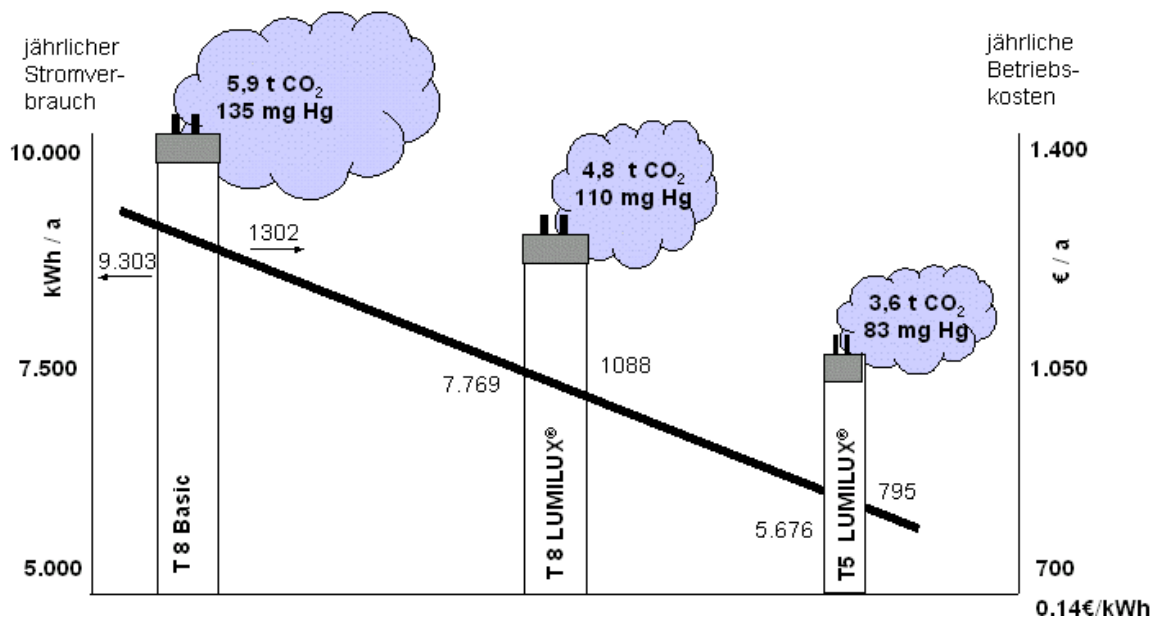


Abbildung 6-7: *Einsparungsmöglichkeiten beim Einsatz von modernen Lichtsystemen*

Das Beispiel macht deutlich, dass die Energieeffizienz von Produkten ein entscheidender Parameter für das Produktdesign ist und die ökonomischen und ökologischen Potentiale sich wohl gemeinsam betrachten lassen. In der vorliegenden Arbeit wird unter anderem mit Hilfe der Ökobilanzierungsmethode überprüft, ob die Minimalisierung von Produktsystemen nicht zur Zunahme von umweltrelevanten Stoffen im gesamten System führt. Die Entwicklung von zukünftigen Produkten soll auf jedem Fall alle gerade angesprochenen Kriterien erfüllen. In der Lampenindustrie muss die Tendenz zur Minimalisierung verfolgt werden, unter Betrachtung des Gesamtsystems. In der zukünftigen Produktentwicklung wird zunehmend wichtiger, die Entscheidung für die Verwendung von bestimmten Technologien immer im Bezug auf die Energieeinsparung zu treffen.

6.3.2 Wirtschaftlichkeit der Beleuchtungsanlagen

6.3.2.1 Anforderungen an Lampen

An die elektrischen Lampen wird eine breite Zahl an Anforderungen gestellt. Immer längere Lebensdauer, gute lichttechnische Eigenschaften - hohe Lichtausbeute und entsprechend gute Farbwiedergabe bei der höchsten Betriebssicherheit müssen erfüllt werden. Zu weiteren Anforderungen gehört die möglichst hohe Wirtschaftlichkeit. Im Hinblick auf die Energieeinsparung liegt der Schwerpunkt der Entwicklung von Lampen bei energieeffizienten Produkten. Es gilt im Allgemeinen, dass je höher die Lichtausbeute der Lampen ist, desto weniger elektrische Energie wird benötigt, um eine entsprechend hohe Beleuchtungsstärke zu erreichen.

Eines der wichtigsten Kriterien für die Betrachtung der Lampe ist die Lebensdauer.

Die Mindestlebensdauer ist die Lebensdauer der einzelnen Lampe, die unter genormten Bedingungen erreicht wird. Unter wirtschaftlicher Lebensdauer versteht man die Zahl der Brennstunden zwischen den Gruppenauswechslungen von Lampen einer Anlage, unter der Bedingung, dass die Betriebskosten am niedrigsten sind und der Anlagelichtstrom einen bestimmten Wert nicht unterschreitet. Die mittlere Lebensdauer ist der Mittelwert der Lebensdauer einzelner Lampen, die unter genormten Bedingungen betrieben werden (50 % Ausfall = "Average rated life").

6.3.2.1.1 Vorteile der Dreibanden-Leuchtstofflampen

Die Leuchtstofflampen sind mit zwei verschiedenen Leuchtstoffstypen zu beschlämmen - Halophosphat-Leuchtstoffe für Standardlampen und Leuchtstoffe der seltenen Erde für Dreibandenlampen. Die in den 70er Jahren entwickelten Dreibanden-Leuchtstofflampen haben eine bis zu 25 % höhere Lichtausbeute und gute Farbwiedergabeeigenschaften. Die Lichtausbeute beträgt bis zu 104 lm/W, d. h. mehr als das Sechsfache der Lichtausbeute leistungsgleicher Glühlampen. Ein weiterer Vorteil ist der langsame Rückgang des Lichtstromes über die Lebensdauer der Lampe.

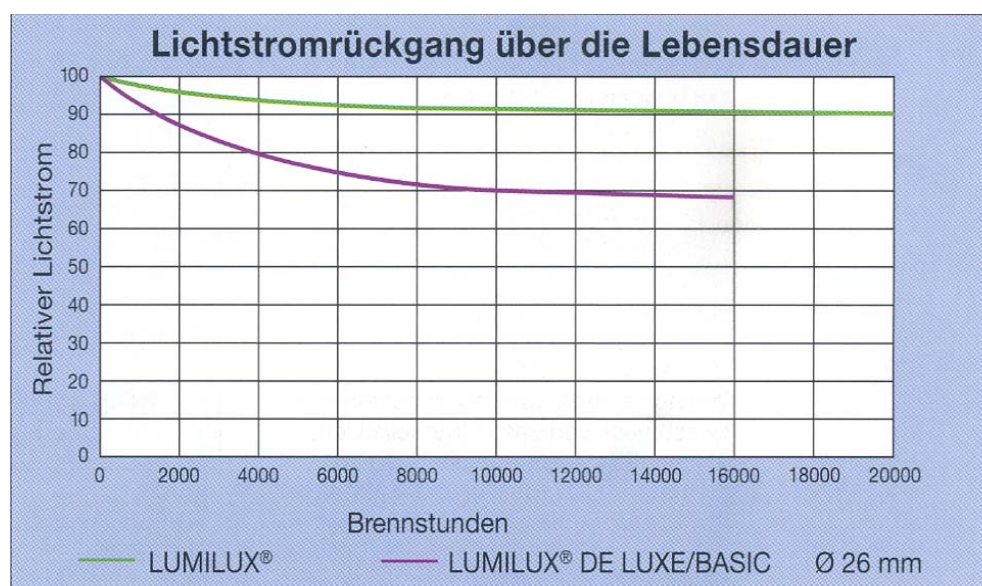


Abbildung 6-8: Vergleich des Lichtstromverhaltens über die Lebensdauer von Lumilux- und Basic-Leuchtstofflampen
Quelle: OSRAM GmbH

6.3.2.2 Anforderungen an Vorschaltgeräte

Die Leuchtstofflampen können wie alle Entladungslampen wegen ihres negativen inneren Widerstands nicht direkt an der Netzspannung betrieben werden. Deswegen ist der Einsatz von elektrischen Komponenten im System nötig. Für den Betrieb der Leuchtstofflampe kommen so genannte Vorschaltgeräte zum Einsatz. Die Rolle der Vorschaltgeräte liegt bei der Einleitung der Entladung- und Stabilisierung des Betriebsstromes. „Ein Betrieb direkt am Netz ist nicht möglich und zulässig, weil Lampen mit höherer Zündspannung nicht zünden und die Lampe bei Betrieb ohne Strom begrenzendes Vorschaltgerät bis zur Zerstörung überlastet wird“ [61]. Wie die Vorschaltgeräte in dem Beleuchtungssystem funktionieren, wird

nun detaillierter beschrieben. „Bei dem elektronischen Vorschaltgerät wird zunächst die Netzspannung 220 V, 50 Hz gleichgerichtet und geglättet. Die entstandene Gleichspannung wird dann in eine Wechselspannung je nach Fabrikat zwischen 25 und 40 Hz umgeformt, die über Stabilisierungsglieder die Leuchtstofflampen versorgt. Zur Verminderung von Netzurückwirkungen durch Oberwellen, Unterdrückung von Funkstörungen und zum Schutz der elektronischen Bauteile von Schaltspannungsspitzen aus dem Netz ist ein Filter vorgeschaltet. Der Gleichrichter besteht aus einer Dioden-Brückenschaltung, die die Netzwechselspannung in eine Gleichspannung umwandelt und einen Pufferkondensator auflädt. Der Halbleiter-Wechselrichter wandelt die Gleichspannung in hochfrequente Wechselspannung um, an der eine oder aber auch zwei Leuchtstofflampen betrieben werden. Wenn Lampen nicht zünden, schaltet eine Abschaltautomatik nach 2 Sekunden die Lampenversorgung ab. Nach Ersatz der schadhaften Lampe ist das elektronische Vorschaltgerät sofort wieder betriebsbereit“ [68].

Durch den Ersatz moderner Vorschaltgeräte bei dem Betrieb der Leuchtstofflampe kommen außer zu solchen Eigenschaften wie Energieeffizienz und längere Lebensdauer der Lampe (Wirtschaftlichkeit), bessere Lichtausbeute (Lichtkomfort) auch die Erhöhung der Betriebssicherheit. Das Funktionsprinzip ist folgendes: Ein Hochfrequenz-Generator mit Strombegrenzung zündet und speist die Lampe mit dem Strom der Frequenz über 20 kHz. Elektronische Vorschaltgeräte (EVG) wandeln die Netzspannung in eine Hochfrequenzschwingung von etwa 35 bis 50 kHz um. Dadurch wird das Flimmern der Lampe fast unsichtbar. Gleichzeitig reduzieren die Elektroden- und Rekombinationsverluste die Lichtausbeute bei T8-Lampen um etwa 10 % stärker als bei 50 Hz-Betrieb. Die Verlustleistungen der Vorschaltgeräte, die bei der normalen Drosselpule etwa 10 W bzw. 13 W bei einer Standard-Leuchtstofflampe 36 bzw. 58 W betragen, werden erheblich gesenkt, sodass die gesamte Steigerung der Lichtausbeute bei T8-Lampen etwa 25 % beträgt. Die Vorschaltgeräte sind im Prinzip für die Bereitstellung einer ausreichenden Zündspannung sowie das Beschränken des Lampenstromes verantwortlich. Diese Funktionen können von einem konventionellen (KVG) oder verlustarmen (VVG) Vorschaltgerät erreicht werden.

Mit der EU-Richtlinie 2000/55/EC [69] sind bestimmte verlustreiche konventionelle Vorschaltgeräte seit Mai 2002 auf dem europäischen Markt nicht mehr zugelassen. Die niedrige Energieeffizienz des gesamten Systems, was durch eine längere Lebensdauer, größere Lichtausbeute des Systems, bessere Lampenzündung, Strombegrenzung und Kompensation von einem Elektronischen Vorschaltgerät (EVG) erreicht werden kann, ist der Grund dafür.

Ein weiterer Vorteil bei der Nutzung von elektronischen Vorschaltgeräten ist die Dimmbarkeit. Dieser Begriff bedeutet die Steuerung der Helligkeit der Lampe je nach Helligkeitsbedürfnissen, ein Potential, dank welchem das Einsparungspotential längst nicht ausgeschöpft ist. Durch Helligkeitssensoren kann die gesamte Beleuchtungsanlage differenziert geschaltet und gesteuert werden, ganz nach den Bedürfnissen des Anwenders. Ein weiterer Vorteil von elektronischen Vorschaltgeräten besteht in der viel niedrigeren Abwärme als beim konventionellen Vorschaltgerät. Der Einsatz von Elektronik für den Betrieb von Entladungslampen erlaubt auch die Lichtsteuerung von 26-mm-Lampen an den bisher konventionellen Ausschnittsteuergeräten. Das Problem besteht darin, neben der Vorheizung der Elektroden die Entladung in der Lampe bei heruntergeregeltem Betriebsstrom flackerfrei aufrechtzuerhalten. Bei neuartigen Sikrypt-Heiztransformatoren mit elektronischer Zündhilfe wird durch einen HF-Generator der Lampe ein permanenter HF-Ionisierungsstrom überlagert, der etwa 4 % der Lampenleitung ausmacht und ein Herunterregeln des 50 Hz-Betriebsstromes auf Null ohne Flackern erlaubt [61].

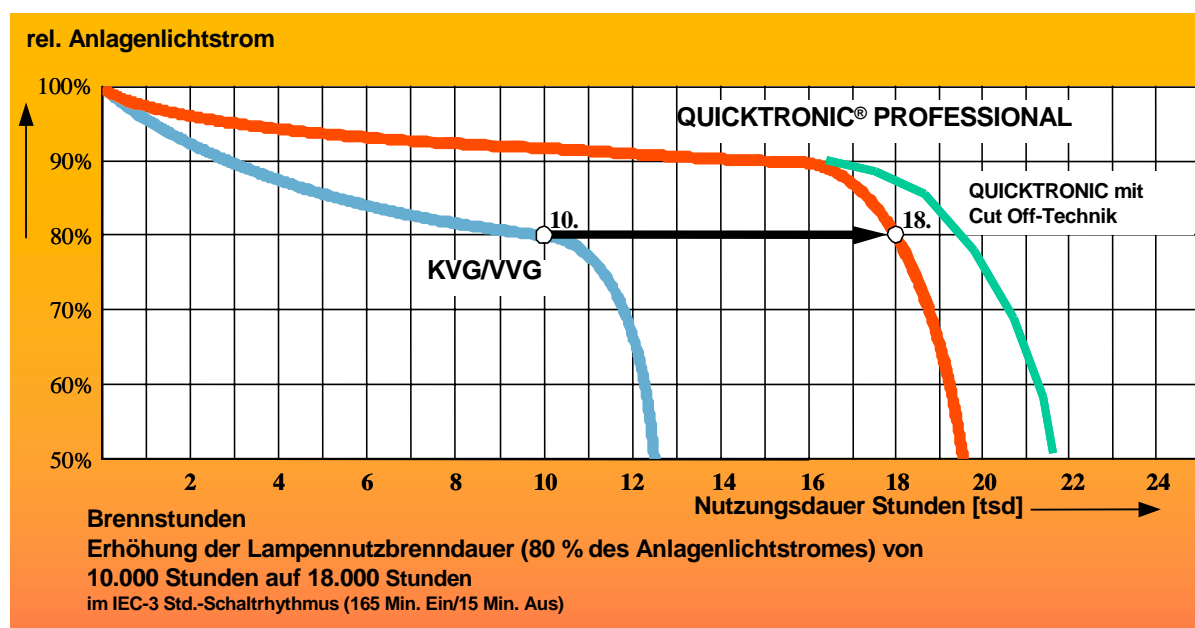


Abbildung 6-9: Einfluss von Vorschaltgeräten auf die Lebensdauer der Lampen
Quelle: OSRAM GmbH

Cut Off-Technik - das Abschalten der Wendelheizung nach Erreichen der Betriebstemperatur

KVG - Konventionelles Vorschaltgerät

VVG - Verlustarmes Vorschaltgerät

Quicktronic - Elektrische Vorschaltgeräte (EVG) für den Betrieb von Leuchtstofflampen und Kompaktleuchtstofflampen

6.3.2.3 Anforderungen an Leuchten

Unter dem Begriff Leuchte wird ein Gerät verstanden, das im lichttechnischen Sinne zunächst der geeigneten Verteilung des Lichtstromes von Lampen und dem Schutz des Benutzers vor Blendung dient [63]. Nach DIN EN 12665 ist die Leuchte ein „Gerät zum Betrieb von Lampen und Verteilung des Lichtes“ [70]. Die Wahl der Leuchte ist von der Aufgabe der Beleuchtung sowie der Lampenart bestimmt.

Die Rolle der Leuchte liegt an der Verbesserung von lichttechnischen Funktionen des gesamten Systems. Auch der Schutz vor Blendung sowie Verteilung und Lenkung des Lichtstromes durch Reflexion gehören zu den wichtigsten Aufgaben. Unter Blendung versteht man einen Sehzustand, der durch eine ungünstige Leuchtdichteverteilung oder zu hohe Leuchtdichtekontraste als unangenehm empfunden wird [62]. Für den Beleuchtungswirkungsgrad einer Anlage ist der Leuchtenbetriebswirkungsgrad, die Lichtverteilungskurve der Leuchte, die Raumabmessungen und die Reflexionsgrade der Raumbegrenzungsflächen und der Einrichtung ausschlaggebend. Eine wirtschaftliche Leuchte muss also nicht nur einen hohen Leuchtenbetriebswirkungsgrad haben, sondern auch eine zweckentsprechende Lichtverteilungskurve haben [71].

Der Betriebswirkungsgrad gibt an, wie viel Prozent des in den Lampen erzeugten Lichtstroms aus einer Leuchte abgestrahlt wird. Maßnahmen, wie die regelmäßige Wartung der offenen Leuchte oder Einbau der Leuchte in einen eingeschlossenen Reflektor führen dazu, dass sich auch nach vielen Betriebsjahren der Betriebswirkungsgrad der Leuchte kaum ändert. Zu den wichtigsten Eigenschaften des Beleuchtungswirkungsgrades gehört neben dem Betriebswirkungsgrad auch die Lichtverteilungskurve. Die Lichtverteilung bestimmt die Art der Beleuchtung (indirekt, direkt, usw.) Spiegelelemente, Prismen und Raster verursachen die Lenkung des Lichtstromes und Abschirmung der Lampe. Gerade von der Konstruktionsart dieser Bauteile hängt der Leuchtenwirkungsgrad ab.

Die weiteren wichtigen Anforderungen an die Leuchten liegen in der Gewährleistung der Betriebssicherheit des gesamten Systems und Eignung zu leichter Installation und problemloser Wartung.

Einen großen Einfluss auf die Eigenschaften der Leuchte hat auch das Design. Gerade bei der Auswahl von Bestandteilen müssen nicht nur wichtige technische Merkmale, sondern

auch die Herausforderungen der modernen Architektur berücksichtigt werden. Der Auswahl von Beleuchtungsaufgaben und Lampenwahl bestimmt sogleich Wahl der Leuchte.

Nach Hentschel [62] unterteilen sich die Leuchtenkomponenten auf optische Bauteile, mechanische Bauteile und elektrische Bauteile. Zu den elektrischen Bauteilen gehören neben den Vorschaltgeräten als elektrische Elemente auch Fassungen, Leitungen, Anschlussklemmen und weitere elektrische Verbindungselemente. Das Vorschaltgerät, auch wenn es in der Leuchte eingebaut ist, soll wegen der ganzen Reihe an spezifischen Funktionen im Lichtsystem extra betrachtet werden. Als optische Bauteile werden in dieser Arbeit die Reflektoren verstanden.

Mechanische Bauteile dienen zur Befestigung und als Schutz der optischen und elektrischen Bauteile der Lampen. Hierzu zählt das Leuchtengehäuse, das gleichzeitig auch als Reflektor und Abschirmung dienen kann. Des Weiteren sind es Befestigungsteile und Dichtungen für Abschlussgläser, Verstärkungsschienen in Kunststoffgehäusen, Schellen, Pendelaufhänger und andere, jeweils benötigte Teile. Für die Konstruktion sind wiederum die Anforderungen des Betriebes maßgebend, in erster Linie die Festigkeitseigenschaften und die Korrosionsbeständigkeit. Die Wirksamkeit eines Reflektors hängt u.a. ab von seiner Form und Anordnung zur Lichtquelle. Wichtig ist auch die Auswahl vom Spiegelreflektor oder ob es sich um einen diffus-streuenden Reflektor (z. B. weiße Kunstharzlacke) handelt. Lichttechnisch hochwertige Spiegelreflektoren lenken den von den Lampen erzeugten Lichtstrom verlustarm auf die Nutzebene. Bei stark lichtstreuenden Reflektoren ist der prozentuale Anteil des auf die Nutzebene gelenkten Lampenlichtstromes geringer, als bei den vorerwähnten Spiegelreflektoren [67]. Die Spiegelelemente, Prismen und Raster besitzen die Funktion der Lenkung des Lichtstromes und Abschirmung der Lampe. Gerade von der Konstruktionsart dieser Bauteile hängt der Leuchtenwirkungsgrad ab. Leuchtstofflampen-Leuchten mit Abluftführungen, die an ein Klimasystem angeschlossen werden, haben meist den lichttechnischen Vorteil, dass der Leuchtenbetriebswirkungsgrad verbessert wird. Die durchströmende Luft senkt die Betriebstemperatur im Leuchtengehäuse und damit die Lampen-Umgebungstemperatur [71].

Die Basis für die Planung der Beleuchtung ist die DIN-Normung. Die Normen für die Beleuchtung werden von vielen zusammengesetzten Gremien erarbeitet. Hierzu zählen unter anderem neben den wissenschaftlichen Mitarbeitern der lichttechnischen Institute, Vertreter der Lampen- und Leuchtenindustrie, Architekten und Planer und Anwender. Die Normen werden durch Neuausgaben dem jeweiligen Stand der Technik angepasst [68].



Abbildung 6-10: *Miniaturisierung der Leuchten bei T5 Leuchtstofflampen*
Quelle: OSRAM GmbH

6.4 Schwerpunkte und Besonderheiten der Ökobilanzierung von Lichtsystemen

In der vorliegenden Arbeit wird eine ökologische Bewertung zweier Lichtsysteme durchgeführt. Alle drei Komponenten des Lichtsystems (Leuchtstofflampe, Vorschaltgerät und Leuchte) [Abbildung 6-12] werden über alle Phasen ihres Produktlebenszyklusses mit Hilfe der Ökobilanzierungsmethodik untersucht und bewertet.

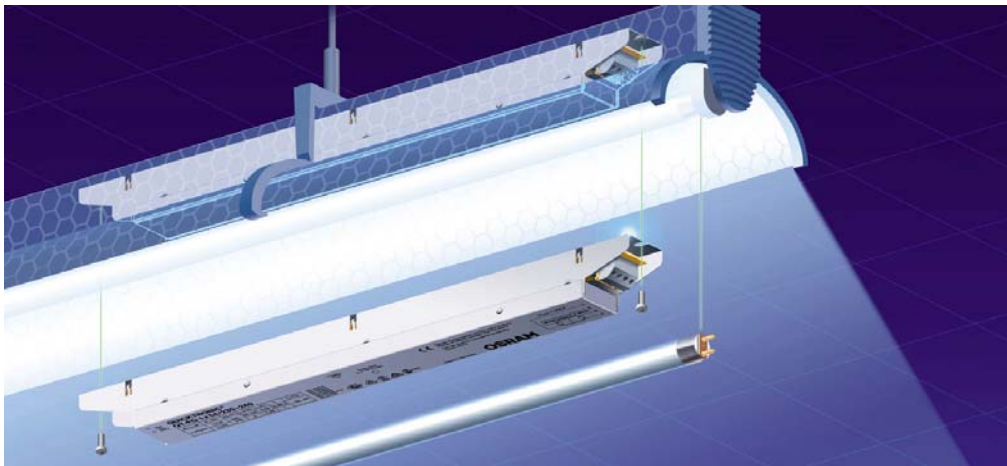


Abbildung 6-11: *Aufbau vom Lichtsystem*
Quelle: OSRAM GmbH

Die gesamte Bilanz ist anhand der verschiedenen Daten erstellt worden. Die in dieser Untersuchung verwendeten Daten unterteilen sich in drei Kategorien. Die spezifisch ermittelten Produktionsdaten konnten für die Modellierung von Lampenherstellung, Vorschaltgeräteherstellung und Leuchtenherstellung erhoben werden. Auch fast alle

Komponenten der Leuchtstofflampe wie Glas, Leuchtstoff, Wendel, Kitt, Sockelproduktion konnten erhoben werden. Die so genannten spezifisch ermittelten Daten, deren Basis die genauen Materialspezifikationen sind, wurden für die Metallkomponenten der Leuchtstofflampe sowie für alle Komponenten der Vorschaltgeräte sowie Leuchten verwendet [Abbildung 6-12]. Die Rohstoffe, Energieerzeugung, Kunststoffe stammen aus den so genannten verallgemeinerten Datensätzen, deren Basis die Datenbanken sowie Literaturwerte sind. Die komplexe Herstellungsphase der Leuchtstofflampen, des Vorschaltgerätes und der Leuchte wird in den weiteren Kapiteln der vorliegenden Arbeit beschrieben.

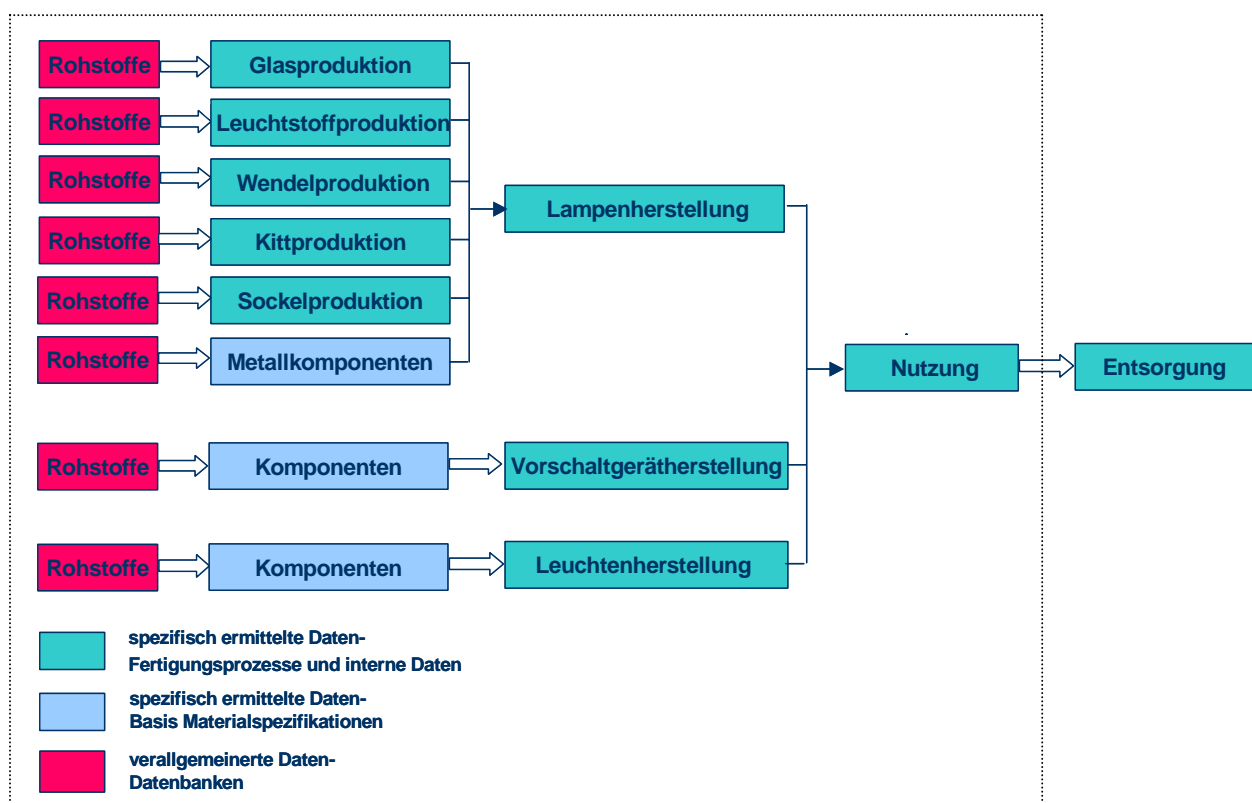


Abbildung 6-12: Darstellung des gesamten Bilanzierungssystems unter Einbeziehung von der Art der Datenermittlung

Die Leuchtstofflampen besitzen im Vergleich zu den anderen Lampen eine lange Lebensdauer und gute Energieeffizienz. Diese Eigenschaften sind vor allem durch den Einsatz von moderner Elektrotechnik möglich. Die Betriebsphase des Lichtsystems lässt sich gut voraussagen. Die mittlere Lebensdauer (50 % Ausfall) der modernen Leuchtstofflampe liegt nun bei 24 000 Betriebsstunden. Die Nutzungsphase der Leuchte ist doppelt so lang wie die Nutzungsphase des Vorschaltgerätes. Da das gesamte System bis zu 10 Jahre im

Betrieb bleibt und das einzige Medium in der Nutzungsphase die elektrische Energie ist, lässt sich der Einfluss der Betriebsphase auf die Umwelt problemlos darstellen. Die Analyse und Erfassung aller Umweltauswirkungen, die mit der Herstellungsphase und Entsorgungsphase des Lichtsystems in Verbindung stehen, werden Mithilfe der Ökobilanzierungsmethode zusammengestellt.

6.4.1 Vorgehensweise bei der Bilanzierung der Leuchtstofflampe

6.4.1.1 Aufbau der Leuchtstofflampe

Die beiden in der Arbeit untersuchten Leuchtstofflampen, unterscheiden sich im Volumen sowie einigen technischen Details. Zu den Hauptbestandteilen der Leuchtstofflampe gehört das Entladungsgefäß, der Fuß mit Elektroden und der Sockel. Die Lampe ist mit Leuchtstoff beschlämmt und enthält die Gasfüllung sowie Quecksilber [Abbildung 6-13]. Die detaillierte Beschreibung der Inhaltstoffe sowie Herstellung der Komponenten der Leuchtstofflampe enthält Kapitel 7.

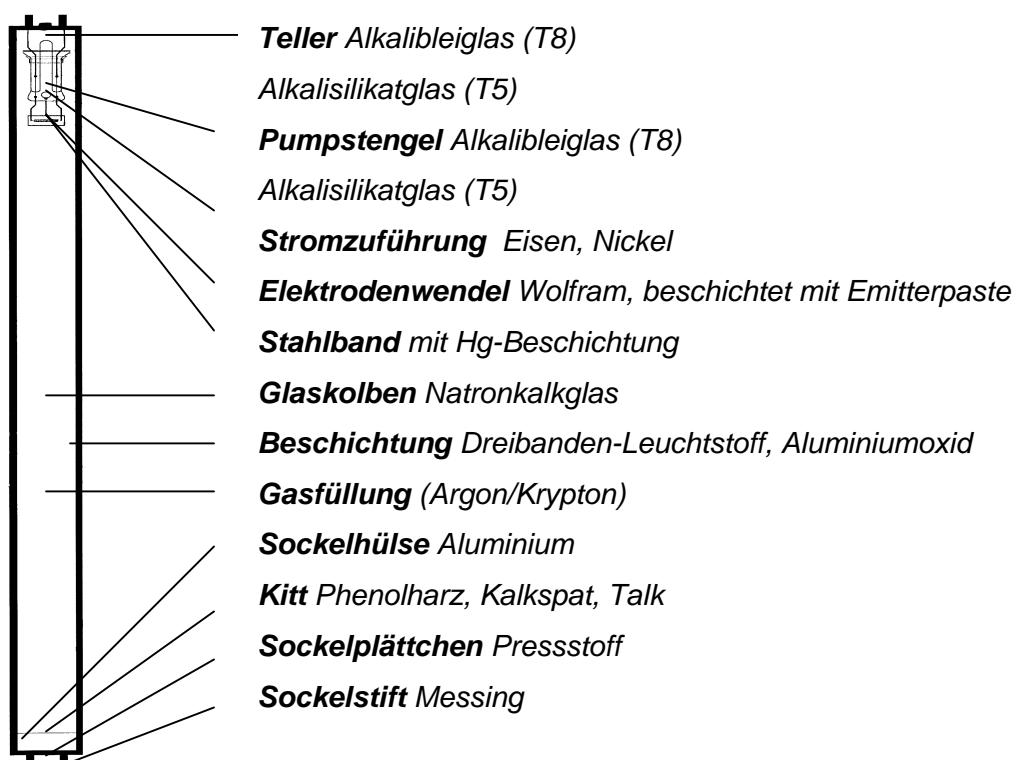


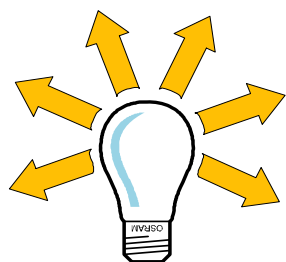
Abbildung 6-13: Aufbau der Leuchtstofflampe

6.4.1.2 Bilanzgrenzen des Untersuchungsbereiches und Datenqualität

Der Untersuchungsbereich der Sachbilanzen von Leuchtstofflampen umfasst Rohstoffaufbereitung, Herstellung sowie die Nutzung. Der Aufbau der Sachbilanzen erfolgt modular, das heißt, alle Prozessschritte, sowie ganze Prozessketten sind als Module dargestellt. Die Beschreibung der innerhalb des gesamten Lebenswegs enthaltenen Module bezieht sich auf interne Fertigungsdaten. Da Lampenhersteller eine hohe Fertigungstiefe aufweisen, d.h. fast alle Vorprodukte kommen aus der eigenen Herstellung, ist die Bilanzierung der internen Daten von hoher Aussagekraft. Mit der Veröffentlichung von Ökobilanzen geht oft die Problematik der Geheimhaltung einher. Um keine Produktionsinterna preiszugeben, können bestimmte Datensätze sowie Zahlen nicht in Form von Sachbilanzergebnissen dargestellt werden. Erst in der Wirkungsabschätzung und auf die funktionelle Einheit bezogene aggregierte Datensätze dürfen der Öffentlichkeit vorgestellt werden.

6.4.1.3 Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit steht mit dem Ziel der Ökobilanzstudie in engem Zusammenhang. Einer der Hauptzwecke einer funktionellen Einheit ist die Angabe einer Bezugsgröße, auf die Input- und Outputdaten normiert werden [22]. Die Bezugsgröße soll als Vergleichsbasis dienen und gleichzeitig die Leistung des untersuchten Systems darstellen. In der Bilanzierung von Lampen wird als funktionelle Einheit die Systembrenndauer des Lichtsystems in Megalumenstunden verwendet. „Lumen“ ist die Einheit des Lichtstromes. Als Lichtstrom bezeichnet man die gesamte von der Lichtquelle abgegebene sichtbare Strahlung [Abbildung 6-14].



Der **Lichtstrom** ist die Lichtleistung der Lichtquelle.

Maßeinheit: **1 Lumen (lm)**

Abbildung 6-14: *Lichtstrom*
Quelle: OSRAM GmbH

Tabelle 6-5: Basis der Umrechnung für die Bilanzierung der Lichtsysteme

	T8 LLP 36 W	T5 FH LLP 28 W
Leistungsaufnahme (W) deklariert	36	28
Lichtausbeute der Lampe (lm/W) (bei 25 °C)	93	93
Lichtausbeute der Lampe (lm/W) (bei 35 °C)		104
Mittlere Lebensdauer (h) (Lampenwartungsfaktor 0,8)	20 000*0,8=16 000	24 000*0,8=19 200
Lichtstrom (lm) der Lampe	3348	2604
Nennlichtstrom- bei 25 °C (lm)		2604
Nennlichtstrom- bei 35 °C (lm)		2912
Lichtstrom über Lebensdauer gemittelt LLP (13 % Verlust über die Lebensdauer)	2912,7	2265,5
Lichtstrom (lm) im System (EVG+LLP)	3290,4	2618,0
Lichtstrom über Lebensdauer gemittelt LLP+EVG (13 % Verlust über die Lebensdauer)	2862,6	2277,6
Lichtmenge pro Lebenszyklus LLP+EVG (Mlmh)	16 000*2862,6=45,8	19 200*2277,6=43,7
Leuchtenwirkungsgrad	80 %	90 %
Lichtstrom über Lebensdauer gemittelt LLP+EVG+Leuchte (Mlmh)	2290,1	2049,8
Lichtmenge pro Lebenszyklus LLP (einschl. LLP+ Leuchtenwirkungsgrad) (Mlmh)	36,64	39,33
Funktionelle Einheit (Mlmh)	150	150
Lampenbedarf (in Stück) für 150 Mlmh	4,1	3,8
Lebensdauer des gesamten Lichtsystems (h)	50 000	50 000
Systembrenndauer für 150 Mlmh (h)	65 600	72 960
EVG Bedarf (in Stück) für 150 Mlmh	1,31	1,46
Leuchtenbedarf (in Stück) für 150 Mlmh	0,6	0,7

7 Lebenszyklusmodellierungen von Komponenten der Leuchtstofflampe

7.1 Glas in der Lampenindustrie

Ohne Glas ist der Bau von elektrischen Lampen nicht möglich. Wie groß die Bedeutung des Glases im Lampenbau ist, beweist schon alleine die Tatsache, dass die großen Lampenhersteller ihre Gläser selbst fertigen. Die großen Mengen verwendeter Gläser sowie hohe Anforderungen an spezifische Eigenschaften machen die Herstellung effizient und profitabel. Leuchtstofflampengläser sehen bei der fertigen Lampe gleich aus, die lichttechnischen Eigenschaften sind identisch und doch ist der Herstellprozess bei den großen Lampenherstellern unterschiedlich.

Der Lampenkolben muss eine Reihe von Anforderungen erfüllen- mechanische Stabilität, Lichtdurchlässigkeit, elektrische Isolationsfestigkeit und dauerhafte Gasdichtheit. Da Leuchtstofflampen Niederdruckentladungslampen sind, stehen Eigenschaften wie chemische und thermische Beständigkeit an zweiter Stelle, ganz im Gegensatz zu den für Hochdrucklampen verwendeten Gläsern. Für die Herstellung von Leuchtstofflampen sind noch weitere Eigenschaften von Bedeutung. Das Entladungsgefäß muss neben einer guten Lichtdurchlässigkeit einen hohen elektrischen Widerstand zur Vermeidung von Kurzschlüssen zwischen den eingeschmolzenen Elektroden besitzen.

Bei den Leuchtstofflampen, wo als Kolbenglas Natronkalkglas eingesetzt wird, ist eine der Hauptanforderungen die Beschränkung der UV-Durchlässigkeit, weil zu viel austretende UV-Strahlung das menschliche Auge schädigen könnte. Diese Forderung wird durch geringe Mengen von Eisenoxid erreicht. In Gegensatz zu Behälterglas ist bei Leuchtstofflampen der Lampenkolben durch Eisenoxid leicht türkis gefärbt und die UV-Durchlässigkeit damit eingeschränkt.

Beim Bau der untersuchten Leuchtstofflampen finden drei Glassorten Einsatz. Für das Kolbenglas wird Natronkalkglas eingesetzt, für Pump- und Tellerrohre werden entweder Bleiglas oder Alkalisilikatglas gebraucht. Die Verwendung vom Bleiglas beim Bau von Lampen hat eine historische Bedeutung. Bleiglas lässt sich mit anderen Gläsern gut verschmelzen und die Gasdichte Verschmelzung kann mit dem bloßen Auge schon während des Einschmelzens kontrolliert werden. Bei Bleiersatzgläsern lässt sich die Verschmelzung nur durch optische Geräte überprüfen.

Ab dem 01.07.2006 wird der Einsatz von Bleiglas verboten, mit der Ausnahme Bleiglas von Leuchtstofflampen [11]. Hier hat der Gesetzgeber berücksichtigt, dass der Umstellprozess technisch aufwändig und nicht innerhalb von 3 Jahren umgesetzt werden kann. Außerdem ist die Menge bleifreien Glases am Markt noch nicht ausreichend.

Stoffverbote, wenn auch Ausnahmen bestehen, führen in der Regel bei technischer Machbarkeit zu einem langfristigen Ersatz der verbotenen Stoffe. Dies ist auch bei der Leuchtstofflampe zu erwarten. Ersatzgläser sind am Markt verfügbar und die Umstellung in der Produktion ist innerhalb der nächsten 3 Jahre zu erwarten. Die Rohstoffsituation auf dem Weltmarkt sowie die Gesetzgebung erfordern einen effizienten Materialeinsatz. Durch die Verkleinerung des Glaskolbens d.h. Reduzierung des Durchmessers kann eine enorme Einsparung an Rohstoffen und Energie erzielt werden. Die Reduzierung des Kolbendurchmessers wurde aufgrund verbesserter Glaseigenschaften möglich. Die erste Einsparung vom Glas und Leuchtstoff erfolgte von 38 mm auf 26 mm Durchmesser, also von den Typen T12 zu T8. In den Leuchtstofflampen der neuen Generation ist es gelungen, den Durchmesser von 26 mm auf 16 mm zu reduzieren. Das Lampenkolbengewicht hat sich dadurch von 151 g auf 100,5 g verringert.

Die Rohstoffe zur Herstellung dieser Gläser, der Fertigungsprozess und die Transportaufwendungen werden in dem folgenden Kapitel detaillierter beschrieben.

7.1.1 Systembeschreibung (Systemgrenze)

Die zu untersuchende Systemgrenze beinhaltet neben Abbau oder Produktion von Rohstoffen, den Transport, das Schmelzen des Glases und den Transport zur Produktionsstätte. Die zweite Phase des Lebenszyklus des Glaskolbens ist deren Herstellung. Weitere Arbeitsschritte, die innerhalb der Fertigung der Leuchtstofflampe anfallen, wie Nutzungsphase und Recycling werden entweder in der Phase der Leuchtstofflampenherstellung oder der Recyclingphase beschrieben und entsprechend zugeordnet. Berücksichtigt wird auch der interne Ausschuss. Die gesamten Transportwege der Rohstoffe bis hin zum Schmelzprozess wurden in die Bilanz aufgenommen. Auch der Transport der fertigen Glasröhre in die eigentliche Leuchtstofflampenproduktion wurde in der Sachbilanz erfasst.

7.1.2 Kolbenglas (Bestandteile des Natronkalkglases)

Da der Glaskolben über 90 % des Gewichtes der gesamten Leuchtstofflampe ausmacht und zusätzlich die Glasherstellung sehr energieintensiv ist, hat die Bilanzierung des Glases großen Einfluss auf das gesamte Ergebnis der Studie. Deshalb wird die Glasproduktion detailliert beschrieben.

Das Glasrohr einer Leuchtstofflampe besteht aus dem Natronkalkglas. Natronkalkglas ist ein weiches Glas mit hohem Alkaligehalt angepasst an Schmelzverbindung mit Gläsern und Metallen deren Ausdehnungskoeffizient im Bereich von $9-10 \times 10^{-6}[\text{K}^{-1}]$ liegen. Die Hauptbestandteile von Natronkalkglas sind SiO_2 (71 %), Na_2O (16,0 %), CaO (4,0 %), MgO (3,0 %), Al_2O_3 (2,0 %) erschmolzen aus den wichtigsten Glasrohstoffen Quarzsand, Feldspat, Natriumcarbonat und Dolomit. Als Zusätze dienen Bariumsulfat, Eisenoxid und Kohlengrieß. Die zur Produktion des Glases eingesetzten Rohstoffe werden grob in „Glasbildner, Flussmittel und Stabilisatoren“ eingeteilt [72]. Der wichtigste Glasrohstoff ist Quarzsand. Zwar ist das Silizium als zweithäufigstes Element mit etwa 25 % am Aufbau der Erdkruste beteiligt, jedoch hat von den vielen vorkommenden Sandarten im allgemeinen nur Quarzsand mit einem SiO_2 -Gehalt von über 99 % eine glastechnische Bedeutung. Als Hauptbestandteil des Glasgemenges hat der Sand einen bedeutenden Einfluss auf die Schmelzeigenschaften. Das Schmelzverhalten des Gemenges wird weitgehend von der Korngröße des Glassandes bestimmt [73].

Zu den weiteren Glaskomponenten des Natronkalkglases gehört Natriumcarbonat (Soda). In der Natur kommt Soda nur in sogenannten Natronseen vor. Da die Industrie eine große Menge an reinem Natriumcarbonat benötigt, wird der für die Zwecke auf dem synthetischen Wege hergestellt. Der Prozess verläuft nach dem sogenannten Solvay- Verfahren. Dank der Zugabe von Soda wird die Schmelztemperatur gesenkt. Soda wandelt in Na_2O um, was die Einschmelzbarkeit des Glases verbessert, die Wärmedehnung erhöht, die Viskosität erniedrigt, aber die chemische Beständigkeit und mechanische Festigkeit verschlechtert [74].

Ein weiterer bedeutender Rohstoff für die Glasherstellung ist Dolomit (Calcium-/Magnesiumcarbonat). Nach dem Schmelzprozess liegen beide Elemente in oxidischer Form vor. CaO erhöht als zweiwertiges Oxid die Zug- und Biegefestigkeit sowie das Elastizitätsmodul am deutlichsten. CaO erhöht im Entspannungsbereich die Viskosität mehr als alle anderen zweiwertigen Oxide. Durch CaO als typischen Stabilisator erzeugt man bei

Abwesenheit anderer zweiwertiger Oxide ab einer Konzentration von 6 % ein chemisch beständiges, in Wasser, Säure und Lauge schwer lösliches Glas [73].

MgO erhöht die Ritzhärte, verbessert die Temperaturwechselbeständigkeit, Kristallisationsfestigkeit und chemische Beständigkeit. Es erhöht bei den Temperaturen der maschinellen Glasverarbeitung (1050 bis 1250 °C) die Viskosität [74].

Eisenoxid - wird als Pigment verwendet, durch das Glas leicht türkis gefärbt wird und die UV-Durchlässigkeit damit eingeschränkt ist.

Kohlegries - fein gemahlene Kohle, die als Läutermittel eingesetzt wird.

Beide sind die für die Läuterung des Glases zuständigen Komponenten. Durch die Umwandlung von Carbonaten zu Oxiden entstehen im Glas unzählige feine Bläschen. Diese werden im Läuterprozess durch die oben genannten Zusätze ausgetrieben.

Tabelle 7-1: *Natürliche und synthetische Glasrohstoffe*
Quelle: [75]

Glasrohstoff	Herstellungsverfahren	Natürliche Mineralische Ausgangsstoffe
Feldspat	Aufbereitung	Perthit
Pottasche	Chemisch-synthetisch	Kaliumchlorid
Soda	Chemisch-synthetisch	Kochsalz
Kalk	Aufbereitung	Kalkspat, Marmor
Dolomit	Aufbereitung	Nat. Dolomit
Bariumkarbonat	Chemisch-synthetisch	Baryt
Mennige	Chemisch-synthetisch	Bleiglanz
Borsäure	Chemisch-synthetisch	Borax, Colemanit
Phosphorsäure	Chemisch-synthetisch	Calciumphosphat/Apatit

Für die Optimierung des Glasherstellungsprozesses ist die Wiederverwendung von Altglasscherben von größter Bedeutung. Durch die Vermischung von Scherben und feinkörnigen Einsatzstoffen ist eine bessere Verteilung möglich und der Schmelzprozess wird effizienter. Durch die Zugabe von 10 % Scherben zur Schmelze lassen sich ca. 3 % der

gesamten Schmelzenergie einsparen. Ein Scherbeneinsatz von bis zu 50 % in der Kolbenglasherstellung ist ohne Beeinträchtigung der Glasqualität möglich. Als Scherben eingesetzt werden Produktionsabfälle aus der Glas- und Leuchtstofflampenproduktion und recyceltes Kolbenglas von Ausschusslampen sowie zugekauften Scherben von externen Lampenrecyclern.

7.1.2.1 Technologie der Herstellung von Glaskolben

Die Bilanzierung des Glaskolbens beginnt beim Abbau der Rohstoffe. Die zur Glasherstellung notwendigen Rohstoffe werden mit Bahn und/oder LKW befördert und im Glaswerk in Silos oder Bunkern gelagert. Die Rohstoffe werden verwogen, gemischt und mit Scherben versetzt. Der Transport erfolgt generell pneumatisch. Das so entstandene Gemenge wird in die Schmelzwanne durch Einlegeschnecken gefördert. Die Glaswanne wird mit einem nahezu stöchiometrischen Erdgas/Luft Gemisch beheizt. Bei der vorliegenden Wanne wird die Verbrennungsluft regenerativ vorgeheizt. Die Schmelztemperatur liegt bei ca. 1500 °C. Die Beheizung der Glasschmelze der regenerativen Wanne erfolgt durch installierte Querbrenner, die in einem konstanten Rhythmus wechselseitig brennen. Die Wärme des abströmenden Rauchgases wird durch so genannte Regenerativkammern gespeichert und zur Vorwärmung der Verbrennungsluft beim Seitenwechsel verwendet. Die in diesem Prozess entstehende Glasschmelze muss homogen sein und darf keine Gasblasen enthalten. Gasblasen werden in der Läuterzone zusätzlich zur chemischen Läuterung durch von unten in die Schmelze einströmende Luft nach oben ausgetrieben. Die Schmelze fließt über den Durchlass von der Schmelzwanne in die Arbeitswanne, wo die Schmelze auf ca. 1200 °C abgekühlt wird. Danach erfolgt das so genannte Ziehverfahren, in dem der Glasstrang seine Röhrenform, den entsprechenden Durchmesser sowie die notwendige Wandstärke bekommt. Die Glasrohre werden nach dem so genannten Vello-Verfahren hergestellt. Das aus der Düse ausgetretene flüssige Glas fließt durch eine Düse über einen nach unten trichterförmig erweiterten Dorn. In dem Produktionsschritt kann die Geometrie durch die Ziehgeschwindigkeit und das Verstellen des Dorns beeinflusst werden. Der Glasstrang wird nach 5 bis 8 Metern in die Horizontale umgelenkt und entlang der Ziehbahn gekühlt. Am Ende der Ziehbahn wird das ca. 100 m lange Glasrohr in die entsprechenden Lampenlängen mittels Thermoschock getrennt und die Enden eingerollt und verschmolzen. So entsteht ein Glaskolben, der für die Produktion der Leuchtstofflampe eingesetzt werden kann. Die anschließende Qualitätskontrolle führt zum Aussortieren fehlerhafter Glaskolben, die dann als Scherben dem Schmelzprozess wieder zugeführt werden [Abbildung 7-1].

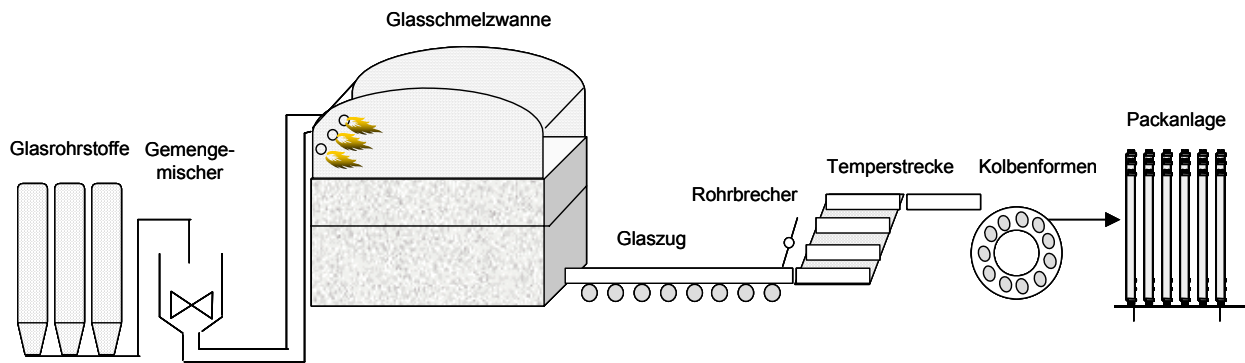


Abbildung 7-1: Technik der Glaskolbenherstellung

7.1.3 Pumpstängel und Tellerglas

Alkali-Blei-Silicatgläser enthalten > 10 % PbO. Anteile von 20-30 % PbO bei 54-58 % SiO₂ und ca. 14 % Alkalien sind hoch isolierend und damit elektrotechnisch bedeutsame Bleigläser wie sie als „Fußgläser“ in Lampen, Bildröhren usw. verwendet werden [75].

Zur Einführung von Blei in Glas werden die Pb₃O₄ (Mennige) verwendet.

Mennige - (Pb₃O₄), chemisch als Bleisalz der Ortho- Bleisäure bekannt. Leuchtend rotes, wasserunlösliches Pulver [74]. Mäßige Zusätze von PbO im Glas erhöhen die Beständigkeit, höherer Bleigehalt erniedrigt die Schmelztemperatur und führt zu geringerer Härte, aber höherer Lichtbrechzahl des Glases, die in der „Brillanz“ zur Geltung kommt [76]. Das wichtigste Bleierz zur Mennige-Herstellung sowie Ausgangsstoff für metallisches Blei und andere Bleiverbindungen ist der Bleiglanz, chemische Bezeichnung Bleisulfid. Dieses Mineral ist die bedeutendste Quelle der Gewinnung von Blei. Die größten Bleilagerstätten befinden sich in den USA, Mexiko, Brasilien, Tunesien, und Australien.

Der bergmännisch abgebaute Bleiglanz und andere Bleierze werden nach dem Röst-Reduktionsverfahren zu Bleioxid umgesetzt. Der Prozess erfolgt in den Sinteranlagen. PbS wird zu PbO aufgrund der Entfernung von Schwefel (in den Sinterglocken) umgewandelt.

Mangandioxid - (Braunstein) ist ein Oxid des Mangans mit der Summenformel MnO₂.

Als Entfärbungsmittel kompensiert es die grünliche Eisenfärbung des Glases durch physikalische Entfärbung und wird daher als „Glasseife“ bezeichnet, weil es das Glas gewissermaßen „rein“ wäscht [74].

Aluminiumlithiumsilikate - (Alumo- Silikate) - Gruppen von Silicaten, bei denen Siliziumatome teilweise durch Aluminiumatome ersetzt sind [74].

Die natürlichen Al-Träger kann man als Alumo- Silikate je nach Zusammensetzung und geologischer Entstehung gemäß ihrer Struktur als hochpolymere Netzwerke auffassen, wobei ihre Vernetzung über Sauerstoffatome reinen SiO_4 - Netzwerk erfolgt. Im Feldspat ist jedes vierte Siliziumatom im Raumnetz durch Aluminium ersetzt [73].

Kaliumcarbonat - Pottasche (K_2CO_3). Kommt in der Natur in einigen Seen vor. Pottasche wird vorwiegend durch Carbonierung von Kalilauge hergestellt. Pottasche ist wie Soda ein Flussmittel und daher wichtiger Glasrohstoff. Das durch Pottasche ins Glas eingebrachte K_2O ist ein typischer Netzwerkwandler. Die Wirkung des K_2O im Glas ist ähnlich der des Na_2O , aber abgeschwächer. Es verleiht dem Glas eine hohe Lichtbrechung [74].

Bariumcarbonat - Ausgangsprodukt für die Bariumkarbonat-Herstellung ist vorwiegend das Material Schwerspat, chemisch Bariumsulfat, oft als Baryt bezeichnet [73].

BaCO_3 , ist ein weißes, schwer wasserlösliches Pulver. Bariumcarbonat wird überwiegend aus Schwerspat hergestellt. Als BaO erhöht es die Härte des Glases, verringert die Kristallisationsneigung und verbessert die Lichtbrechung. Vorkommens- und herstellungsbedingt enthält Bariumcarbonat fast immer bis zu 1 % SrO , was aber für die Glasherstellung nicht relevant ist [74].

Natriumsulfat - Na_2SO_4 , ist ein weißes, wasserlösliches Pulver. Es zersetzt sich oberhalb $1200\text{ }^\circ\text{C}$ in Gegenwart von SiO_2 zu Na_2SiO_3 und SO_3 wobei sich das Schwefeltrioxid weiter zersetzt zu $\text{SO}_3 \rightarrow \text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$. Diese Gase sind mit für die Läuterung verantwortlich [74].

7.1.4 Umweltaspekte der ganzheitlichen Bilanzierung von Glas

Bei der Herstellung des Glases ist vor allem der hohe Energieverbrauch und die damit verbundenen Emissionen als ersten Faktor der Umweltbelastung zu nennen. Um die für den Schmelzprozess entsprechend hohe Temperatur zu erreichen, wird Erdgas für die Beheizung der Schmelzwanne verwendet. Beim Schmelzen von Glasrohstoffen kommt es zur Bildung von Verbrennungsprodukten, die als Emissionen in die Luft abgegeben werden. Es bilden sich vor allem Stickstoffoxid, Schwefeldioxid und Kohlendioxid. Weiterhin sind in den Emissionen der Öfen Staub und kleinere Mengen an Schwermetallen enthalten [Tabelle 7-2]. Kohlendioxid stammt außerdem aus der Zersetzung von Karbonaten im Gemenge. Weiterhin sind im emittierten Staub kleine Mengen an Schwermetallen.

Um die Staubemission zu minimieren, ist ein Elektrofilter im Einsatz. Dadurch es ist möglich, die Staubemission um über 90 % zu reduzieren. Der im Filter abgeschiedene Staub wird dem Schmelzprozess als Sekundärrohstoff wieder zugeführt.

Bei der Befuerung der Wanne entsteht eine große Menge an Stickstoffoxidemissionen. Eine Minderung des Stickstoff-Gehaltes lässt sich primär durch die Änderung der Feuerführung erzielen, sekundär durch die nicht selektive katalytische Reduktion mit Ammoniak. Um die gesetzlichen Ziele erreichen zu können, ist durch ein mehrjähriges Forschungsvorhaben die Stickstoffoxidemission in drei Schritten drastisch reduziert worden. Da der Stickstoff aus der Verbrennungsluft bei hohen Temperaturen zu Stickstoffoxid reagiert, wurde die Feuerführung geändert und damit die Flammentemperatur gesenkt. Des Weiteren wurde der Ofenraum vergrößert und so ein fast vollständiger Ausbrand der Verbrennungsgase erzielt. Durch diese Maßnahmen konnten primär über 30 % der Stickstoffoxidemissionen reduziert werden. Die restlichen Stickstoffoxide werden sekundär durch das Eindüsen des gasförmigen Reduktionsmittels Ammoniak in die Regenerativkammern der Glaswanne bei ca. 900 °C nach dem Exxonverfahren reduziert und größtenteils in Stickstoff und Wasser getrennt. Es handelt sich um ein SCNR-Verfahren = selektive nichtkatalytische Reduktion. Der Wirkungsgrad liegt bei ca. 70 %. Die bei der Glasherstellung entstehende ca. 450 °C heiße Abluft wird über Wärmetauscher zurück gewonnen für die Beheizung des Werks und zur Warmwasserbereitung verwendet.

Tabelle 7-2: *Herkunft der Emissionen der Glasindustrie*

Kohlendioxid	Zersetzung von Karbonaten im Gemenge und der Verbrennung von Gas
Staubemissionen	Austreiben flüchtiger Gemengebestandteile, Verwirbelung von Gemenge
Stickstoffoxide	Zersetzung vom Stickstoffverbindungen im Gemenge
Schwermetalle	Geringfügige Verunreinigungen in Rohstoffen, Altglasscherben
Chloride	Verunreinigungen in einigen Rohstoffen insbesondere in synthetischem Natriumcarbonat
Fluoride	Geringfügige Verunreinigung in einigen Rohstoffen

7.2 Leuchtstoff

7.2.1 Eigenschaften und Funktionen des Leuchtstoffs

Als Leuchtstoffe bezeichnet man Substanzen, welche die Fähigkeit besitzen, Licht durch Lumineszenz zu erzeugen. Dabei wandeln sie absorbierte Energie, z. B. in Form von UV-, Röntgen-Korpuskularstrahlung oder Tageslicht in Lichtenergie um. Durch diese Eigenschaft haben sie sich zahlreiche Verwendungsmöglichkeiten in der Technik erobert (z.B. bei elektrischen Lampen, Leuchtdioden, Fernseh-Bildröhren und der Röntgentechnik).

Die Leuchtstoffe emittieren Licht in mehr oder weniger schmalen Wellenlängenbereichen (wenige nm bis ca. 200 nm) des sichtbaren Spektralgebietes, des nahen Ultraviolett und Infrarot. Man spricht von „Photolumineszenz“ bei Anregung des Leuchtens durch Ultraviolett- oder Röntgenstrahlung oder durch Tageslicht, von „Kathodenlumineszenz“ bei Anregung durch Kathodenstrahlen, von „Elektrolumineszenz“ bei Anregung im elektrischen Feld. Für die Anwendung in Lampen ist nur die „Photolumineszenz“ von Bedeutung, und zwar im Wesentlichen die Umwandlung kurzwelliger ultravioletter Strahlung in sichtbares Licht.

Im Allgemeinen wird die Leuchtfähigkeit erst durch eine Aktivierung, z. B. durch Einbau von kleinen Mengen an kristallgitterfremden Ionen (Aktivatoren) in das Kristallgitter (Wirtsgitter) der anorganischen Verbindung (Grundmaterial) erworben. Von Bedeutung als Grundmaterial sind vor allem Salze der Erdalkalien und ihrer Nebengruppen - Elemente wie Phosphate, Silicate, Aluminate, Sulfide sowie die Halogenide der Alkalien und Erdalkalien. Bedeutung als Aktivator besitzen vor allem die Schwermetalle und die seltenen Erden [77]. Die Kristallphosphore zeigen die Lumineszenz erst bei hoher Reinheit des Kristalls und oft bei Anwesenheit geringer Spuren von Fremdstoffen, sog. Aktivatoren [61]. Für Lampen kommen nur feste Leuchtstoffe in Betracht, aber auch unter den festen lumineszenzfähigen Stoffen ist die Auswahl sehr eingengt. Da man die Leuchtstoffe in dem Lampenbau aus technischen und ökonomischen Gründen in möglichst dünner Schicht anwenden will, ist ein starkes Absorptionsvermögen für die anregende Strahlung notwendig. Leuchtstoffe für die Niederdrucklampe müssen vor allem die Quecksilberstrahlung im UV-Bereich bei 185 bis 254 nm gut absorbieren. Diese Umwandlung der UV-Strahlung in sichtbares Licht ist der größte Verlustposten in der Energiebilanz der Leuchtstofflampe.

Für die Herstellung von Leuchtstofflampen werden zwei Typen von Leuchtstoffen verwendet- die so genannte Halophosphate und Dreibandleuchtstoffe. Die Leuchtstofflampen der

„neuen Generation“ sind aber durch die hohe thermische Beanspruchung der Halophosphat-Leuchtstoffe während der Lebensdauer ausschließlich mit seltenen Erden herzustellen.

7.2.1.1 Halophosphate

Halophosphate werden seit den 40er Jahren als Leuchtstoffe in Entladungslampen eingesetzt. Mit 65 % sind sie immer noch das am häufigsten eingesetzte Leuchtmittel in der Leuchtstofflampenbeschichtung. Standardleuchtstoff ist antimon- und mangandotiertes Calciumhalophosphat, das mit seinen beiden Emissionsbanden (Sb^{3+} blau, Mn^{2+} gelborange) den wesentlichen Teil des sichtbaren Spektralbereiches ausfüllt. Der Calciumhalophosphat wird aus Calciumcarbonat und Phosphorsäure in einem chemischen Prozess gefällt, getrocknet, mit Additiven versehen und geglüht. Durch die Wahl der Additive und Variationen bei den Ausgangssubstanzen wird die gewünschte Lichtfarbe erzeugt.

7.2.1.2 Dreibandleuchtstoffe

Dreibandenleuchtstoffe werden seit den 70er Jahren im Lampenbau verwendet. Rohstoffe für diese Leuchtstoffkategorie sind die Metalloxide der seltenen Erden. Der Begriff der „seltenen Erden“ hat sich deswegen in der Chemienomenklatur ausgeprägt, da die seltenen Erden früher aus vermeintlich seltenen Mineralen isoliert wurden. Die Häufigkeit der Seltenerdelemente in der Erdrinde ist nicht so gering wie der Name erscheinen lässt.

Cer (Ce) ist das häufigste Seltenelement. Es kommt häufiger als Kobalt (Co) und Zink (Zn) in der Natur vor. Yttrium (Y) ist häufiger als Blei (Pb). Weil die Seltenerdelemente in der Natur immer in Gruppen vorkommen, ist ein aufwändiges Fraktionierungs- und Trennverfahren wegen der großen Ähnlichkeit der chemischen und physikalischen Eigenschaften der Verbindungen nötig [78]. Mit dem Einsatz von Dreibandleuchtstoffen statt Halophosphaten steigt die Lebensdauer der Lampe, da die Seltenerdleuchtstoffe bei den Betriebsbedingungen der Lampen stabiler als die Halophosphate sind. Aus diesem Grund werden die Leuchtstoffe der seltenen Erde immer mehr an Bedeutung gewinnen.

Das Grundprinzip der Funktion von Dreibandleuchtstoffen basiert nicht wie bei den Halophosphaten auf der Erzeugung eines kontinuierlichen Spektrums, sondern die Emission erfolgt im blauen (BAM), grünen (CAT) oder roten (L 581) Spektralbereich des sichtbaren Lichts. Aus diesen Leuchtstoffkomponenten lassen sich dann die in der Lampe verwendeten

Lichtfarben zusammenmischen. Wichtig ist auch hier der Einbau von so genannten Aktivatoren in das Kristallgitter.

Für die technische Lichterzeugung kommen wegen ihrer Absorptions- und Emissionseigenschaften nur Europium und Terbium in Frage. Dreiwertiges Europiumoxid lässt sich besonders gut in Yttriumoxid einbauen [79].

Für die Herstellung von Dreibandleuchtstoffen in den zu untersuchenden Leuchtstofflampen wurden folgende drei Leuchtstoffkomponenten bilanziert - Bariummagnesiumaluminat, Europium-dotiert (BAM), Cermagnesiumaluminat, Terbium-dotiert (CAT) und Yttrium-/Europiumoxid (L 581).

Bariummagnesiumaluminat - Die Emissionsbande dieses blau lumineszierenden Leuchtstoffes hat ihr Maximum bei 448 nm im blauen Spektralbereich. Zur Darstellung werden die Ausgangskomponenten in oxidischer Form gemischt und geglüht, die Glühtemperatur liegt zwischen 1500 und 1600 °C.

Cermagnesiumaluminat - die Absorption übernimmt die von ca. 210-310 nm reichende Ce^{3+} -Absorptionsbande. Ce^{3+} wirkt als Sensibilisator für die Tb^{3+} -Lumineszenz. Das Emissionsmaximum liegt im grünen Bereich bei 542 nm. Auch hier werden zur Darstellung die Rohstoffe zuerst gemischt. Der Glühprozess erfolgt in leicht reduzierender Atmosphäre bei 1500 -1600 °C.

Yttrium/Europium-Mischoxid - die Absorptionskante dieses Leuchtstoffs liegt bei 280 nm, so dass er nur durch kurzwelliges UV-Licht (Hg-Linie 254 nm) und durch Kathodenstrahlen erregbar ist. Das Absorptionsmaximum liegt hier mit 611 nm im orangeroten Bereich. Auch hier erfolgt die Darstellung über einen Glühprozess der Oxide bei 1000 -1100 °C.

7.2.2 Systembeschreibung

Die zu untersuchende Systemgrenze beinhaltet die Fertigungsprozesse von allen drei Komponenten des Leuchtstoffs (BAM, CAT und L581). Da für die Aufbereitung von Rohstoffen keine Daten zur Verfügung standen, wurde eine Bewertung erst ab der Herstellung von Leuchtstoffkomponenten möglich. Auch die Herstellung der Leuchtstoff-Suspension ist in die Bilanz miteinbezogen. Alle innerhalb der Systemgrenze in die Bilanz aufgenommenen Schritte werden nun detailliert beschrieben.

7.2.3 Technologie der Leuchtstoffherstellung

Die Herstellung von Dreibandleuchtstoffen erfolgt wie schon erwähnt in einem mehrstufigen Prozess. Hierzu werden die Rohstoffe in ihrer oxidischen Form mit den zusätzlichen Komponenten gemischt und gegläht. Der geglähte Leuchtstoff, der nun erhärtet ist, wird zerkleinert und fein gemahlen.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass es für jeden Leuchtstoff ein Korngrößenoptimum gibt, bei dem die eintreffende Anregungsstrahlung möglichst vollständig absorbiert wird. Dies ist bei einer zu groben Körnung nicht gegeben. Des Weiteren erfordert die spätere Beschichtung des Glaskolbens eine gleichmäßige porenfreie Schicht, was bei zu hoher Korngröße nicht mehr gegeben ist. Wenn der Leuchtstoff zu fein gemahlen ist, kommt es zur Zerstörung des Gitters, was für die Lichtausbeute eine negative Auswirkung hat. Auch die Leuchtstoffmenge und die Zahl der Leuchtstoffschichten, die auf dem Kolbenglas aufgetragen sind, sind für die Lichtausbeute von größter Bedeutung. Bei zu geringerer Schichtdicke durchdringt ein Teil der UV-Strahlung ungenutzt die Leuchtstoffschicht und geht durch Absorption im Glas verloren. Bei zu dicker Beschichtung wird zwar die UV-Strahlung vollständig im Leuchtstoff absorbiert, aber das vorwiegend auf der Lampeninnenseite der Schicht erzeugte Licht wird durch Streuung im Leuchtstoff und der dabei auftretenden partiellen Absorption geschwächt. Die Komponenten der Dreibandleuchtstoffe werden nun zur gewünschten Lichtfarbe vermischt und mit den anderen Zusatzstoffen und Wasser zu einer flüssigen Suspension, mit der dann die Glaskolben beschlämmt werden, verarbeitet.

Bei der Einführung der Leuchtstoffe wurden zum Zweck der Verbesserung der Lumineszenz einige toxische Stoffe eingesetzt [Magnesiumarsenat, Cadmiumborat]. Um den Schutz der Mitarbeiter in der Produktion zu gewährleisten wird auf die Verwendung giftiger Stoffe weitgehend verzichtet. Heute liegt die Gefahr eigentlich nur an der leichten Verstaubung des Pulvers (Bildung vom Feinstaub während der Produktion). Zur Bekämpfung der Feinstaubemissionen wird eine breite Zahl von Maßnahmen bereits eingesetzt. Der schon geglähte Leuchtstoff stellt keinerlei Gefahr für die Menschen dar (z.B. stellt BAM als hochgeglühtes Aluminat trotz des Bariumgehalts keinen Gefahrstoff dar) [Abbildung 7-2].

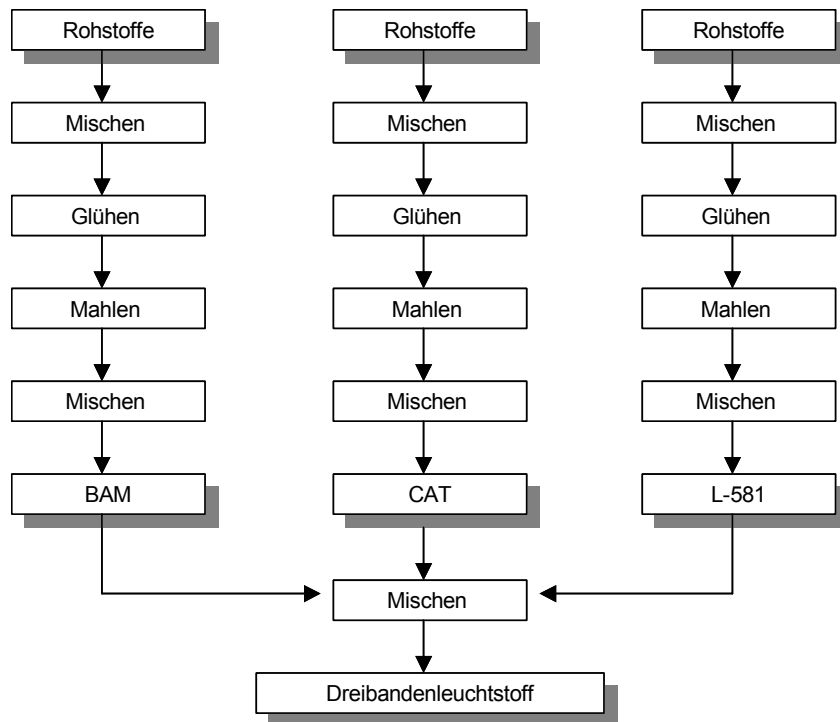


Abbildung 7-2: Herstellung von Dreibandenleuchtstoff

7.3 Elektrodenwendel

7.3.1 Wolframdraht-Eigenschaften und Herstellungsverfahren

Wolfram ist das Metall, dessen Eigenschaften als Glühdraht konkurrenzlos sind, weil der Schmelzpunkt von Wolfram bei 3695 K liegt und sein Dampfdruck bei hohen Betriebstemperaturen der niedrigste aller Metalle ist.

Die hohe Hitzebeständigkeit dieses Metalls ist für den Bau der elektrischen Lampen von größter Bedeutung. Erst seit dem Einsatz von Wolfram in der Glühwendel, statt früherem Tantal oder Osmium, hat sich die gesamte Lampentechnik rasch entwickelt. Um aus dem Wolfram eine Wendel herzustellen, sind mehr als 80 Produktionsschritte notwendig. Weil das reine Wolfram in der dünnen, langen Wendel bei hohen Betriebstemperaturen (2500-3000 °C) sehr instabil ist, wird die Zugabe bestimmter Additive notwendig. Wie sich der Prozess der Wendelherstellung entwickelte und welche technischen Schritte das Verfahren enthält, wird nun detailliert beschrieben [Abbildung 7-3].

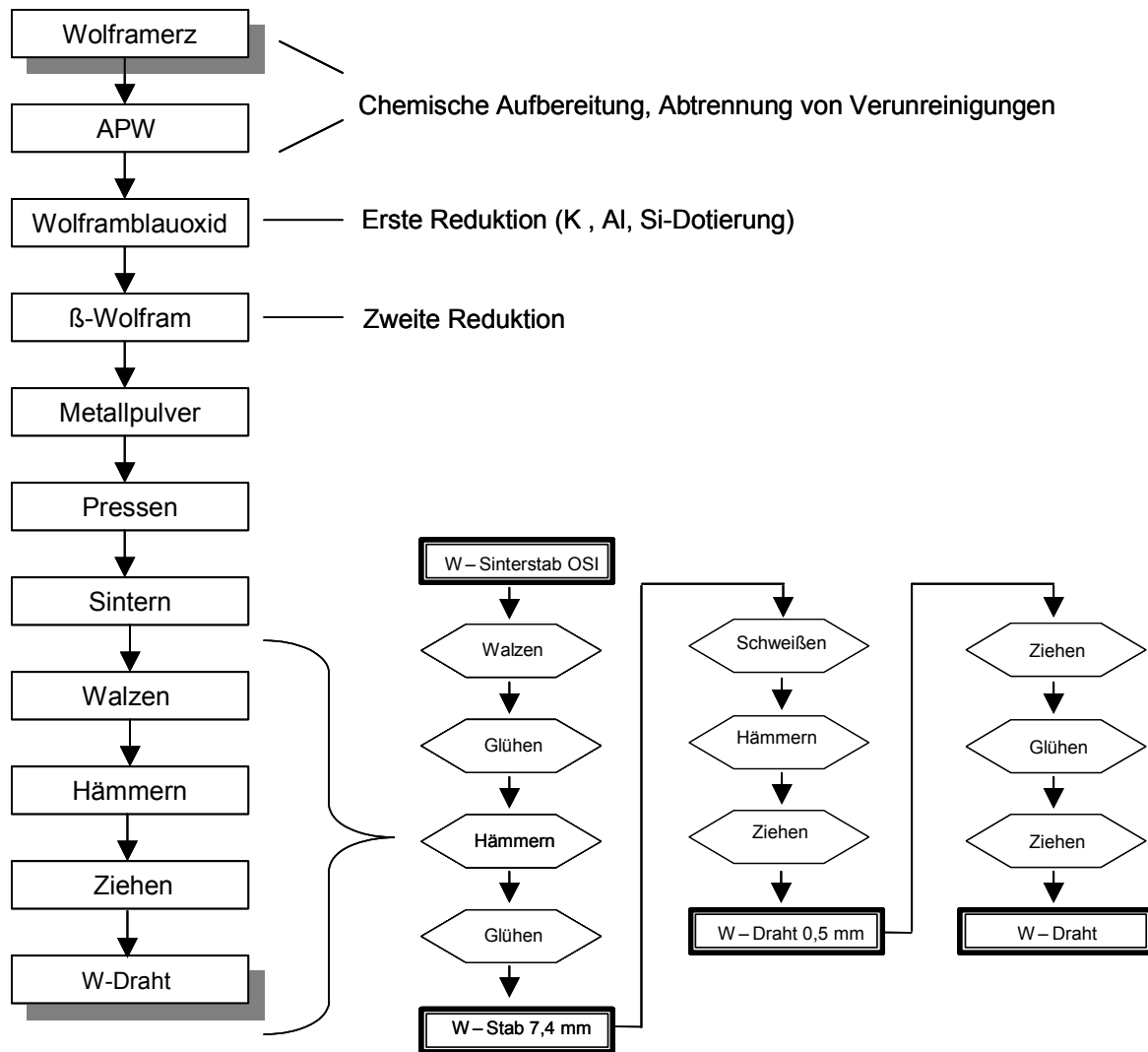


Abbildung 7-3: Herstellung von Wolframdraht

7.3.1.1 Technologie der Wolframdrahtherstellung

7.3.1.2 Aufbereitung von Wolframpulver

Wolframerze wie Wolframit oder Scheelit sind die Ausgangsmaterialien zur Gewinnung von Wolfram. Die Wolframerze werden zunächst durch Flotation angereichert. Danach erfolgt der Aufschluss der Erze durch Schmelzen mit Soda. In diesem Prozess bildet sich das wasserlösliche Wolframat. Nach wässriger Extraktion fällt im Säuren das Hydrat des Wolframtrioxids aus, welches abfiltriert wird. Durch Zusatz ammoniakalischer Lösung entsteht ein Komplex namens Ammonium- Parawolframat [80].

Da die hohe Reinheit des Wolframs für die ganze Prozesstechnologie von Bedeutung ist, werden in den ersten Produktionsschritten während der pulvermetallurgischen Prozesse

(vom Wolframerz über Ammoniumparawolframat bis Ammoniumwolframbronze) die vollständige Entfernung der Verunreinigungen erreicht.

Ammoniumparawolframat (APW) ist als Rohstoff für die Pulverherstellung geeignet, weil man das Metallpulver durch nur zwei Reduktionsschritte erreichen kann. Dieses APW wird in einem ersten Reduktionsschritt zu Ammoniumparawolframat-Tetrahydrat umgewandelt. Das APW (Menge um 1 kg) wird in einem Schiffchen im Laufe von drei Stunden durch einen 450 °C heißen Rohofen geschoben. In diesem Schritt entsteht das gut kristallisierbare Ammoniumparawolframat-Tetrahydrat (APT).

Aus dem APT wird durch eine zweitstufige Reduktion- erste mit Formiergas und zweite mit Wasserstoff - ein metallisches Wolframpulver hergestellt. Die erste Reduktion über einen Temperaturbereich von 430 °C bis 600 °C ergibt ein „blaues Wolframoxid“.

7.3.1.2.1 Dotierungsprozess

Durch den nächsten Produktionsschritt der Wolframdrahtherstellung - die so genannte Dotierung - wird die Stabilisierung des Drahtes erreicht, welche einen direkten Einfluss auf die Lebensdauer der Wendel hat. Dieser Prozess hat eine lange Geschichte in der Herstellung des Wolframdrahtes.

Erst nach einer Zufallsentdeckung von Pacz (1920) [81], der zur Wolframdrahtherstellung eine so genannte „gefeuerte Säure“ verwendete, konnte ein W-Draht hergestellt werden, der im Glühzustand nicht durchhing. Als „gefeuerte Säure“ bezeichnet man ein WO_3 , das über einen längeren Zeitraum in keramischen Tiegeln der Marke Battersea bei ca. 830 °C geglüht wurde, wobei die Tiegel unter anderem K, Si und Al enthielten und dies an das Wolfram in kleinen Mengen als Dopelemente abgaben. Im deutschen Sprachgebrauch wird K-, Al- und Si- dotiertes Wolfram als BSD-Wolfram (Battersea doped-Wolfram) und im internationalen als NS-Wolfram (Non Sag-Wolfram) bezeichnet. Bis heute wird das blaue Wolframoxid mit empirisch ermittelten Mengen an Kaliumsilikat- und Aluminiumsalzlösungen dotiert, um dem Wolframdraht die notwendige Hochtemperaturformstabilität zu geben. Die auf das Gefüge im BSD-Draht wirksamen Substanzen konnte erst in den 70er Jahren identifiziert werden. Mit transmissions-elektronenmikroskopischen Methoden gelang es elementares Kalium nachzuweisen, das in submikroskopischen Bläschen, sogenannten „Bubbles“, eingeschlossen ist [82].

Als Dopung bezeichnet man den Einbau von Dotierungselementen (K, Al, Si) in Form von wässrigen Lösungen (Aluminiumnitrat, Kaliumsilikat). Von größter Bedeutung ist Kalium.

Durch seine Unlöslichkeit im Wolframtgitter bilden sich kleinste Kaliumnester im Grundmaterial, die durch den Ziehprozess in Drahtachse ausgerichtet werden, später eine Ausbildung von Kristallen in dieser Richtung begünstigen und schließlich die Wendel stabilisieren [85]. Die Reduktion des Wolframpulvers mit Wasserstoff bei niedrigen Temperaturen (450-575 °C) wird in der Literatur als direkte Methode zur Herstellung von reinem β -Wolfram (sog. "primäres β -W") beschrieben [83, 84]. Sobald das Wolfram sich in der β -Phase befindet, ist der Einbau von Kalium möglich. Durch die Reduktion, unter dem Wasserstoff bei der Temperatur zwischen 800 bis 900 °C wird das Kalium in der β -Phase des Wolframs in die α -Phase eingeschlossen. Das β -Wolfram wird in diesem Prozess zu einem BSD-Wolframpulver reduziert. Bei diesem Verfahren ist laut der Quelle eine niedrige Schütthöhe (2 mm bis 3 mm) des Ausgangspulvers in dem Reduktionsschiffchen wichtig [85]. Weiterhin ist die Verwendung von trockenem Wasserstoff besser geeignet, als von bis dahin oft verwendeten feuchten Wasserstoff [86].

7.3.1.2.2 Pressen und Sintern

Das gedopte Wolframpulver wird zu ca. 3,5 kg schweren Stäben gepresst. Dieser Pressstab ist mechanisch aber noch sehr labil und muss vor der weiteren Verarbeitung stabilisiert werden (Prozess der Vorsintern). Erst dann erfolgt der richtige Sinterprozess in der so genannten Sinterglocke unter Wasserstoffstrom und bei einer Temperatur von ca. 1100 °C. Der Wolframstab wird nahe des Schmelzpunktes gesintert (dieser Prozess erfolgt zwischen zwei Elektroden und ist sehr energieintensiv). Durch die hohe Temperatur bekommen die Stäbe eine ausreichende mechanisch/thermische Stabilität. Nach dem Sintern besitzt der Wolframstab ca. 90 % der theoretischen Dichte von Wolfram.

7.3.1.2.3 Hämmern, Walzen und Ziehen

In diesem Prozessschritt werden die gesinterten Wolframstäbe (\varnothing 20 mm; 3,5 kg) durch Walzen und Hämmern weiter umgeformt und bearbeitet. Zwischen diesen Arbeitsschritten erfolgt der Prozess der Glühung (Zwischenglühung), welcher zum Ziel hat, die möglichst homogene Struktur eines Kristalls (Einkristall - die Grenzen zwischen den Kristallen sollen möglichst zusammengewachsen sein) zu bilden. Sobald die Stäbe einen Durchmesser von 3,6 mm erreicht haben, beginnt das Ziehen des Materials. Dieses erfolgt auf den so genannten Ziehmaschinen, die mit Ziehsteinen, die aus Hartmetall bzw. Polykristallinen Diamanten oder Naturdiamanten bestehen, ausgerüstet sind. Die Ziehsteine haben eine bestimmte Ziehformung (Öffnungsform). Die ersten Ziehstufen erfolgen auf Maschinen, die

mit nur einem Ziehstein ausgerüstet sind, ab 0,5 mm Durchmesser auf Bänken, die bis zu acht Ziehstufen in einem Ziehvorgang vereinen. Die Temperaturen des Drahts während des Ziehens im Stein liegen je nach Drahtdurchmesser zwischen 400 und 1000 °C. Ein Ziehsteindurchgang verringert den Querschnitt des Drahts am Anfang des Ziehprozesses um 40 %, am Ende um 10 % [86].

Nach dem mehrfachen Zieh- und Glühprozess entsteht ein BSD-Wolframdraht, der noch eine Graphit-Oxidschicht auf der Oberfläche besitzt („schwarze“ BSD-Drähte). Da bei der Wendelherstellung die so genannten „blanken BSD-Drähte“ gebraucht werden, muss die Graphit-Oxidschicht abgetragen werden. Dieser Prozess erfolgt mit Hilfe der elektrolytischen Abtragung sowie Glühung unter H_2 [Abbildung 7-4].

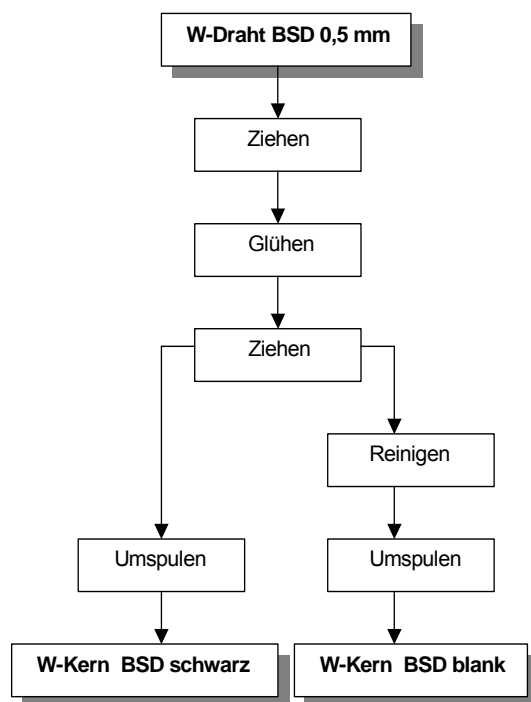


Abbildung 7-4: Herstellung von W-Kern BSD-schwarzen Drähten und W-Kern BSD blanken Drähten

7.3.2 Molybdän-Eigenschaften und Herstellungsverfahren

Das Molybdän wird in der Lampenindustrie als Kerndraht zum Wickeln der Wolframwendel sowie als Halterdraht in der Lampe zur mechanischen Unterstützung langer Wendeln benötigt [86]. Für die Verwendung als Kerndraht ist Molybdän wegen seiner Reinheit sowie hohen Warmfestigkeit besonders geeignet. Molybdän besitzt mit 2890 °K einen relativ hohen Schmelzpunkt gegenüber anderen Metallen. Durch diese Eigenschaften wird Molybdän mit dem Wolfram während der Glühung nicht legieren. Auch die Möglichkeit, dieses Metall auf

dem chemischen Wege aus der Wolframwendel zu entfernen, ist für die Anforderungen der Herstellungsverfahren von Bedeutung. Die pulvermetallurgische Herstellung des Kerndrahtes-Walzen, Hämmern, Ziehen verlaufen ähnlich wie bei der Wolframdrahtherstellung. Molybdän wird mit Kalium gedopt, mit unterschiedlichen Mengen je nach dem Verwendungszweck.

7.3.2.1 Technologie der Molybdändrahtherstellung

Das Molybdän wird aus dem Molybdänoxid durch zwei Reduktionsschritte zu Metallpulver gewonnen. Der Prozess der Dotierung erfolgt mit dem Kaliumsilikat und Aluminiumnitrat. Um aus dem Metallpulver die Drähte herzustellen, müssen nacheinander folgende Prozesse der Pressen, Sintern, Walzen, mehrfaches Zwischenglühen sowie Ziehen erfolgen. Molybdändrähte werden ähnlich wie die Wolframdrähte in der Form von „schwarzen“ Drähten hergestellt und weiter zu den „blanken“ bearbeitet. Bei den blanken Drähten ist die Oberfläche des Drahtes durch elektrolytischen Abtrag oder Glühung von Oxid und Graphit gereinigt. Molybdän zeigt abhängig vom Reinigungsverfahren unterschiedliche Oberflächenrauigkeiten [Abbildung 7-5].

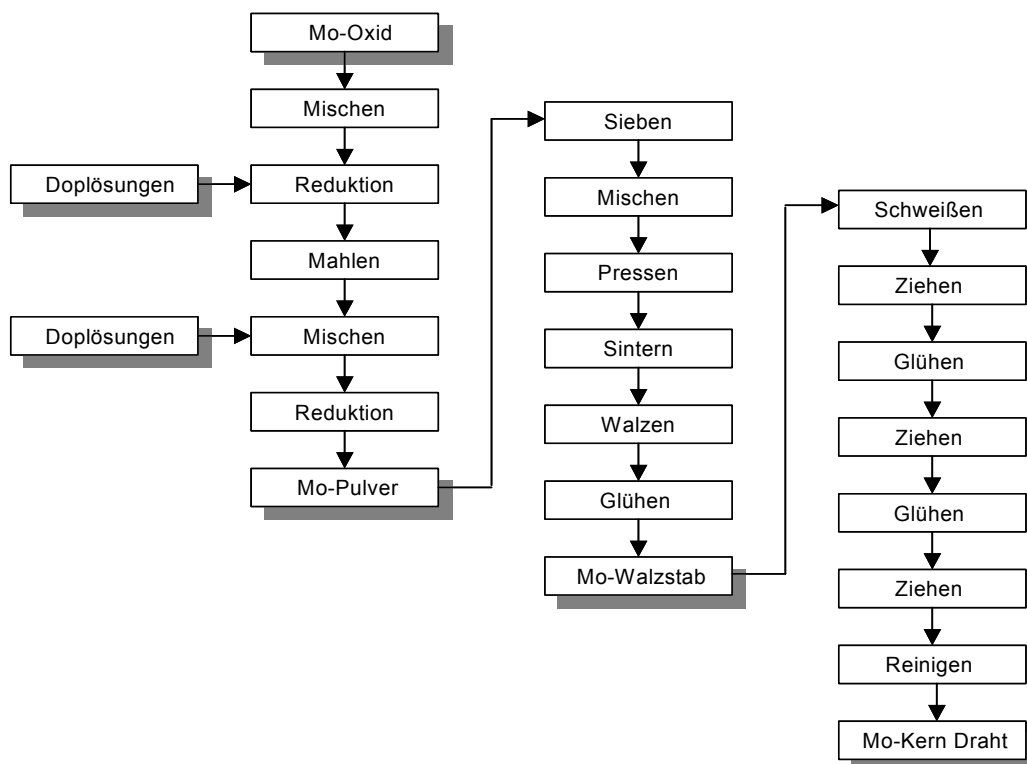


Abbildung 7-5: Herstellung von Molybdän-Kern Draht

7.3.3 Technologie der Wendelherstellung

Die Wendeln werden in verschiedenen Abmessungen und Formen hergestellt, je nach Lampentyp und Wattage. Die Entwicklung der so genannten Elektrodenwendel erfolgt von der Einfachwendel über die Doppelwendel bis hin zur Tripelwendel / Stabwendel.

Die Doppelwendel ist dank der Idee entstanden, den einfachen Draht noch mal wickeln zu können. Der Zweck ist die Erhöhung der Lichtausbeute durch die kleinere wirksame Oberfläche der Wendel und die damit verbundenen geringeren Wärmeverluste. Außerdem konnten auch die Abmessungen der Glaskolben verringert werden [85].

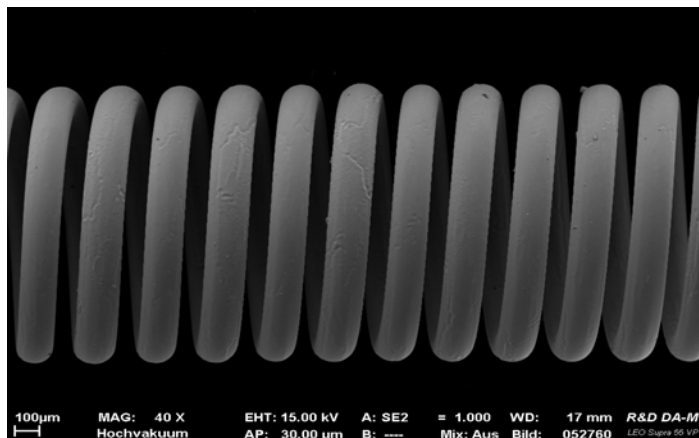


Abbildung 7-6: *Einfachwendel*
Quelle: OSRAM GmbH

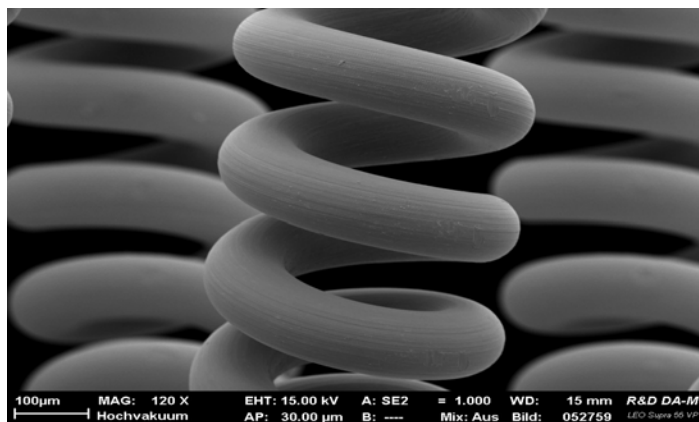


Abbildung 7-7: *Doppelwendel*
Quelle: OSRAM GmbH

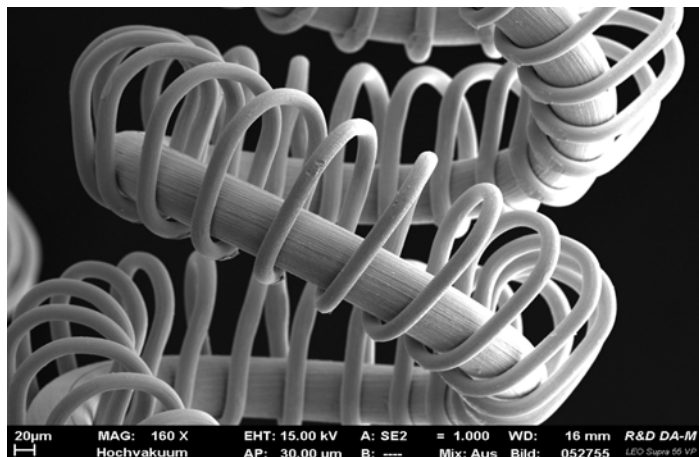


Abbildung 7-8: *Dreifachwendel*
Quelle: OSRAM GmbH

Für den Bau der Entladungslampen werden häufig (z. B. für T5-Leuchtstofflampe) Tripelwendeln eingesetzt. Die Tripelwendeln sind im Prinzip Doppelwendeln, die mit einem ca. 12 bis 24 μm feinen W-Draht lose umwickelt sind. Die Umwicklung hilft, das später aufgebrauchte Emittermaterial mechanisch besser in der Wendel zu halten, so dass es nicht während der Zündvorgänge aus der Wendel geschleudert wird.

Die Stabwendel (Flachstabwendel für T8-Leuchtstofflampe) ist eine Weiterentwicklung der Tripelwendel mit gleichen Qualitätsdaten, aber vereinfachtem Aufbau, bei der die Korbwirkung der Umwicklung weiter optimiert wurde. Für zwei in dieser Arbeit zu betrachtenden Leuchtstofflampentypen unterscheiden sich die Wendeln in Bauform und Produktionsverfahren. Das Metall (Molybdän oder Eisen) muss die hohen Temperaturen der Glühung aushalten und kann dabei mit dem Wolfram keine Legierung bilden.

Die Flachstabwendel werden auf einem Eisenkern gewickelt, die Triplewendeln erst auf Molybdänkern, später noch über einen weiteren Kern (so genannten Maschinenkern, der auch aus Molybdän besteht) weiter verarbeitet. Nach dem Wickelvorgang müssen Wendeln aus strukturtechnischen Gründen und zwecks Auslösung der mechanischen Spannungen auf dem Kern gegläht werden. Dabei sind Temperaturen notwendig, welche die Verwendung von hochschmelzendem Metall als Kerndraht erforderlich machen. Um den Kern aus der Wendel zu lösen, muss ein Beizprozess in Säuren stattfinden. Die auf den Mo-Kern gebrachten Wendeln werden mit Mischsäure (Mischung aus Salpetersäure, Schwefelsäure und Wasser) ausgebeizt. Die Eisenkerne lassen sich mit der Salzsäure auslösen.

Beim ersten Einschalten der Lampe bei Temperaturen von über 2000 °C, findet in der Wendel der Prozess der Rekristallisation statt. Die vielen einzelnen Bereiche des Wolframdrahtes vereinigen sich zu wenigen einkristallinen Bezirken, die zusammen gewachsen sind. Hier spielen die im Drahtzug gebildeten Blasen, die mit Kalium gefüllt sind, eine wichtige Rolle. „Die Wendel erscheint - bei geringeren Durchmessern - wie aus einem Wolfram-Einkristall herausgeschnitten“ [83].

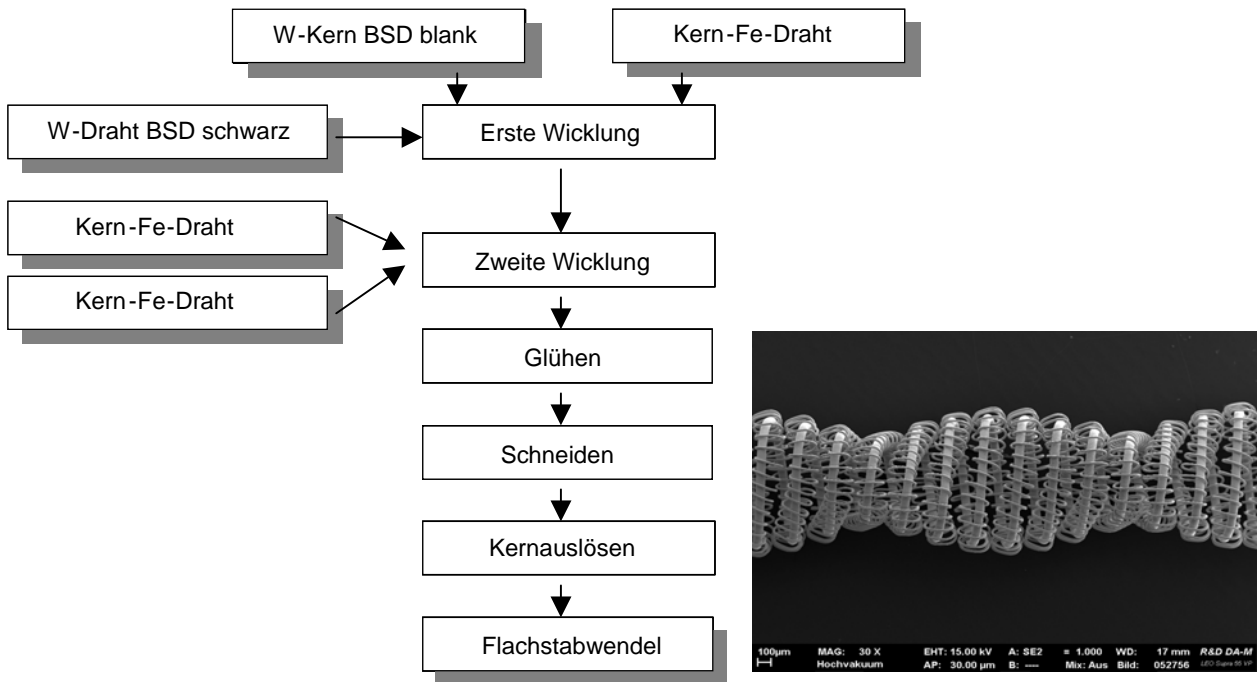


Abbildung 7-9: Herstellung der Flachstabwendel und Bild der Flachstabwendel
Quelle: OSRAM GmbH

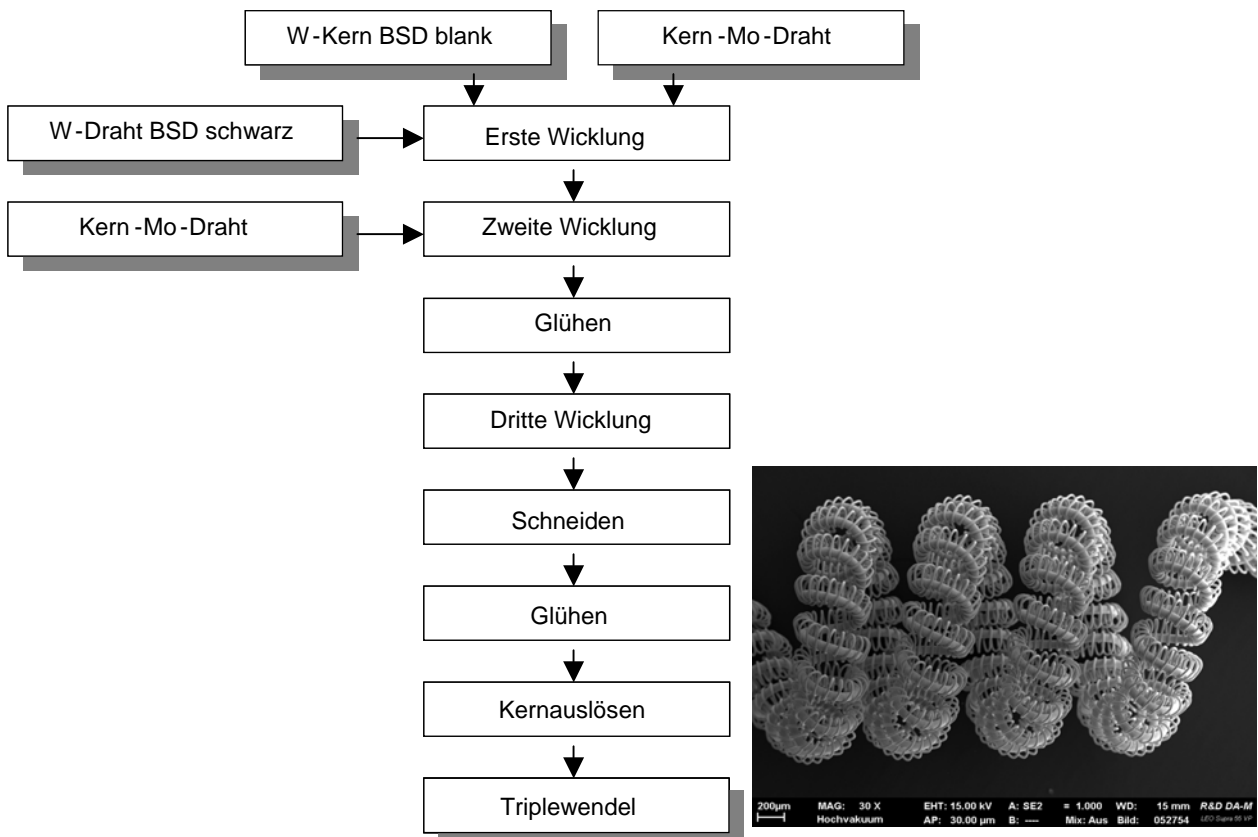


Abbildung 7-10: Herstellung der Triplewendel und Bild der Triplewendel
Quelle: OSRAM GmbH

7.4 Sockelkitt

7.4.1 Funktionen des Sockelkitts

Die Funktion des Kittes beim Lampenbau gewährleistet eine dauerhafte Verbindung zwischen Glas und Sockel. Der Kitt muss Wärme und Feuchte sowie der mechanischen Beanspruchung der Lampe widerstehen und gewährleisten. Sehr wichtige Eigenschaft ist, dass bei Erwärmung der Lampe keine Spannungen zwischen Glas und Metall auftreten.

Die in den Kitten enthaltenen Stoffe sind im Rahmen der Herstellung nach einer bestimmten Rezeptur gemischt. Durch Veränderung dieser Rezeptur können die Kittes an die Anforderungen der Lampe sowie den bei der Lampenfertigung verwendeten Maschinen angepasst werden. Da die Härtung des Kittes nicht nur unter Erhitzen (ca. 200 °C), sondern auch bei Raumtemperatur stattfindet, ist es wichtig, innerhalb einer bestimmten Zeit den Sockelkitt im Lampenbau zu verarbeiten. Wenn die entsprechende Zeitspanne nicht eingehalten werden kann, sind die Eigenschaften des Kittes nicht mehr gewährleistet und der Kitt kann nicht mehr verarbeitet werden.

7.4.2 Systembeschreibung und Herstellungsschritte von Kitt

Kittes entstehen aus einem Gemisch aus Füllstoffen wie Calciumcarbonat, Harzen (Phenolharz), flüchtigen Lösemitteln (Ethanol) und Weichmacher. Alle Schritte des Herstellungsprozesses wurden in die Sachbilanz aufgenommen. Der Transportweg in die Leuchtstofflampenfertigungsstelle ist auch im Rahmen der Untersuchung erfasst.

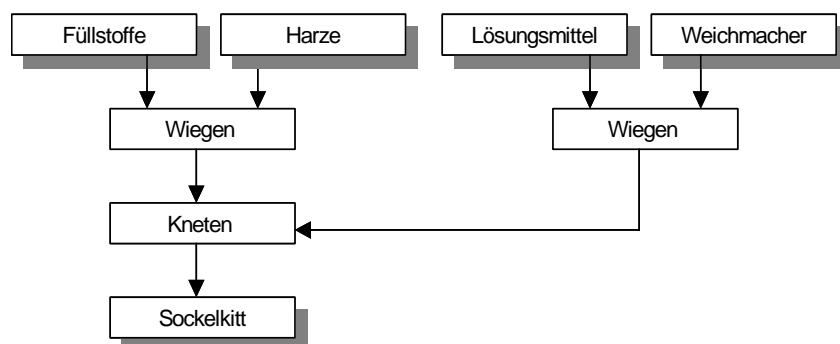


Abbildung 7-11: Herstellung von Sockelkitt

7.5 Metalle im Lampenbau

7.5.1 Sockelhülse

Der Sockel ermöglicht eine sichere Kontaktierung zwischen der Wendel und den Stromzuführungen. Diese Verbindung zwischen den Elektroden (Stromzuführungen), die durch die Kontaktstifte an den Strom angeschlossen sind, und dem Glaskolben soll dauerhaft sein. Das Einbringen des Sockels gibt der Lampe die geometrischen Eigenschaften, so dass der Einsatz der Lampe in die Leuchte problemlos erfolgen kann. Da der Sockel gegen atmosphärische Einflüsse stabil bleiben muss, ist ein korrosionsbeständiges Metall-Aluminium einzusetzen. Hier wird ein dünnes Aluminiumband verwendet. Die Form der Sockelhülse wird mit Hilfe der Stanzen erreicht.

Die Daten zur Bilanzierung dieses Prozesses sind mit Hilfe der Fertigungsdaten zusammengestellt. Die Informationen bezüglich der Herstellung des Aluminiumbandes sind aus der Datenbank entnommen.

7.5.2 Stromzuführungen, Mittelstütze und Kontaktstifte

Stromzuführungen sind Metalldrähte, die in dem Pumpstängelglas eingeschmolzen sind. Sie bilden den Halt für die Wendel, die zwischen den beiden Drähten gespannt ist. Die Stromzuführung ist aus drei Teilen zusammengeschweißt. Die Leitungsstücke, die an die Wendel angeschlossen sind, werden als Elektroden bezeichnet. Mit den Elektroden ist ein Dichtungsdraht verbunden, der vollständig und dicht mit dem Pumpstängelglas eingeschmolzen ist. Der dritte Teil der Stromzuführung ist die Sockelleitung, die den Dichtungsdraht mit dem Sockel verbindet. Die Elektrode der Stromzuführung besteht aus manganlegiertem Nickeldraht, die Dichtung aus Eisendraht und die Sockelleitung aus einem kupferlegierten Stahldraht.

Ein weiterer Draht, der auch zum Gestell gehört ist die Mittelstütze. Dieser ist ein aus Nickel bestehender Haltedraht.

Die Kontaktstifte ermöglichen das Einsetzen von Stromzuführungen an die Stromquelle. Diese sollen auch das möglichst einfache Auswechseln von Lampen in der Leuchte gestatten. Die Kontaktstifte sind aus Messing hergestellt.

Die Sachbilanz von Stromzuführung, Mittelstütze und Kontaktstifte wurde mit Hilfe der Literaturdaten erstellt.

7.5.3 Emitter

7.5.3.1 Eigenschaften und Funktion des Emitters

Unter Emitter sind oxidische Verbindungen verschiedener Erdalkalimetalle zu verstehen, die im Lampenbau in Form von Suspensionen verarbeitet werden. Chemisch gesehen sind Emitter Erdalkalicarbonate, die in einem mehrstufigen Prozess aus Kaliumnatriumtartrat und den Erdalkalinitraten hergestellt werden. Durch verschiedene Prozesse und hohe Temperatur wird der Emitter aktiviert (formiert). Das erste Glühen der Wendel bewirkt erst eine chemische Umwandlung der Emitter, „die wegen ungenügender Luftbeständigkeit der Oxide als Karbonatgemisch auf die Wendel gebracht werden. Die Oxide bilden sich aus den Karbonaten durch Abgabe von CO_2 . An diesen chemischen Prozess schließt sich ein physikalischer an, bei dem die zunächst stöchiometrischen Erdalkalioxide in einen n-leitenden Emitter mit niedriger Elektronenausstrittarbeit überführt werden. Dies geschieht dadurch, dass eine geringe Wolframmenge der Wendel mit einem Teil des Sauerstoffs der Erdalkalioxide zu WO_3 reagiert, was effektiv zu einem Überschuss von Erdalkaliatomen im Emitter und zum gewünschten Elektronenüberschuss (n-Leitung) führt“ [82]. Obwohl die Menge des Emitters für den Leuchtstofflampenbau verschwindend gering ist, beeinflusst er verschiedene Lampeneigenschaften, vor allem die Lebensdauer der Lampe in erheblichem Maße.

7.5.3.2 Technologie der Emitterherstellung

Der Emitter entsteht in einer Reihe von vielen chemischen Prozessen- Fällung, Trocknung, Glühung und Mahlung von Kaliumnatriumtartrat und Erdalkalinitraten. Alle sind in die Bilanz miteinbezogen worden. Obwohl die Menge von Emittlern in der Leuchtstofflampe so gering ist, kann die mehrstufige Herstellung auf die Ergebnisse der Sachbilanzen von Bedeutung sein. Da bei der Herstellung von Strontiumcarbonat das Abwasser mit den Nitraten belastet wird, sollte auf die ökologische Bewertung von Emitterpaste nicht verzichtet werden.

7.5.4 Quecksilber im Lampenbau

7.5.4.1 Funktionen des Quecksilbers

Das Quecksilber spielt eine entscheidende Rolle in der Entladungstechnik. Die fast vollständige Umwandlung der UV-Strahlung in sichtbare Strahlung ist durch die Anregung des Leuchtstoffes von Quecksilber-Atomen möglich. Die langjährige Entwicklung der Leuchtstofflampe war von allem mit der Reduzierung des Quecksilbergehalts verbunden.

Aus der vor 30 Jahren in die Lampe eingesetzten Quecksilbermenge ist noch weniger als 10 % der Menge vorhanden [Abbildung 7-12].

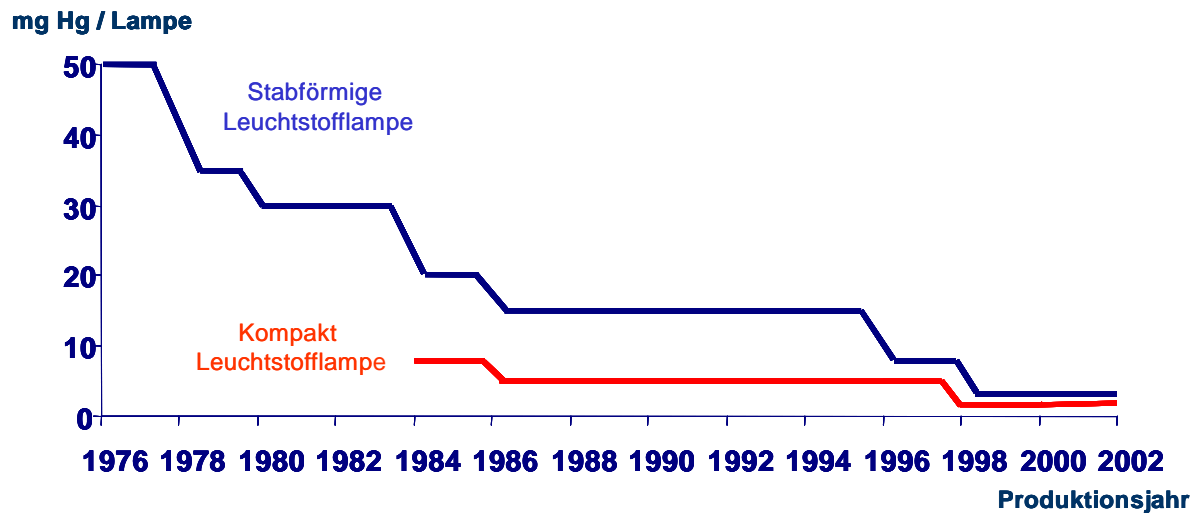
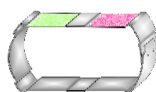


Abbildung 7-12: Minimierung des Quecksilbergehalts in Leuchtstofflampen
Quelle: OSRAM GmbH

Auch die Art der Dosierung hat sich geändert. Das Quecksilber wird bei modernen Leuchtstofflampen nicht mehr flüssig dosiert, sondern nur als dünne Beschichtung auf einem Stahlband eingesetzt. Diese Art der Dosierung ist mit zwei Vorteilen verbunden - die Menge des Quecksilbers kann auf ein Minimum begrenzt werden. Weil das Metall am Band fest gebunden ist und erst in der fest verschlossenen Lampe durch Erhitzen freigesetzt wird, fallen bei der Herstellung keine Arbeitsplatzemissionen an [Abbildung 7-13].



- | | |
|---|---------------------------------|
| + kostengünstig | - 10- fache Kosten |
| - Dosierung von Kleinstmengen aufwendig | + Dosierung einfach |
| + Recycling Alt-Hg einfach | - Recycling nicht möglich |
| - Emissionen → Filteranlage | + Emissionen vernachlässigbar |
| - Arbeitsplatzbelastung | + Arbeitsplatzbelastung minimal |
| + für alle Lampen | + für alle Lampen |

Abbildung 7-13: Möglichkeiten der Quecksilberdosierung in der Leuchtstofflampe
Quelle: OSRAM GmbH

7.5.4.2 Eigenschaften des Quecksilbers und deren Vorkommen

Quecksilber ist in seiner metallischen Form bei Raumtemperatur flüssig. Der Schmelzpunkt von Quecksilber liegt bei $-38,9\text{ °C}$ und der Siedepunkt bei 357 °C . Quecksilber besitzt einen hohen Dampfdruck von $0,16\text{ Pa}$ bei 20 °C . Quecksilber bildet mit fast allen Metallen Amalgame. Der elektrische Widerstand von flüssigem Quecksilber ist für ein Metall außergewöhnlich hoch [87]. Seit der Entstehung der Erdatmosphäre vor ungefähr vier Milliarden Jahren haben natürliche Quecksilberquellen wie Erosion und vulkanische Tätigkeiten zu einer ubiquitären Verteilung von Quecksilber in der Ökosphäre geführt. So sind auch heute noch geogene Quellen mit einem Anteil von ca. 60% an der Gesamtemission die größten Emittenten von Quecksilber. Seine Verteilung ist nicht homogen, größere Mengen sind nur in bestimmten Gebieten zu finden, die Hauptform des Vorkommens sind Sulfide [88].

7.5.4.3 Toxizität der Quecksilberverbindungen

Die toxischen Wirkungen des Quecksilbers sind abhängig von der chemisch-physikalischen Form, in der das Schwermetall vorliegt. Hg (II) ist deutlich toxischer als Hg (I) und elementares Quecksilber. Die anorganischen Quecksilberverbindungen sind aber weit weniger giftig als organische, wie z. B. Methylquecksilber. Die Toxizität hängt allgemein von der Lipophilie der entsprechenden Hg-Spezies ab. Die Toxizität von Quecksilber ist auch von der jeweiligen Zustandsform anhängig. So ist Hg-Dampf bedeutend gefährlicher als elementares Quecksilber. Zielorgane bei Vergiftungen mit anorganischem Quecksilber sind hauptsächlich das Nervensystem einschließlich des Gehirns sowie die Nieren. Organische Quecksilberverbindungen sind aufgrund ihrer hohen Lipophilie äußerst toxisch. Sie reichern sich besonders in Fettgewebe und Muskeln an und können schwere Schäden des Zentralnervensystems hervorrufen. Darüber hinaus wirken sie stark embryotoxisch und teratogen [89].

Da die Lampenindustrie mit metallischem Quecksilber arbeitet, werden dessen wichtigste Eigenschaften und Auswirkungen bezüglich der Toxizität kurz beschrieben. Metallisches Quecksilber ($p=13,6$) besitzt bei Raumtemperatur einen im Vergleich zu anderen Metallen hohen Dampfdruck: ($0,16\text{ Pa}$). Die Dampfsättigung der Luft ist mit ca. 15 mg/m^3 (entspr. $1,8\text{ ml/m}^3$) erreicht. Diese Konzentration reicht aus, um eine chronische Vergiftung auszulösen [88]. Das Resorbieren von Quecksilber entsteht vor allem durch die Lunge (Dämpfte), aber auch durch die Haut kann das Metall in die Gewebe eindringen. Anhand von Studien und

forensischer Analysen an tödlich Vergifteten wurde festgestellt, dass sich anorganisches Quecksilber am stärksten in den Nierenrinden, weniger in der Leber anreichert. Als Dampf aufgenommenes elementares Quecksilber findet sich außerdem in relativ hoher Konzentration im Nervengewebe. Hauptausscheidungsorgane wasserlöslicher Substanzen sind die Nieren [88].

Organische Quecksilberverbindungen zeigen für die Menschen eine höhere Toxizität als anorganisches Quecksilber. Methylquecksilber ist für Mensch und Ratte deutlich toxischer als anorganisches Quecksilber(II) chlorid. Die akute Vergiftung durch organische Quecksilberverbindungen ist durch Reizerscheinungen des ZNS gekennzeichnet, wie Unruhe, psychomotorische Erregung, Tremor, Einschränkung aller sinnlichen Wahrnehmungsqualitäten, Krämpfe und schließlich Lähmungszustände. Je nach Höhe und Dauer der Stoffaufnahme gibt es alle Übergänge zur chronischen Vergiftung, die in wesentlichen Zügen mit den anorganischen Verbindungen oder metallischen Quecksilber übereinstimmen [88].

Das Quecksilber besitzt die Eigenschaften, sich im Organismus anzureichern (Bioakkumulation). Die höchste Akkumulation für Quecksilber wurde im aquatischen Bereich gefunden. Der Anstieg von Quecksilberkonzentration in der Nahrungskette im aquatischen Bereich ist bewiesen worden. Je nach der chemischen Verbindung, in der das Quecksilber verfügbar ist, sammelt es sich in verschiedenen Ökosystemen. In der Nahrungskette im Meer ist das Plankton die erste Stufe, in der Quecksilberverbindungen aufgenommen und konzentriert werden. Berichten zufolge beträgt der biologische Konzentrationsfaktor von der Stufe der Algen bis zur Stufe der Raubfische (z. B. Hechte, Thunfische und Haie) bis zu 1:100 000¹⁵⁵. Ein Beispiel für die Auswirkungen des natürlich vorkommenden Quecksilbers in den Ozeanen sind die außergewöhnlich hohen Quecksilberkonzentrationen im Blut von Grönländern, die täglich größere Mengen Fleisch von Meeressäugern verzehren [90].

7.5.4.4 Quecksilber in der Umwelt

Gegenüber anderen Spurenmetallen weist das Quecksilber die Besonderheit auf, dass es sowohl durch anthropogen verursachte als auch natürlichen Emissionen in beträchtlichem Maß in die Atmosphäre gelangt [91]. Man schätzt, dass von den gesamten Quecksilberemissionen nur 20 % anthropogener Herkunft sind, 80 % kommen aus natürlichen Quellen, wie z. B. Vulkane oder Ozeane [92]. Die wichtigsten Verursacherbereiche für die anthropogenen Emissionen in Europa sind: Verbrennung fossiler Brennstoffe, Chlor-Alkali-

Elektrolyse, Müllverbrennungsanlagen und Verhüttung von Nichteisenmetallen [91]. Die größten Quecksilber-Emissionsquellen überhaupt sind die Kohlenfeuerungsanlagen. Die Kohlenverbrennung macht mit ca. 60-70 % den größten Teil der gesamten Quecksilberemissionen aus. Zwischen 1990 und 2000 sank dank einer ganzen Zahl an durchgeführten Maßnahmen die Quecksilberemission in Europa um 60 % [93].

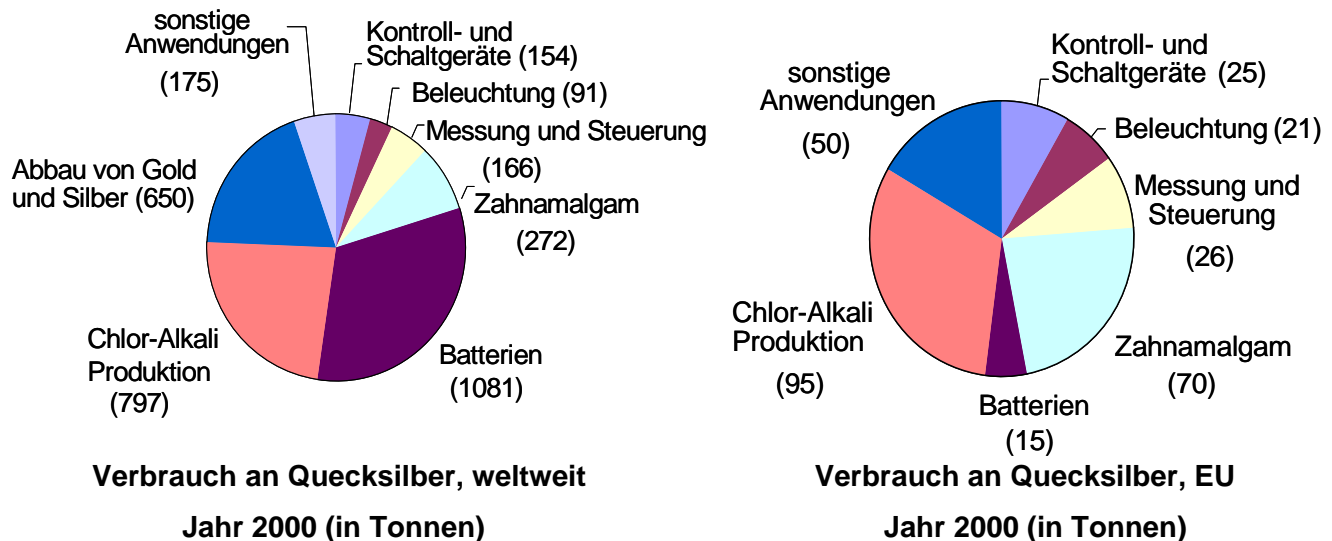


Abbildung 7-14: Globaler und Europäischer Verbrauch an Quecksilber im Jahr 2000
Quelle: [94]

In Europa lag der Bedarf an Quecksilber im Jahre 2000 in der Lichtindustrie bei 5,9 %, der globale Bedarf liegt für Beleuchtung bei 2,6 %. Da 70 % der gesamten Quecksilberemissionen aus Stromerzeugung und Müllverbrennungsanlagen verursacht werden, sind Maßnahmen besonders in diesen Bereichen zu treffen. Mit der erwarteten erheblichen Erhöhungen des Stromverbrauches in den kommenden Jahren, vor allem in Asien, ist zugleich eine Erhöhung von Quecksilberemissionen zu erwarten.

7.5.4.5 Quecksilber - ein lokales und kein globales Problem

Die Wirkung des Metalls Quecksilber stellt sich als ein lokales Problem dar. Die ganze Reihe an ernstesten Quecksilbervergiftungen ist auf in Nahrungsmitteln kumuliertem Quecksilber zurückzuführen. Zu den bekanntesten Vergiftungen mit Quecksilber kam es in den 60er in Japan und in den 70er Jahren im Irak. In Japan wurden über mehrere Jahre anorganische Hg-Verbindungen ins Meer geleitet. Das Quecksilber wurde methyliert, hat sich in der

Nahrungskette angereicht und gelangte mit der Nahrung (Fisch) in den menschlichen Körper, wo es sich akkumuliert hat (Minimata - Krankheit). Im Irak sind mehrere Hunderte Personen gestorben, nach dem sie Brot, das aus mit Quecksilbersalz gebeiztem Saatgetreide hergestellt worden war, gegessen haben. Diese Fälle sind lokale Ereignisse, die durch das Unwissen hinsichtlich der Gefahren für die Menschen ausgelöst wurde. Darüber hinaus kann man nicht von einer globalen Bedrohung des Menschen durch zuviel Quecksilber in Luft und Wasser als unmittelbare Kontaktmedien sprechen.

8 Ökobilanz der Leuchtstofflampe

8.1. Technologie der Herstellung von Leuchtstofflampen

Die Herstellung der Leuchtstofflampe umfasst einen mehrstufigen Prozess, unter welchem die Herstellung der so genannten „Gestelle“ als erster Schritt zu verstehen ist [Abbildung 8-1].

Weiter findet die Beschlämmung des Glasrohres mit dem Leuchtstoff statt. Der Leuchtstoff wird in Form einer wässrigen Suspension in den Glaskolben eingespült, der überschüssige Leuchtstoff läuft aus dem senkrecht Lampenkolben ab. Nach dem die Kolben getrocknet sind, müssen organische Substanzen wie Binder und andere Zusätze der Leuchtstoffpaste entfernt werden.



Abbildung 8-1: *Gestelle auf dem Produktionsband* (Quelle: OSRAM GmbH)

Das geschieht, in dem die beschlammten Glaskolben ausgeheizt werden. Der nächste Schritt ist das Einschmelzen der Gestelle, deren Fertigung eine Reihe an Prozessen beinhaltet. Das Ausgangsprodukt für die Fertigung von Gestellen ist ein Glasrohr, aus dem der so genannten „Teller“ gefertigt wird, der mit Pumpstängel, Stromzuführungen und Mittelstütze zusammenschmolzen werden kann. Der nächste Schritt beinhaltet das Aufbringen der Wendel sowie das mit Quecksilber beschichtete Stahlband. Damit fertige Gestelle in den Glaskolben eingeschmolzen werden können, muss aus den Kolbenrändern der Leuchtstoff entfernt werden. Nach dem Einschmelzen der Gestelle erfolgt der Prozess des Pumpens mit Edelgasen wie Argon und Krypton. Ein wichtiger Schritt ist das Aktivieren (Formieren) von Elektroden. Danach wird der Sockel an der Lampe angebracht. Dieser besteht aus einer Aluminiumhülse, Kontaktstiften sowie einem Sockelplättchen, die zusammengenietet sind. Die Verbindung mit dem Lampenkolben wird mit Kitt erreicht. Nach dem Sockeln wird der Kitt zur Härtung ausgeheizt. Nach der Zündkontrolle werden die Lampen verpackt. Eine schematische Darstellung des Produktionsprozesses ist in der Abbildung 8-2 zusammengefasst.

Die gerade beschriebene Technologie ist typisch für die Herstellung von T8- Leuchtstofflampen. Die Fertigung von T5-Leuchtstofflampen ist im Prinzip gleich, unterscheidet sich jedoch in wenigen Schritten. In der T5-Leuchtstofflampenfertigung findet die so genannte

Schrägbeschlämmung statt. Die Unterschiede liegen vor allem in der Technologie der Leuchtstoffbeschlämmung. Die Leuchtstoffsuspension wird nicht wie bei der T8-Leuchtstofflampe in die vertikal stehenden Glaskolben eingespült. Die Glaskolben werden in einer schrägen Position mit der Leuchtstoffsuspension gefüllt. Durch die Schrägebandumdrehungen kann der überschüssige Leuchtstoff gleichmäßig aus den Kolben herausfließen. Ein weiterer Unterschied zwischen den beiden Verfahren liegt in der nachfolgenden Ausheizungstechnik. Im Fall der Fertigung von T5-Leuchtstofflampen wird die elektrische Energie statt dem Erdgas bei der Trocknung eingesetzt.

Man muss auch an dieser Stelle berücksichtigen, dass die Effektivität der Herstellungsverfahren, Höhe des Medienverbrauches sowie Ausschusses über die gesamte Produktionslinie, mit der Produktionsmenge und Zeitspanne des Fertigungslinienbetriebes in direktem Zusammenhang steht. Bei dem Betrieb jeder Produktionslinie werden in der Regel weitgehende Optimierungsschritte durchgeführt.

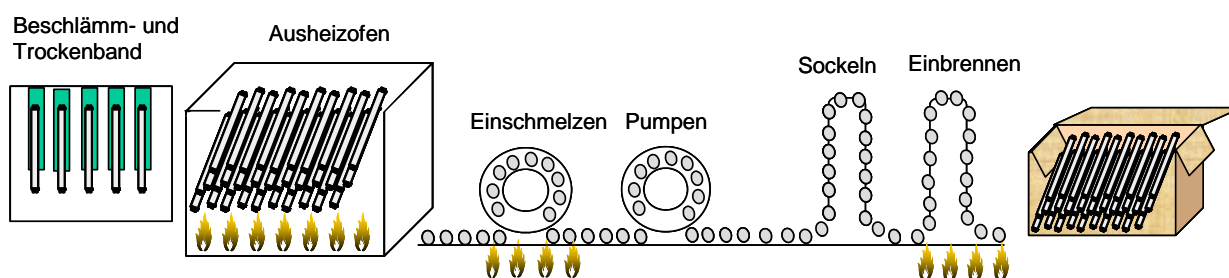


Abbildung 8-2: Schematische Darstellung der Herstellungsphase von Leuchtstofflampen

8.2 Sachbilanz

In der ersten Phase der Ökobilanz von Leuchtstofflampen erfolgte die Beschreibung der Systemgrenze sowie die Erhebung und die Aggregation der umweltrelevanten Daten. Der wichtigste Teil einer Ökobilanz, die Identifizierung und Quantifizierung der Daten, hat als Ziel die Abbildung des realen Stands der gesamten Herstellung von Leuchtstofflampen. Die Ergebnisse der Sachbilanzen können erst in Form der Wirkungskategorien dargestellt werden.

8.2.1 Modellierung der Herstellungsphase von Leuchtstofflampen [Systemgrenze]

Die Modellierung der Herstellungsphase beinhaltet in einem ersten Schritt die Festlegung der Systemgrenze für die Produktion von T8- und T5-Leuchtstofflampen. Die abgebildeten

Modelle erstrecken sich auf die Produktionsphase. Das Modell der Produktion von T8-Leuchtstofflampen ist in der Abbildung 8-3 dargestellt.

Die Modellierung der Herstellungsphase erfolgt anhand der produktionsspezifischen Daten. Die Erhebung der Daten für die Herstellungsphase ist sehr detailliert und erfolgt über alle Produktionsschritte. Für jede Komponente der Leuchtstofflampe wurde ein Bilanz erstellt mit dem Ziel, die Betrachtung ganzheitlich zu erstellen. Damit wird der Aufwand für die Herstellung aller Komponenten der Leuchtstofflampen mit einbezogen. Für jedes Modul, das sich außer der Systemgrenze befindet, sind die Ergebnisse der bereits beschriebenen Bilanzen für Leuchtstofflampenkomponenten entsprechend aggregiert.

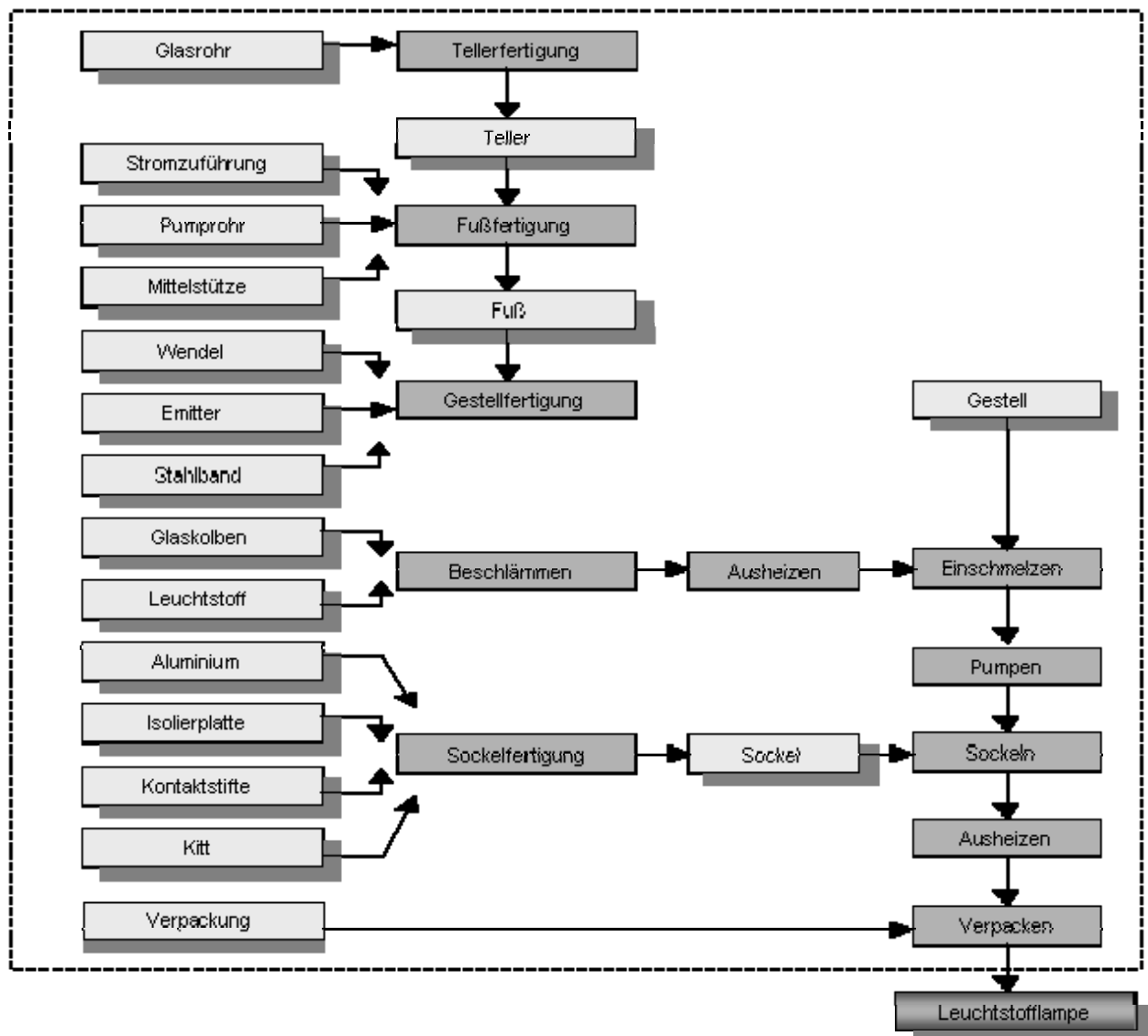


Abbildung 8-3: Die Systemgrenze der Fertigung von Leuchtstofflampen

8.3 Wirkungsabschätzungen der gesamten Herstellungsphase von T5- und T8-Leuchtstofflampen im Vergleich

Im Rahmen der ganzheitlichen Bilanzierung wurde die gesamte Herstellungsphase der beiden Leuchtstofflampen untersucht, um nachher den ökologischen Vergleich gewährleisten zu können. Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung sind für die Kategorien: Kumulierter Energieaufwand, Treibhauspotential, photochemisches Oxidantienbildung, Versauerungspotential, Eutrophierungspotential und Feinstaub vorgenommen. Die detaillierte Beschreibung von Parametern der Wirkungsabschätzung ist im Anhang durchgeführt worden. Die Ergebnisse der Untersuchung sind erst im Bezug auf die Produkteinheit dargestellt und beschrieben, was den Vergleich im Hinblick auf die produktionsbezogenen Verbesserungen ermöglicht. Den Bezug zu der funktionellen Einheit im Sinne der LCA wird von allen Komponenten des Lichtsystems erfolgen.

8.3.1 Vergleichende Betrachtung der Herstellungsphase von zwei unterschiedlichen Leuchtstofflampentypen (bezogen auf Lampenstückzahl)

Im ersten Schritt der Bewertung von T8- und T5-Leuchtstofflampen wurden die beiden Herstellungsverfahren gegenüber gestellt. Die Unterschiede, die mit der Fertigungstechnik in Verbindung stehen, konnten detailliert ermittelt und abgebildet werden. Bei der Betrachtung wurden alle Produktionsschritte der beiden Linien untersucht, um die möglichen Verbesserungspotentiale aufdecken zu können.

Die Emissionen, die bei der Herstellung von Leuchtstofflampen entstehen (NO_x , SO_2 , CO_2 , Staub) tragen direkt zu Treibhauspotential, Photooxidantienbildung, Versauerungspotential, Feinstaubbildungspotential bei. Weitere Emissionen stammen bei dieser Untersuchung aus dem Strommix-Deutschland, Erdgas Importmix-Deutschland sowie aus Vorketten für die weiteren bei der Produktion eingesetzten Medien.

Von wesentlicher Bedeutung bei dieser Betrachtung ist der festgestellte Unterschied durch die eingesetzten Energie-Träger der beiden Produktionslinien (Unterschiede von Strom und Erdgas-Beheizung). In der T8-Leuchtstofflampenproduktion wird weniger elektrische Energie eingesetzt und mehr Erdgas. In der Produktion von T5-Leuchtstofflampen ist es gerade umgekehrt. Die Höhe und die Art von Umweltbelastungen hängt mit den unterschiedlichen Energieerzeugungswegen zusammen. Nach der Einbeziehung von Strommix-Deutschland und Erdgas Importmix-Deutschland lässt sich feststellen, dass der Wert für den

kumulierten Energieaufwand bei der Herstellung von T8-Leuchtstofflampen um ca. 11 % höher liegt als bei der Herstellung von T5-Leuchtstofflampen. Dafür ist aber GWP (100)-Wert bei der Herstellung von T8-Leuchtstofflampen um ca. 14 % niedriger als bei der Herstellung von T5-Leuchtstofflampen.

8.3.2 Vergleichende Betrachtung der Herstellungsphase von zwei Leuchtstofflampentypen mit der Einbeziehung von Produktkomponenten (bezogen auf die Lampenstückzahl)

Die bisherigen Betrachtungen haben sich auf die Herstellungsphase der zwei Leuchtstofflampentypen im Vergleich bezogen. Für die ganzheitliche Bewertung muss jedoch der gesamte Herstellungsaufwand - d. h. mit Berücksichtigung der Komponenten - einbezogen werden. Darüber hinaus sollen die Ergebnisse der LCA von Komponenten entsprechend der Herstellungsphase zugerechnet werden. Eine besondere Bedeutung hat an dieser Stelle der Ausschuss über die gesamte Produktionslinie. Es soll immer der reale „Mehrverbrauch“ incl. Ausschuss der Herstellungsphase bei der Bewertung berücksichtigt werden und nicht nur Materialinhalt des Produktes selbst. Nur unter Berücksichtigung des Ausschusses kann man feststellen, welche Umweltauswirkungen von Leuchtstofflampenkomponenten in der ganzheitlichen Betrachtung entscheidend sind und welchen Vorerzeugnissen die wichtigste Rolle zugeschrieben werden kann. Um Verbesserungspotentiale zu ermitteln, ist es wichtig, die Unterschiede zwischen den Komponenten der beiden Leuchtstofflampentypen zu erkennen. Die in der Abbildung 8-4 dargestellten Werte des kumulierten Energieaufwands für alle Komponenten der beiden Leuchtstofflampen im Vergleich zeigen den Einfluss des Glaskolbens. Aufgrund der geringeren Masse des Kolbens bei der T5-Leuchtstofflampe ist der KEA-Wert um 26 % niedriger als bei der T8-Leuchtstofflampe. Weitere Unterschiede der Wendel treten bei den Wendeln auf. Bei der Triplewendel der T5-Leuchtstofflampe wird durch zusätzliche Wendelwicklungen bei der Glühung ca. 37 % mehr Energie benötigt als beim Glühen der Doppelwendel. Da sich Tripel- und Doppelwendel im Gewicht deutlich unterscheiden - 4 mg bei der Tripelwendel, 10 mg für die Doppelwendel - nivelliert sich der energetische Aufwand des Glühprozesses vollständig bei Betrachtung des gesamten Herstellprozesses.

Eine große Bedeutung im Bezug auf die Umwelteinflüsse der zwei Leuchtstofflampen im Vergleich hat die Leuchtstoffschicht. Die Menge des eingesetzten Leuchtstoffs für die T8-Leuchtstofflampe ist kleiner als die bei der T5-Leuchtstofflampe. Die so genannte Schutzschicht, die aus der Aluminiumoxid besteht, ist jedoch bei der T5-Leuchtstofflampe

deutlich dünner. Wenn man zu den spezifischen Werten für die Leuchtstoffschicht und die Schutzschicht noch die realen Ausschusszahlen addiert, wird daraus ein deutlicher Vorteil für die T8-Leuchtstofflampe. Auch bei gleichem Ausschuss der T5- und T8-Leuchtstofflampen, würde sich nicht viel ändern, weil die Leuchtstoffherstellung viel energieintensiver als die Aluminiumoxidherstellung ist. Die zwei weiteren Komponenten, die bei der Herstellung von Leuchtstofflampen ins Gewicht fallen, sind das Aluminium zur Herstellung der Sockelhülse sowie die Gläser des Gestells. In beiden Fällen ist bei dem Vergleich von T8- und T5-Leuchtstofflampen wegen der kleinen Menge ein deutlich niedrigerer KEA-Wert bei Komponenten der T5-Leuchtstofflampe zu erkennen.

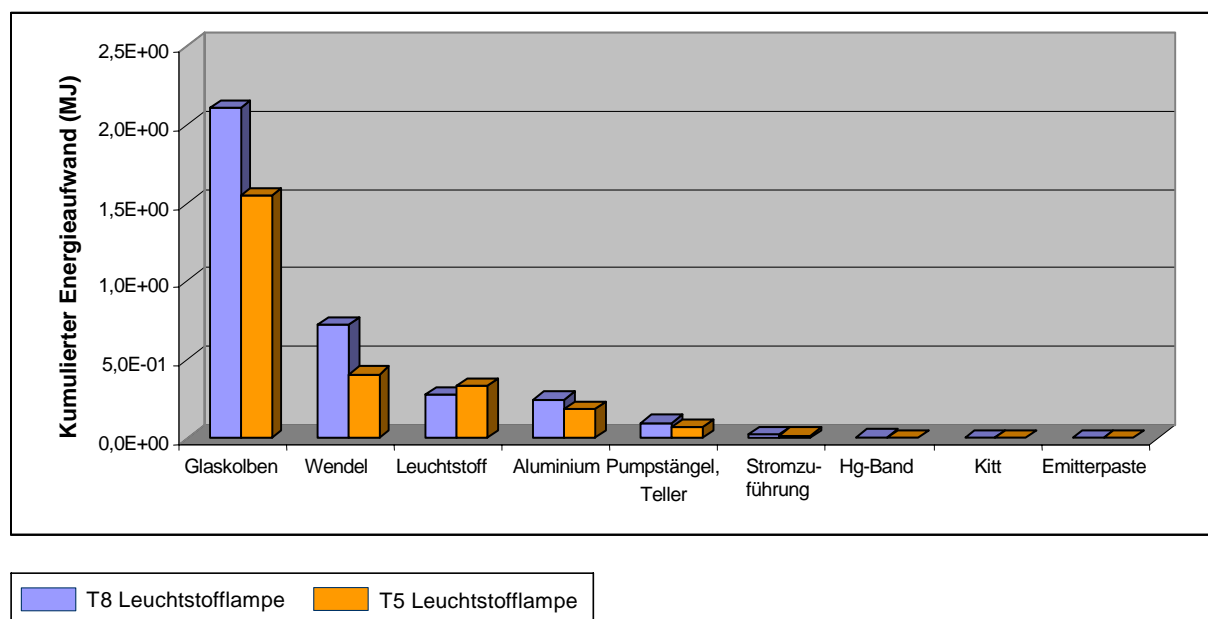


Abbildung 8-4: Kumulierter Energieaufwand der Leuchtstofflampenkomponenten zur Herstellung einer T8- und T5-Leuchtstofflampe im Vergleich bezogen auf die Produkteinheit (je eine Leuchtstofflampe und unter Berücksichtigung des Mehrverbrauches in der Leuchtstofflampenherstellungsphase)

8.3.3 Vergleichende Betrachtung der Herstellungsphase von zwei Leuchtstofflampentypen mit der Einbeziehung von Produktkomponenten (bezogen auf die funktionelle Einheit)

Um die Unterschiede zwischen den beiden Leuchtstofflampen im Hinblick auf die funktionelle Einheit (Systembrenndauer in Mlmh) darstellen zu können, müssen die Ergebnisse entsprechend zugeschrieben werden. Anhand der lichttechnischen Parameter der beiden Leuchtstofflampentypen wurde eine Systembrenndauer von 150 Mlmh errechnet. Dazu muss

eine höhere Zahl an T8-Leuchtstofflampen (nämlich 4,1 Stück) als T5-Leuchtstofflampen eingesetzt (3,8 Stück) werden (siehe Tabelle 6-16, Kapitel 6).

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung sind in Abbildung 8-5 und Abbildung 8-6 zusammengefasst.

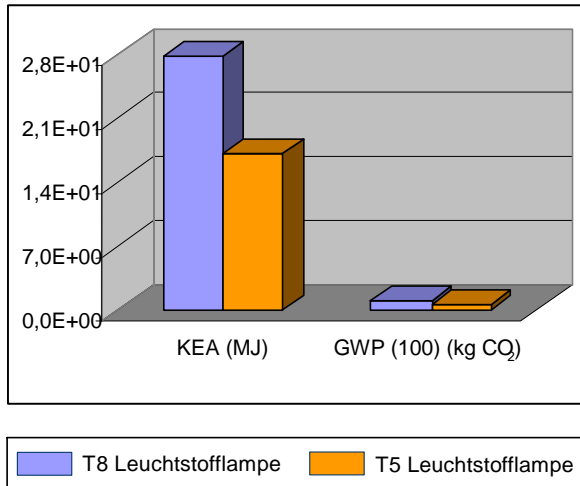


Abbildung 8-5: Parameter der Wirkungsabschätzung der T8- und T5-Leuchtstofflampe im Vergleich bezogen auf die funktionelle Einheit (150 Mlmh)

Bei der ganzheitlichen Betrachtung der gesamten Herstellungsphase bezogen auf die funktionelle Einheit ist festzustellen, dass bei allen Parametern der Wirkungsabschätzung die T8-Leuchtstofflampe schlechter abschneidet, als die T5-Leuchtstofflampe.

Die Herstellung der T8-Leuchtstofflampen führt zu deutlich höheren Emissionen.

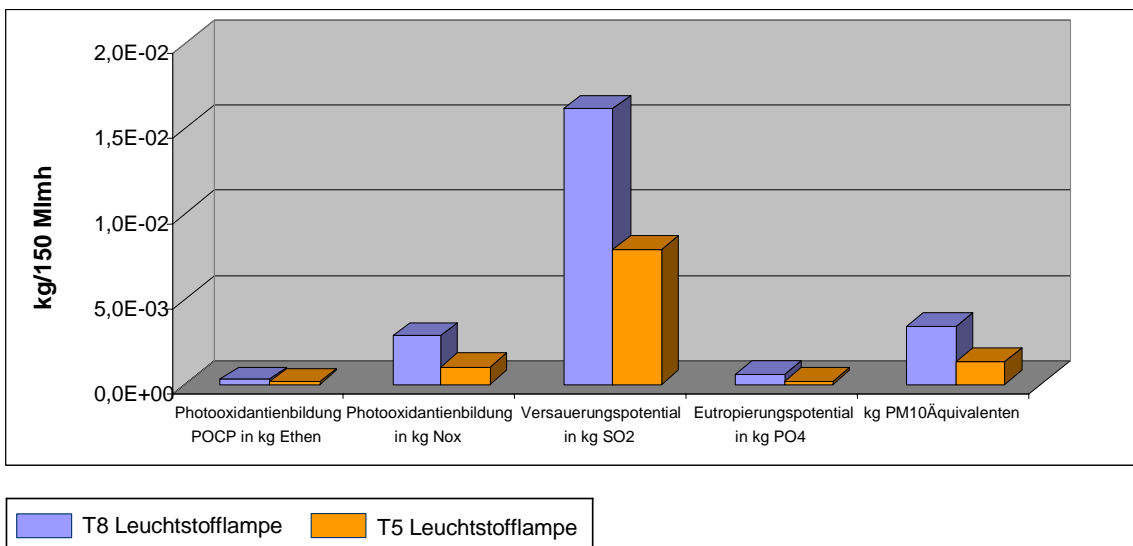


Abbildung 8-6: Parameter der Wirkungsabschätzung der T8- und T5-Leuchtstofflampe im Vergleich bezogen auf die funktionelle Einheit (150 Mlmh)

Allgemein betrachtend liegt die Bedeutung während der gesamten Herstellungsphase beim Beitrag zum Treibhauspotential und Versauerungspotential. Geringer machen sich das Photooxidantienbildungspotential sowie das Feinstaubpotential bemerkbar. Eine untergeordnete Rolle spielt das Eutrophierungspotential.

8.3.4 Ganzheitliche Betrachtung der Herstellungsphase zur Nutzungsphase der Leuchtstofflampen im Vergleich

Mit Hilfe der LCA-Methodik lassen sich die Umweltauswirkungen in jeder Lebenszyklusphase des Produktes ermitteln. Insbesondere bei der ganzheitlichen Bewertung von Lampen besitzt der kumulierte Energieaufwand eine hohe Aussagekraft. Während in der Herstellungsphase viele unterschiedliche Faktoren eine Rolle spielen, wird in der Nutzungsphase als das einzige Medium - die elektrische Energie verbraucht. Für die Ermittlung mit der Energie zusammenhängender Umweltauswirkungen wurde das Modul-Strommix-Deutschland herangezogen. Wenn man anhand der KEA-Indikatoren die gesamte Herstellungsphase unter Einbeziehung aller Komponenten mit der Nutzungsphase vergleicht, lässt sich feststellen, dass die gesamte Fertigung der Leuchtstofflampe eine untergeordnete Rolle spielt. Während der gesamten Herstellungsphase tritt nur eine geringe Umweltbelastung im Vergleich zur Nutzungsphase auf. Der KEA der Herstellungsphase liegt im Vergleich zu Nutzungsphase weit unter einem Prozent [Abbildung 8-7].

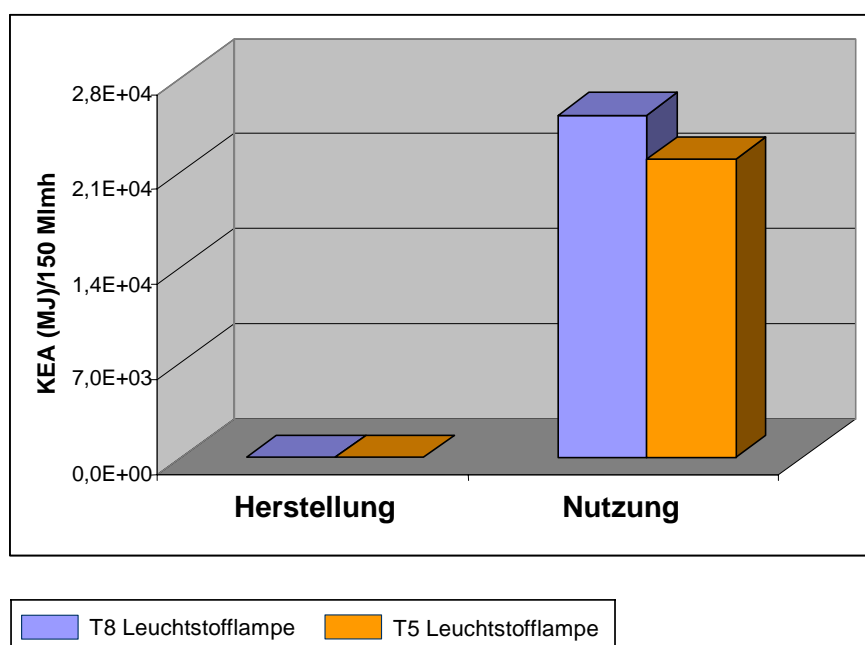


Abbildung 8-7: Kumulierter Energieaufwand der Herstellungs- und Nutzungsphase zweier Leuchtstofflampentypen (T8 und T5) im Vergleich bezogen auf die funktionelle Einheit (150 Mlmh)

8.4 Zusammenfassung

Mit der Durchführung einer ökologischen Analyse zweier Leuchtstofflampentypen im Vergleich konnte dargestellt werden, welche Faktoren über die Herstellung- und Nutzungsphase dieser Produkte die entscheidende Rolle spielen und wo die potentiellen ökologischen Vorteile beider Produkte liegen. Die Berücksichtigung von Aufwendungen aller Komponenten der zwei Leuchtstofflampen im Vergleich hat sich als zielführend erwiesen.

Die kleinere T5-Lampe trägt zu deutlich weniger Umweltauswirkungen bei als die T8-Lampe. Dies ist auf die Ressourceneinsparung bei der Herstellung zurückzuführen. Darüber hinaus konnte man die Vorteile von der Miniaturisierung der Lampe im Hinblick auf die Umweltauswirkungen gut darstellen.

9. Ökobilanz der Vorschaltgeräte

Der nächste Schritt der Ökobilanzierung der Lichtsysteme betrifft die elektronischen Betriebsgeräte. In dieser Arbeit werden zwei Typen von Vorschaltgeräten untersucht, das QTP - für den Betrieb von T8-Leuchtstofflampen und das QT-FH - für den Betrieb von T5-Leuchtstofflampen. Die Beurteilung der gesamten Herstellungsphase von Vorschaltgeräten hat als Ziel, ähnlich wie bei der Bilanzierung der Leuchtstofflampen, die Erkennung von möglichen Verbesserungspotentialen nicht nur im Herstellungsverfahren, sondern auch beim Produktdesign.

Im ersten Schritt der Bewertung wird das Herstellungsverfahren der Vorschaltgeräte im Vergleich untersucht, bei welchem die Stoffströme von Komponenten, Energie und Hilfsstoffen dargestellt werden. Ein weiterer Schritt umfasst die Recherche der Inhaltsstoffe sowie Herstellungsdaten von Komponenten. Für die Darstellung der potentiellen Auswirkungen der Vorschaltgeräte im Vergleich wurden identische Kategorien der Umweltauswirkungen in Form von Äquivalenzwerten wie bei der Bewertung von Leuchtstofflampen herangezogen (GWP 100, Photooxidantienbildung, Versauerungspotential, Eutrophierungspotential, PM10). Diese Vorgehensweise erlaubt den Vergleich zwischen allen Komponenten des Lichtsystems.

9.1 Sachbilanz

9.1.1 Modellierung der Herstellungsphase von Vorschaltgeräten [Systemgrenze]

Die Fertigung von elektrischen Betriebsgeräten ist ein mehrstufiger Prozess, der die Bestückung der Leiterplatte mit Komponenten wie Kondensatoren, Transistoren, Spulen, Widerständen sowie den Lötprozess umfasst. Die Komponentenzahl kann je Vorschaltgerät über hundert Stück betragen. Die Bestückung erfolgt bis auf einige Komponenten automatisch.

Das Herstellungsverfahren fängt bei der Bestückung der Leiterplatte mit axialen Komponenten und dem Kupfer-Draht an. Als Nächstes werden die schmalen, radialen Komponenten auf die Leiterplatte aufgebracht, wonach die SMD-Bestückung erfolgt. Die kleinen Komponenten werden erst auf der Leiterplatte mit einem Haftmittel befestigt und später gelötet. Die Leiterplatten sind in Form von so genannten Nutzen zusammengesetzt, die aus sechs Leiterplatten bestehen und nach der Bestückung vereinzelt werden. Danach erfolgt die visuelle und elektronische Prüfung der Produkte und eventuell eine manuelle

Nachbestückung. Der letzte Produktionsschritt ist die Endmontage der Leiterplatte [Abbildung 9-2] in die Gehäuse und die Verpackung des fertigen Produktes.

Dass die gesamte Fertigung bis auf wenige Emissionen kaum Umweltauswirkungen mit sich bringt, ist im Sinne der ganzheitlichen Bilanzierung nicht als erheblicher Vorteil zu sehen. Viel wichtiger ist bei den Betrachtungen der Produktion der hohe Energiebedarf der Produktionsanlagen, was im Endeffekt erhebliche Emissionen bei der Stromerzeugung verursacht.

Die Herstellungsphase von Vorschaltgeräten lässt sich einfach modular abbilden - es ist nicht nötig, Recyclingschleifen zu bilden. Komponenten, die voll automatisch bestückt werden, sind auf Bändern fixiert und werden direkt verarbeitet. Ein Teil der Leiterplatte wird bei der Nutzen-Vereinzelung abgeschnitten und als Abfall entsorgt. Dadurch ist der reale Produktions-Stoff-Input viel höher als die Menge der reinen Elektronik-Komponenten im fertigen Vorschaltgerät selbst. Die Mengen des Verpackungsabfalls machen sich vor allem bei kleinen Komponenten wie Dioden und Widerständen bemerkbar. Bei der vorliegenden Untersuchung wurden alle Typen von Verpackungsmaterialien identifiziert, um später die entsprechenden Produktionsketten in die Bilanz einbeziehen zu können. Auch die Materialien für die Verpackung des Produktes selbst sind in die Bilanz mit einbezogen.

Die Systemgrenze bei der Bilanzierung der Vorschaltgeräte umfasst die gesamte Herstellungsphase mit Einbeziehung aller Komponenten sowie Verpackungsmaterialien [Abbildung 9-1].

Um die Unterschiede zwischen den Produkten am Besten darstellen zu können, werden die Ergebnisse der Untersuchung auf die Produkteinheit bezogen. Nach der Darstellung der Unterschiede, bezogen auf die Vorschaltgerätestückzahl, werden die Umweltauswirkungen im Bezug auf die funktionelle Einheit dargestellt. Die Nutzungsphase der Vorschaltgeräte und deren Gegenüberstellung zur gesamten Herstellungsphase werden in diesem Kapitel nicht vorgenommen, da die Vorschaltgeräte nur im Lichtsystem funktionieren und alleine nicht betrieben werden können. Der Energieverbrauch über die Nutzungsdauer wird im Kapitel 12 auf alle Komponenten des Lichtsystems (Lampen, Vorschaltgeräte und Leuchten) dargestellt.

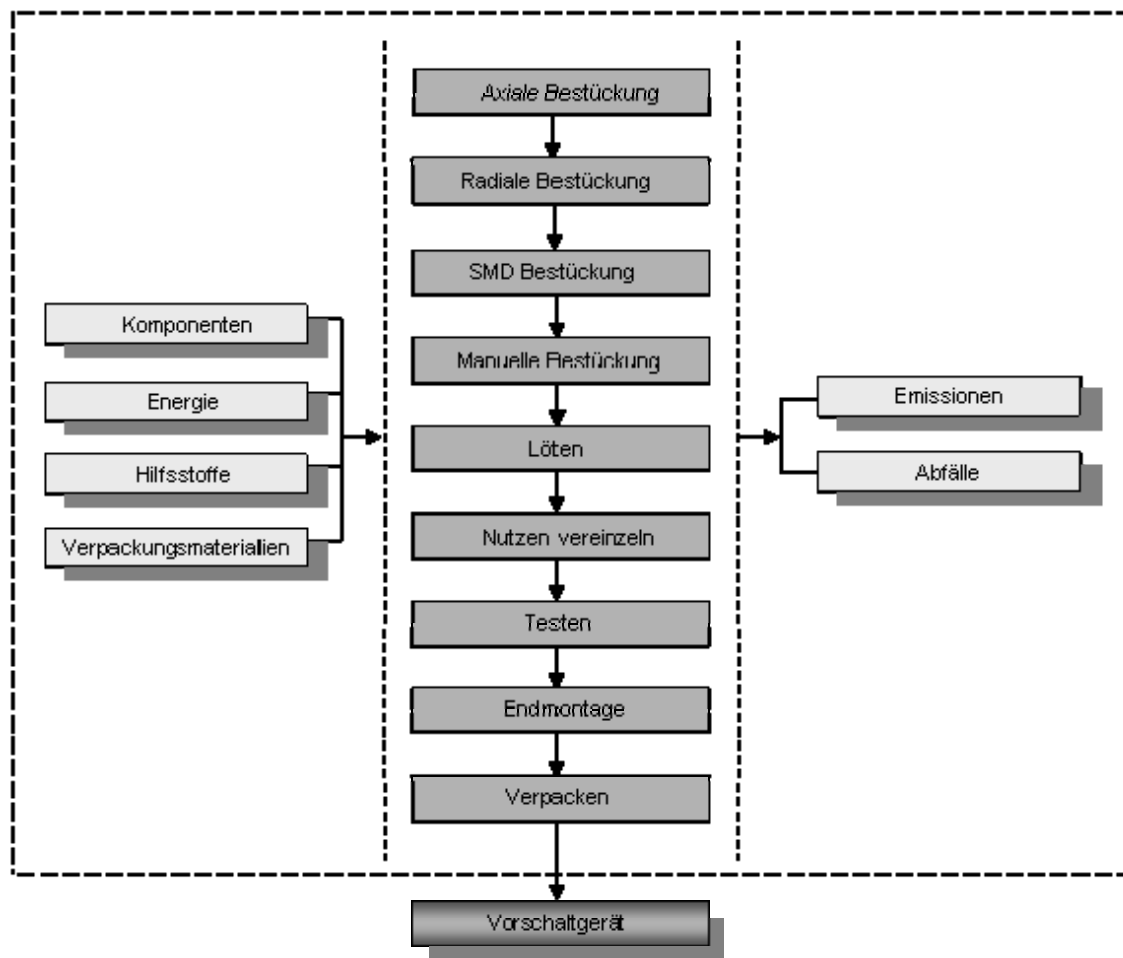


Abbildung 9-1: Die Systemgrenze der Fertigung von Vorschaltgeräten



Abbildung 9-2: Bestückte Leiterplatte

9.1.2 Datenermittlung

Eine Darstellung des Input und Output-Flusses der gesamten Herstellungsphase sowie die Aggregation der Daten zu der Produkteinheit von zwei Typen von Vorschaltgeräten war die Aufgabe der Sachbilanzen. Die Daten für die Zuteilung der Komponenten zum jeweiligen Produktionsschritt wurden direkt aus der Fertigung der elektrischen Betriebsgeräte entnommen. Die Höhe des Energieverbrauches in der Produktion wurde für jeden

Fertigungsschritt gemessen. Die zu bilanzierenden Vorschaltgeräte sind in gleichem Verfahren hergestellt, unterscheiden sich jedoch im Aufbau. Die Bestimmung der Inhaltsstoffe der einzelnen Komponenten sind entweder anhand von Materialdatenblättern [Abbildung 9-3] oder Literaturquellen recherchiert worden. Es wurde versucht, für alle eingesetzten Komponenten, die Vorketten mit Hilfe der Datenbanken sowie Literaturrecherchen zu erstellen, und in die gesamte Bilanz der Herstellungsphase einzubeziehen. Eine Abschätzung der Herstellungsphase für die elektronischen Komponenten lässt sich jedoch zurzeit nur aufgrund der wenigen publizierten Daten bilanzieren sowie mit Hilfe der Materialzusammensetzung zuordnen. Der Grund dafür ist, dass die meisten elektronischen Komponenten auf dem asiatischen Markt hergestellt werden und aus diesen Fertigungen keine Daten preisgegeben werden. Darüber hinaus fehlen auch die Informationen bezüglich produktionsbezogenen Umweltauswirkungen während der Herstellungsphase von einigen Komponenten der Vorschaltgeräte. Die „Lücken“ in der Sachbilanz konnte man durch Aggregation von prozentuellem Materialanteil in Komponenten und spezifischem KEA-Wert der Materialien schließen [Tabelle 9-1]. Der kumulierte Energieverbrauch als Leitindikator ist an dieser Stelle aber im Prinzip zu begrüßen. Wenigstens der Parameter lässt sich über den gesamten Lebenszyklus des Vorschaltgeräts transparent darstellen im Vergleich zu der Nutzungsphase des elektrischen Betriebsgeräts.

Material Data Sheet					
Product family name	Aluminum Electrolytic Capacitor				
	Screw terminal				
	B414xx, B415xx, B434xx, B435xx				
Version / date	1	01.01.2002			
Construction element	Materials	CAS	Average mass [%] *)	Traces [ppm]	Sum [%]
Material group					
Active Part					74
Metals	Aluminum foil	7429-90-5	31		
Liquids	Ethylene Glycol, Butyrolacton		29		
Others	Paper		14		
Encapsulation					24
Metals	Aluminum case	7429-90-5	13		
Polymers	Phenolic resin cover disk:		8		
Polymers	PVC/PET insulation		2		
Polymers	Rubber seal		1		
Termination					2
Metals	Aluminum terminal screw	7429-90-5	2		

Abbildung 9-3: Ausschnitt aus dem Materialdatenblatt (EPCOS AG)

Tabelle 9-1: Beispiele der Werte von kumuliertem Energieaufwand der Materialien der Vorschaltgerätekomponten [95]

Stoff	Beschreibung	Wert (MJ/kg)	Quelle
Al	Aluminiumfolie	177000	Ffe, München ¹
Al	Aluminium	168200	Software Sima Pro/96 ²
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid 95,63 %	23020	Ffe, München ¹
Cr	Chrom	113620	Ffe, München ¹
Cu	Kupfer	49532	Ffe, München ¹
Cu	Draht mit Kupferbeschichtung	83400	Ffe, München ¹
Epoxid	Epoxydharz	140824	Ffe, München ¹
Ethylenglykol	Elektrolyt	37000	Ffe, München ¹
Fe	Eisen	68020	Pre ²
Fe ₂ O ₃	Eisenoxidproduktion	168000	Ffe, München ¹
Gummi	PB I	80800	Sima Pro/ Idemat 96 ²
Glas	Glaswolle	26600	Sima Pro /IVAM Datensatz ²
Ni	Nickel	156290	Ffe, München ¹
PA 66	Polyamid 66	130612	Software Umberto ³
PBT	PBT	106700	Ffe, München ¹
Pb	Blei	33900	Ffe, München ¹
Pd	Palladium	706000	Bfe Zürich `96 ²
PET	PET-Polyesterschicht	84000	Ffe, München ¹
PP	PP I	79000	Sima Pro/ Idemat 96 ²
Si	Silizium	902520	Ffe, München ¹
SiO ₂	Siliziumdioxid 2,91 %	0,340	Ffe, München ¹
Stahl	Elektrostahl	6242	Software Umberto ³

¹ Forschung für Energiewirtschaft e.V. (FfE), München

² Nissen N.F. Entwicklung eines ökologischen Bewertungsmodells zur Beurteilung elektronischer Systeme. TU-Berlin, 2001. Dissertation, Seite 87.

³ IFEU & IFU - Institut für Energie und Umwelt Forschung Heidelberg GmbH & Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH

9.1.3 Ergebnisse der Sachbilanzen

Aufgrund einer detaillierten Analyse aller Produktionsschritte der zwei Vorschaltgeräte im Vergleich konnte man die Unterschiede in dem Fertigungsverfahren sowie die in der Komponentenzusammensetzung darstellen. Die Erfassung des Energieverbrauches während der Herstellungsphase führte zu dem Ergebnis, dass die Vorschaltgeräte der T8-Leuchtstofflampe fast ein Fünftel weniger Energie für die Fertigung benötigen, als die der T5-Leuchtstofflampe. Dies ist auf die viel höhere Komponentenzahl für die Bestückung von Leiterplatten der QT-FH zurückzuführen.

Obwohl die Stückzahl bei den QT-FH Komponenten deutlich höher ist, wird jedoch bei der detaillierten Untersuchung von den Kapazitäten der Bauteile festgestellt, dass sowohl die Gehäuse wie die gesamte Masse der Komponenten vom QTP Vorschaltgerät viel niedriger ist als die gesamte Masse der QT-FH. Die Unterschiede in der gesamten Masse liegen bei ca. 9 % zwischen dem QTP und QT-FH Vorschaltgerät.

Bei der Betrachtung der Materialien im Bezug auf Masse des gesamten Produktes summieren sich die Eisenmetalle auf über 50 % des gesamten Produktes. Nichteisenmetalle, Kunststoffe, Ferrite, Papier, Glas und Siliziumdioxid sind die am häufigsten in den Vorschaltgeräten enthaltenden Materialien. Die Unterschiede in der prozentuellen Materialzusammensetzung sind in den Abbildungen 9-4 und 9-5 dargestellt. Anzumerken bleibt, dass der Einfluss aller Materialien in die ökologische Betrachtung aufgenommen worden ist.

Wie schon in dem Kapitel Datenermittlung beschrieben, erfolgt die Modellierung der gesamten Herstellungsphase von Vorschaltgeräten nicht auf Basis der Gewichtszusammensetzungen, sondern unter Berücksichtigung aller in die Fertigung fließenden Materialien und Hilfsstoffe. Vor allem die Verpackung der Komponenten (hohe Abfallmengen) sowie die Art der Produktverpackung werden in der Bilanz erfasst. Die Verpackungskomponenten, die eigentlich als Abfall zu bewerten sind, sind bei QT-FH Vorschaltgeräten höher als beim QTP. Das resultiert aus der höheren Komponentenzahl, die für die Produktion verbraucht werden. Vor allem bei der Menge an Papier, Kunststoff, Kupfer-Draht und Folie schneidet die QTP besser ab. Wie diese Unterschiede für die ganzheitliche Bilanzierung unter der Berücksichtigung der Bauteileigenschaften von Bedeutung sind, wird bei der Wirkungsabschätzung nachgewiesen. In dem weiteren Kapitel wird ermittelt, inwiefern die Komponenten zu den ganzheitlich gesehenen Umweltauswirkungen bei der Produktionsphase beitragen und wie hoch sie im Bezug auf die gesamte Herstellungsphase sind.

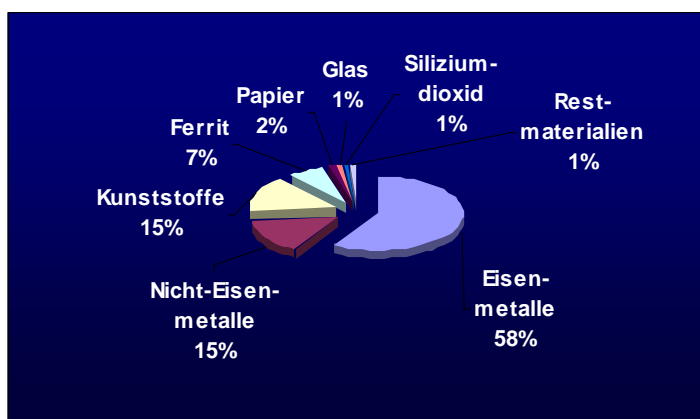


Abbildung 9-4:
Die Materialzusammensetzung
der QTP-Vorschaltgeräte
Quelle: [95]

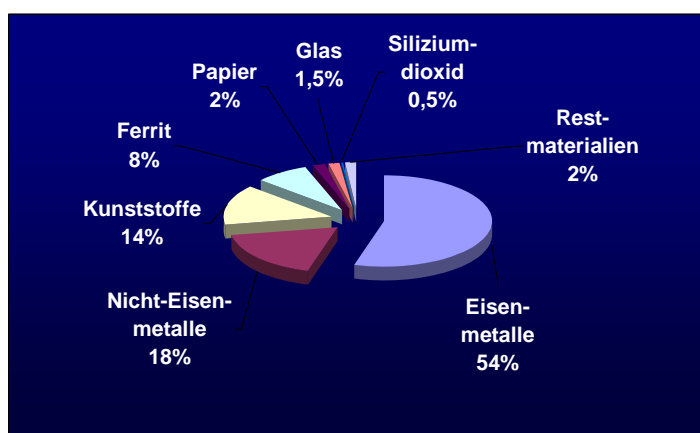


Abbildung 9-5:
Die Materialzusammensetzung
der QT-FH-Vorschaltgeräte
Quelle: [95]

9.2. Wirkungsabschätzung

9.2.1 Wirkungsabschätzung der gesamten Herstellungsphase von zwei Vorschaltgeräten im Vergleich

Bei der Betrachtung der Unterschiede zwischen den Komponenten konnte festgestellt werden, dass die elektronischen Komponenten der QT-FH trotz der gesamten höheren Menge einen kleineren gesamt KEA-Wert besitzen wie die elektronische Komponenten bei der QTP. Der Unterschied liegt im KEA Wert von 0,91 MJ. Insgesamt sind die Differenzen des KEA-Wertes zwischen dem gesamten Aufwand für die Komponenten je Vorschaltgerätetyp deutlich höher als die Unterschiede zwischen den Fertigungsverfahren. Bei der Betrachtung der Unterschiede zwischen den Herstellungsverfahren konnte man feststellen, dass der KEA Wert bei der QTP Fertigung um 0,67 MJ/Gerät niedriger ist als bei der Herstellung von QT-FH. Den höchsten KEA-Wert haben im Bezug auf die Produkteinheit elektronische Komponenten wie radiale Drosselspulen, radiale Kondensatoren, Leiterplatten,

sowie die Klemmen. Die entscheidende Rolle hat jedoch bei der Betrachtung zwischen den zwei Vorschaltgeräten im Vergleich das hohe Gewicht des Gehäuses bei dem QTP-Vorschaltgerät. Hier liegt der Unterschied bei 15 %. Diese trägt zur größten Differenz in der Wirkungsabschätzung bei. Auch die unterschiedliche Menge an Verpackungsmaterialien (Komponentenverpackung, Produktverpackung) spielt eine Rolle bei der Bilanzierung. Aufgrund der detaillierten Untersuchung von Menge und Verpackungsmaterialien konnte man feststellen, dass durch die größere Zahl an elektronischen Komponenten für die QT-FH auch die Menge der Verpackung bei fast allen elektronischen Komponenten höher liegt.

Wenn man die gesamte Herstellung von Vorschaltgeräten incl. Komponentenherstellung betrachtet, fällt der hohe Aufwand für die Herstellung der Komponenten im Vergleich zum Fertigungsaufwand der Vorschaltgeräte auf. Bezogen auf die ganzheitlich gesehene Herstellungsphase lässt sich feststellen, dass bei der QTP - Fertigung 12 % des kumulierten Energieaufwands in die Gerätefertigung fließt und 88 % in die Komponentenherstellung.

Bei der Herstellung von QT-FH fällt eine hohe Menge an Energie, in der Fertigung der Geräte selbst als auch durch die Menge der elektronischen Bauteile an, welche deutlich höher ist als beim QTP [Abbildung 9-6].

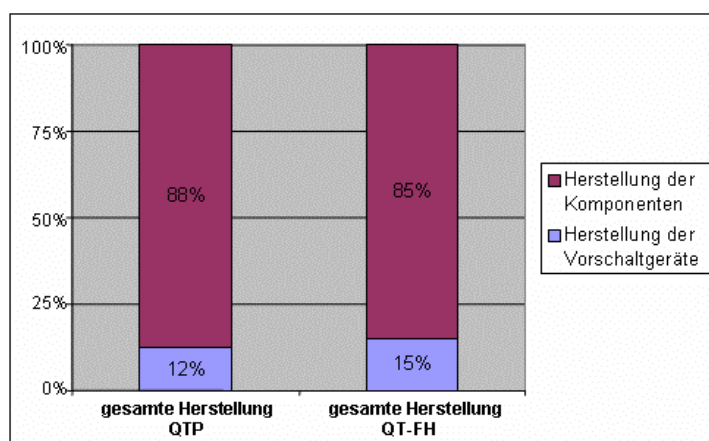


Abbildung 9-6:
Vergleich zwischen den KEA für die Fertigung der VorschaltgerätekompONENTEN und Fertigung der Vorschaltgeräte

9.2.2. Vergleichende Betrachtung der Herstellungsphase von zwei Vorschaltgeräten mit der Einbeziehung von Produktkomponenten (bezogen auf die Produktstückzahl)

Bei der ökologischen Betrachtung der gesamten Herstellungsphase wurde festgestellt, wie hoch der Beitrag bezüglich der untersuchten Wirkungspotentiale liegt [Abbildung 9-7, 9-8]. Die Aussage ist im Bezug auf die Produkteinheit dargestellt, um die Unterschiede zwischen den Produkten besser ermitteln zu können. Die aufgrund der vielen Daten zusammengestellte Zahl wird weiter zu dem Vergleich zwischen allen Komponenten des Lichtsystems im Bezug auf die funktionelle Einheit dienen.

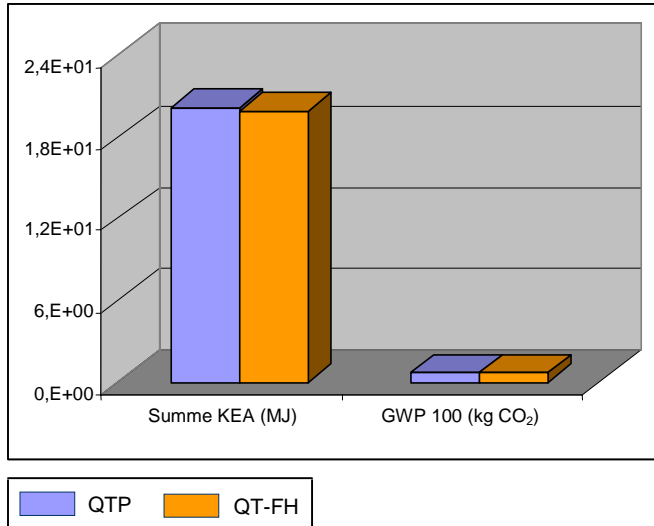


Abbildung 9-7: Parameter der Wirkungsabschätzung der gesamten Herstellungsphase von QTP- und QT-FH-Vorschaltgeräten im Vergleich (je Vorschaltgerät)

Bei der ganzheitlichen Bilanzierung der zwei Vorschaltgeräte konnte man feststellen, dass bei allen Kategorien der Wirkungsabschätzung der QT-FH bessere Werte aufweist als die QTP. Die Unterschiede liegen bei der Abschätzung des kumulierten Energieaufwands bei 240 kJ pro Gerät. Auch der Beitrag zum Treibhauspotential ist um 0,02 kg CO₂ pro Vorschaltgerät reduziert.

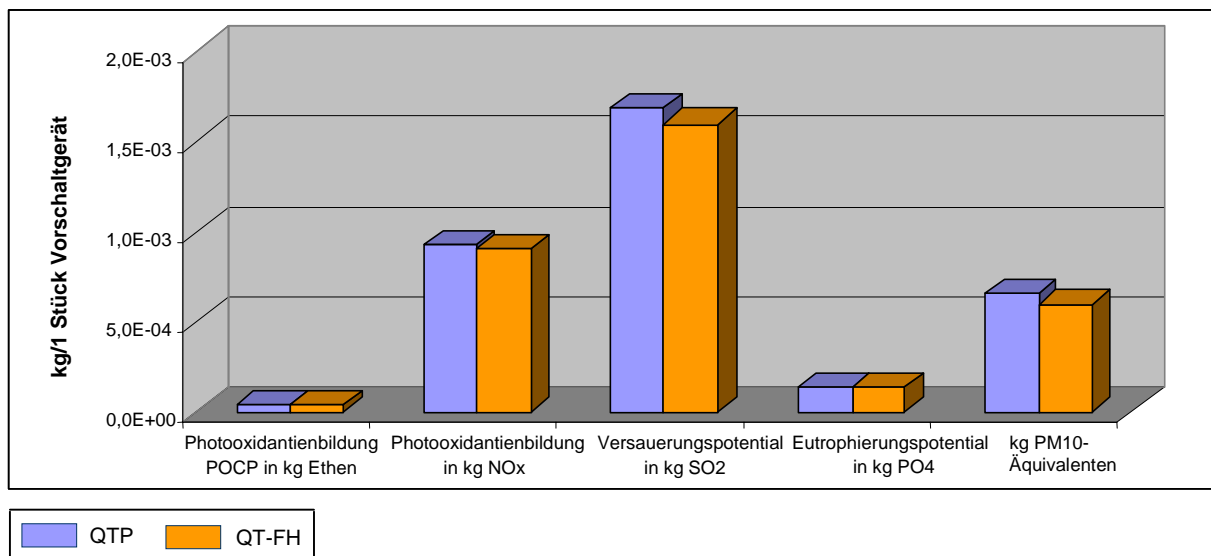


Abbildung 9-8: Parameter der Wirkungsabschätzung der gesamten Herstellungsphase von QTP- und QT-FH-Vorschaltgeräten im Vergleich (je Vorschaltgerät)

Neben der Stromerzeugung entstehen die Hauptumwelteinflüsse durch die Bauteilherstellung, was im KEA sichtbar wird. Darüber hinaus bildet das Versauerungspotential neben der Photooxidantienbildung in kg NO_x und dem Feinstaubbildungspotential den Haupteinfluss. Untergeordnete Rolle spielt das Eutrophierungspotential [Abbildung 9-8].

9.2.3 Vergleichende Betrachtung der Herstellungsphase von zwei Vorschaltgeräten mit der Einbeziehung von Produktkomponenten (bezogen auf die funktionelle Einheit)

Um die Unterschiede zwischen QTP und QT-FH-Vorschaltgeräten im Bezug auf die funktionelle Einheit (Systembrenndauer in Mlmh) darstellen zu können, müssen die Ergebnisse der funktionellen Einheit zugeschrieben werden. Die Daten werden genauso wie bei der Betrachtung von Leuchtstofflampen auf eine bestimmte Zahl von Vorschaltgeräten bezogen. Anhand der lichttechnischen Parameter wurde für die beiden Vorschaltgeräte die Systembrenndauer von 150 Mlmh gewählt. Um diese Größe bei dem Betrieb der Lampe mit den entsprechenden Vorschaltgeräten zu erreichen, muss eine höhere Zahl an QTP Vorschaltgeräten in das System eingesetzt werden. Der Bedarf an QTP-EVG liegt bei 150 Mlmh im System bei 1,31 Stück und 1,46 Stück an QT-FH (siehe Kapitel 6-16, Kapitel 6). Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung sind in den Abbildungen 9-9 und 9-10 zusammengefasst. Bei der ganzheitlichen Betrachtung der gesamten Herstellungsphase bezogen auf die funktionelle Einheit ist festzustellen, dass bei allen Parametern der Wirkungsabschätzung der QT-FH schlechter abschneidet, als die QTP. Das Ergebnis resultiert jedoch nur aus der theoretischen Vorschaltgerätezahl, die für den Betrieb im dem Lichtsystem nötig sind. Die Differenz bezüglich der Emissionen über die gesamte Herstellungsphase ist gering, sie ist durchschnittlich bei dem QT-FH im System um 7 % höher als QTP über die gesamte Herstellungsphase im System gesehen.

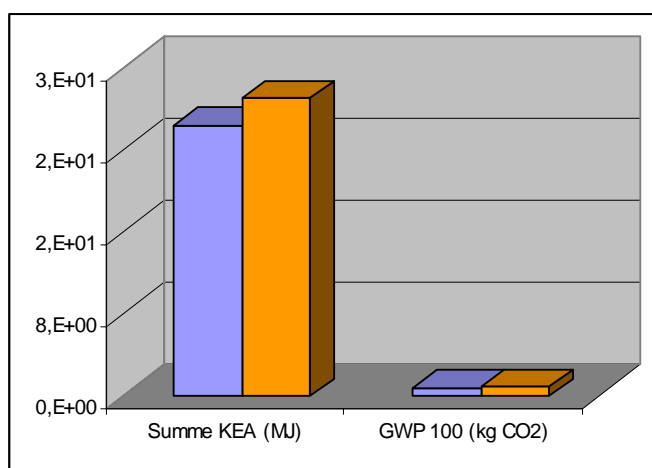


Abbildung 9-9:
Parameter der Wirkungsabschätzung der gesamten Herstellungsphase von QTP- und QT-FH-Vorschaltgeräten im Vergleich bezogen auf die funktionelle Einheit



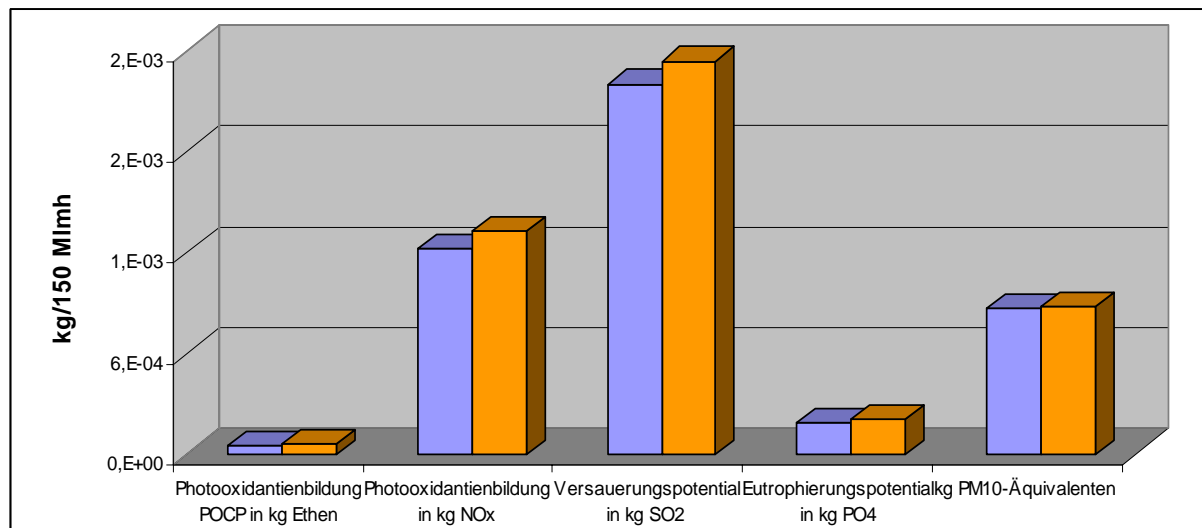


Abbildung 9-10: Parameter der Wirkungsabschätzung der gesamten Herstellungsphase von QTP und QT-FH-Vorschaltgeräten im Vergleich bezogen auf die funktionelle Einheit

9.3 Zusammenfassung

Mit der Durchführung einer ökologischen Analyse konnten deren Umweltauswirkungen über die gesamte Herstellungsphase dargestellt werden. Der Haupteinfluss liegt während der gesamten Herstellung nicht in der Fertigungsphase der Vorschaltgeräte selber, sondern im Fertigungsaufwand der Komponenten. Obwohl das QT-FH eine höhere Zahl an elektrischen Komponenten aufweist und damit energieaufwändiger bei der Gerätefertigung ist, wird der ökologische Vorteil gerade bei diesem Vorschaltgerät festgestellt. Der Hauptgrund dafür ist der niedrigere kumulierte Energieaufwand der gesamten elektronischen Komponenten sowie das Gehäusegewicht von QT-FH im Vergleich zu QTP. Um die zwei Lichtsysteme zu vergleichen, wurde eine Systembrenndauer von 150 Mlmh gewählt. Die Lichtausbeute ist unter der Berücksichtigung der wirtschaftlichen Lebensdauer der Lampe, dem Leuchtenwirkungsfaktor sowie der Lebensdauer berechnet. Dass man um 150 Mlmh zu erzeugen, mehr QT-FH-Vorschaltgeräte als QTP-Vorschaltgeräte braucht, zeigt sich in den Umweltauswirkungen. Dass der Energieverbrauch von Vorschaltgeräten im System für Leuchtstofflampe und Vorschaltgerät gemeinsam gemittelt werden muss, wird die Beschreibung dieser Lebenszyklusphase in diesem Kapitel vernachlässigen. Die weiteren Unterschiede werden bei der ganzheitlichen Bewertung des gesamten Lichtsystems betrachtet.

10. Ökobilanz der technischen Leuchte

Der letzte Schritt bei der ganzheitlichen Bilanzierung von Lichtsystemen ist die Bilanzierung der Leuchte. In dieser Arbeit werden zwei Leuchtentypen untersucht, die entsprechend mit der T8-Leuchtstofflampe und dem QTP-Vorschaltgerät sowie mit der T5-Leuchtstofflampe und dem QT-FH-Vorschaltgerät die Lichtsysteme bilden. Bei der Untersuchung wird der Fokus vor allem darauf gelegt, welche Aspekte bei der ganzheitlichen Herstellung von Leuchten die größte Rolle spielen und wie hoch die ganzheitliche Auswirkung der Leuchte im Vergleich zu den anderen Komponenten des Lichtsystems ist.

Im ersten Schritt der Untersuchung wird die gesamte Produktion der beiden Leuchten dargestellt. Die Höhe des Energieverbrauches sowie alle Betriebsstoffe über die gesamte Fertigung werden in der Bilanz erfasst. Eine Grundvoraussetzung bei der Bilanzierung von Leuchten war die Recherche aller im Leuchtenbau verwendeten Materialien. Vor allem der Einsatz von Lacken (Lackierungsprozesse), die das zu untersuchende Produkt korrosionsbeständig und deswegen auch langlebig machen, war für diese Arbeit von Bedeutung. Für die Darstellung der Umweltauswirkungen, die mit diesen zwei Leuchten in Verbindung stehen, wurden genauso wie bei den ersten zwei Komponenten des Lichtsystems die GWP 100, die Photooxidantienbildung, das Versauerungspotential, das Eutrophierungspotential sowie PM10 betrachtet. Da die Leuchte über die Nutzungsphase keinen elektrischen Strom verbraucht, jedoch zusammen mit der Lampe und dem Vorschaltgerät ein System bildet, wird der Aufwand in der Nutzungsphase im Hinblick auf die Lebensdauer sowie den Leuchtenwirkungsgrad einer funktionellen Einheit zugerechnet.

10.1 Sachbilanz

10.1.1 Modellierung der Herstellungsphase der technischen Leuchte [Systemgrenze] und Datenermittlung

Die Systemgrenze bei der Ökobilanzierung der technischen Leuchte soll die vollständige Rohstoffbeschaffung, deren Aufbereitung, Fertigung der Leuchte, sowie die Nutzung umfassen. Im Einzelnen bedeutet dies, dass beginnend bei der Herstellung der Vorerzeugnisse, über die verwendeten Energie- sowie Hilfsstoffe bei der Fertigung der Leuchte alle Teilschritte zu untersuchen waren. Der Fokus bei der Herstellung der Leuchte liegt in der Auswahl von den eingesetzten Materialien sowie der Untersuchung der Lackierungsprozesse.

Die Sachbilanz der Leuchtenfertigung bildet den derzeitigen Stand der Technik am analysierten Standort ab. Um die Vergleichbarkeit der beiden ausgesuchten Leuchtentypen gewährleisten zu können, sind bei der Untersuchung die gleichen Rahmenbedingungen einzuhalten. Die zur ökologischen Bewertung von Lichtsystem ausgewählten Leuchten gehören zu den so genannten technischen Leuchten (Architekturleuchten) und sind röhrenförmig (Rohrleuchten) [Abbildung10-1]. Sie sind mit einem separaten Vorschaltgerät zu betreiben und ohne Schalter zu bedienen. Zu den Hauptkomponenten der Leuchte gehören Kunststoffe, Stahl sowie Aluminium.



Abbildung 10-1: *Die Architekturleuchte*

Die Modellierung der Herstellungsphase erfolgt aufgrund der Abbildung des Fertigungsablaufs [Abbildung 10-2]. Die beiden in dieser Arbeit untersuchten Leuchten entstehen in einem ähnlichen Prozess der Montage von Leuchtenkomponenten. Die Bauteile müssen erst auf verschiedene Weise vorbereitet werden - das Blech wird mittels Laser geschnitten, gebogen und entfettet. Die fertigen Stahlkomponenten werden auf eine Leiste gepunktet, die Leiste wird danach auf einen Reflektor montiert.

Ein wichtiger Prozess bei der Herstellung von Leuchten ist die Lackierung des Reflektors. Dieser Prozess erfolgt in der zu untersuchenden Anlage in den folgenden Fertigungsschritten: Phosphatieren, Spülen, Haftwassertrocknung, Pulverbeschichtung und Einbrennung von Pulverlack. Für die untersuchten Produkte wird Pulverlack verwendet. Lackauftragsverfahren ist das Spritzverfahren. Da bei diesem Verfahren große Verluste entstehen (Overspray)*, wird das überschüssige Material gesammelt und wieder verwendet. In der untersuchten Anlage lassen sich 80 % des eingesetzten Pulverlacks wieder nutzen, 20 % des eingesetzten Lackes müssen als Abfall entsorgt werden.

*Als Overspray wird die Lackmenge bezeichnet, die von der jeweiligen Applikationstechnologie (z.B. Sprühpistole) nicht auf das Produkt gelangt und definiert aus der Spritzkabine abgesaugt werden muss, um Qualitätseinbußen auf dem Produkt zu vermeiden [96].

Die weiteren Komponenten der Leuchte wie Litze, Schutzblech und Leuchtstoffrohr werden für die Produktion vorbereitet (Aluminiumblech wird zugeschnitten und gerundet, Leuchtstoffrohr abgesägt und die Litzen auf die richtige Länge zugeschnitten). Weitere Arbeitsschritte erfolgen bei der manuellen Montage der Leuchte.

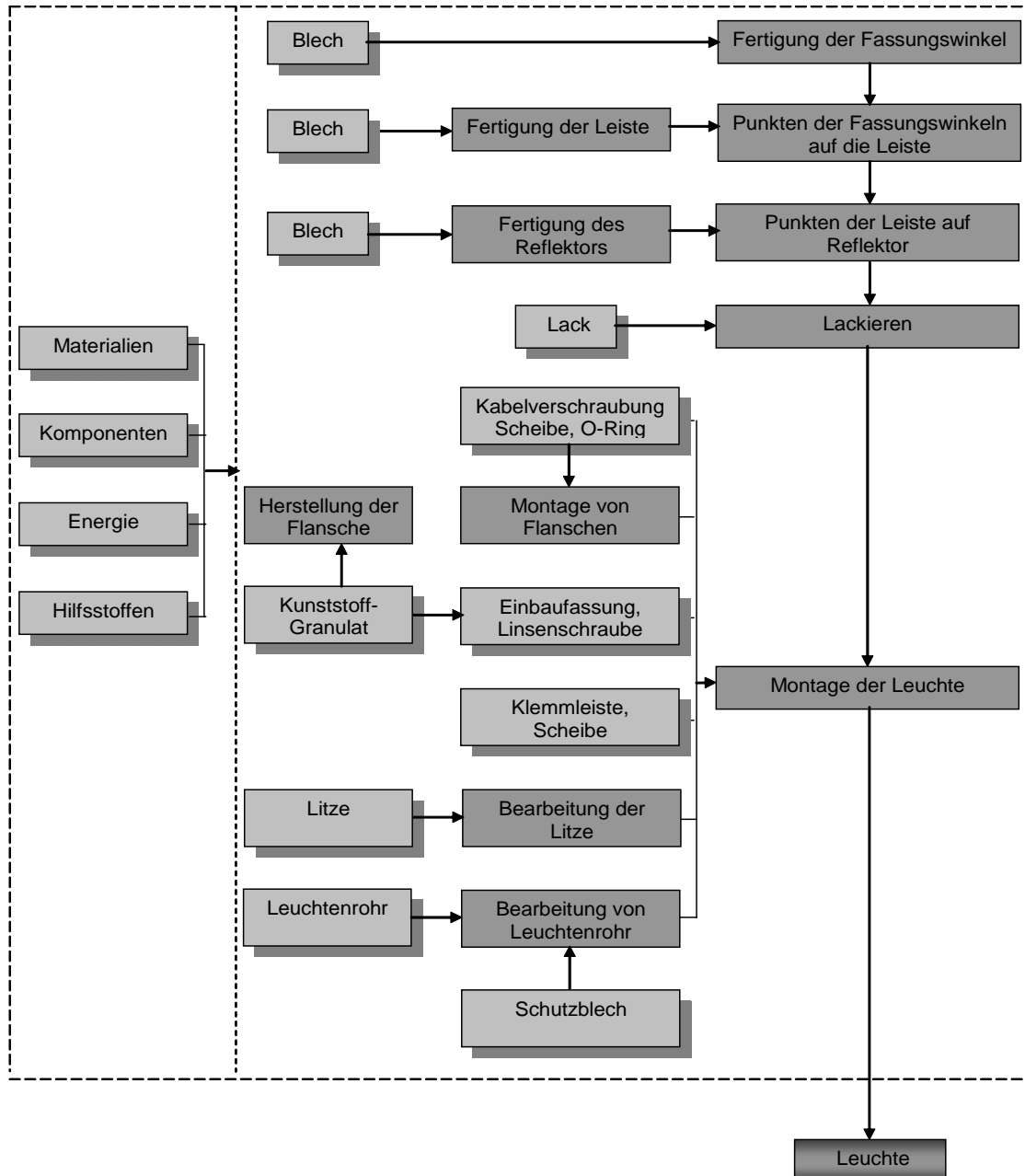


Abbildung 10-2: Systemgrenze der Herstellung der technischen Leuchte

Die Hierarchie der Produktionsphase ist als Erstes innerhalb der Leuchtenfertigung erfasst. Nach der ersten Betrachtung werden weitere Aufwendungen für die Zukaufteile, Komponenten, Materialien und anschließend Rohstoffen gesucht. So wird in der gesamten

Herstellungsphase einer technischen Leuchte zwischen der Herstellung der Leuchte, Herstellung der Vorprodukte und Aufbereitung der Rohstoffe unterschieden.

Es war innerhalb dieser Arbeit nicht möglich, für alle Vorprodukte der technischen Leuchte genaue Energieverbrauchsdaten bei deren Produktion zu ermitteln. Diese Einschränkungen beziehen sich jedoch nicht auf die Hauptkomponenten der Leuchte. Für die übrigen Bauteile wurden alle eingesetzten Materialien ermittelt und aufgrund der Zusammensetzung und mit Hilfe von Datenbanken die ökologischen Auswirkungen dargestellt. Zusammengefasst sind die notwendigen Daten zur Erstellung der Sachbilanzen aus dem Fertigungsablauf der Hersteller entnommen, über die Informationen der Zulieferanten ermittelt (nach Anfrage) sowie mit der Hilfe von Datenbanken und Literatur recherchiert.

10.1.2 Ergebnisse der Sachbilanzen

Durch eine detaillierte Untersuchung konnten die Unterschiede im gesamten Herstellungsverfahren sowie in der Komponentenzusammensetzung der untersuchten Leuchten abgebildet werden. Der Gewichtanteil der am höchsten vertretenen Komponenten setzt sich wie folgt zusammen: Kunststoffe - ca. 60 % , Stahlkomponenten - ca. 34 % , Kupfer und Aluminium - je ca. 2 % und weitere Materialien - ca. 2 % [Abbildung 10-3, 10-4].

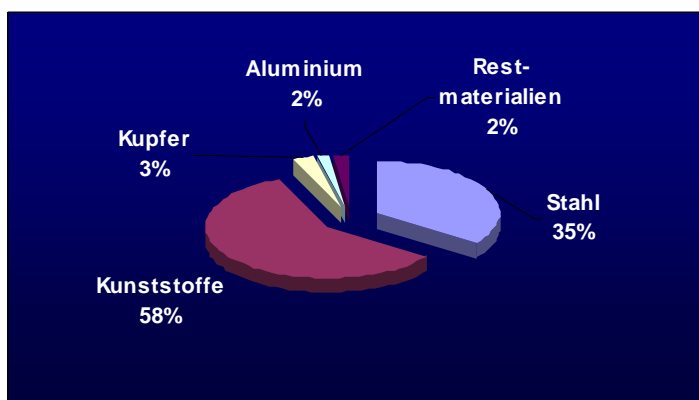


Abbildung 10-3:
Die Materialzusammensetzung der Leuchte (T8-Lichtsystem)

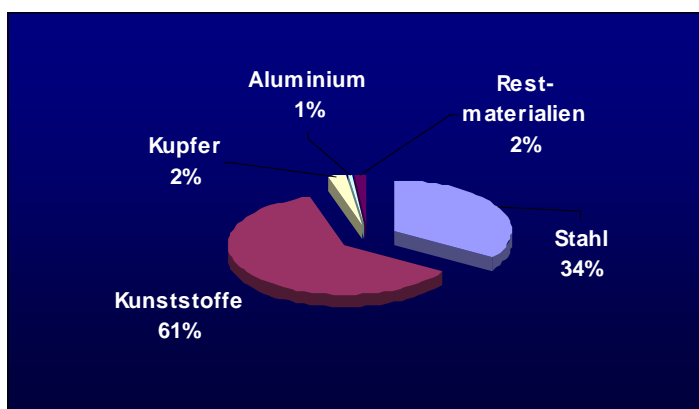


Abbildung 10-4:
Die Materialzusammensetzung der Leuchte (T5-Lichtsystem)

Als erster Aspekt der Sachbilanzen sind die Unterschiede im Gesamtgewicht der beiden untersuchten Produkte und daraus resultierenden Differenzen bei der Menge von angesetzten Komponenten zu berücksichtigen. Die für das T5-Lichtsystem geeignete Leuchte ist schwerer als die Leuchte für das T8-Lichtsystem. Die größere Menge an eingesetzten Materialien resultiert vor allem daraus, dass der Reflektor sowie auch das Acryl-Leuchtenrohr ein höheres Gewicht aufweisen als die vergleichbaren Komponenten des T5-Leuchtentyps. Weil die beiden Leuchten aus gleichen Materialien zusammengebaut sind, werden sich die hohen Unterschiede im Gewicht der Materialien mit großer Wahrscheinlichkeit negativ auf die Bilanz der Leuchte des T5-Lichtsystems im Vergleich zu der Leuchte des T8-Lichtsystems auswirken.

Als weiteres ist die Herstellungsphase der beiden Leuchtentypen untersucht worden. Wesentlich sind hier der Energieverbrauch über alle Fertigungsphasen sowie der produktionsbezogene Mehrverbrauch der eingesetzten Materialien. Alle Angaben über Materialverbrauch resultieren aus der Berechnung von realen Input-Stoffen in der Produktion. Im Bezug auf den Vergleich der Fertigung der beiden Leuchten sind kaum Unterschiede festzustellen. Die wenigen Differenzen resultieren aus den verschiedenen Gewichten der in der Produktion eingesetzten Komponenten (z.B. Lasern und Biegen von Blech). Als sehr energieintensiver Produktionsschritt hat sich die Fertigung von Kunststoff-Flanschen aus Granulat erwiesen. Auch zur Fertigung des Reflektors wird sehr viel Energie benötigt.

Bei der Ermittlung der wesentlichen Prozessparameter ist das Lackieren des Reflektors von entscheidender Bedeutung. Die Lackierung ist ein sehr energieintensiver und komplexer Prozess. Die Reflektoren der ausgewählten Leuchtentypen sind mit Pulverlack beschichtet. Nach Harsch [96] zeichnen sich die Pulverlacksysteme im Vergleich zu den Lösemittellacksystemen durch die Reduzierung der Schichtdicke (Optimierung des Kornspektrums, Korngröße) sowie die Reduzierung des Herstelleraufwandes (Optimierung des Sichtungsprozesses) aus. Bei der Betrachtung der Lackieranlage dominiert der Energieverbrauch beim Prozess der Trocknung nach Vorbehandlung der Oberfläche durch das Entfetten und Phosphatieren und späteren Einbrennen von Pulver. In der untersuchten Anlage werden zwei Medien für die Beheizung der Lackieranlage verwendet - elektrische Energie sowie Erdgas. Bei der Betrachtung des Anlagenaufwandes überwiegt der Anteil der Stromaufbereitung. In wie weit die Unterschiede in der Herstellung, vor allem aber in der eingesetzten Materialmenge unter Berücksichtigung der Bauteileigenschaften von Bedeutung sind, wird bei der Wirkungsabschätzung nachzuweisen versucht.

10.2 Wirkungsabschätzung

10.2.1 Wirkungsabschätzung der gesamten Herstellungsphase von zwei technischen Leuchten im Vergleich

Im Folgeschritt der Sachbilanzen sind potentielle, durch die ganzheitliche Herstellung von zwei Leuchten im Vergleich verursachten Umweltauswirkungen in Form der Kategorien erfasst und gegenüber gestellt. Mit Hilfe der Äquivalentenkoeffizienten sowie dem kumulierten Energieaufwand lässt sich der gesamte Aufwand zur Fertigung der Produkte sowie der gesamten Herstellung abbilden.

Es gibt kaum Unterschiede bei der Betrachtung des kumulierten Energieaufwandes über die gesamten Fertigungsprozesse im Vergleich. Als dominierend hat sich bei der Fertigung die Lackieranlage sowie die Herstellung der Flansche (Kunststoff-Gießen) erwiesen. Betrachtet man jedoch die gesamte Herstellungsphase (incl. Komponenten und Materialien), ist festzustellen, dass der weitaus größte KEA bei der T5-Lichtsystemleuchte besteht, verursacht durch die höhere Masse der Komponenten. Es kann festgestellt werden, dass die höheren Aufwendungen zur Herstellung dieser Leuchte durch die größere Masse an Leuchtenrohr und vor allem an Reflektor verursacht worden sind. Darüber hinaus liegt die Differenz über die gesamte Herstellung beim KEA-Parameter über 20 %.

Werden die Werte für die am häufigsten eingesetzten Komponenten der Leuchten mit Berücksichtigung des Gewichtes in der Leuchte betrachtet, so fällt auf, dass der höchste Wert der Wirkungsabschätzung das Acryl-Leuchtenrohr besitzt. Die Differenz zwischen den beiden Leuchtenrohren im Bezug auf den GWP 100 liegt bei 0,8 kg CO₂-Äquivalenten. Eine weitere wichtige Komponente ist das Blech. Hier ist der Unterschied zwischen den beiden Leuchten nicht so groß und beträgt 0,1 kg CO₂-Äquivalente. Betrachtet man den Einfluss der Verpackungsmaterialien im Hinblick auf die gesamte Herstellungsphase ist festzustellen, dass der KEA-Parameter 0,1 % den gesamten Herstellungsaufwand darstellt.

10.2.1.1 Vergleichende Betrachtung der Herstellungsphase von zwei technischen Leuchten mit der Einbeziehung von Produktkomponenten (bezogen auf die Produktstückzahl)

Mittels Wirkungsabschätzung über die gesamte Herstellungsphase wurde festgestellt, wie hoch der Beitrag bezüglich der untersuchten Wirkungspotentiale ist. Diese Aussage bezieht sich zunächst nur auf die Produkteinheit, um die Unterschiede zwischen beiden Produkten darstellen zu können.

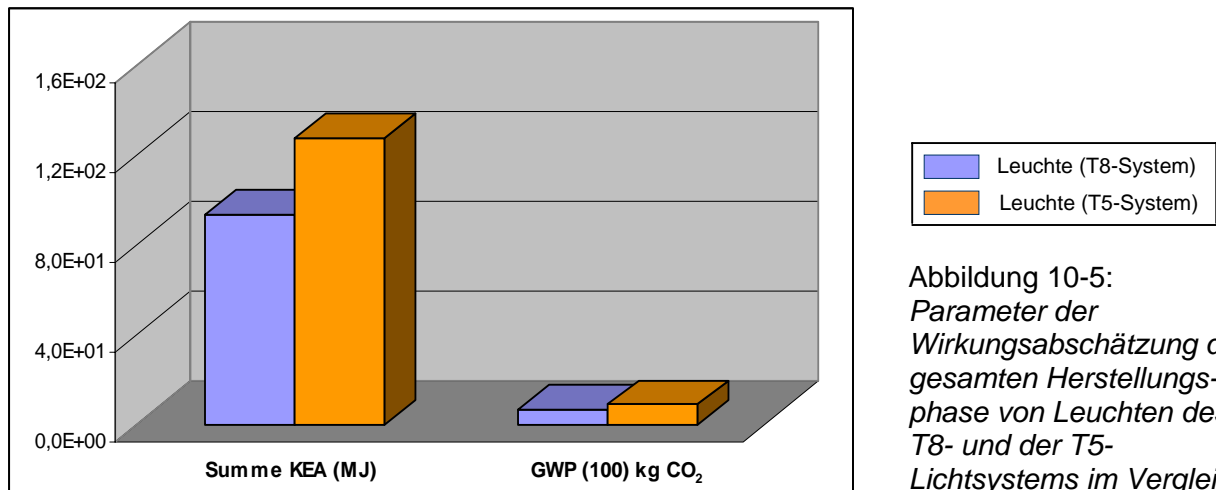


Abbildung 10-5: Parameter der Wirkungsabschätzung der gesamten Herstellungsphase von Leuchten des T8- und der T5-Lichtsystems im Vergleich (je Leuchte)

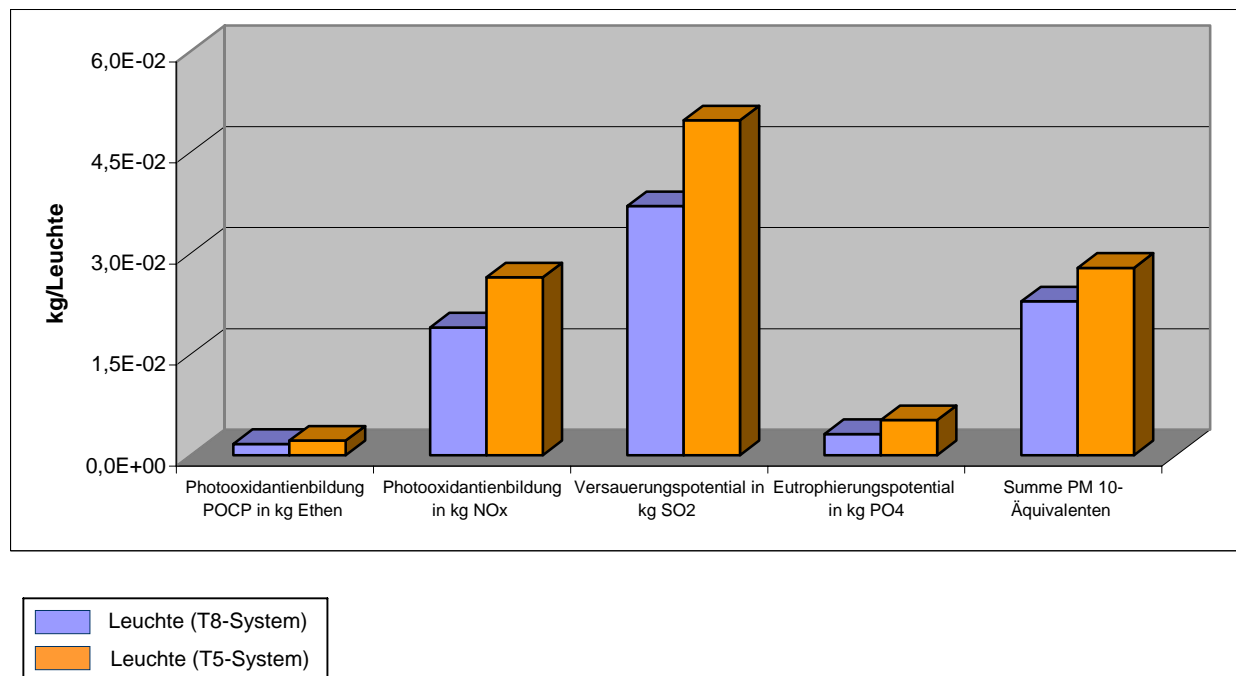


Abbildung 10-6: Parameter der Wirkungsabschätzung der gesamten Herstellungsphase von Leuchten des T8- und T5-Lichtsystems im Vergleich (je Leuchte)

Aus den Erkenntnissen der Wirkungsabschätzung kann man die Höhe der entsprechenden Wirkungskategorien für die beiden Leuchten im Vergleich als Schlussfolgerungen ziehen. Es wurde festgestellt, dass bei allen Parametern der Wirkungsabschätzung die Leuchte des T5-Lichtsystems deutlich schlechter abschneidet als die Leuchte des T8-Lichtsystems.

Die Abweichungen bezüglich der Parameter zwischen den beiden Leuchten sind relativ hoch. Die Unterschiede liegen beim kumulierten Energieaufwand bei ca. 27 % und beim Treibhauspotential bei ca. 24 %. Betrachtet man die Ergebnisse aus der Abbildung, fallen

vor allem neben dem hohen Wert des Versauerungspotentials, die Werte zu Photooxidantienbildung sowie zum Feinstaub auf [Abbildung 10-5, Abbildung 10-6].

10.2.1.2 Vergleichende Betrachtung der Herstellungsphase von zwei technischen Leuchten mit der Einbeziehung von Produktkomponenten (bezogen auf die funktionelle Einheit)

Die Bewertung der umweltbezogenen Relevanz der zwei verschiedenen Leuchtentypen soll im Bezug auf die funktionelle Einheit geschehen. Die Gewichtungen der Parameter im Hinblick auf die Produktzahl muss nun der für die gesamte Bilanz ausgewählten Systembrenndauer von 150 Mlmh angepasst werden.

Es wurde anhand der lichttechnischen Parameter berechnet, dass um die entsprechenden Einheiten erreichen zu können, man 0,6 Leuchten für das T8-Lichtsystem und 0,7 Leuchten für das T5-Lichtsystem benötigt (Vorgehensweise zu der Berechnung unter Kapitel 6, S. 60). Aufgrund des Ergebnisses der Wirkungsabschätzung in Bezug auf die funktionelle Einheit ergeben sich noch wesentliche Differenzen in der gesamten Herstellungsphase zwischen den beiden untersuchten Leuchtentypen.

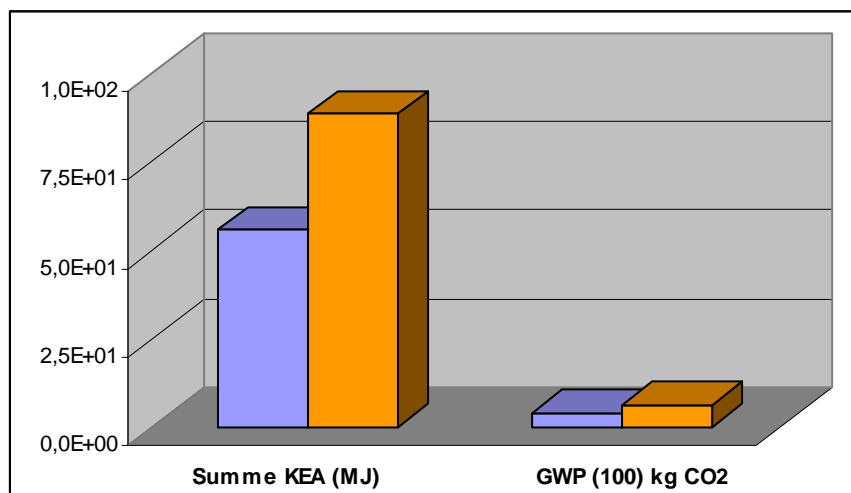


Abbildung 10-7:
Parameter der Wirkungsabschätzung der gesamten Herstellungsphase von Leuchten des T8- und der T5-Lichtsystems im Vergleich bezogen auf die funktionelle Einheit (150 Mlmh)

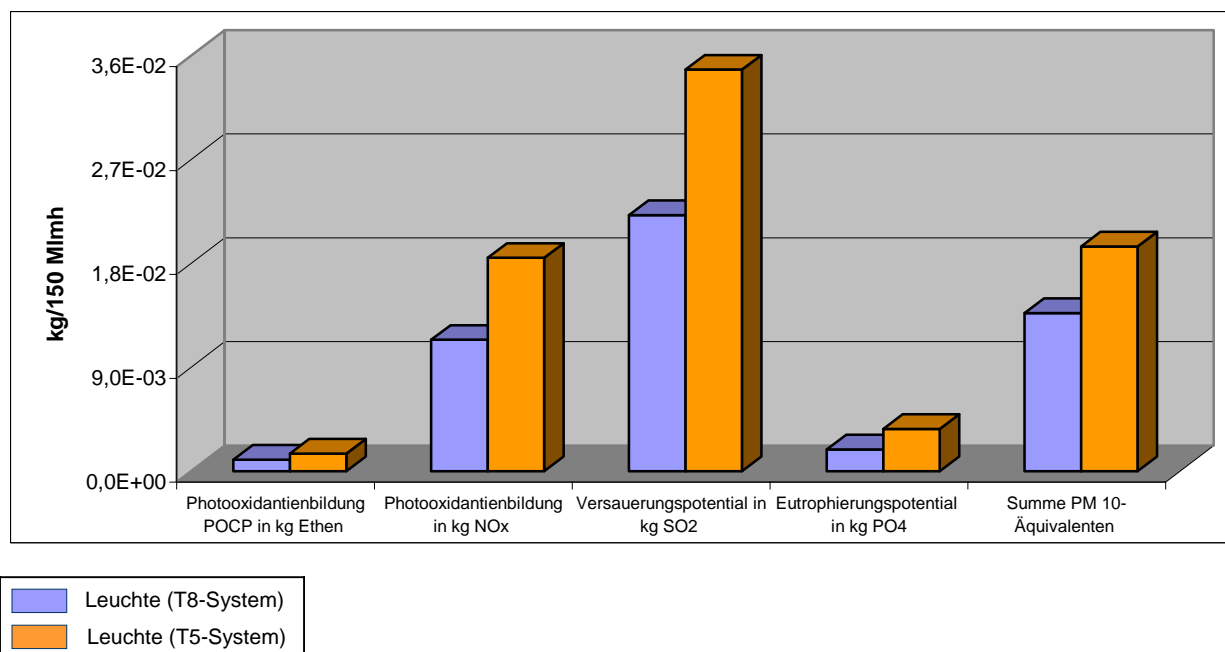


Abbildung 10-8: *Parameter der Wirkungsabschätzung der gesamten Herstellungsphase von Leuchten des T8- und T5-Lichtsystems im Vergleich bezogen auf die funktionelle Einheit*

Betrachtet man die Ergebnisse aus der Abbildung, ist festzustellen, dass den weitaus größten Beitrag das Treibhauspotential besitzt. An zweiter Stelle ist das Versauerungspotential zu nennen. Eine untergeordnete Rolle spielen das Eutrophierungspotential sowie der POCP-Äquivalentwert. Die Höhe der Werte für die NO_x – Emissionen sowie die Feinstaub-Äquivalente sind ähnlich. Bei allen Parametern der Wirkungsabschätzung zeigt die Leuchte für das T5-Lichtsystem die Nachteile auf der Seite der Umwelt. Die Unterschiede liegen bei allen untersuchten Parametern zwischen bei 35 % [Abbildung 10-7, Abbildung 10-8].

10.3 Zusammenfassung

Aus den Erkenntnissen der ökologischen Analyse zweier Leuchten kann man folgende Schlussfolgerungen ziehen: Betrachtet man ganzheitlich die gesamte Herstellungsphase so wird deutlich, dass in der Fertigung der beiden Leuchtentypen nur wenige Unterschiede vorhanden sind, dagegen aber große Differenzen in den Massen bestehen. An dieser Stelle bleibt vor allem zu beachten, dass je höher das Gewicht der Leuchte ist, unter der Berücksichtigung von gleicher Komponentenzusammensetzung, umso mehr negative Umwelteinflüsse sind über den gesamten Lebenszyklus zu erwarten. Darüber hinaus ist das Beachten des Produktdesigns im modernen Umweltschutz elementar. In der gesamten Herstellungsphase überwiegt zwar der Aufwand zur Herstellung der Komponenten, die

Tendenz ist jedoch nicht so deutlich wie bei der Herstellung von Vorschaltgeräten. Hier spielt die Fertigungsphase der Leuchte aufgrund der Energieintensiven Lackierungsanlage sowie vielen Bearbeitungsschritten der Komponenten (wie Lasern des Bleches) eine bedeutende Rolle.

Besonders große Differenzen zwischen den beiden Produkten haben sich bei der Betrachtung der gesamten Herstellungsphase anhand der funktionellen Einheit erwiesen - Systembrenndauer von 150 Mlmh. Um die Lichtmenge zu erzeugen, muss man den Einsatz von über 30 % mehr kumulierten Energieaufwand im Fall von der Leuchte des T5-Lichtsystems miteinbeziehen. Da die Leuchte selbst keinen Strom verbraucht, aber mit Leuchtstofflampe und Vorschaltgerät als ein energiebetriebenes System zu bewerten ist, muss die Tatsache bei der Betrachtung der Nutzungsphase mitberücksichtigt werden. Der Energieverbrauch für die drei Komponenten des Lichtsystems wird deswegen gemeinsam gemittelt. Die Beschreibung der Nutzungsphase findet nicht in diesem Kapitel statt, wird aber in der ganzheitlichen Betrachtung der Nutzungsphase des Lichtsystems dargestellt.

11. Entsorgung von Komponenten des Lichtsystems

Die Entsorgung des Abfalls stellt sich als eine der großen Aufgaben der heutigen Gesellschaft dar. Abfälle belasten unsere Umwelt durch eine breite Zahl an direkten sowie indirekten Auswirkungen und verursachen Kosten, die bei der Entsorgung, Verwertung und dem Recycling entstehen.

In der EU fallen jährlich rund 1,3 Tonnen Abfälle an (landwirtschaftliche Abfälle sind nicht mitgerechnet). Nach Angaben der Europäischen Umweltagentur (EUA) entfällt der größte Teil des gesamten Abfallaufkommens in der EU auf die folgenden fünf großen Abfallströme: Industrieabfälle (26 %), Bergbauabfälle (29 %), Bau- und Abbruchabfälle (22 %), feste Siedlungsabfälle (14 %) und Abfälle aus Land- und Forstwirtschaft. Etwa 2 % dieser Abfälle, d. h. rund 27 Millionen Tonnen, sind gefährliche Abfälle [97].

Diese Darstellung macht es deutlich, dass die Industrie einer der größten Beteiligten für die Abfallentstehung ist. Es ist aber auch im eigenen Interesse der Industriehersteller während der Produktion die entstehenden Abfallmengen auf einem Minimum zu halten. Vor allem der überwachungsbedürftige Abfall soll vermindert werden. Als Nächstes sind die Kapazitäten des Produktes für die Entstehung der Abfallmenge von Bedeutung. Diese Tatsache ist besonders in der Elektronikbranche bemerkbar. Laut N. Nissen [98] bringt die Miniaturisierung von Elektronikprodukten ökologische Vorteile mit sich. Je kleiner ein Produkt ist, desto weniger Abfall entsteht am Ende des Produktlebenszyklus und desto kleiner ist der Aufwand, der zu dessen Entstehung genutzt werden muss. Eine Ressourcenschonung bedeutet also immer gleichzeitig eine Deponienschonung.

11.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Die Verbesserung der Abfallwirtschaft war der Hauptgrund, die Richtlinie über Elektro- und Elektronikaltgeräte (WEEE) in Kraft zu setzen, mit dem Ziel „die Vermeidung von Abfällen von Elektro- und Elektronikgeräten und darüber hinaus die Wiederverwendung, das Recycling und andere Formen der Verwertung solcher Abfälle, um die zu beseitigende Abfallmenge zu reduzieren“ [10]. Der Hersteller von Elektro- und Elektronikgeräten ist aufgrund der Richtlinie verpflichtet, die Behandlung, Wiederverwendung sowie umweltverträgliche Entsorgung von Produkten zu übernehmen. Ab dem 13.08.2005 dürfen nur die Geräte in Verkehr gebracht werden, die eine Wiederverwendung sowie -verwertung nicht verhindern. Damit die betroffenen Produkte identifizierbar sind, ist das Aufbringen des

Symbols der durchgestrichenen Mülltonne auf die Produkte, die nach dem 13.08.2005 in Verkehr gebracht sind, vorgeschrieben. Zu den von der WEEE-Richtlinie betroffenen Kategorien gehören folgende Beleuchtungskörper: Lampen mit Ausnahme von Glüh-/ Halogenlampen, Leuchten mit Ausnahmen von Leuchten im Haushalt und die Geräte für Steuerung von Licht. Gerade in der Lampenindustrie sind die Kosten der Entsorgung im Vergleich zu den anderen von der WEEE-Richtlinie betroffenen Produkte sehr hoch [Abbildung 11-1].

Entsorgungskosten bei Lampen betragen 10% bis 80% der Herstellkosten. Für andere WEEE-Produkte ist der Kostenanteil wesentlich niedriger.

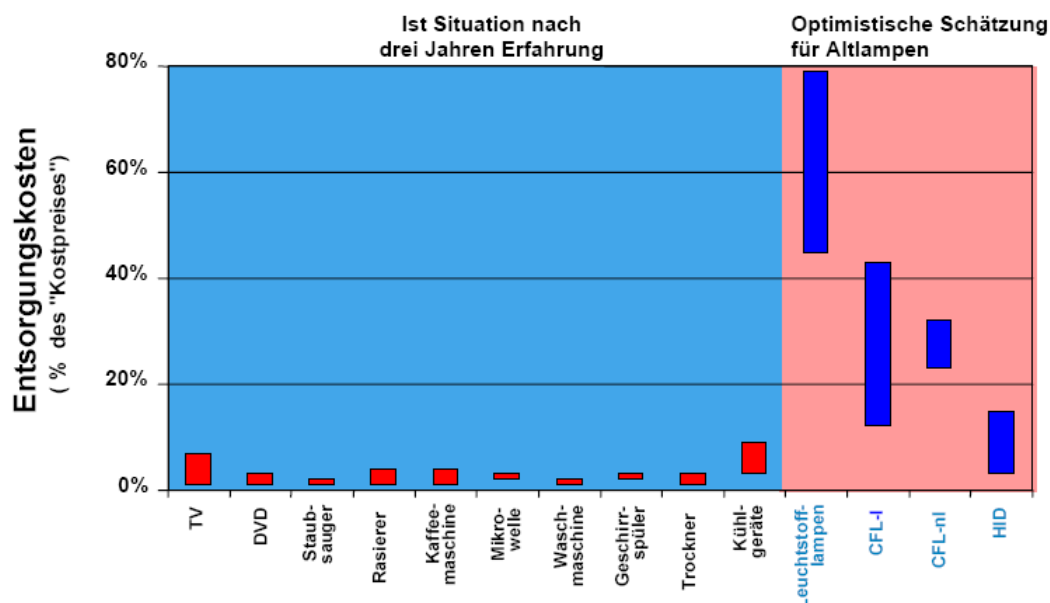


Abbildung 11-1: WEEE-Kundeninformationen Lampen, Anteil der Entsorgungskosten
Quelle: ZVEI Fachverband Elektrische Lampen

11.2 Stoffliches Recycling der Leuchtstofflampe

Die Recyclingmaßnahmen sind mit der Optimierung des gesamten Lebenszyklussystems stark verbunden. Die durch die Entsorgung gewonnenen Materialien können wieder in den Produktionszyklus eingesetzt werden. So kann z. B. die Eingabe von Glasscherben zu dem Schmelzprozess nicht nur die eingesetzte Rohstoffmenge einsparen, sondern auch den Energiebedarf der Glasschmelze reduzieren. 10 % Glasscherben mehr in der Schmelze reduzieren die Schmelzenergie um 3 %. Die Entsorgung des gesamten Lichtsystems erfolgt getrennt für Leuchtstofflampe, Vorschaltgerät und Leuchte. Nun wird das Recycling der

einzelnen Komponenten des Lichtsystems dargestellt. Die Leuchtstofflampen können aufgrund zweier Verfahren recycelt werden (KappTrenn-Verfahren und Shredder-Verfahren). Die Produktionsabfälle aus der Lampenproduktion werden entsorgt, der Ausschuss mit Kapp Trenn-Verfahren aufgearbeitet.

11.2.1 KappTrenn-Verfahren

Die KappTrenn-Verfahren eignen sich nur für das Recycling von stabförmigen Leuchtstofflampen. Mit dem Shredder-Verfahren kann man im Prinzip alle Typen der Entladungslampen recyceln. Nach dem häufigsten Recyclingverfahren für die Leuchtstofflampen (KappTrenn-Verfahren) werden die Enden der Leuchtstofflampe abgeschnitten und der Leuchtstoff ausgeblasen. Die Leuchtstoffe, die zu den Halophosphaten gehören, lassen sich nicht wieder verwerten. Für das Recyclingverfahren von Dreibandenleuchtstoffen ist bereits eine Strategie entwickelt worden. Die verstärkten Bemühungen bezüglich dem Recycling des Dreibandenleuchtstoffes hatte im Prinzip zwei Gründe. Zum Ersten ist das die stets steigende Zahl an Leuchtstofflampen, die mit Dreibandenleuchtstoffen beschlämmt sind, zum Zweiten ist hier der hohe Preis der Leuchtstoffkomponenten zu nennen.

Vor allem hat das Recycling des Glaskolbens eine große Bedeutung für die effiziente Produktion der Leuchtstofflampen. Das Kolbenglas kann nach dem Recyclingverfahren in Form von Glasscherben wieder den Schmelzprozessen zugeführt werden. Durch den Einsatz von Recyclingscherben lassen sich der spezifische Energiebedarf der Glasschmelze sowie die Menge von eingesetzten Rohstoffen reduzieren. Da das wieder gewonnene Kolbenglas quecksilberhaltig ist, soll der Quecksilbergehalt auf $< 3\text{mg/kg}$ in den einzusetzenden Scherben eingehalten werden. Durch die Zugabe von quecksilberhaltigem Glas in den Produktionsprozess (Glasschmelzen) werden die Quecksilberemissionen zwar leicht steigen, ganzheitlich gesehen spielt das aber nur eine untergeordnete Rolle. Die größere Bedeutung hat die enorm hohe Energieeinsparung beim Schmelzprozess.

Das Recycling von Leuchtstofflampenenden läuft über die so genannte Brecher- und Siebstrecke. Damit sich die abgeschnittenen Kolbenenden bis auf die Materialien sortieren lassen, müssen die erst gebrochen werden. Die auf diesem Weg erhaltenen Metalle werden in Eisen und Nichteisenmetalle sortiert, was zu den weiteren Recyclingschritten führt. Die bei dem KappTrenn-Verfahren anfallenden Reste wie Gestellglas und Sockelkitt lassen sich durch ein spezielles Plasmaverfahren weiter verarbeiten. Der fein gemahlene Lampenbruch wird bei Temperaturen über 6000 °C im Argon-Plasma aufgeschmolzen. Durch den Einsatz

der hohen Temperaturen ist dieser Prozess zwar energieaufwendig, bietet aber einen wichtigen Vorteil. Aufgrund der spezifischen Schmelzbedingungen wie hohe Temperaturen sowie Ausschluss von Sauerstoff können sich keine Dioxine bilden. Das verglaste (vitrifizierte) Material wird entweder direkt, oder nach einer Weiterbehandlung zu Schaumglas verarbeitet. Die Verwendung des Schaumglases ist durch eine Zahl an Eigenschaften von Vorteil. Eine gute thermische Isolation, mechanische Stabilität, keine Verrottung bei einem geringeren spezifischen Gewicht macht das Schaumglas für die Bauindustrie als Isolationsmaterial sowie im Straßenunterbau oder Drainagesystemen verwendbar. Mit der Einführung der Herstellungsverfahren von Schaumglas ist ein weiterer Schritt in der Leuchtstofflampenrecycling erreicht [Abbildung 11-2].

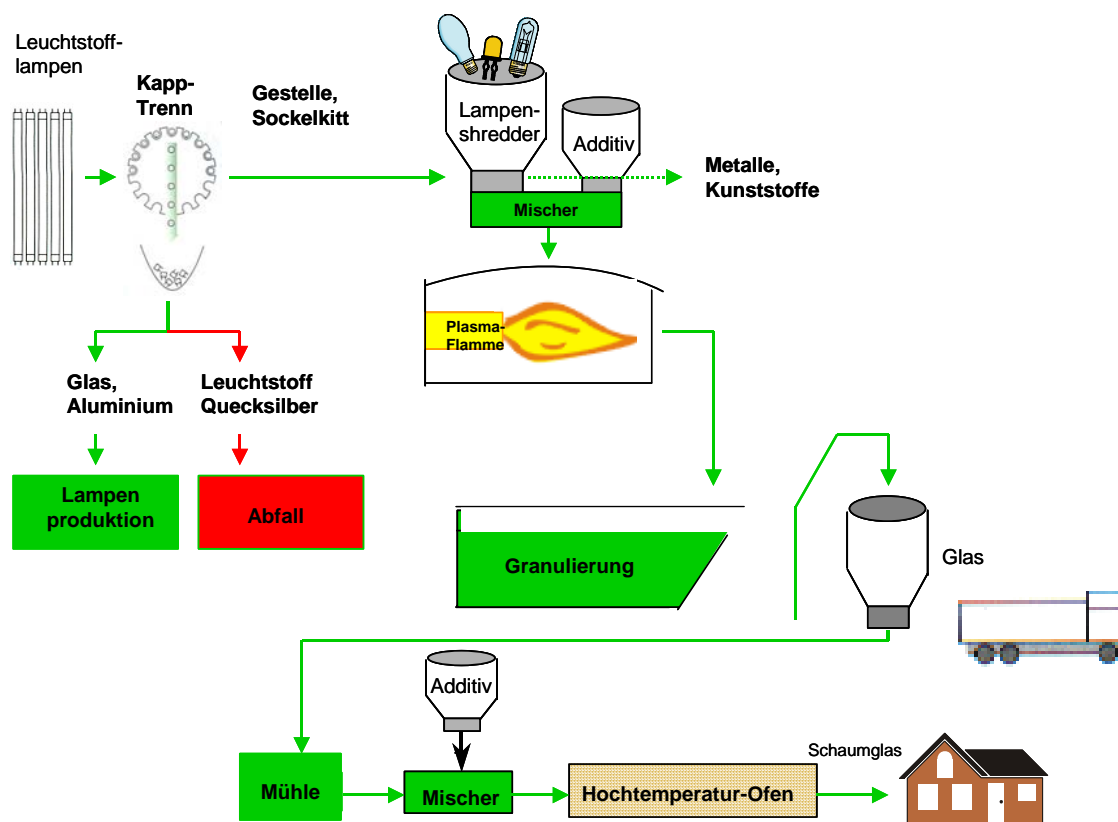


Abbildung 11-2: Recycling der Leuchtstofflampen/ Entladungslampen

11.2.2 Shredderverfahren

Mit einem Shredderverfahren lassen sich nicht nur Leuchtstofflampen, sondern alle Lampentypen recyceln [Abbildung 11-3]. Auch das Glasbruch, die Produktionsabfälle sowie die Restfraktionen aus der Kapp-Trennmaschine können weiter verarbeitet werden. Der Shredderprozess erfolgt in drei Schritten:

Als erstes werden die Lampen nach Typen und Baugrößen sortiert und dann in einer Hammermühle zerkleinert. In einer nachgeschalteten Taumelsiebmaschine wird der Glasbruch in die Korngrößen aufgeteilt. Die erste Fraktion hat die Korngröße > 8 mm und die besteht aus den Aluminiumkappen, die als flächig verformte Teile auf dem ersten Siebdeck ausgetragen werden. Das zweite Produkt (Fraktion kleiner als 8 mm und größer als 1 mm) besteht aus Glasfraktion. Dieses Material wird nach zweifacher Absiebung der Leuchtstoffe direkt abgefüllt. Die dritte Fraktion ist der abgesiebte Leuchtstoff (Korngrößen kleiner als 1 mm). Dieses Pulver wird ebenfalls separat erfasst. Der Leuchtstoff kann einer Quecksilberdestillation unterzogen werden. Die gerade beschriebene sortenreine Gewinnung der Lampenbestandteile (Trennung zu Metallen, Glas und Leuchtstoff) ermöglicht sowohl eine hochwertige Verwertung als auch einen hohen Verwertungsgrad bei stabförmigen Leuchtstofflampen von fast 100 % [99].

Quotenschnittstelle – Beispiel Sammelgruppe- Lampen

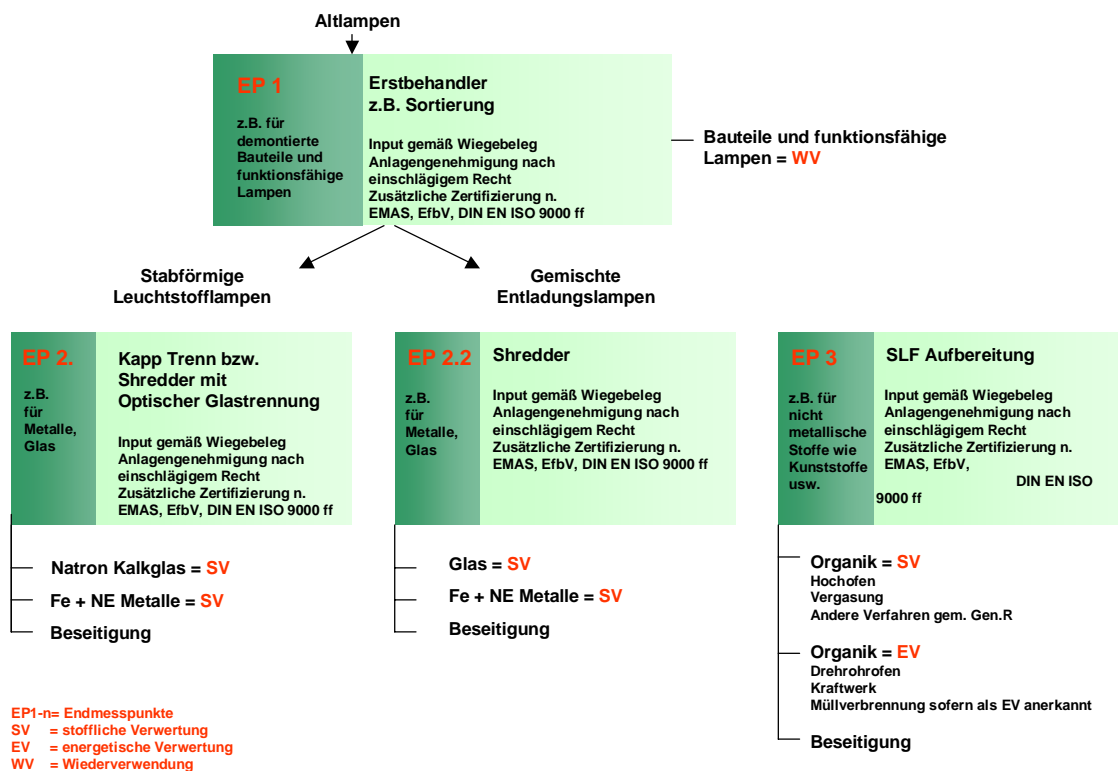


Abbildung 11-3: Darstellung des Entsorgungswegs von Lampen
 Quelle: ZVEI

11.3 Entsorgung von Leuchten und Vorschaltgeräten

Der Entsorgungsweg von Leuchten und Vorschaltgeräten erfolgt für beide Produkte auf ähnlichem Weg [Abbildung 11-4]. Als erstes müssen die Geräte demontiert werden. Die nach der Demontage erhaltenen Materialien werden weiter in der Shredder-Fraktion bearbeitet. In dieser Phase erfolgt eine Verwertung von Metallen - die Metalle werden in Eisen-Metallschrott und Nichteisen Metallschrott getrennt. Die Rückstände aus dem Shredder-Verfahren werden der entsprechenden stofflichen oder thermischen Verwertung zugeführt. Die Restmaterialien, die keiner weiteren Behandlung unterliegen können, müssen aus einer Deponie abgelagert werden.

Entsorgung der Leuchte und Vorschaltgeräte

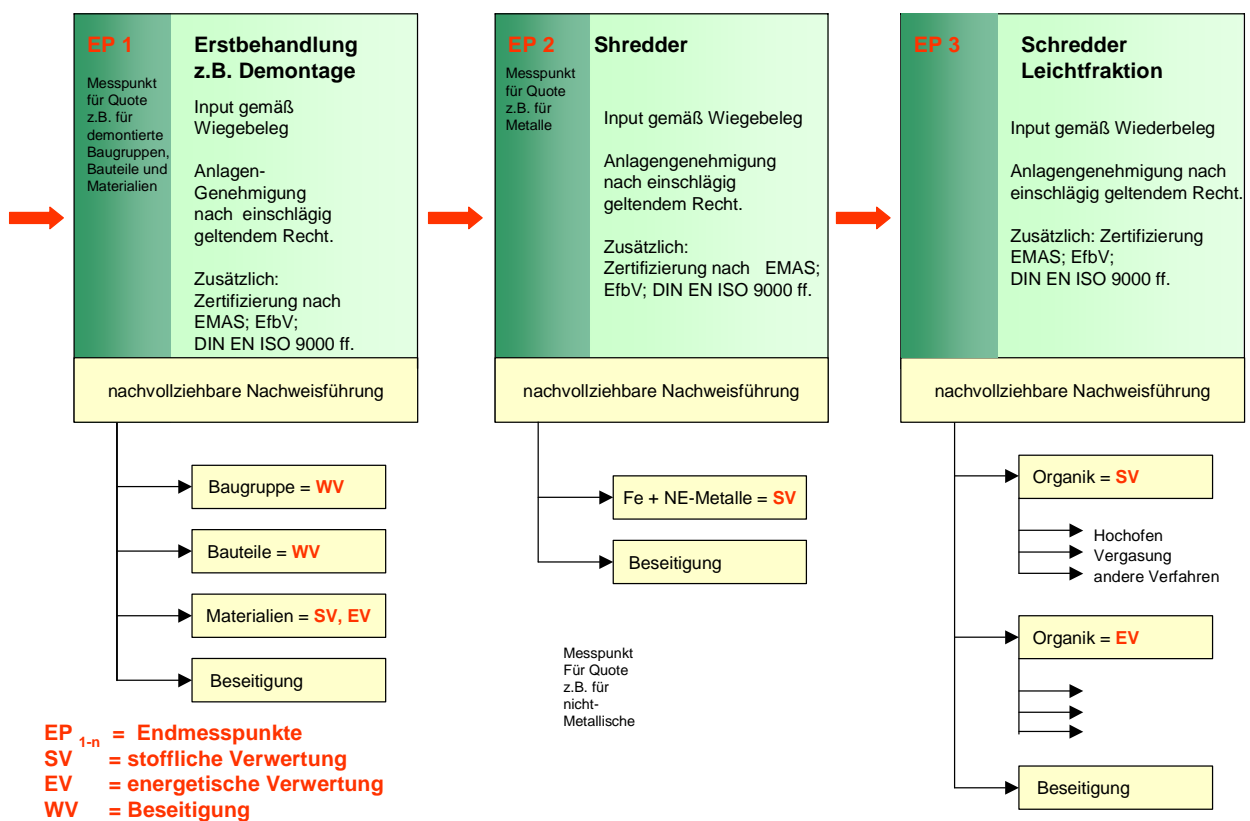


Abbildung 11-4: Konzept zur Bestimmung von WEEE-konformen Recycling- und Verwertungsquoten und Darstellung der zugeordneten Prozesse
 Quelle: ZVEI

Da der Hersteller laut WEEE-Richtlinie über den Entsorgungsweg seines Produktes eine Verantwortung trägt, wird es in deren Interesse sein, die genauen Mengen des Elektro- und Elektronikschrottes zu erkennen. Die Input- und Output-Flüsse müssen dokumentiert

werden. Die Mengenbilanzierung je Sammelgruppe erfolgt durch den vom Hersteller beauftragten Betreiber der Behandlungsanlagen, dem so genannten Erstbehandler.

Die Modellierung des Entsorgungsweges von Vorschaltgeräten und Leuchten konnte leider im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden. Der Grund lag am Mangel an produktionsspezifischen Daten von Recyclinganlagen. Darüber hinaus sind die Darstellungen des Energieverbrauches sowie der Emissionen im Bezug auf Menge des entsprechend recycelten Elektro- und Elektronikschrottes nicht möglich gewesen.

12. Ganzheitliche Betrachtung der Lichtsysteme

Die Ermittlung von Parametern der Wirkungsabschätzung, die mit den zwei Lichtsystemen in Verbindung stehen, wurde bereits für die gesamte Herstellungsphase für jede Komponente des jeweiligen Systems (Leuchtstofflampe, Vorschaltgerät sowie Leuchte) durchgeführt. Nun werden alle Wirkungsabschätzungsparameter über die gesamte Herstellung im Bezug zur funktionellen Einheit, der Betriebslebensdauer, des jeweiligen Systems zusammengestellt.

Darüber hinaus lassen sich die Differenzen der Umweltauswirkungen von den jeweiligen Komponenten, Produkten über die Herstellung sowie die Nutzungsphase abbilden. Das Ziel ist, dabei zu erkennen, bei welchen Komponenten die Haupteinflüsse hinsichtlich der ökologischen Auswirkungen liegen, sowie welche Bedeutung die Nutzungsphase im Vergleich zu der Herstellungsphase des Systems hat. An diese Stelle wird der Strommix-Deutschland für die Ausrechnung der Wirkungsabschätzungsparameter während der Gebrauchsphase herangezogen. Die Unterschiede der ökologischen Auswirkungen zwischen den Lichtsystemen sollen auch zeigen, wie hoch die ökologischen Vorteile beim Einsatz von Produkten mit neuer Technologie sind. Aufgrund der Bilanzierung unterschiedlicher Produkte gleicher Kategorien lassen sich die Empfehlungen für die künftige Entwicklung der Produktgruppe feststellen.

12.1 Vergleichende Darstellung definierter Wirkungskategorien der gesamten Herstellungsphase aller Komponenten der Lichtsysteme (bezogen auf die funktionelle Einheit)

In diesem Kapitel wird eine Übersicht von Parametern der Wirkungsabschätzung von allen Komponenten des Lichtsystems im Bezug durchgeführt.

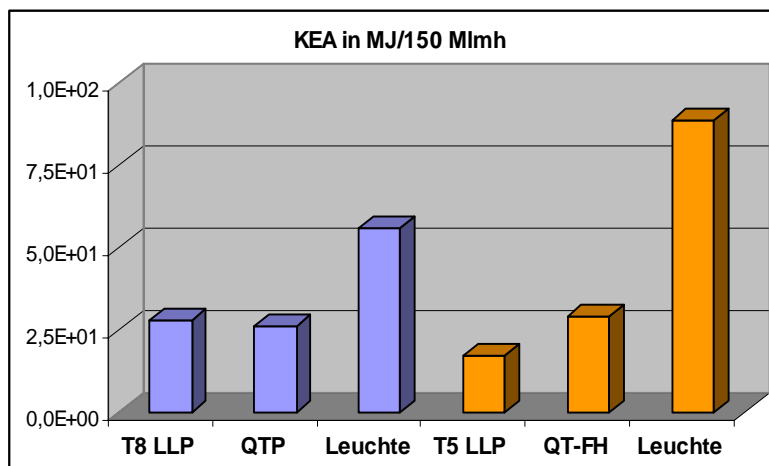


Abbildung 12-1: Kumulierter Energieaufwand der Herstellungsphase von Komponenten der T8- und T5- Lichtsysteme bezogen auf die funktionelle Einheit

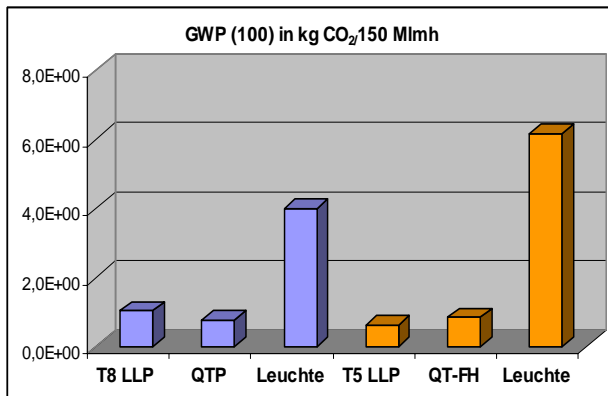


Abbildung 12-2: Treibhauspotential in kg CO₂ der gesamten Herstellungsphase von Komponenten der T8- und T5- Lichtsysteme bezogen auf die funktionelle Einheit

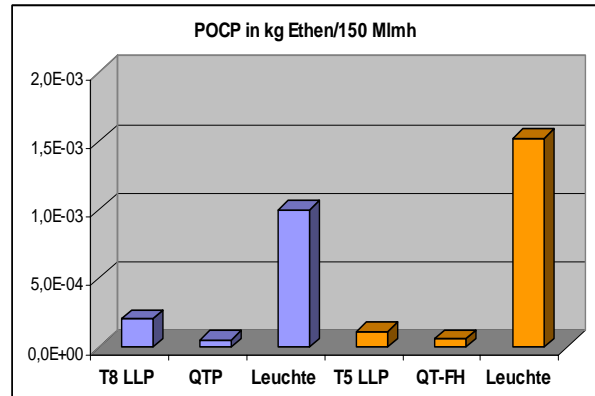


Abbildung 12-3: Photooxidantienbildung in kg Ethen der gesamten Herstellungsphase von Komponenten der T8- und T5- Lichtsysteme bezogen auf die funktionelle Einheit

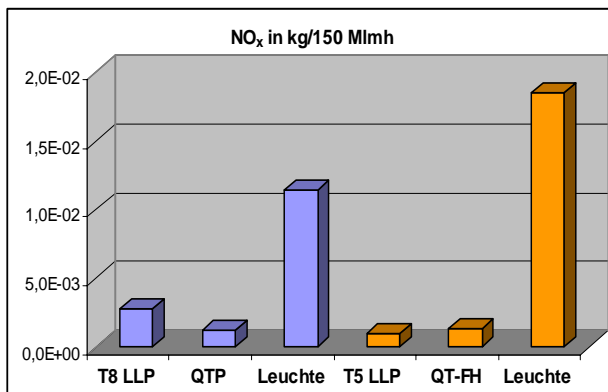


Abbildung 12-4: Photooxidantienbildung in kg NO_x der gesamten Herstellungsphase von Komponenten der T8- und T5- Lichtsysteme bezogen auf die funktionelle Einheit

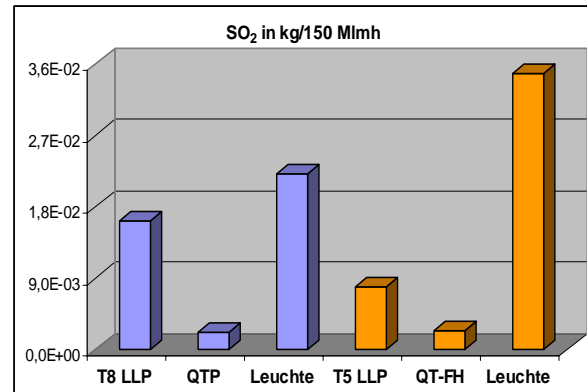


Abbildung 12-5: Versauerungspotential in kg SO₂ der gesamten Herstellungsphase von Komponenten der T8- und T5- Lichtsysteme bezogen auf die funktionelle Einheit

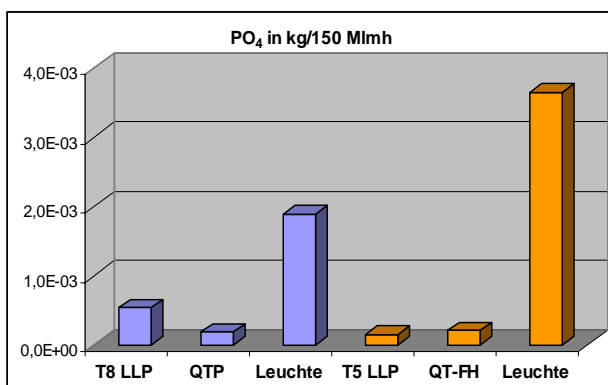


Abbildung 12-6: Eutrophierungspotential in kg PO₄ der gesamten Herstellungsphase von Komponenten der T8- und T5- Lichtsysteme bezogen auf die funktionelle Einheit

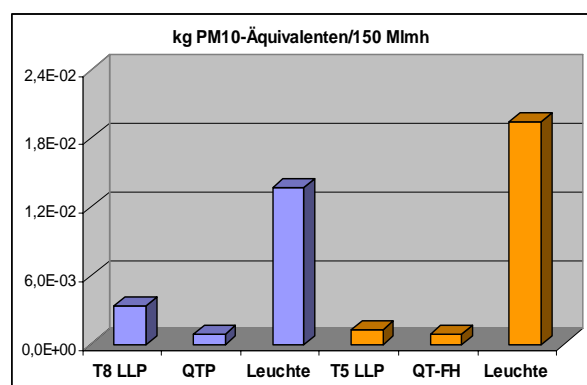


Abbildung 12-7: Summe PM10-Äquivalenten von Komponenten der T8- und T5- Lichtsysteme bezogen auf die funktionelle Einheit

Aufgrund der Zusammenstellung aller Parameter der Wirkungsabschätzung von den Komponenten des Lichtsystems und im Bezug auf die funktionelle Einheit wird deutlich, dass bei allen untersuchten Aspekten der Umweltbeeinträchtigung die Haupteinflüsse bei der Herstellung der Leuchte liegen [Abbildungen von 12-1 bis 12-7]. Bei jedem der untersuchten Parameter der Wirkungsabschätzung sind die Werte für die Abschätzung der Umwelteinflüsse der Leuchte hoch. Diese Tendenz hängt vor allem mit der hohen Masse der Leuchte im Bezug zu anderen Komponenten zusammen.

Die Herstellung von Hauptkomponenten der Leuchte (Kunststoffen, Stahl und Aluminium) ist energieaufwändig. Auch der Prozess der Lackierung des Leuchtenreflektors trägt deutlich zu dem Ergebnis bei. Die Differenz zwischen den zwei Leuchten resultiert nicht nur aus dem höheren Aufwand der Herstellungsphase sondern auch aus dem höheren Bedarf an Leuchtenmengen für die ausgewählte Systembrenndauer von 150 Mlmh als funktionelle Einheit.

Aus dieser Betrachtung kommt heraus, dass bei der ökologischen Umweltverträglichkeit der Leuchte das Gewicht der Leuchtenkomponenten die größte Rolle spielt. Je leichter und kleiner die Leuchte ist, unter Berücksichtigung der gleichen Fertigungstechnologie, desto größer ist der Beitrag zur Umweltschonung. Bei der Betrachtung der weiteren Komponenten des Lichtsystems in Bezug auf die funktionelle Einheit fällt auf, dass bei allen Parametern der Wirkungsabschätzung das QTP- Vorschaltgerät besser abschneidet als die QT-FH. Die Unterschiede sind jedoch gering und resultieren nur aus der höheren Menge von Vorschaltgeräten, die für die Systembrenndauer von 150 Mlmh erforderlich sind.

Bei der Betrachtung des ökologischen Beitrages zur Auswirkung auf die Umwelt der Leuchtstofflampen im Vergleich zeigt sich, dass die T5-Leuchtstofflampe deutlich besser im System abschneidet, als die T8-Leuchtstofflampe. Die hohen Unterschiede zwischen den Parametern der Wirkungsabschätzung resultieren als erstes aus den günstigeren Werten der Bilanz der T5-Leuchtstofflampe und als zweites aus einem kleineren Bedarf an den T5-Leuchtstofflampen im System aufgrund der längeren Lebensdauer.

Auffallend sind die Differenzen bei den Emissionen zwischen den T5- und T8-Leuchtstofflampen. Hier spielt vor allem die Einsparung der Ressourcen bei der Glasherstellung vom T5-Leuchtstofflampenrohr eine große Rolle. Die deutlich niedrigeren Werte bei NO_x , SO_4 sowie bei den Feinstaub- Äquivalenzwerten resultieren aus der Ein-

sparung der Rohstoffe bei der Herstellung der Glaskolben für die T5-Leuchtstofflampe sowie einem niedrigeren Energieverbrauch pro Produkt während der Herstellungsphase.

Im Folgenden wird der Beitrag von Wirkungsabschätzung je Komponente des Lichtsystems zum gesamten Beitrag der Herstellungsphase abgebildet. Für diese Aufteilung ist der prozentuelle Anteil der Umwelteinflüsse der Komponenten des Lichtsystems im Bezug auf die gesamte Höhe der Wirkungsparameter des jeweiligen Lichtsystems dargestellt [Abbildung 12-8 und Abbildung 12-9].

Bei dieser Zusammenstellung fällt auf, dass bei dem Vergleich die überwiegenden Emissionen aus der Herstellung der Leuchte stammen. Bei der Herstellung des T5-Lichtsystems liegt der Beitrag besonders hoch. Bei der Herstellung des T8-Lichtsystems überwiegt der Einfluss der T8-Leuchtstofflampenherstellung. Die höchste Menge an Emissionen bei der Herstellung von Leuchtstofflampen in beiden untersuchten Fällen liegt im Versauerungspotential.

Bei der Herstellung der Vorschaltgeräte überwiegt der Beitrag zum Treibhauspotential.

Bei der ganzheitlichen Betrachtung des Lichtsystems liegen die höchsten Werte für die Leuchte bei der Photooxidantien- und Feinstaubbildung sowie dem Beitrag zum Eutrophierungspotential.

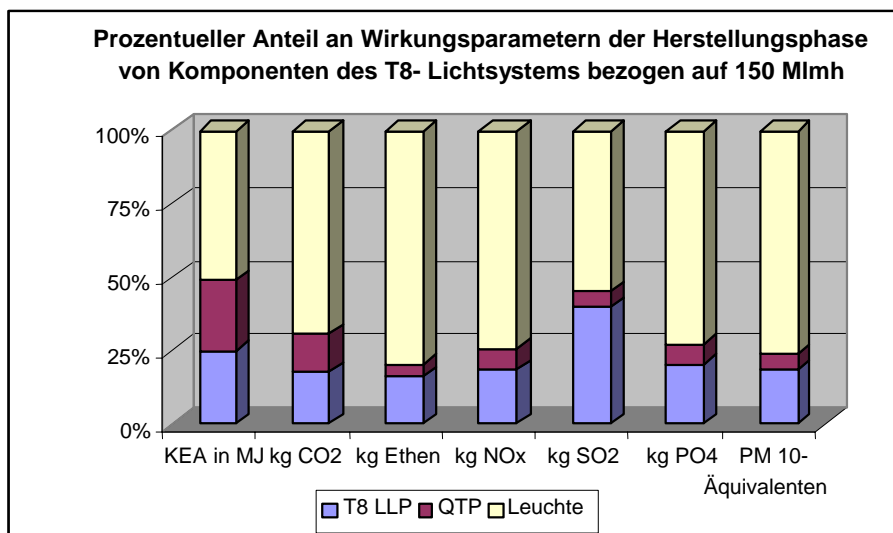


Abbildung 12-8: Prozentueller Anteil an Wirkungsparametern der Herstellungsphase von Komponenten des T8-Lichtsystems bezogen auf die funktionelle Einheit (150 Mlmh)

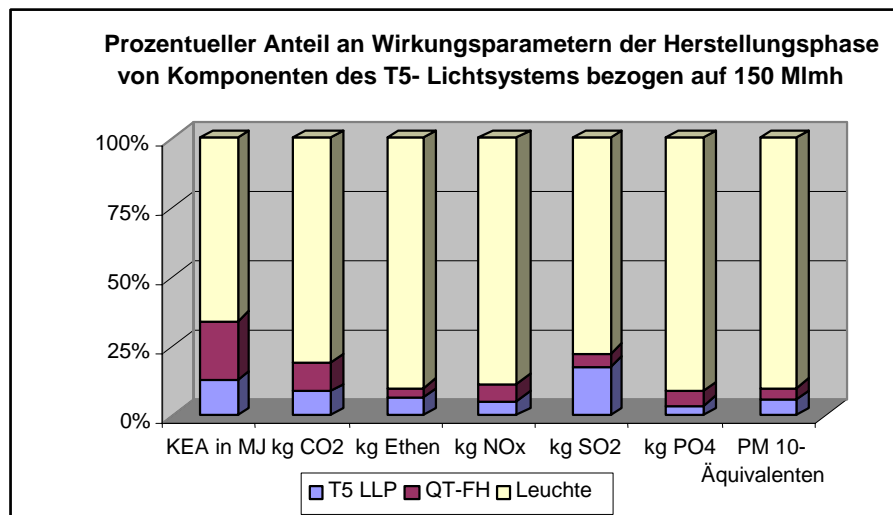


Abbildung 12-9: Prozentueller Anteil an Wirkungsparametern der Herstellungsphase von Komponenten des T5-Lichtsystems bezogen auf die funktionelle Einheit (150 Mlmh)

12.2 Vergleichende Darstellung definierter Wirkungskategorien der gesamten Herstellungsphase und der Nutzungsphase der T8- und T5-Lichtsystemen im Vergleich

Der Bilanzierungsumfang umfasst die mit der gesamten Herstellungsphase sowie der Nutzungsphase in Verbindung stehenden Parameter der Wirkungsabschätzung. Aufgrund der vergleichenden Darstellung der zwei Lichtsysteme konnten die Unterschiede zwischen den beiden Systemen ganzheitlich dargestellt werden.

Bei dieser Betrachtung sind die Differenzen in der Höhe des gesamten kumulierten Energieaufwandes der Herstellungsphase von T8- und T5-Lichtsystemen festzustellen. Die liegen bei der Herstellung des T5-Lichtsystems in Höhe der KEA- Parameter um 25 MJ höher als bei der des T8-Lichtsystems [Abbildung 12-10]. Der Grund dafür liegt eindeutig an den hohen Werten der gesamten Herstellungsphase der Leuchte des T5-Lichtsystems, was mit dem massiven Aufbau des zu untersuchenden Produktes verbunden ist. Wenn die T5-Leuchte baugleich mit der T8-Leuchte wäre, würde das T5-Lichtsystem schon in der Herstellungsphase besser abschneiden aufgrund der deutlich schlechteren Werte bei der Herstellung der T8-Leuchtstofflampe.

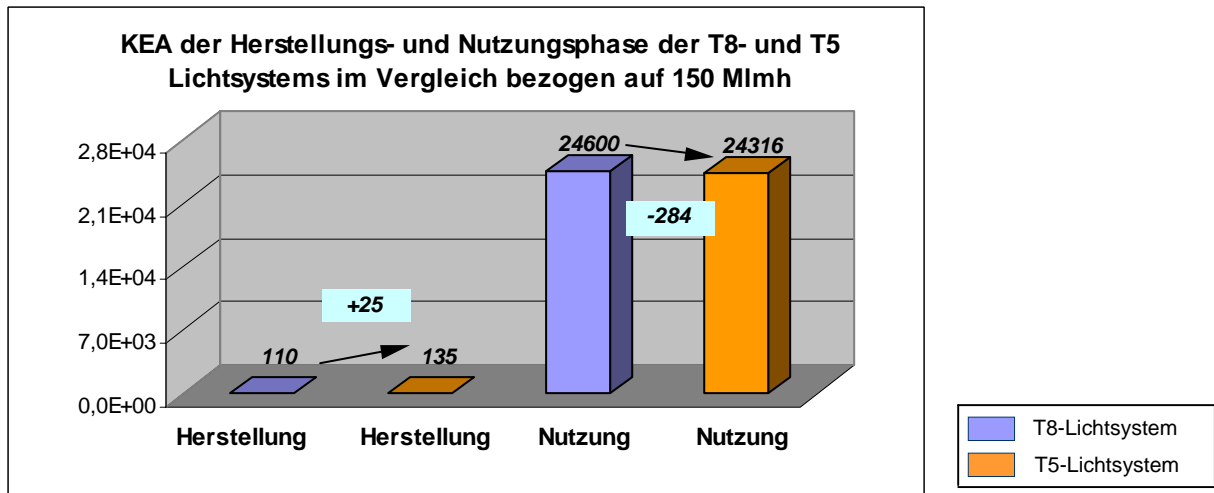


Abbildung 12-10: KEA der Herstellung und Nutzungsphase der T8- und T5-Lichtsysteme im Vergleich bezogen auf die funktionelle Einheit (150 Mlmh)

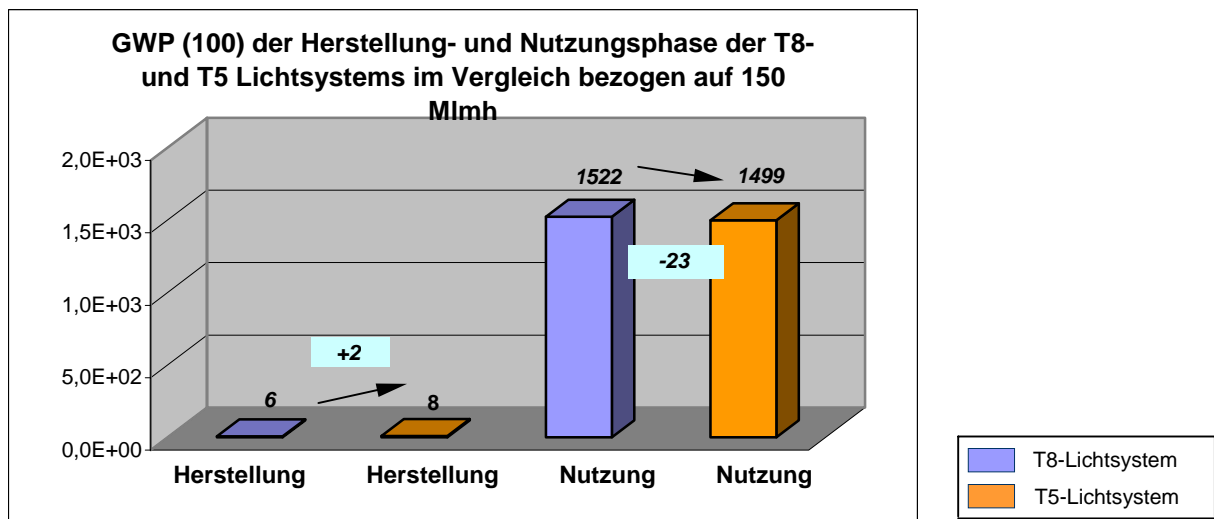


Abbildung 12-11: GWP (100) der Herstellung und Nutzungsphase der T8- und T5-Lichtsysteme im Vergleich bezogen auf funktionelle Einheit (150 Mlmh)

Die Vorteile beim Einsatz des T5-Lichtsystems werden in der Nutzungsphase deutlich. Der Unterschied beim kumulierten Energieaufwand über die Nutzungsphase beträgt 284 MJ Einsparung beim T5-Lichtsystem im Vergleich zum T8-Lichtsystem. Ganzheitlich gesehen liegt die Einsparung bei der Nutzung eines T5-Lichtsystems im Bezug auf die ökologischen Auswirkungen des Produktes bei 259 MJ - 932,4 Millionen kWh bei einer Betriebslebensdauer von 150 Mlmh [Betriebslebensdauer eines Lichtsystems]. Bei der Betrachtung der weiteren Parameter der Wirkungsabschätzung, z. B. GWP 100 in kg CO₂ kann man die gleiche Tendenz erkennen. In der Herstellungsphase des T5-Lichtsystems überwiegt zwar der Ausstoß der CO₂-Emissionen, über die Nutzungsphase ist der jedoch wieder um das 10-fache niedriger [Abbildung 12-11]. Das hohe Einsparungspotential in der Nutzungsphase

zeigt, dass die weitere Entwicklung der Lichtsysteme verstärkt mit der Korrelation zur
Gebrauchsphase stehen, da die Lebensdauer der Komponenten sowie die Lichtausbeute
des Lichtsystems eine entscheidende Rolle in der Nutzungsphase haben. Wenn man
ganzheitlich den Vergleich mit Hilfe der ökologischen Wirkungsparameter zwischen der
Herstellungsphase und Nutzungsphase darstellt, zeigt sich, dass die Herstellungsphase aller
Komponenten des Lichtsystems nur eine untergeordnete Rolle spielt [Abbildung 12-12 und
Abbildung 12-13].

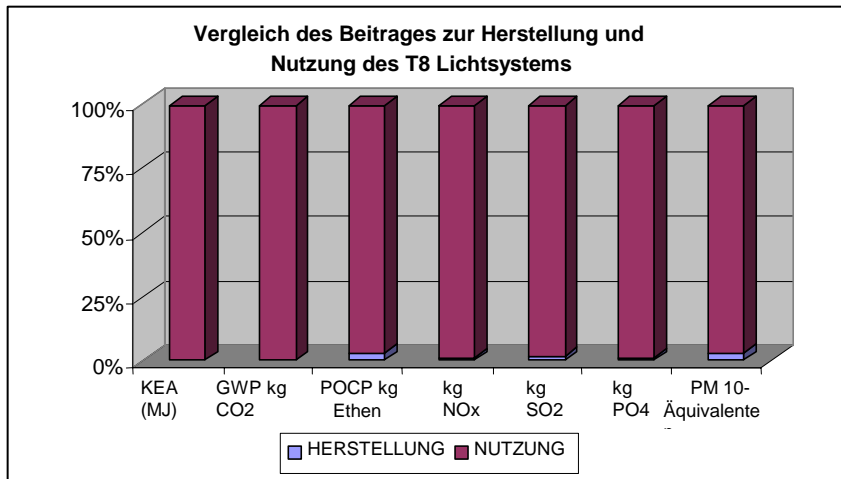


Abbildung 12-12: Vergleich des Beitrages zur Herstellung und Nutzung des gesamten T8-Lichtsystems

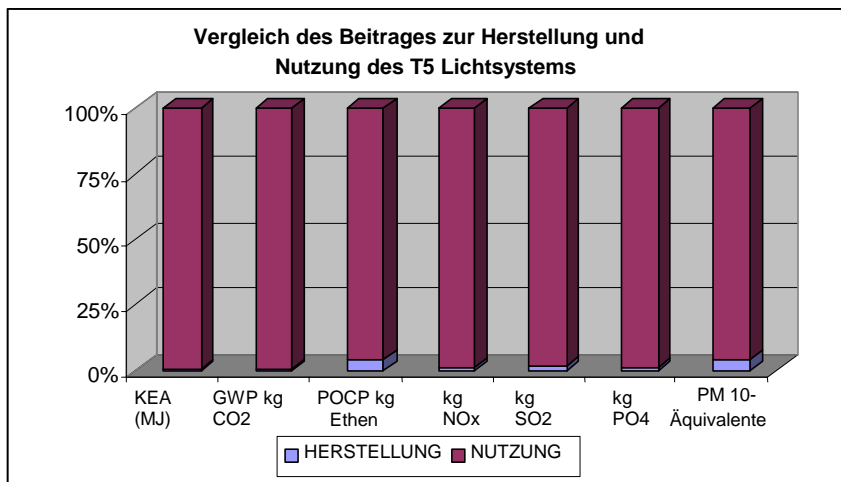


Abbildung 12-13: Vergleich des Beitrages zur Herstellung und Nutzung des gesamten T5-Lichtsystems

13. Bewertungsmodell der Lichtsysteme unter der Berücksichtigung von Anforderungen der EuP-Richtlinie

Ziel der ganzheitlichen Analyse der Lichtsysteme war die Entwicklung einer Bewertungsmethode, die für die Produktgruppe der Lichtsysteme geeignet ist. Durch die LCA wurden die relevanten Umweltauswirkungen ermittelt, um aufgrund dessen, neue Entscheidungsstrategien aufzeigen zu können. Im Vordergrund sollte neben der rein ökologischen Ermittlung der wichtigsten Faktoren für die Lichtsysteme, der Einfluss des Kunden bei der Produktwahl berücksichtigt werden. Denn besonders bei der Beleuchtung sind die Unterschiede in den Produktpaletten hinsichtlich der mit der Nutzungsphase in Verbindung stehenden Umweltauswirkungen, sehr hoch. Die Bewertungsmethode soll aber gleichzeitig die Anforderungen der EuP-Richtlinie widerspiegeln. Darüber hinaus soll ein Vorschlag für die Rahmenbedingungen eines Öko-Profiles für Lichtsysteme im Hinblick auf die EuP-Richtlinie daraus abgeleitet werden können. Mit der Darstellung der ökologischen Auswirkungen verschiedener Produkte für gleiche Anwendungsgebiete wird es möglich sein, die besten Produkte zu identifizieren. Die Produkte, die schlecht bei der Bewertung abschneiden, d. h. ein gewisses Energieeffizienzminimum nicht erreichen, könnten dann sukzessiv aus dem Markt genommen werden.

13.1 Anforderungen an die Bewertungsmethode für die Lichtsysteme

Die Bewertung der Lichtsysteme wurde anhand der Ergebnisse einer LCA für zwei Lichtsysteme vorgenommen. Die Rolle der ökologischen Bewertung liegt vor allem in der Beurteilung von Produkten der gleichen Anwendungsgebiete untereinander im Hinblick auf das ökologische Profil des Produktes. Mit der Bewertungsthematik ist eine gewisse Problematik verbunden. Auch wenn die ökologischen Kriterien anhand einer LCA ermittelt worden sind, ist es im Prinzip kaum möglich, eine vergleichende Bewertung vieler verschiedener Produkte oder Produktsysteme durchzuführen. Es ist relativ einfach, wenn beide Produkte nach dem gleichen Schema untersucht worden sind. Schwierig ist es, wenn ein genereller Produktvergleich vorgenommen werden soll, aber für die vergleichenden Produkte keine LCA nach der gleichen Methode vorliegt. Die LCA kann dem Produkt nicht nachträglich übergestülpt werden, sondern erfordert die präzisen Daten über den gesamten Lebenszyklus. Für die in dieser Arbeit untersuchten Lichtsysteme sind die gleichen Kriterien nicht nur bei der Suche nach Bewertungsverfahren, sondern vor allem zur Herstellung von vergleichenden Ökobilanzen angewandt. Die Basis für die ökologische Bewertung liegt vor allem in der Beurteilung von Produkten der gleichen Produktgruppe untereinander im

Hinblick auf das ökologische Profil. Das Ziel ist dabei, die Optimierungspotentiale des Systems zu erkennen, um künftig durch maximale Systemeffizienz einen Beitrag zum Umweltschutz leisten zu können.

Die in dieser Arbeit vorgeschlagene Bewertungsmethode beinhaltet die wichtigsten Kriterien bei der Auswahl von Leuchtstofflampen, Vorschaltgeräten und Leuchten und ermöglicht so dem Anwender, sich die besten Produkte anhand bestimmter Kriterien auszusuchen und zu bewerten. Der Kunde bestimmt die Auswahl der Komponenten des Lichtsystems, die in Kombination zu einer recht unterschiedlichen Energieeffizienz und damit verbundenen Umweltauswirkung führen können. Wichtig ist, dass der Kunde über die effizienten Systemkomponenten aufgeklärt ist und diese mühelos kombinieren kann. Die Kommunikation zwischen Hersteller und Verbraucher muss auf einer einfachen und verständlichen Basis geschehen. Darüber hinaus ist auch die Erstellung von Produktinformationen, in welchen die nützlichen Informationen enthalten sind, von Bedeutung.

13.2 Anforderungen der EuP-Richtlinie an das Ökodesign von energiebetriebenen Produkten

Die zentrale Anforderung der EuP-Richtlinie (Eco-design Requirements for Energy-using Products) ist die Steigerung der Energieeffizienz in den Mitgliedstaaten der EU, was auf die Verbesserung der Energieeffizienz der energiebetriebenen Produkte hinausläuft. Die EuP-Richtlinie wird in Deutschland am 11. August 2007 wirksam. Derzeit, d. h. ab Juni 2007, werden die ersten Durchführungsmaßnahmen erlassen. Zu den zwei wichtigsten Kriterien für die Anwendung der späteren Durchführungsmaßnahmen gehören das ausreichende Potential des Produktes zur Verbesserung sowie die ganzheitliche Produktbewertung. Die Produkte sollen so gestaltet werden, dass ihre Umweltauswirkungen kontrollierbar reduziert werden können, was vor allem durch verstärkte Energieeffizienz und Ökodesign erreicht werden soll.

Umfassend soll ein gesetzlicher Rahmen geschaffen werden, der sicherstellt, dass Umweltaspekte bereits bei der Entwicklung von neuen Produkten berücksichtigt werden.

Die EuP-Richtlinie verweist auf die folgenden Umweltaspekte bei der Produktgestaltung: Auswahl und Einsatz von Rohmaterialien, Fertigung, Verpackung, Transport und Vertrieb, Installierung und Wartung, Nutzung sowie Ende der Lebensdauer [5]. Als weiteres sollen die Möglichkeiten der Wiederverwendung, des Recyclings und der Verwertung von Material und/oder Energie berücksichtigt werden.

Die Ökodesignparameter [Abbildung 13-1] sollen als Teil der Informationen eines Ökoprofils vorhanden sein. Das aufwendige Vorfahren hat als Ziel die Entdeckung von Umweltaspekten, die über den gesamten Lebenszyklus des Produktes die Verbesserungspotentiale aufweisen. Die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse und den daraus resultierenden „Best of Class“- Produkten sollen den Kunden als Informationen zur Verfügung gestellt werden.

Ökodesignparameter (Anhang I, Teil 1)



Abbildung 13-1: ZVEI Ökodesignparameter
Quelle:[100]

13.3 Aufzeichnung der potentiellen Verbesserungsmöglichkeiten in der Lichtsystem-Produktgruppe im Hinblick auf die Anforderungen der EuP-Richtlinie - Kriterien der Bewertung von Komponenten des Lichtsystems

Nach der Bewertung von Ergebnissen der LCA-Analyse, die für die Lichtsysteme durchgeführt worden ist, konnte man feststellen, dass die ökologischen Auswirkungen in der Herstellungsphase im Vergleich zu der Nutzungsphase unter einem Prozent liegen. Darüber hinaus sind die Verbesserungen dieser Produktgruppe in der Gebrauchsphase des Lichtsystems zu suchen. Die Energieeffizienz der Lichtsysteme muss vor allem mit dem Einsatz von hochwertigen Produkten verbunden werden, welche die Anforderungen an die Energieeffizienz erfüllen. Darüber hinaus sollen nun die Komponenten der Lichtsysteme so

bewertet werden, dass die Kriterien für die best of class Produkte zusammengestellt sein sollen. Gleichzeitig werden die Ecoprofile festgelegt, die Mindestanforderungen der Lichtsysteme festlegen und darüber hinaus dem Kunden eine Auswahl bei der Kaufentscheidung erleichtern sollen.

13.3.1 Kriterien der Bewertung von Lichtsystemen

Die Kriterien für die Bewertung von Lichtsystemen sind für die drei Komponenten des Lichtsystems spezifischen Parameter zu unterscheiden. Bei den Leuchtstofflampen ist das vor allem die Lichtausbeute der Lampe. Die soll über 95 lm/W liegen. Auch die Lebensdauer der Lampe spielt eine große Rolle. Die soll in den modernen Beleuchtungsanlagen über 20 000 h betragen. Bei der Auswahl von jeder Lampe muss auf die Energieeffizienzklasse geachtet werden. Bei der Wahl von Leuchtstofflampen soll die Energieeffizienzklasse bei A liegen. Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Farbwiedergabe, die in Stufen der Farbwiedergabe - Index R_a ausgedrückt werden. Je niedriger der R_a Wert ist, umso weniger gut werden die Farben wiedergegeben.

Bei der Auswahl der Vorschaltgeräte sind möglichst die Geräte auszuwählen, die dimmbar sind. Durch die Dimmbarkeit ist die Anpassung der Beleuchtungsstärke individuell an die Lichtbedürfnisse möglich. Weil gerade diese Komponente des Lichtsystems die elektrische Energie im System verbraucht, muss die so genannte Verlustleistung so niedrig wie möglich sein. „Für den Vergleich der Leistungsaufnahme zählt nicht allein die Leistung der Lampe, sondern die Leistung des Systems Lampe + Vorschaltgerät“ [101]. Es ist allerdings zu beachten, dass elektronische Vorschaltgeräte nicht unter allen Bedingungen optimal sind. Bei Außenanwendung mit großer Hitze und Kälte kann auch das konventionelle Vorschaltgerät zu bevorzugen sein.

Die von der CELMA (dem europäischen Dachverband der Hersteller von Leuchten, Betriebsgeräten und Lampenfassungen) erarbeiteten Grenzwerte für Klassen von Vorschaltgeräten (EEI = Energy Efficiency Index) sollen auch in diese Bewertungsmethodik miteinbezogen werden. Nach dieser Klassifizierung wurden Vorschaltgeräte und Lampenschaltungen in Klassen eingeteilt [Tabelle 13-1]. Darin sind die folgenden Energieklassen definiert: A1, A2 und A3 für elektronische Vorschaltgeräte (A1 = dimmbar), B1 und B2 für verlustarme elektromagnetische Vorschaltgeräte.

Das Messverfahren der Systemleistungsaufnahme wurde als europäische Norm von CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique) in die EN 50294:1998 [102] übernommen und ist seit 01.06.1999 gültig. Nur noch die Vorschaltgeräte der Klasse A und B sind auf dem Markt erhältlich. Die Vorschaltgeräte der Klasse D dürfen nicht mehr ab dem Jahr 2002 in Verkehr gebracht werden. Ab dem 21.11.2005 dürfen auch Vorschaltgeräte mit der EEI Klassifizierung C keine CE-Kennzeichnung mehr tragen.

Tabelle 13-1: *Die Energieeffizienz-Klassen für Vorschaltgeräte*
Quelle: [101]

Energieeffizienz-Klassen für Vorschaltgeräte	
Klasse A1	Dimmbare elektronische Vorschaltgeräte (EVG)
Klasse A2	Elektronische Vorschaltgeräte (EVG) mit reduzierenden Verlusten
Klasse A3	Elektronische Vorschaltgeräte (EVG)
Klasse B1	Magnetische Vorschaltgeräte mit sehr geringen Verlusten (VVG)
Klasse B2	Magnetische Vorschaltgeräte mit geringen Verlusten (VVG)

Bei der Wahl der Leuchte ist unbedingt darauf zu achten, dass die Leuchte einen Reflektor besitzt. Bei der guten Leuchte für gewerbliche Anwendung ist der Leuchtenbetriebswirkungsgrad als Information angegeben. Der wird individuell von den Leuchtenhersteller vermessen, ist aber wichtig für die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit und die Lichteffizienz.

13.3.2 Erstellung der Rahmenbedingungen eines Öko-Profiles für die Lichtsysteme

Im Rahmen dieser Arbeit wurde für die Auswertung der Informationen eine Bewertungsmethodik benötigt. Als Grundlage dafür wurde die Nutzwertanalyse [103] verwendet. Die Bewertung für die Lichtsysteme beginnt bei der Charakterisierung von einzelnen Kriterien für die Leuchtstofflampe, Vorschaltgerät und Leuchte. Die dafür ausgewählten Parameter beschreiben die wichtigsten Kriterien, die für ein effizientes Lichtsystem von Bedeutung sind. Anhand dieser Kriterien wurde eine Abschätzung von Gewichtung der einzelnen Kategorien dargestellt. Nach der vorgenommenen Hierarchisierung wurden dann die endgültigen

Parameter in Form von Punkten festgelegt. In der [Tabelle13-2] wird gezeigt, welche Kriterien ausgewählt wurden und welche Gewichtung vorgenommen worden ist.

Tabelle 13-2: Kriterien der Bewertung von Lichtsystemen

KRITERIEN DER BEWERTUNG VON LICHTSYSTEMEN

	Lichtausbeute	Energieeffizienz	Mittlere Lebensdauer	Farbwiedergabe
Leuchtstofflampe	> 103 lm/W <i>sehr gut</i> 103 - 93 lm/W <i>gut</i> < 93 lm/W <i>bedingt geeignet</i>	Klasse A <i>sehr gut</i> Klasse B <i>gut</i>	≥ 24.000 h <i>sehr gut</i> 24.000 - 20.000 h <i>gut</i> < 20.000 h <i>bedingt geeignet</i>	Ra 100 - 90 <i>sehr gut</i> Ra 80 - 70 <i>gut</i> Ra 70 - 40 <i>bedingt geeignet</i>
	Energieeffizienz			
Vorschaltgerät	Klasse A1 <i>sehr gut</i> Klasse A2, A3 <i>gut</i> Klasse B1, B2 <i>bedingt geeignet</i>			
	Leuchtaufbau	Leuchtenbetriebswirkungsgrad		
Leuchte	Reflektor mit Spiegelraaster <i>sehr gut</i> Reflektor <i>gut</i> Ohne Reflektor <i>bedingt geeignet</i>	Leuchtenbetriebswirkungsgrad > 0,8 <i>sehr gut</i> Leuchtenbetriebswirkungsgrad 0,6-0,8 <i>gut</i> Leuchtenbetriebswirkungsgrad < 0,6 <i>bedingt geeignet</i>		

Tabelle 13-3: Gesamtbewertung der Lichtsysteme

Kriterien für Leuchtstofflampen	Verteilung	Kategorie	Gewichtung	Wert
Lichtausbeute	30 %	> 103 lm/W	5 Punkte	1,5
		103 - 93 lm/W	3 Punkte	0,9
		< 93 lm/W	2 Punkte	0,6
Energieeffizienzklasse	30 %	Klasse A	5 Punkte	1,5
		Klasse B	3 Punkte	0,9
Mittlere Lebensdauer	20%	≥ 24.000 h	5 Punkte	1,0
		24.000 - 20.000 h	3 Punkte	0,6
		< 20.000	2 Punkte	0,4
Farbwiedergabe	20 %	Ra 100 - 90	5 Punkte	1,0
		Ra 80 - 70	3 Punkte	0,6
		Ra 70 - 40	2 Punkte	0,4
Summe	100 %			
Kriterien für Vorschaltgeräte	Verteilung	Kategorie	Gewichtung	Wert
Energieeffizienzklasse	100 %	Klasse A1	5 Punkte	5,0
		Klasse A2, A3	3 Punkte	3,0
		Klasse B1, B2	2 Punkte	2,0
Summe	100 %			
Kriterien für Leuchte	Verteilung	Kategorie	Gewichtung	Wert
Leuchtaufbau	60 %	Reflektor mit Spiegelraster	5 Punkte	3,0
		Reflektor	4 Punkte	2,4
		Ohne Reflektor	1 Punkte	0,6
Leuchtenbetriebswirkungsgrad	40 %	> 0,8	4 Punkte	1,6
		0,8 - 0,6	3 Punkte	1,2
		< 0,6	2 Punkte	0,8
Summe	100 %			

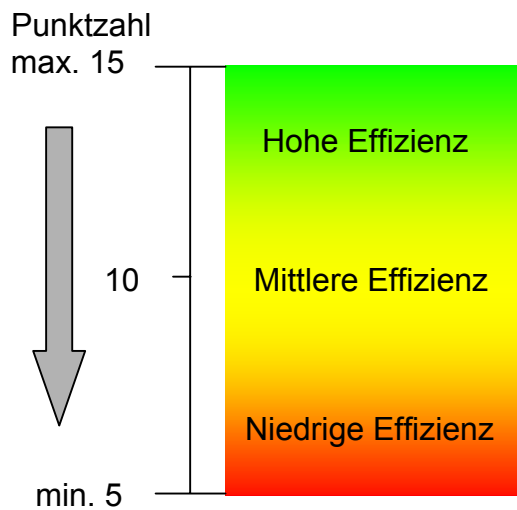


Abbildung 13-2: Grafische Darstellung der Bewertung der Lichtsysteme

Die Bewertungsmethode [Abbildung 13-2] spiegelt den in der EuP-Richtlinie gestellten Anforderungen an das Ökodesign des Produktes wider. Anhand dieser Methode kann gezeigt werden, dass ein effektives Lichtsystem mit einfachen Mitteln zu erkennen und zusammengestellt werden kann. Die Beschreibung konzentriert sich auf die wichtigsten Umweltauswirkungen dieses Produktes über den gesamten Lebenszyklus, im Fall des Lichtsystems auf die Nutzungsphase. Alle umweltrelevanten Produkteigenschaften und alle dem Produkt während seines Lebenszyklus zurechenbaren und als physikalische Größen messbaren Aufwendungen sind berücksichtigt. Alle im Ökoprofil gespiegelten Parameter finden sich hier wieder.

Als Hersteller können konkrete Maßnahmen zur Minimierung der Umweltauswirkung des Produkts angeregt werden, indem Produkte mit geringer Energieeffizienz oder schlechter Systemausbeute dem Verbraucher deutlich gemacht werden. Die besten Produkte aus der Produktpalette können anhand der Ergebnisse der ganzheitlichen Analyse und der oben gezeigten Bewertung als repräsentative „best in class“ Produkte entsprechend gefördert werden. Die Bewertung kann als Grundlage für die kundennahe Produktumweltdeklaration herangezogen werden. Sie bildet, losgelöst von der aufwendigen LCA, eine einfache, übersichtliche Handreichung hin zur Beleuchtung der Zukunft.

14. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde eine vergleichende Ökobilanz zweier unterschiedlicher Lichtsysteme durchgeführt. Ziel dabei war, wissenschaftlich festzustellen, welche Aspekte bei der Beleuchtung im Hinblick auf die Umwelteinwirkungen entlang der einzelnen Produktlebenswege die wichtigste Rolle spielen. Aufgrund dessen können die Verbesserungspotentiale in diesen Produktgruppen aufgezeigt und gleichzeitig die Anforderungen der EuP-Richtlinie nach einer detaillierten Darstellung der Umweltauswirkungen erfüllt werden.

Zum ersten Mal ist eine Modellierung vom gesamten Lebenszyklus aller Komponenten des Lichtsystems - Leuchtstofflampen, Vorschaltgeräte und Leuchten - vorgenommen worden. Die Systemgrenze der Ökobilanz umfasste die Herstellungsprozesse der Leuchtstofflampen, Vorschaltgeräte und Leuchten einschließlich aller Vorprodukte. Um die Anforderungen der Ökobilanzierungsmethodik zu erfüllen, wurden detaillierte Daten aus der Produktion entnommen sowie eine Literaturrecherche durchgeführt. Mit Hilfe der angewendeten Ökobilanzierungsmethodik konnten die Korrelationen der Umweltbelastung über alle untersuchten Phasen des Lebenszyklus dargestellt werden. Die bei der Energiebereitstellung entstehenden Emissionen sind den Umweltauswirkungen, die bei Produktion und Transport emittiert werden, gegenüber gestellt worden. Die Art und die Höhe der entsprechenden Emissionen sind in dieser Arbeit für alle Komponenten des Lichtsystems mit Hilfe der Wirkungsabschätzungsparameter und im Bezug auf die Produkteinheit sowie die funktionellen Einheit, d. h. der Systembrenndauer in Megalumen Stunden dargestellt worden.

Die Ökobilanzierung hat sich zwar als eine sehr aussagekräftige, jedoch gleichzeitig als eine sehr aufwendige Methode erwiesen. Vor allem die Sammlung der Daten für die Erstellung der Sachbilanzen für die Produktion aller Komponenten des Lichtsystems war besonders zeitintensiv. Da das Ziel der vorliegenden Arbeit die Anforderungen der EuP-Richtlinie erfüllen soll, muss man an der Stelle unbedingt auf den hohen Aufwand bei der Herstellung einer Ökobilanz aufmerksam machen. Die Hersteller von der EuP-Richtlinie betroffenen Produktgruppen sind zur Einhaltung dieser Richtlinie verpflichtet. Betrachtet man den Aufwand für die vorliegende Ökobilanz des Lichtsystems, ist auch dann, wenn die einzelnen Komponenten von den jeweiligen Herstellern selbst durchgeführt werden, ein wirtschaftlich schwer zu vertretender Zeitaufwand erforderlich. Dies gilt vor allem, wenn der Schwerpunkt der Umwelteinflüsse in der Nutzungsphase und nicht in der Herstellung liegt.

Mit der Erstellung einer ganzheitlichen Analyse von Produkten sind jedoch nicht nur die Daten der Hersteller nötig, sondern auch die Daten der Zulieferer sowie Literaturquellen. Da in der EuP-Richtlinie die Durchführung der ganzheitlichen Analyse von Produkten als Methode zum Aufzeigen von Verbesserungspotentialen vorgesehen ist, sollen für die von der EuP-Richtlinie betroffenen Produktgruppen eine ganzheitliche Untersuchung in Form einer LCA erstellt werden. Das Aufzeigen der Umweltrelevanz von untersuchten Systemen je Produktgruppe stellt sich als eine wichtige Aufgabe dar. In dieser Arbeit ist es gelungen, einen Teil, der von der EuP-Richtlinie betroffenen Produktgruppe „Beleuchtung“ zu untersuchen und durch die eindeutigen Ergebnisse einen klaren Weg für den möglichen Einsatz energieeffizienter Komponenten des Systems aufzuzeigen.

Unklar bei der Auslegung der EuP ist bis heute, wer die für den Verbraucher erforderliche Zusammenstellung der einzelnen umweltrelevanten Parameter, also die Zusammenstellung der Bewertungsmodule des Systems, übernehmen soll. Die EuP-Richtlinie ist mit heutigem Stand auf das Produkt gesehen anzuwenden, während für den Verbraucher nur die Betrachtung des Lichtsystems aus ökologischer und ökonomischer Sicht wichtig ist. Auch in einer Frage an die EU Kommission wurde klar der Produktbezug bestätigt. Langfristig führt dies zu keiner für den Verbraucher zufriedenstellenden Lösung, denn nur ein einfaches, transparentes Anwendungsschema findet in der Regel die notwendige Akzeptanz.

Dank der Durchführung von Ökobilanzen konnte in dieser Arbeit transparent und nachvollziehbar nachgewiesen werden, dass im Falle der Lichtindustrie der Energieverbrauch in der Nutzungsphase der entscheidende Parameter ist. In dieser Arbeit sind klare Vorteile bei der ganzheitlichen Betrachtung von T5-Lichtsystemen im Vergleich zu den T8-Lichtsystemen dargestellt worden. Obwohl die Parameter der Wirkungsabschätzung bei der Herstellung der T5-Lichtsysteme ein wenig schlechter abschneiden, liegt der weit überwiegende Vorteil im niedrigeren Energieverbrauch des T5-Lichtsystems in der Nutzungsphase.

Die Darstellung der Umweltrelevanz von den zu untersuchenden Komponenten des Lichtsystems hatte dessen ganzheitliche Betrachtung als Ziel. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Bewertungsmethodik für die Lichtsysteme entwickelt. Da das Ergebnis dieser Studie direkt zu der Umweltrelevanz der Lichtsysteme in der Nutzungsphase führt, konzentrieren sich die Parameter der Bewertungsmethodik auf die Komponentenoptimierung des Lichtsystems für die nachfolgende Gebrauchsphase. Die Erstellung der Bewertungsmethodik erfolgte unter der Berücksichtigung von Anforderungen der EuP-Richtlinie, d. h. die Energieeffizienz dieser Produktgruppe soll mit Hilfe eines Modells problemlos ermittelt

werden. Darüber hinaus dient die Bewertungsmethode im Rahmen der Beurteilung von Lichtsystemen als ein Werkzeug der Entscheidung. Und da die Auswahl der entsprechenden Komponenten des Lichtsystems von den Kunden bestimmt ist, liegen die Stärken des Bewertungsmoduls vor allem in der einfachen Vorgehensweise bei den Vergleichsmöglichkeiten zwischen verschiedenen Komponenten des gesamten Lichtsystems.

Das in dieser Arbeit entwickelte Modul der Bewertung wurde gezielt ausgewählt und erprobt. Es erlaubt den Kunden, die Produkte des Lichtsystems an Hand einer Skala auf einfache Art beurteilen zu können. Darüber hinaus soll die Einflussmöglichkeit der Anwender positiv verstärkt werden, in dem die Vorteile von energieeffizienten Produkten verstärkt kommuniziert werden. Für den Kunden bedeutet die Auswahl von ökologisch-optimierten Lichtsystemen auch eine deutliche Verringerung der Betriebskosten. Darüber hinaus können bei der richtigen Auswahl von Lichtsystemen die ökologischen und ökonomischen Aspekte miteinander verknüpft werden. Eine gleichzeitige Verkettung von effizienten Produkten und Kundenanforderungen an diese Produkte soll durch die Anwendung der Bewertungsmethode deutlich aufgezeigt werden. Eine Information an Kunden, die nur über umweltrelevante Aspekte der Produktion sowie den Entsorgungsweg des Produktes berichtet, bedeutet oft keinen Anreiz mehr, sich für diese Produkte zu entscheiden.

Die zentralen Anforderungen der EuP-Richtlinie ist die Verringerung des Energieverbrauches in allen Phasen des Lebenszyklus des Produktes. Darüber hinaus sollen die von den Produkten verursachten Umweltbelastungen deutlich verringert werden. Die für diese Arbeit wichtigsten Aussagen berichten über die Umweltrelevanz von Lichtsystemen in der Gebrauchsphase sowie die Rolle der Bewertungsverfahren. Eine aussagekräftige Methodik der Beurteilung von Lichtsystemen sowie die Sicherheit der Entscheidung bei der Wahl in dieser Produktgruppe ist von entscheidender Bedeutung.

Die Möglichkeit für die Anwendung der in dieser Arbeit vorgeschlagenen Bewertungsmethode ist groß. Die kann als ein geeignetes Instrument für den Dialog mit den Kunden, aber auch mit dem Gesetzgeber eine Anwendung finden. Die Faktoren der Bewertung können bei der Entwicklung der neuen Produkte mitberücksichtigt werden. Die Methodik lässt sich so gezielt weiterentwickeln, dass sie für eine breite Palette von Lichtprodukten angepasst und umgesetzt werden kann.

Eine künftige Aufgabe der Hersteller sollte schwerpunktmäßig die Kundenkommunikation sein. Es ist bis heute nicht gelungen, breiten Bevölkerungsschichten den Gedanken des

Energiesparens ohne Verschlechterung der Lebensqualität nahe zu bringen. Hier tut Aufklärung und Lobbyarbeit Not, wobei dies als langfristiger, aber auch dringend erforderlicher Lernprozess in Zeiten knapper werdender Energien zu sehen ist. Der Trend, eine Produktpalette mit möglichst hoher Energieeffizienz nicht nur herzustellen, sondern auch erfolgreich zu vermarkten, ist Aufgabe der Hersteller. Das Bewusstsein der Bevölkerung vor allem bei nachfolgenden Generationen zu sensibilisieren, kann nur mit der Unterstützung der Gesetzgeber erfolgen.

Literaturverzeichnis

1. Brundtland, G. H., 1987: Our common future. World Commission on Environment and Development, Oxford University Press, 1987.
2. Europäische Kommission, 2001: Integrierte Produktpolitik. Grünbuch vom 7. Februar 2001 zur Integrierten Produktpolitik (von der Kommission vorgelegt). [KOM (2001) 68 endgültig - nicht im Amtsblatt veröffentlicht].
3. Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament „Entwicklung einer thematischen Strategie für die nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen“ (Brüssel, den 01.10.2003) [KOM (2003) 572 endgültig].
4. Milles, U., 2004: BINE Informationsdienst, Basis Energie 17, Effiziente Kraftwerke, Mai 2004.
5. Richtlinie 2005/32/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 6. Juli 2005 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energiebetriebener Produkte und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EGW des Rates sowie der Richtlinie 96/57/EG und 2000/55/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, Amtsblatt der Europäischen Union.
6. EU-Richtlinie über Umweltauswirkungen von elektrischen und elektronischen Geräten (EEE-Richtlinie), Arbeitspapier Version 1.0; 01.02.02.
7. EU-Richtlinie über Energieeffizienzanforderungen (EER-Richtlinie), April 2002.
8. Das Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen [Abgeschlossen in Kyoto am 11. Dezember 1997].
9. Richtlinie 2002/96/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Januar 2003 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte, Amtsblatt der Europäischen Union.
10. Richtlinie 2002/96/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Januar 2003 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte, Amtsblatt der Europäischen Union, Anhang IV.
11. Richtlinie 2002/95/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Januar 2003 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten, Amtsblatt der Europäischen Union.
12. Richtlinie 2003/87/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 2003 über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft und zur Änderung der Richtlinie 96/61/EG des Rates, Amtsblatt der Europäischen Union.
13. Richtlinie 2003/87/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 2003 über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der

- Gemeinschaft und zur Änderung der Richtlinie 96/61/EG des Rates, Amtsblatt der Europäischen Union, Artikel 16.
14. Richtlinie 96/61/EG des Rates von 24.09.1996 über die Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften vom 10.10.1996.
 15. Europäisches Schadstoffemissionsregister EPER <http://www.eper.de> abgerufen 10/05.
 16. Kommission der Europäischen Gemeinschaften, 2004: Bericht der Kommission für die Frühjahrstagung des Europäischen Rates - Die Lissabon Strategie realisieren, Reformen für die Erweiterte Union. Brüssel, den 20.02.2004. [KOM (2004) 29 endgültig/ 2].
 17. DIN EN ISO 14040, 1997: Umweltmanagement - Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen.
 18. Grahl, B., Jepsen, D., 2005: Erstellt im Auftrag des Umweltbundesamtes KFZ 202 95 382-09; Richtlinie 2005/32/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energiebetriebener Produkte (EuP-Richtlinie), Struktur der Richtlinie und Stand der Konkretisierung. (DM) (Art.15, S.12); 24.10.2005.
 19. ISO TR 14025, 2000: Environmental labels and declaration - Type III environmental declarations.
 20. The European Lamp Companies Federation.<http://www.elcfed.org> abgerufen 02/06.
 21. Schornick, D., 2006: EuP Directive (Eco-design requirements for Energy-Using Products); Generaldirektion Transport & Energie, Generaldirektion Umwelt. Fachverband Elektroleuchten, 24.02.2006.
 22. DIN EN ISO 14041, 1998: Umweltmanagement - Ökobilanz - Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz.
 23. DIN EN ISO 14042, 2000: Umweltmanagement - Ökobilanz - Wirkungsabschätzung.
 24. DIN EN ISO 14043, 2000: Umweltmanagement - Ökobilanz - Auswertung.
 25. E DIN EN ISO 14044, 2005: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen.
 26. Boustead, I., Hancock, G.F., 1979: Handbook of Industrial Analysis. Ellis Horwood Ltd.; Chichester, England 1979.
 27. Franke, M., 1984: Umweltauswirkungen durch Getränkeverpackungen. E.F.-Verlag für Energie und Umwelttechnik GmbH, Berlin 1984.

28. Manual for the Environmental Life Cycle Assessment of Products (Heijungs, R. 3t al.), CML-Centre of Environmental Science Leiden University, TNO - Dutch Organisation for Applied Scientific Research Apeldoorn, B&G - Fuels and Raw Materials Bureau Rotterdam; CML (1991).
29. Umweltbundesamt, 1992: Ökobilanzen für Produkte: Bedeutung, Sachstand, Perspektiven. Berlin, Texte 38, 1992.
30. Society for Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC),1990: Workshop Report: A technical Framework for Life Cycle Assessments / SETAC. Washington, USA, 1991. Workshop 18, 23 August 1990. Smugglers Notch, Vermont.
31. Society for Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC),1992: Workshop Report: Result of the Leiden Workshop 2; 3 December 1991, Brüssel, April 1992.
32. Society for Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC),1993: Guidelines for Life Cycle Assessment: A Code of Practice /SETAC. Europe, Brüssel, August 1993.
33. ILV-Fraunhofer-Institut Lebensmitteltechnologie und Verpackung, 1997: Verwertung von Kunststoffabfällen aus Verkaufsverpackungen in der Zementindustrie - Ökologische Analyse nach dem LCA - Prinzip
34. Schmitz, S.,1994: Ökobilanz für Getränkeverpackungen - Vergleichende Untersuchung der durch Verpackungssysteme für Frischmilch und Bier hervorgerufenen Umweltbeeinflussungen; Umweltbundesamt, Berlin, 1994.
35. Grumme, K., 2000: Produkt-Ökobilanzen in der Automobilindustrie - Möglichkeiten einer Anwendung der Wirkungsabschätzung und Interpretation in der Produktentstehung.
36. Kümmel, J., 2000: Ökobilanzierung von Baustoffen am Beispiel des Recyclings von Konstruktionsleichtbeton. Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart (Mitteilung des Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Band 2000/1).
37. Eberle, U., Grießhammer, R. Dr., 2000: Ökobilanzierung zu Wasch- und Reinigungsmittelrohstoffen und deren Anwendung in der gewerblichen Wäscherei. Öko-Institut e.V., Freiburg; Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit - Wasserwirtschaft - Forschungsbericht 296 64 145 UBA-FB 000106/2.
38. Bayerisches Institut für Angewandte Umweltforschung und -technik GmbH, 2002: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. Flo-Pak GmbH (Projektgemeinschaft): Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. Vergleichende Ökobilanz für Loose-fill-Packmittel aus Stärke bzw. Polystyrol veröffentlicht als Endbericht (DBU-Az.04763), März 2002.

39. Ecoinvent, 2004: Swiss Centre for Life Cycle Inventories - Ecoinvert. The Life Cycle Inventory Data, Version 1.1, June 2004.
40. Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH (ifu), Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu), 2002: Umberto 4.1 - Software für das betriebliche Stoffstrommanagement. Hamburg, Heidelberg, Dezember 2002.
41. Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Universität Stuttgart und PE-Product Engineering, 2003: Software GABI 4 - Software und Datenbank zur ganzheitlichen Bilanzierung. Dettingen/Teck, 2003.
42. Rubik, F., 2002: Integrierte Produktpolitik. Metropolis, Marburg 2002.
43. DIN EN ISO 14020, 1998: Umweltkennzeichen und -erklärungen. Allgemeine Prinzipien ISO.
44. Back E. unter Mitarbeit von Egli, N., Rentsch, C., Gudet, Ch.: Umweltzeichen verhelfen ökologisch verträglichen Produkten zum Markterfolg. Umweltschutz 4/1997 http://www.umwelt-schweiz.ch/buwal/de/medien/umwelt/1997_4unterseite6/index.html abgerufen 10/06.
45. Studie zum Umweltbewusstsein 2004: Konsumverhalten im Alltag. Kapitel 7.3. http://www.blauer-engel.de/deutsch/navigation/body_blauer_engel.htm abgerufen 09/05.
46. Richtlinie 2003/66/EG der Kommission vom 3. Juli 2003 zur Änderung der Richtlinie 94/2/EG zur Durchführung der Richtlinie 92/75/EWG des Rates betreffend die Energieetikettierung für elektrische Haushaltskühl- und -gefriergeräte sowie entsprechende Kombinationsgeräte. Amtsblatt der Europäischen Union.
47. Verordnung über die Kennzeichnung von Haushaltsgeräten mit Angaben über den Verbrauch an Energie und anderen wichtigen Ressourcen (Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung - EnVKV) vom 30. Oktober 1997.
48. Umweltbundesamt, 1998: Produktökobilanzen und ihre Anwendungsmöglichkeiten im Baubereich. Texte 69/98.
49. IMDS-Datenbank. Internationalen Material Daten System (Materialdatensystem der Automobilindustrie). <http://www.mdsystem.com>, abgerufen 12/05.
50. Ecoinvent (Swiss Centre for Life Cycle Inventories). <http://ecoinvent.ch>, abgerufen 02/04.
51. Jürgens, G., 1999: Betriebliche Umweltinformationssysteme in der Produktentwicklung. „Ökologische Produktgestaltung“ Stoffstromanalysen und Ökobilanzen als Instrumente der Beurteilung. Schimmelpfeng, L., Lück, P. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York 1999.

52. Umweltbundesamt, 1995: Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen - Wirkungsabschätzung und Bewertung. Texte 23/95, S.17.
53. Society of Environmental Toxicology and Chemistry - Europe (ed.): Life-Cycle Assessment. Workshop Report, 2-3 December 1991, Leiden. SETAC - Europe, Brussels, April 1992.
54. Leyden Workshop Progresses LCA. SETAC Europe (ed.): Life Cycle Newsletter 2, No.1,1992.
55. Hoppe, G.,1979: Licht. Ecomed Verlagsgesellschaft GmbH, München. Presse, Druck und Verlags GmbH, Augsburg, 1979.
56. DIN 5039, 1995: Licht, Lampen, Leuchten - Begriffe, Einleitung. Ausgabe 09/95.
57. Craford, M.G., Holonyak jr.,N., Kish, jr. F.A.,2001: Leuchtdioden - Bye, bye, Glühbirne. Spektrum der Wissenschaft, November 2001.
58. Fördergemeinschaft Gutes Licht. Definitionen und Bilder.
<http://www.licht.de>, abgerufen 07/05.
59. European Lamp Companies Federation, 2005:
<http://www.elcfed.org/content.php?level1=2&level2=6&mode=1>, abgerufen 07/07.
60. Internationales Wörterbuch der Lampentechnik .Internationale Beleuchtungskommission C I E Publ. No.17.4, Publication 50 (845) CEI 1987. Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale.
61. Hentschel, H. J., 2002: Licht und Beleuchtung. Grundlagen und Anwendungen der Lichttechnik. 5, neu bearb. u erw. Aufl. Heidelberg Hüthig, 2002.
62. Hentschel, H. J., 1987: Licht und Beleuchtung. Theorie und Praxis der Lichttechnik. 3 bearb. u. erw. Aufl. Alfred Hüthig Verlag GmbH, Heidelberg, 1987.
63. Fieß, R.,1993: Experimentelle und theoretische Untersuchungen an neuartigen Hg-Niederdrucklampen zur LCD-Hinterleuchtung. Dissertation, Karlsruhe, 1993.
64. Heinloth, K., 1996: Energie und Umwelt. Klimaverträgliche Nutzung von Energie. 2., überarbeitete und erweiterte Aufl. Stuttgart, Zürich, 1996.
65. Thomas, S., Wissner, M., Kristof, K., Irrek, W., 2002: Die vergessene Säule der Energiepolitik. Energieeffizienz im liberalisierten Strom- und Gasmarkt in Deutschland. S.21, 2002. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH im Wissenschaftszentrum Nordrhein-Westfalen.
66. VDEW, 2004: Jahresbericht 2004. Verband der Elektrizitätswirtschaft e.V. (VDEW), Berlin. Endenergieverbrauch in Deutschland 2002.
67. Brunner, C.U., Bush, E., Gasser, S., Lingenhel, S., Nipkow, J., 2001: Energieeffizienz bei Elektrogeräten. Wirkung der Instrumente und Maßnahmen. Schweizerische Agentur für Energieeffizienz. Im Auftrag des Bundesamtes für Energie, August 2001.

68. Zieseniß, C.H., 1985: Beleuchtungstechnik für den Elektrofachmann. Lampe, Leuchten und ihre Anwendung. Heidelberg Hüthig, 1985.
69. Richtlinie 2000/55/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000 über Energieeffizienzanforderungen an Vorschaltgeräte für Leuchtstofflampen, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften.
70. DIN EN 12665, 2002: Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung.
71. Böcker, W., 1981: Künstliche Beleuchtung. Ergonomisch und energiesparend. Campus, Frankfurt/Main, New York, 1981.
72. Behrendt, S., 1998: Ökobilanzierung komplexer Elektronikprodukte. Innovationen und Umweltentlastungspotentiale durch Lebenszyklusanalyse. Springer Verlag Berlin, 1998.
73. Lange, J., 1980: Rohstoffe der Glasindustrie. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Leipzig, Berlin, Oktober 1980.
74. Illig H. J., 1983: ABC Glas. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Leipzig, 1983.
75. Lohmeyer, S., 1987: Werkstoff Glas II. Expert - Verlag, Bd. 1. Ehningen bei Böblingen, 1987.
76. Pfaender, H.G., 1980: Schott-Glaslexikon. Überarbeitet und ergänzt von Hubert Schröder. München, 1980.
77. Ruffler, H., 1978: Leuchtstoffe, anorganische. Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie. 4. Aufl. Bd. 16 Weinheim, Verlag Chemie, 1978.
78. Institut für Anorganische und Analytische Chemie (IAAC). Westfälische Wilhelms-Universität Münster. Die Chemie der Seltenen Erden. http://Uni-muenster.de/Chemie.ac/lehre/dl-dpl/v-ac/sose/03/Seltene_Erden.pdf abgerufen 06/05.
79. Lange, J., Skibbe, R., 1967: Europium und Terbium als Aktivatoren in technischen Leuchtstoffen. TWAOG - Technisch Wissenschaftliche Anhandlungen der OSRAM - Gesellschaft, Band 9. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York 1967, S.157.
80. Wikipedia, die Freie Enzyklopädie. Wolfram. <http://www.de.wikipedia.org/wiki/Wolfram>, abgerufen 04/05.
81. Pacz, A., 1922: USA Patent 1.410.499.
82. Moon, D.M., Koo, R.C., 1971: Mechanism and Kinetics of Bubble Formation in Doped Tungsten. Met. Trans. 2, 1971.
83. Millner, T., Hegedüs, A. J., Sasvári, K., Neugebauer, J., 1957: Weiterer Beitrag zur Reduktion des Wolframtrioxyds. Z. anorg. Allg. Chem., 1957, S.289, 288-312.

84. Morcom, W. R., Worell, W. L. , Sell, H.G., Kaplan, H. I., 1971: Preparation and characterization of beta-tungsten, metastable tungsten phase. Met. Trans. 5, 1971. S. 155-161
85. OSRAM Gesellschaft mit beschränkter Haftung, Berlin und München, Gesamtherstellung, 1987: Taschenbuch der Lampentechnik. ProduServ GmbH Verlagsservice, Berlin, 1987.
86. Shujie, L., Yuping, L., Zhengqiu, C., 1988: β -W in brown oxide and the relationship between β -W and doping effect. J. Ref. Hard. Metals, 1988. S.103-108
87. Slemr, F. , Langer, E., 1991: Trend der Quecksilberkonzentration in der Luft. Fraunhofer-Institut für atmosphärische Umweltforschung IFU. Schriftenreihe, Band 05-91. Garmisch-Partenkirchen, August 1991.
88. Falter, R., 1996: Quecksilber in Ökosystemen - Bestimmung von organischen Quecksilberspezies mit einer neuentwickelten HPLC-Methode. Dissertation aus dem Institut für Umwelt-Geochemie der Universität Heidelberg, Februar 1996. Bayreuther Forum Ökologie. Band 30/1996.
89. Marx, A. , 1997: Antikörper zum Nachweis von Quecksilber (II). München, Technische Universität, Dissertation, 1997.
90. Hörsted-Bindslev, P., Magos, L., Holmstrup, P., Arenholt-Bindslev, D., 1993: Amalgam - eine Gefahr für die Gesundheit? Metabolismus und Toxikologie des Quecksilbers. Deutscher Ärzte Verlag, Köln, 1993. S.97.
91. Hempel, M., 1993: Entwicklung und Anwendung von Methoden zur Gefährdungsabschätzung quecksilberkontaminierter Standorte. Dissertation. Technische Universität Hamburg - Harburg, 1993.
92. Scheffer, F., Schachtschabel, P., 1992: Lehrbuch der Bodenkunde. 13.Aufl. Stuttgart. Verlag Enke, 1992.
93. European Kommission, 2004: Consultation Document. Development of an EU Mercury Strategy, DG Environment, 2004.
94. Maxon, P., 2004: Mercury flows in Europe and the world. The impact of decommissioned chlor-alkali plants. Report by Concorde East/West Sprl for DG Environment.
95. Scherer, D.F., 2005: Comparative Life Cycle Assessment of Electronic Ballasts for Fluorescent Lamps. Thesis for the fulfilment of the Master of Science in Environmental and Resource Management, Cottbus, Januar 2005.
96. Harsch, M., 1998: Modellierung und Optimierung verfahrenstechnische Prozesse in der Lackiertechnik. Beitrag zur Ganzheitlichen Bilanzierung. Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde der Universität Stuttgart, 1998.

97. Kommission der Europäischen Gemeinschaften, 2003: Mitteilung der Kommission. Eine thematische Strategie für Abfallvermeidung und -recycling. Brüssel, den 27.05.2003. KOM (2003) 301 endgültig. S.9.
98. Nissen, N.F., 2001: Entwicklung eines ökologischen Bewertungsmodells zur Beurteilung elektronischer Systeme. Fachbereich12 - Elektrotechnik der Technischen Universität Berlin, 2001.
99. Arbeitsgemeinschaft Lampen-Verwertung (AGLV) im Fachverband Elektrische Lampen Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., ZVEI, 2001: Leitfaden für die Entsorgung von Lampen, August 2001.
100. Schornik, D., 2006: Fachverband Elektroleuchten. 12. Symposium: Innovative Lichttechnik in Gebäuden. 26/27 Januar 2006.
101. ZVEI, 2001: Vorschaltgeräte für Leuchtstofflampen. Leitfaden - Für die Anwendung der Richtlinie 2000/55/EG über Energieeffizienzanforderungen an Vorschaltgeräten für Leuchtstofflampen. Zentralverband Elektrotechnik -und Elektronikindustrie e.V. ZVEI: Stand: Februar 2001.
102. DIN EN 50294, 1998: Verfahren zur Messung der Gesamteingangsleistung von Vorschaltgerät-Lampe-Schaltungen, 12.1998.
103. Utermarck, J., 1996: Nutzwertanalyse im Beschaffungsbereich des Industriebetriebs. Göttingen, 1996.
104. Hutter, C., Köhler, D., 1999: Ökobilanzierung mit Hilfe der KEA-Datenbank. Praxistests. Forschungsstelle für Energiewirtschaft der Gesellschaft für praktische Energiekunde e.V., München, Juli 1999, S. 2
105. IPCC (Intergovernmental Panel on climate Change) 2001: Klimaänderung 2001. Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger. Dritter Wissensstandsbericht des IPCC (TAR). Herausgegeben von ProClim-Forum für Klima und Global Change Schweizerische Akademie der Naturwissenschaften. Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change WMO/UNEP, IPCC), Glossar 2001, S. 114.
106. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 2004: Treibhausgase. BayLfU 2004 - PS1/Umweltberatung Bayern.
107. GaBi-Software. Dokumentation. Anthropogener Treibhauseffekt. <http://www.pre-product.de/GABI/Dokumentation/Dokumentation/IKP/Wirkkriterien/GWP.htm>, abgerufen 03/05.
108. IPCC (Intergovernmental Panel on climate Change), 2001: The Scientific Basis. 4. Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases. Contribution of Working Group I to

- the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. S.244
109. Wikipedia, Die freie Enzyklopädie: Treibhauspotenzial.
<http://de.wikipedia.org/wiki/Treibhauspotenzial>, abgerufen: 07/06.
110. Umweltbundesamt für Mensch und Umwelt, 2005: Hintergrundpapier. Hintergrundinformation: Sommersmog. Berlin, Juni 2005, S.2-3.
http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/sommersmog_2005.pdf
abgerufen:09/06.
111. Saur, K., 1998: Beitrag zur Bewertung der Ganzheitlichen Bilanzierung als Grundlage der Bauteilentwicklung. Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Universität Stuttgart, 1998. S. 77-78.
112. Lindfors, L.-G. et al.,1995: LCA-Nordic Technical Report No 10 and Special Reports No 1-2. TemaNord 1995:503, Nordic Council of Ministers, Copenhagen, 1994.
113. Umweltbundesamt für Mensch und Umwelt, 2006: Eutrophierung. Umweltdaten Deutschland Online. Stand März 2006. <http://www.env-it.de/umweltdaten/public/theme/document.do?documentId=7282>, abgerufen 10/06.
114. Kummer, T., Dr., 2006: Universität Essen - Chemiedidaktik. Eutrophierung.
<http://www.uni-essen.de/chemididaktik/S+WM/Umweltaspekte/Eutrophierung.htm>,
abgerufen:10/06.
115. Saur, K., 1998: Beitrag zur Bewertung der Ganzheitlichen Bilanzierung als Grundlage der Bauteilentwicklung. Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Universität Stuttgart, 1998. S. 71.
116. de Leeuw, F.,1993: Assessment of the atmospheric hazards and risks of new chemicals: Procedures to estimate „hazard potentials“. Chemosphere, Vol.27, No.8, 1993, S.1313-1328.
117. Wasser Wissen, Das Internetportal für Wasser und Abwasser, 2006: Lexikon. Institut für Umweltverfahrenstechnik - Universität Bremen. Begriff - saurer Regen:
http://www.wasser-wissen.de/abwasserlexikon/s/saurer_regen.htm,
abgerufen 10/06.
118. Saur, K., 1998: Beitrag zur Bewertung der Ganzheitlichen Bilanzierung als Grundlage der Bauteilentwicklung. Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Universität Stuttgart, 1998. S. 69.
119. Richtlinie 1999/30/EG des Rates vom 22. April 1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L 163, S. 41.

120. Umweltatlas Hessen. Luft: Immissionskataster. Feinstaub PM10.
<http://atlas.umwelt.hessen.de/servlet/Frame/atlas/luft/ik/qualitaet/pm10/pm10.htm>
121. Umweltbundesamt, 2003: Episodenhafte PM10-Belastung in der Bundesrepublik Deutschland in den Jahren 2000 bis 2003. Erstellt vom Umweltbundesamt mit Daten der Messnetze der Länder und des Bundes.
<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2804.pdf>, abgerufen 09/2006.
122. European Environmental Agency. Environmental signals 2002. Environmental Assessment Report No. 9. Copenhagen, Denmark.
123. World Health Organization Regional Office for Europe, European Centre for Environment and Health, 2002: Environmental health indicator systems - update of methodology sheets. Bonn, Germany.
124. de Leeuw, F., 2002: A set of emission indicators for long-range transboundary air pollution. Environmental Science and Policy, 5, 135-145.
125. Institut für Energie- und Umweltforschung, 2005: Beitrag der Abfallwirtschaft zur nachhaltigen Entwicklung in Deutschland. Teilbericht Siedlungsabfälle. UFO-Plan-Vorhaben, FKZ 203 92 309 des Umweltbundesamtes. Heidelberg, April 2005, S.75.

ANHANG

1. Kumulierter Energieaufwand

2. Treibhauseffekt

3. Photooxidantienbildung

4. Eutrophierung

5. Versauerung

6. Feinstaub - PM10

1. Kumulierter Energieaufwand

Der Kumulierte Energieaufwand gibt die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwandes an, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomisches Gutes (Produkt oder Dienstleistung) entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann. Dieser Energieaufwand stellt die Summe der Kumulierten Energieaufwendungen für die Herstellung (KEA_H), die Nutzung (KEA_N) und die Entsorgung (KEA_E) des ökonomisches Gutes dar, wobei für diese Teilsummen anzugeben ist, welche Vor- und Nebenstufen mit einbezogen sind.

$$KEA = KEA_H + KEA_N + KEA_E$$

Kumulierter Energieaufwand zur Herstellung (KEA_H)

KEA_H wird die Summe der primärenergetisch bewerteten Energieaufwendungen genannt, die sich bei der Herstellung selbst sowie bei der Gewinnung, Verarbeitung, Herstellung und Entsorgung der Fertigungs-, Hilfs- und Betriebsstoffe und Betriebsmittel einschließlich der Transportaufwendungen für einen Gegenstand oder eine Dienstleistung ergeben.

Kumulierter Energieaufwand für die Nutzung (KEA_N)

KEA_N wird die Summe der primärenergetisch bewerteten Energieaufwendungen genannt, die sich für den Betrieb oder die Nutzung eines Gegenstandes oder einer Dienstleistung ergeben. Diese Summe beinhaltet neben dem Betriebsenergieverbrauch den Kumulierten Energieaufwand für die Herstellung und Entsorgung von Ersatzteilen, von Hilfs- und Betriebsstoffen sowie von Betriebsmitteln, die für Betrieb und Wartung erforderlich sind. Die zugrunde gelegten Betriebs- und Nutzungszeiten sind stets anzugeben. Der Energieaufwand für Transporte ist mit einzuschließen.

Kumulierter Energieaufwand für die Entsorgung (KEA_E)

KEA_E wird die Summe der primärenergetisch bewerteten Energieaufwendungen genannt, die sich bei der Entsorgung eines Gegenstandes oder Teilen des Gegenstandes, d.h. dem endgültigen Ausschleusen aus dem Nutzungskreislauf, ergeben. Diese Summe beinhaltet neben dem Energieaufwand für die Entsorgung von Hilfs- und Betriebsstoffen sowie von Betriebsmitteln, die für die Entsorgung erforderlich sind. Der Energieaufwand für Transporte ist hier ebenfalls zu bilanzieren [104].

2. Treibhauseffekt

Treibhausgase (darunter auch Wasserdampf) und Wolken lassen einen Teil der kurzwelligeren Sonneneinstrahlung durchdringen, absorbieren aber die langwellige (Infrarot-) Ausstrahlung der Erdoberfläche und von Wolken, beziehungsweise strahlen einen Teil davon zum Erdboden zurück und einen Teil ins Weltall ab. Zwischen Erdoberfläche und Troposphäre wird also Wärme eingefangen - so entsteht der „natürliche Treibhauseffekt“. Die Abstrahlung der Atmosphäre hängt von der Temperatur in der Höhe ab, in der sie ausgestrahlt wird. Eine Zunahme der Treibhausgaskonzentration führt zu einer zunehmenden Undurchlässigkeit der Atmosphäre für Infrarot und somit zu einer Abstrahlung in den Weltraum aus größerer Höhe bei tieferer Temperatur. Dies verursacht einen Strahlungsantrieb, ein Ungleichgewicht, das nur mit einer Zunahme der Temperatur im System Oberfläche-Troposphäre kompensiert werden kann. Dies wird der „erhöhte Treibhauseffekt“ genannt [105].

Zur Absorption der Wärmestrahlung tragen einige natürlich vorkommende Treibhausgase (Wasserdampf, Kohlendioxid, Lachgas, Ozon, Methan und andere) in unterschiedlichem Maße bei. Der Mensch hat seit Beginn der Industrialisierung zunehmend Einfluss auf die Konzentration dieser Treibhausgase in der Atmosphäre genommen und so einen zusätzlichen Treibhauseffekt verursacht. Besonders rasch steigen die Konzentrationen von Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) und Ozon (O₃) in der Atmosphäre an [106].

Es wird versucht, die Lebenszeit eines Gases in der Atmosphäre abzuschätzen, indem die möglichen Abbaureaktionen betrachtet werden. Je unwahrscheinlicher der Abbau eines Moleküls, desto höher ist die Verweilzeit in der Atmosphäre. Die Treibhauspotentiale (Global Warming Potentials) werden auf Kohlendioxid CO₂ bezogen und für 1 kg eines Gases bezogen auf 1 kg CO₂ angegeben. Die Ermittlung der Äquivalenzziffern kann vorgenommen werden über [107]:

$$GWP_{i,t} = \frac{\int_0^T a_i c_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} c_{CO_2}(t) dt} [kgCO_2 - Äq.]$$

mit

a_i Wärmestrahlungsabsorptionskoeffizient des Gases i

$c_i(t)$ Konzentration des Gases i zum Zeitpunkt t

T Integrationszeitraum in Abhängigkeit von Betrachtungszeitraum

Das Treibhauspotential eines Treibhausgases gibt also an, um wie viel mal stärker oder schwächer eine bestimmte in die Atmosphäre emittierte Menge des Gases im Vergleich zur gleichen Menge CO₂ zum Treibhauseffekt beiträgt. Gemäß Definition wird die mittlere Erwärmungswirkung über einen bestimmten Zeitraum, meist über 100 Jahre, gemittelt betrachtet. CO₂ hat laut Definition ein Treibhauspotenzial von 1. Für z. B. Methan beträgt das Treibhauspotenzial bei 100 Jahren Zeithorizont 23, d. h. 1 Kilogramm Methan trägt in diesem Zeitraum 23 mal stärker zum Treibhauseffekt bei als 1 Kilogramm CO₂. Maßgeblich sind dabei die Zahlen gemäß dem Third Assessment Report des IPCC [108] aus dem Jahr 2001 bei einem Zeithorizont von 100 Jahren [109].

Tabelle 15-1: GWP-Werte
Quelle: [108]

Verbindung	GWP 100
CO ₂	1
CH ₄	23
N ₂ O	296
FCKW	bis zu 14000
FKW/H-FKW	12-12000
R134a	1300
SF ₆	22.200

3. Photooxidantienbildung

Ozon ist eine Verbindung, die aus drei Sauerstoffatomen besteht (O_3). Ozon entsteht durch die Reaktion von molekularem Sauerstoff mit atomarem. Es ist chemisch sehr reaktiv, greift also viele andere Stoffe an und kann deshalb Menschen, Pflanzen und Materialien (zum Beispiel Kunststoffe und Gummi) schädigen. In der Luftschichten oberhalb von etwa zehn Kilometern (der Stratosphäre) befindet sich mit über 90 Prozent der Hauptanteil dieses Gases. Das Ozon hat dort die lebenswichtige Funktion eines Filters gegen den schädlichen ultravioletten Anteil der Sonnenstrahlung (UVB). In den unteren Luftschichten der Atmosphäre bis zehn Kilometer Höhe (der Troposphäre) gibt es einen Sockelanteil natürlich vorhandenen Ozons. Zusätzliches Ozon bildet sich durch komplexe photochemische Reaktionen von Sauerstoff und Luftverunreinigungen. Beim photochemischen Smog (auch Sommersmog genannt) handelt es sich um ein Schadstoffgemisch, das in der unteren Atmosphäre aus einer Vielzahl von Vorläufersubstanzen unter dem Einfluss von Sonnenlicht entsteht: Bei intensiver Sonneneinstrahlung werden durch komplexe photochemische Reaktionen vor allem aus den Vorläufersubstanzen Stickstoffoxide (NO_x) und flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (CH_4), aber auch aus Kohlenmonoxid (CO) und Methan (CH_4) so genannte photochemische Oxidantien (Photooxidantien) wie Ozon, aber auch Stickstoffdioxid (NO_2), organische Nitrate wie Peroxiacetylnitrat (PAN), Wasserstoff-superoxid (H_2O_2), Aldehyde und organische Säuren gebildet. Ozon ist die Leitsubstanz des Sommersmogs, da es von der Konzentration und den Wirkungen her dominiert [110].

Zur genauen Quantifizierung der Ozonbildung durch verschiedene Stoffe, definiert man ein „photochemisches ozonbildendes Potential“, kurz POCP. Das POCP wird als Menge des photochemisch produzierten Ozons angegeben. Um die verschiedenen Photooxidantien gegeneinander in Bezug zu setzen, gibt man sie als Ethen-Äquivalent an. Man bezieht die einzelnen POCP-Werte auf den Wert von Ethen. (Ethen hat demnach den POCP-Wert Eins). Genaue POCP-Werte lassen sich nur für eine gegebene Belastungssituation angeben, da die tatsächliche Ozonbildung unter anderem von der NO_x -Konzentration, der Witterung (Wind, Luftfeuchtigkeit) und der Lichtintensität abhängt. Bei der Wichtung der photochemischen Ozonbildung ist zu berücksichtigen, dass es sich um ein regional begrenztes und technisch beeinflussbares Problem handelt. Folgender Ausdruck wird zur Berechnung der Äquivalente benutzt [111].

$$POCP_t = \frac{a_i / b_i}{a_{C_2H_4} / b_{C_2H_4}} [C_2H_4 - \Delta q]$$

mit

a_i Änderung der Ozonkonzentration aufgrund der Änderung der VOC Emission i

b_i Integration der VOC Emission i bis zu diesem Zeitpunkt

$a_{C_2H_4}$ Änderung der Ozonkonzentration aufgrund der Änderung der Ethen-Emission

$b_{C_2H_4}$ Integration der Ethen-Emissionen (C_2H_4) bis zu diesem Zeitpunkt

Tabelle 15-2: *POCP-Werte*

Quelle: [112]

Verbindung	POCP
Ethen	1
Benzol	0,189
Methan	0,007
NMVOG	0,466
Propan	0,42

4. Eutrophierung

Eutrophierung (Überdüngung) bezeichnet die Anreicherung von Lebensräumen (terrestrische Ökosysteme und vorzugsweise geschlossene Gewässer) mit den Pflanzennährstoffen Stickstoff und Phosphor, wodurch Stoffkreisläufe verändert werden. Die Nährstoffe werden sowohl über die Atmosphäre (hauptsächlich Stickstoffverbindungen) als auch über den Wasserpfad (Überschüsse von Stickstoff- und Phosphatdünger aus der Landwirtschaft, Ableitung von Phosphaten aus Weichmachern) in die Ökosysteme eingetragen [113].

Durch die „Überdüngung“ der Gewässer kommt es zu einem verstärkten Algenwachstum. Auch die von den Algen lebenden Tiere und dementsprechend alle Folgeglieder der Nahrungskette vermehren sich stärker. Durch den Anstieg der Algenpopulation und deren photosynthetischer Aktivität reichert sich in den oberen Gewässerschichten Sauerstoff an (Sauerstoffüberschuss). Abgestorbene Algen und andere angestorbene Organismen sinken zum Gewässergrund und werden in den unteren Gewässerschichten durch Mikroorganismen zersetzt. Es handelt sich dabei um aerobe¹ Abbauprozesse, es wird also verstärkt Sauerstoff zum Abbau des organischen Materials benötigt. Mit zunehmender Gewässertiefe wird diese Sauerstoffzehrung immer größer und die Sauerstoffbilanz kann negativ werden, d.h. es wird mehr Sauerstoff in dieser Gewässerschicht verbraucht als eingetragen wird. Dadurch entstehen in den Gewässern anaerobe Bedingungen, man sagt, dass Gewässer „kippt um“. Die aeroben¹ Abbauprozesse werden durch anaeroben² Abbauprozesse (ohne Sauerstoffbedarf) ersetzt, wobei Fäulnisbakterien giftige Gase wie Ammoniak, Methan und Schwefelwasserstoff freisetzen. In dem sauerstoffarmen, mit giftigen Abbaustoffen angereicherten Gewässern sterben viele Arten von Lebewesen ab [114].

¹ aerob - Bezeichnung für die Lebensweise von Organismen, die zum Leben Sauerstoff benötigen oder chemische Reaktionsweisen, die nur unter Sauerstoffzufuhr möglich sind.

² anaerob - Bezeichnung für die Lebensweise von Organismen, die zum Leben keinen freien Sauerstoff benötigen, und für eine chemische Reaktionsweise, die unter Ausschluss von Sauerstoff abläuft.

Unter der Voraussetzung, dass die natürlicherweise knappen Nährstoffe Stickstoff und Phosphor entscheidend zur Eutrophierung beitragen, kann zur Abschätzung des Beitrags verschiedener Stoffe ein Eutrophierungspotential definiert werden. Die im Molekül vorhandenen N- und P-Atome werden zum Molekulargewicht ins Verhältnis gesetzt. Als Bezugssubstanz dient das Phosphat-Anion. Sinnvollerweise betrachtet man hier Ionen, die sich beim Eintrag ins Wasser bilden. Diese Ionen werden auch üblicherweise in der Wasseranalytik erfasst. Folgende Formel zeigt, wie das EP berechnet wird [115].

$$EP_i = \frac{v_i / M_i}{v_{po_3^-} / M_{po_3^-}} [kgPO_4^{3-} \text{ Äq.}]$$

mit

v_i potentielle Biomessenbilder in PO_4^{3-} -Äquivalent je Menge der Substanz i

M_i Molmasse der Substanz i

Tabelle 15-3: *EP-Werte*

Quelle: [116]

Verbindung	EP
Phosphat (PO_4^{3-})	1
Ammoniak NH_3	0,33
Ammonium-Ion NH_4^+	0,33
Nitrat NO_3^{2-}	0,42

5. Versauerung

Sauerer Regen ist Verunreinigter Niederschlag. Ursache dafür sind Schwefeldioxid (SO₂) und Stickoxide (NO_x), die bei der Verbrennung von Öl und Kohle entstehen. Diese giftigen Stoffe gelangen in die Atmosphäre, lösen sich in den dort schwebenden Wassertröpfchen und fallen als Säure in Form von „saurem Regen“, Nebel oder Tau auf die Erde zurück. Die Folgen sind u.a. Waldsterben, Fischsterben in Seen und Flüssen [117]. Man kann bestimmten Emissionen ein Versauerungspotential AP zuweisen, indem man im Molekül vorhandenen S-, N- und Halogenatome zur Molmasse ins Verhältnis setzt. Die betreffenden Substanzen sind die Vorläufer der wichtigsten anorganischen Säuren, die über Oxidationsreaktionen gebildet werden können. Dabei zählt Schwefel doppelt, weil dieses Element potentiell eine zweibasige Säure (Schwefelsäure) bildet. Als Bezugssubstanz dient SO₂. Das Versauerungspotential AP erlaubt eine Aussage darüber, in welchem Maße ein Schadstoff zum Gesamtproblem beiträgt. Das AP kann sinngemäß auf Emissionen im Wasser übertragen werden. Es wird durch folgende Zusammenhang beschrieben [118]:

$$AP_i = \frac{v_i / M_i}{v_{SO_2} / M_{SO_2}} [kgSO_2 - \ddot{A}q.]$$

mit

v_i potentielle H⁺-Äquivalente je Messeneinheit der Substanz i

M_i Molmasse der Substanz i

Tabelle 15-4: AP-Werte

Quelle: [118]

Verbindung	AP
SO ₂	1
NO _x	0,7
H ₂ S	1,88
HCl	0,88

6. Feinstaub - PM10

Unter der Messgröße PM10 (Particulate Matter < 10 µm) wird die Feinstaubfraktion mit einem oberen Partikeldurchmesser bis zu 10 µm verstanden. Die Einführung dieser neuen Messgröße wurde durch die 1999 verabschiedete, erste EG-Tochterraichtlinie [119] erforderlich, da sich der neue Partikel-Grenzwert nicht mehr wie bislang auf Gesamtschwebstaub, sondern auf die PM10-Fraktion bezieht [120].

Die Schwebstaubkomponente PM10 macht im Mittel ca. 80 % der Masse des Gesamtstaubs aus. PM10 entstehen hauptsächlich bei Verbrennungsprozessen aus stationären und mobilen Quellen, bei Industrieprozessen wie z.B. der Zementherstellung sowie bei der Behandlung und beim Transport staubender Güter. PM10 wird aber auch aus Gasen (z. B. Stickoxiden, Schwefeldioxyden, Ammoniak) gebildet und hat natürliche Quellen. Staubteilchen mit einem Durchmesser von weniger als 10 µm transportieren adsorbierte toxische Luftschadstoffe als Aerosole in tiefere Lungenbereiche und entfalten dort ihre Schädigung auf Atemwege und Herz/Kreislaufsystem [121].

Die großräumige PM10-Belastung der Außenluft wird durch direkte Staubemissionen und Sekundärpartikel verursacht, die sich aus Vorläufersubstanzen wie NO₂, SO₂, NH₃ und NMVOC bilden. So verbindet sich z.B. SO₂ in der Luft mit NH₃ und H₂O zu partikelförmigem (NH₄)₂SO₄. Die Zuordnung erfolgt mit aerosol formation factors, die in der Berichterstattung der EU - European Environmental Agency [122] angewendet und auch von der WHO [123] als Indikator für die Luftqualität empfohlen werden. Die Faktoren wurden aus den Arbeiten von De Leeuw [124] abgeleitet und werden von diesem als repräsentativ für die Bedingungen in Europa eingestuft. Sie setzen sich zusammen aus dem Anteil der Vorläufersubstanz, der in Aerosolform umgewandelt wird, und aus einem Massenkorrekturfaktor, der die Umwandlung des gasförmigen Schadstoffs in den Aerosolanteil beschreibt (SO₂→SO₄; NO₂→NO₃; NH₃→NH₄). Für PM10 beträgt der Faktor 1. Der Beitrag zum Potenzial wird durch Summenbildung aus dem Produkt der emittierten Menge der einzelnen Schadstoffe und dem jeweiligen PM10-Potenzial nach folgende Formel berechnet [125]:

$$PM\ 10 = \sum_i (m_i \cdot x_{PM\ 10_i})$$

Tabelle15-5: *PM10*-Werte
Quelle: [125]

Partikel PM10 und Vorläufersubstanzen	PM10-Äquivalente in kg PM10-Äq./kg
Partikel PM10	1
Partikel aus Dieselemissionen	1
NO _x (als NO ₂)	0,88
SO ₂	0,54
NH ₃	0,64