

Möglichkeiten des Recyclings von LEDs im Vergleich zu anderen Beleuchtungskörpern

Stefan Luidold, Holger Schnideritsch

Sowohl die technologische Weiterentwicklung der Leuchtdioden (LEDs), welcher im Jahre 1994 mit der Entwicklung eines effizienten und stabilen blauen GaInN-Halbleiters ein Durchbruch gelang, als auch das sogenannte „Glühlampenverbot“ führten dazu, dass die Beleuchtungstechnik derzeit einem rasanten Wandel unterliegt. Einerseits verschwinden die jahrzehntelang in großen Mengen eingesetzten Glühlampen vom Markt und andererseits nehmen die Stückzahlen an eingesetzten LEDs enorm zu. Nachdem

ein möglichst effizientes Recycling der Lampen aufgrund der Schadstoffentfrachtung (Leuchtstoff- und Energiesparlampen) und der Rückgewinnung von Wertmetallen anzustreben ist, sollen der aktuell vorliegende Stand der Technik als auch die damit verbundenen Möglichkeiten und Schwierigkeiten in diesem Artikel aufgezeigt werden.

Schlüsselwörter:

Leuchtdiode – LED – Recycling – Lampen – Verwertung

Possibilities for the Recycling of LEDs in Comparison to Other Lightings

The development of an efficient and stable blue GaInN-semiconductor exhibited a breakthrough for the application of light emitting diodes. The following technological development and the ban of light bulbs currently cause a rapid change in the lighting technology. On the one hand the light bulbs, which were used to a large extent, disappear from the market and on the other hand the use of LEDs strongly increases. This article describes the state of the technology for the recycling of lamps as well as further

possibilities and limitations, because an efficient recycling of lamps is desirable due to a proper disposal of harmful substances (fluorescent and energy-saving lamps) and the recovery of valuable metals.

Keywords:

Light emitting diode – LED – Recycling – Lamp – Recovery

Possibilités de recyclage des DELs par rapport à d'autres luminaires

Posibilidades del reciclaje de LEDs en comparación con otros aparatos lumínicos

Vortrag gehalten auf dem 45. Metallurgischen Seminar vom 23. bis 25. Mai 2012 in Ulm.

1 Einleitung

Die Verwendung von elektrischem Strom zur Erzeugung von Licht reicht bis in das frühe 19. Jahrhundert zurück. Während die ersten Versuche zur Glühlampenherstellung zu keiner größeren praktischen Anwendung führten, gelang es T.A. Edison [1] eine zu den Gaslampen wettbewerbsfähige Kohlefadenlampe herzustellen. Mit dem gleichzeitigen Aufbau der Stromversorgungsnetze begann somit der Siegeszug der Glühlampen. Während die Eignung von metallischen Glühfäden (aus Osmium, Tantal und Wolfram) bereits seit längerem bekannt war, gelang es erst durch technische Entwicklungen im Bereich der Pulvermetallurgie, den Kohlefaden durch ein hochschmelzendes Metall zu ersetzen. Dazu leistete C. Auer von Welsbach, der Gründer der Treibacher Industrie AG

und Schöpfer der Marke Osram sowie Entdecker von vier chemischen Elementen (Nd, Pr, Yb und Lu) einen wesentlichen Beitrag. Er beseitigte die Mängel der Kohlefadenlampe durch die Entwicklung der Osmium-Lampe, der ersten gebrauchsfähigen Metallfadenlampe, von welcher er 1900 bei der Weltausstellung in Paris bereits eine größere Anzahl präsentieren konnte [2]. Nachdem 1909 W.D. Coolidge ein Verfahren zur Herstellung von duktilen Wolframfäden patentierte [3], begann die kommerzielle Produktion der Wolfram-Glühlampen, welche erst heutzutage durch die EU-Richtlinie zur umweltgerechten Gestaltung energiebetriebener Produkte (Richtlinie 2005/32/EG) und der Verordnung zu deren Durchführung (Verordnung EG Nr. 244/2009) vom Markt gedrängt werden.

Das Grundprinzip einer anderen Lampenart, der Gasentladungslampen, wurde bereits 1857 entdeckt, als H. Geiß-

ler die nach ihm benannte Röhre erfand. Diese bestand aus einer evakuierten Glasröhre mit jeweils einer Elektrode an den Enden, welche mit Edelgas oder Luft unter geringem Druck gefüllt war. Letzteres konnte durch Anlegen einer Hochspannung zum Leuchten angeregt werden. Obwohl A.H. Becquerel bereits 1867 das Prinzip der Leuchtstofflampe beschrieben hatte, begann Philips 1920 in Eindhoven mit der Entwicklung einer solchen. 1927 meldeten F. Meyer, H.-J. Spanner und E. Germer das grundlegende Prinzip der Niederspannungs-Leuchtstoffröhre zum Patent an. Nachdem bereits 1948 die Halophosphat-Leuchtstofflampe entwickelt wurde, gelangte diese jedoch erst 1978 auf den Markt. Ebenso verzeichneten Lichtemissionsdioden, LEDs, eine jahrzehntelange Entwicklungsgeschichte, denn General Electric produzierte die ersten im Alltag anwendbaren LEDs bereits 1962 [4].

Nachdem die Beleuchtungstechnik durch das Verbot der Glühlampen und die rasant zunehmende Anwendung von LEDs neben den bereits seit längerem üblichen Leuchtstofflampen derzeit einem rasanten Wandel unterzogen ist, soll nun untersucht werden, welche Auswirkungen sich daraus auf das Recycling der Beleuchtungsmittel ergeben.

2 Aufbau und Funktionsweise der Lampentypen

Grundsätzlich lässt sich die Vielzahl an verschiedenen Lampenbauarten grob in drei Kategorien unterteilen. Eine wesentliche Gruppe bilden die thermischen Strahlungsquellen, welche vor allem die herkömmlichen Glüh- und Halogenlampen beinhalten. Ein weiteres Prinzip der Lichterzeugung stellen die Gasentladungslampen dar, welche vor allem die Leuchtstoff- und Energiesparlampen umfassen. Den neuesten, am Massenmarkt befindlichen Typ bilden die lichtemittierenden Dioden (light emitting diode, LED), bei denen das Licht von einem Halbleiter erzeugt wird.

2.1 Glüh- und Halogenlampen

Die Erwärmung von Festkörpern führt zur verstärkten Emission von Wärmestrahlung, wobei diese bei ausreichend hohen Temperaturen zum Teil auch als sichtbares Licht abgestrahlt wird, welches sich zu Beleuchtungszwecken nutzen lässt. Bei den Glühlampen befindet sich ein gewendelter Wolframdraht als Glühkörper in einem gasdichten Glaskolben, welcher meistens mit einem Stickstoff/Argon-Gemisch gefüllt ist. Während die Glühlampentechnologie bei ausreichender Lebensdauer nach höchstmöglicher Lichtausbeute strebt, wozu möglichst hohe Temperaturen zu erzielen sind, wird dies jedoch durch die zunehmende Abdampfung des Wolframs begrenzt. Bezüglich Aufbau und Funktionsweise gleichen sich die Halogen- und die Glühlampen, wobei erstere durch höhere Wendeltemperaturen ein helleres Licht und eine höhere Effizienz erzielen. Der Zusatz eines Halogens in den Kolben (wie beispielsweise Iod), wodurch sich ein Kreisprozess ergibt, ermöglicht hierbei die Beibehaltung der langen Lebensdauer. Das von der Glühwendel abgedampfte Wolfram verbindet sich in den kühleren Zonen mit dem Halogen, $W + I_2(g) \leftrightarrow WI_2(g)$, welches aufgrund der

Kolbentemperatur gasförmig bleibt und sich wiederum am heißen Wolframfaden zersetzt [4].

2.2 Gasentladungslampen

Bei diesem Typ beruht das Prinzip der Lichterzeugung auf der Anregung von Atomen, Ionen oder Molekülen in der Gasphase durch Stoßprozesse. Im Falle der Niederdruck-Gasentladung erhalten die Elektronen durch die zwischen den Elektroden angelegte Spannung Energien von einigen Elektronenvolt, bevor sie diese durch inelastische Stöße an Quecksilberatome abgeben. Letztere emittieren die aufgenommene Energie durch Resonanzstrahlung bei einer Wellenlänge von 185 und 254 nm. Dieses UV-Licht lässt sich in weiterer Folge durch geeignete Leuchtstoffe an der Innenseite des Entladungsgefäßes in sichtbares Licht konvertieren [5].

2.3 LEDs

Bei den Leuchtdioden (light emitting diodes, LED) beruht die Lichterzeugung im Festkörper auf der Rekombination von positiven und negativen Ladungsträgern (Löcher und Elektronen). Obwohl organische LEDs (OLED) und Polymer-LEDs (PLEDs) seit vielen Jahren intensiv untersucht werden, reichen die Stabilität, Flächenhelligkeit und Lebensdauer für deren Anwendung in der Allgemeinbeleuchtung im Gegensatz zu den Halbleiter-LEDs noch nicht aus. Deren wesentliches Element ist ein pn-Übergang in einem hochkristallinen Festkörper, wie InP oder GaN. Durch Anlegen einer Vorwärtsspannung gelangen Elektronen von der n-Schicht in die lochleitende p-Schicht und Löcher von der p-Schicht in die n-Schicht. Demnach können sich ein Elektron und ein Loch an derselben Stelle aufhalten. Bei deren Rekombination müssen Energie und Impuls erhalten bleiben. Die Emission eines Photons mit einer der Bandlückenenergie entsprechenden Wellenlänge gewährleistet hierbei den Energieerhaltungssatz. Durch entsprechendes Design zur Verringerung von unterschiedlichen Verlusten (Ag-Spiegel, optimierte Geometrie etc.) lassen sich beispielsweise bei roten LEDs mit AlGaInP als Halbleiter bereits Lichtausbeuten von 100 lm/W erzielen (Abbildung 1) [5].

Obwohl Leuchtdioden bereits seit den 1960er-Jahren erhältlich sind, gelang der entscheidende Durchbruch erst

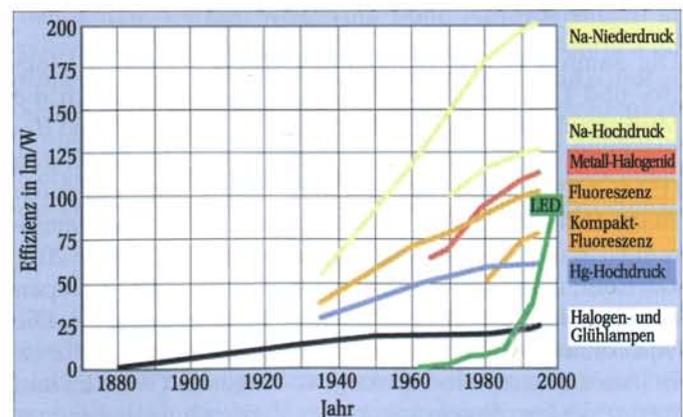


Abb. 1: Effizienz verschiedener Lichtquellen [5]

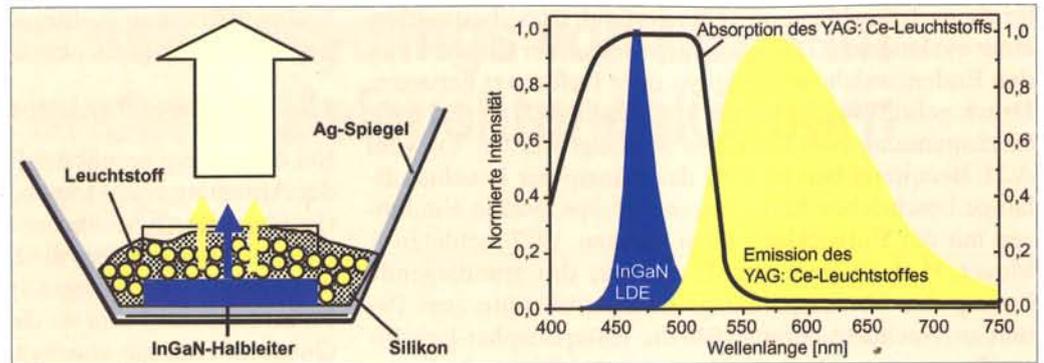


Abb. 2: Prinzipieller Aufbau und Spektrum einer LED mit nitridischem Halbleiter

1994 durch die Entwicklung von effizienten und stabilen blauen InGaN-Halbleitern, welche auf einen Saphir aufgebracht werden. Weiße LEDs für die Beleuchtung basieren heute auf InGaN-Halbleiter, welche im UVA oder blauen Spektralbereich emittieren. Letztere werden mit einem gelben Leuchtstoff kombiniert (Abbildung 2), dessen Schichtdicke so einzustellen ist, dass die additive Lichtmischung weißes Licht ergibt [5].

Als Leuchtstoff eignet sich hierzu vor allem $(Y,Gd)_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce$, kurzerhand als YAG:Ce bezeichnet, welcher blaue Strahlung stark absorbiert und sein breitbandiges Emissionsmaximum bei etwa 560 nm besitzt. Ein anderes Konzept besteht in der additiven Farbmischung dreier Farben, wozu grüne und rote Leuchtstoffe zu verwenden sind, welche mit $SrGa_2S_4:Eu$ (535 nm) und $SrS:Eu$ (615 nm) schnell gefunden waren [5].

Weitere Entwicklungen bezüglich geeigneter Leuchtstoffe basieren unter anderem auf den Verbindungen $(Ba,Sr,Ca)_2Si_5N_8:Eu$ für rotes Licht, $SrSi_2N_2O_2:Eu$ in einer Mischung mit $Sr_2Si_5N_8:Eu$ für weiße LEDs, sowie $CaAlSiN_3:Eu$ und weiteren zahlreichen nitridischen Leuchtstoffen [6].

Aufgrund der hohen Zuverlässigkeit und Flexibilität von LEDs für Beleuchtungszwecke sowie durch weitere Entwicklungen bzw. Verbesserungen als auch einer Kostensenkung durch Ansteigen der Produktionszahlen stellen weiße LEDs nicht mehr nur für Glüh- und Halogenlampen, sondern zunehmend auch für Leuchtstoff- und Energiesparlampen eine interessante Alternative dar.

3 Derzeitiges Recycling der Beleuchtungskörper

Die Sammlung und Behandlung von gebrauchten Elektro- und Elektronikgeräten wird in Österreich durch die Verordnung über die Abfallvermeidung, Sammlung und Behandlung von elektrischen und elektronischen Altgeräten (EAG-VO, BGBl. II Nr. 121/2005, zuletzt geändert durch BGBl. II Nr. 166/2011) geregelt. Darunter fallen unter anderem auch die Beleuchtungskörper, wobei die Novelle 2011 klarstellt, dass (aus gesetzlicher Sicht) die LED-Lampen zur Kategorie der Gasentladungslampen gehören [7]. Die Verordnung beruht auf den beiden EU-Richtlinien 2002/96/EG über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (WEEE) und 2002/95/EG zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten.

Die Verarbeiter zurückgenommener Elektro- und Elektronik-Altgeräte haben nachweislich sicherzustellen, dass nichtverwendete Geräte entsprechend dem Stand der Technik behandelt werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die elektrischen Glühlampen (inkl. Halogenlampen) nur hinsichtlich des Stoffverbots von der EAG-VO betroffen sind und mit dem Restmüll entsorgt werden können, während die LEDs seit 2011 den Gasentladungslampen (Leuchtstoff- und Energiesparlampen etc.) gleichgestellt sind. Dies ist damit zu begründen, dass LEDs zwar kein Quecksilber, jedoch aber elektronische Bauteile enthalten, welche eine gesonderte Behandlung erforderlich machen.

Nachdem die gesonderte Sammlung und Behandlung von Gasentladungslampen bereits seit Jahren gesetzlich vorgeschrieben ist, haben sich hierzu bereits einige Verfahren im Industriemaßstab etabliert, wobei die sortenreine Rückgewinnung von Stoffen im Vordergrund steht. Jedoch kommt auch der Schadstoffentfrachtung wesentliche Bedeutung zu, weil die Gasentladungslampen nach wie vor vom Stoffverbot ausgenommen sind und Quecksilber enthalten. Beim Kapp-Trennverfahren (Abbildung 3), welches sich nur für stabförmige Leuchtstofflampen verwenden lässt, erfolgt zuerst eine Belüftung der unter Unterdruck stehenden Röhren mit einem Lochbrenner. Anschließend trennen weitere Brenner die metallhaltigen Lampenenden von der Röhre, aus der in der nachfolgenden Ausblasstation der Leuchtstoff entfernt wird [8].

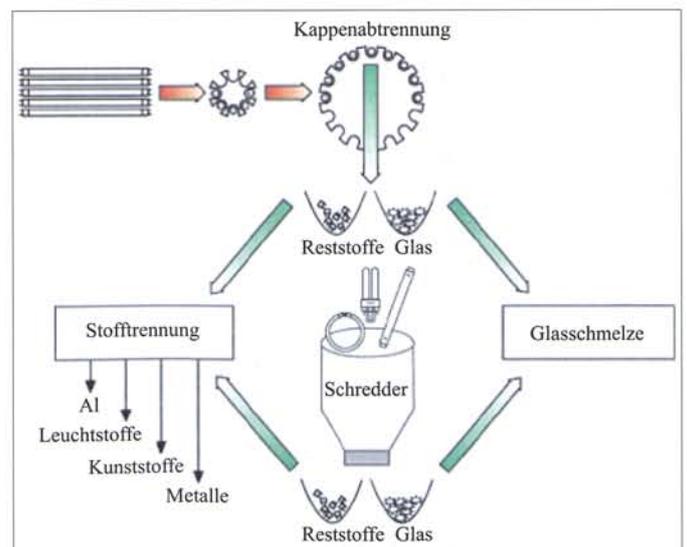


Abb. 3: Das von Osram 1981 entwickelte Kapp-Trennverfahren [9]

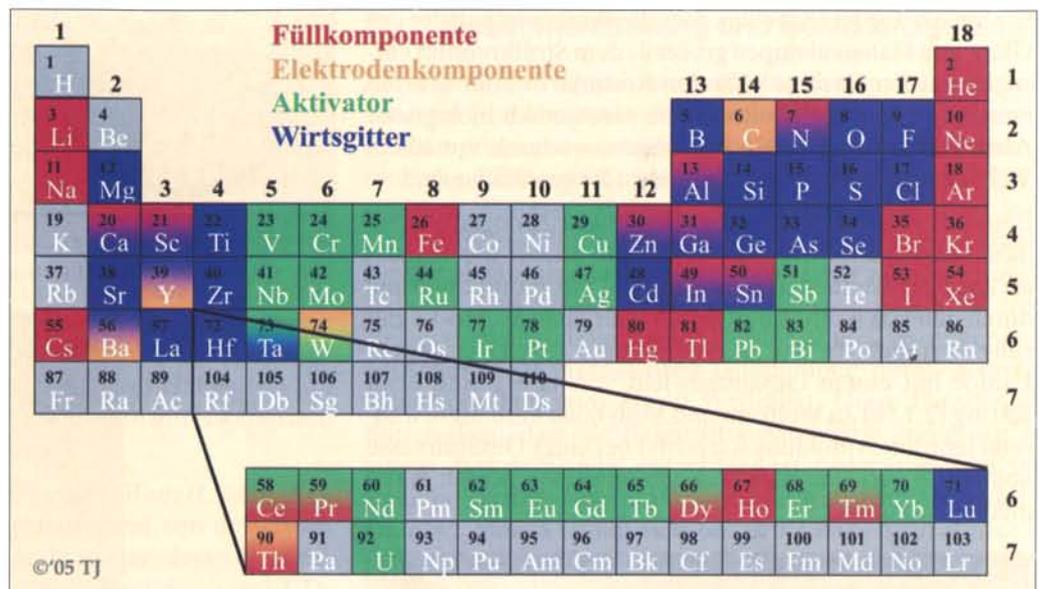


Abb. 4: Verwendung der Elemente in Leuchtstofflampen [6]

Das verbleibende Glasrohr gelangt zur Zerkleinerung in einen Brecher und danach beseitigt ein Metallabscheider noch verbliebene Metallanteile aus den Glasscherben. Im Gegensatz hierzu bietet der Schredder den Vorteil, dass sich nicht nur alle Lampentypen, sondern auch Glasbruch, Produktionsabfälle und Restfraktionen aus der Kapp-Trennanlage verarbeiten lassen, indem die Lampen zuerst zerkleinert werden und anschließend eine Trennung der einzelnen Fraktionen erfolgt [8].

Aus dem Verfahren resultieren ebenso wie bei der in Österreich betriebenen Lampenaufbereitungsanlage Glas, Aluminium, Leuchtstoffe, Kunststoffe und Metalle als Fraktionen, welche sich einer weiteren Verwertung zuführen lassen. Nachdem jedoch vor allem die Feinfraktion (Leuchtstoffe) eine sehr komplexe Materialmischung darstellt und eine Vielzahl unterschiedlicher chemischer Elemente enthält (Abbildung 4 – das Wirtsgitter bildet gemeinsam mit dem Aktivator den Leuchtstoff), fand diese bisher keine Verwertung, sondern wurde aufgrund ihres Quecksilbergehalts in Untertagedeponien verbracht.

Laut einer Mitteilung vom 13. Januar 2011 verfügt jedoch die französische Firma Rhodia über ein Verfahren und Anlagen an ihren Standorten Saint-Fons und La Rochelle zum Recycling von Seltenen Erden aus Leuchtstoffen gebrauchter Gasentladungslampen [10].

Während es darüber hinaus zahlreiche Arbeiten zur Verwertung der gebrauchten Leuchtstoffe gibt [11-18], ließen sich bezüglich des Recyclings von LEDs bisher noch keine Veröffentlichungen auffinden. Gleichfalls gibt es keinerlei Angaben bezüglich gesonderter Aufbereitungsverfahren, weshalb davon auszugehen ist, dass die derzeit noch geringen Anfallsmengen an Leuchtdioden gemeinsam mit dem allgemeinen Elektronikschrott behandelt werden, wodurch zahlreiche der enthaltenen Wertelemente verloren gehen.

Um auch Elemente wie Indium, Gallium, Europium etc. aus den LEDs extrahieren zu können, ist eine weitere Verdünnung dieser Metalle durch Vermischung mit anderen

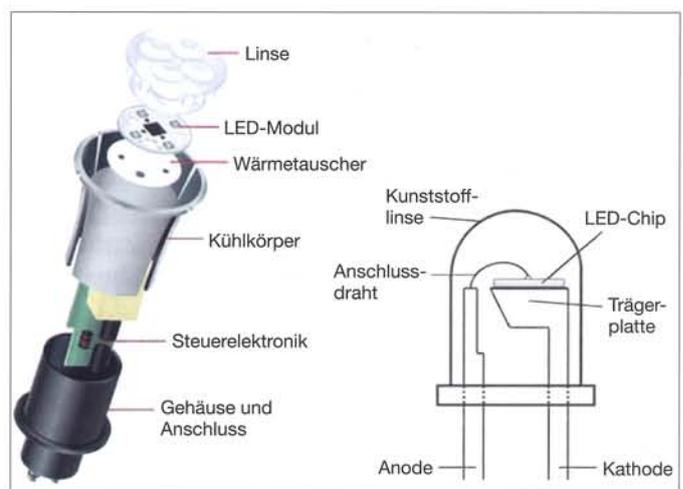


Abb. 5: Gesamtaufbau einer LED-Lampe (links) [19] und einer Leuchtdiode (rechts) [20]

Elektronikschrotten sowie sonstigen Abfällen zu vermeiden und somit voraussichtlich ein eigenständiger Recyclingprozess notwendig. Nachdem die LED-Lampen jedoch relativ komplex aufgebaut sind (Abbildung 5) und darüber hinaus wegen der darin verwendeten, unterschiedlichen Halbleiterverbindungen und Leuchtstoffe ebenso wie die Leuchtstofflampen eine Vielzahl chemischer Elemente beinhalten, werden wiederum hohe Anforderungen an potenzielle Recyclingprozesse gestellt. Die wesentlich geringere Menge an enthaltenen Leuchtstoffen und somit an Seltenen Erden sowie deren schlechtere Abtrennbarkeit mittels physikalischer Methoden aus den LED-Lampen im Vergleich zu den Gasentladungslampen erhöhen nochmals die Herausforderung an eine wirtschaftliche Verwertung.

4 Verwertungsmöglichkeiten

Die vorherigen Ausführungen zeigten bereits, dass die gesonderte Behandlung von Gasentladungslampen, im Speziellen von Leuchtstofflampen, bereits gut etabliert ist, wobei jedoch die Verwertung der daraus resultierenden Leuchtstofffraktion eine neue Entwicklung darstellt. Darü-

ber hinaus war festzustellen, dass die Wertmetallinhalte der Glüh- und Halogenlampen großteils dem Stoffkreislauf entzogen werden, da diese über den Restmüll in Müllverbrennungsanlagen (MVA) oder in die mechanisch-biologische Abfallbehandlung (MBA) gelangen, wodurch vor allem Wolfram und Molybdän nicht mehr rückgewinnbar sind.

Beispielsweise enthalten die Glüh- und Halogenlampen diese beiden Elemente, da bei dieser Bauart die Wendel als auch die Wendelhalterung und die Stromdurchführung durch den Glaskolben aus W, Mo oder einer W/Mo-Legierung bestehen. In der in Abbildung 6 (links) gezeigten Lampe mit einem Gesamtgewicht von 12,3 g sind etwa 260 mg (2,1 %) an Wolfram und Molybdän enthalten, während jene aus Abbildung 6 (rechts) bei einer Gesamtmasse von 46,4 g vergleichbare Mengen an diesen beiden Wertmetallen umfasst.

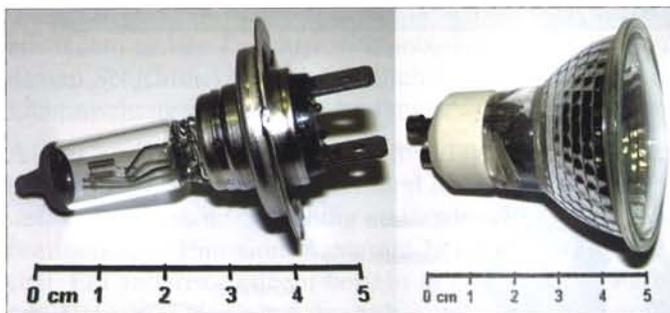


Abb. 6: Übliche Halogenlampen für das Abblendlicht beim PKW (links) und für die Innenraumbeleuchtung (rechts)

Bei den Leuchtstofflampen (Abbildung 7) sind hingegen ausschließlich die beiden Glühwendel (jeweils etwa 7 mg) aus Wolfram gefertigt, während die Wendelhalterung aus Nickel, die Stromdurchführung durch das Glas aus Kupfer, die Kontakte aus Messing und die Blechabschirmung aus niedriglegiertem Stahl bestehen.

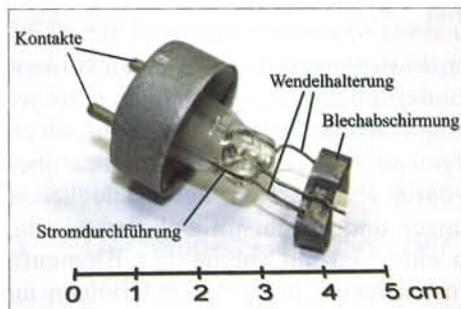


Abb. 7: Endkappe einer Leuchtstoffröhre nach der Aufbereitungsanlage

Aufgrund des sehr geringen W-Inhalts je Einheit ist auch bei diesem Lampentyp, welcher einer gesonderten Sammlung und Aufbereitung zugeführt wird, eine Rückgewinnung des Wolframs nicht wirtschaftlich durchführbar.

Nachdem die Primär- im Vergleich zur Sekundärmetallurgie wesentlich energieintensiver ist, sollten auch die nun vermehrt auf dem Markt auftretenden Leuchtdioden einem effizienten Recyclingverfahren zugeführt werden. Für die Beurteilung der Verwertungsmöglichkeiten von LED-Lampen wurden zwei grundsätzlich unterschiedliche Bauarten herangezogen, deren wesentlicher Aufbau in den Abbildungen 8 und 9 dargestellt ist.

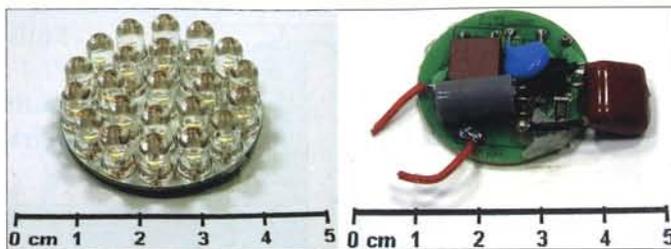


Abb. 8: LED-Module und Elektronik einer LED-Lampe (Bauart 1)

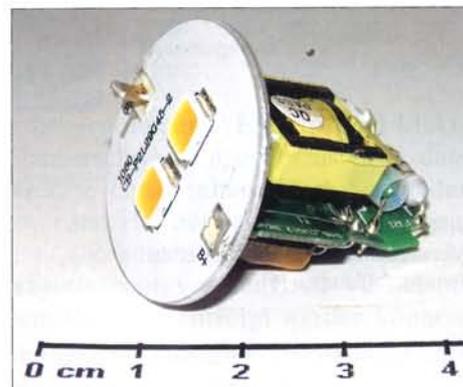


Abb. 9: Gesamtaufbau einer LED-Lampe (Bauart 2)

Hierbei ist jedenfalls zu beachten, dass neben den lichtemittierenden Halbleitern und den Leuchtstoffen in den Beleuchtungskörpern auch weitere elektronische Bauteile und somit entsprechende zusätzliche Wertmetalle enthalten sind.

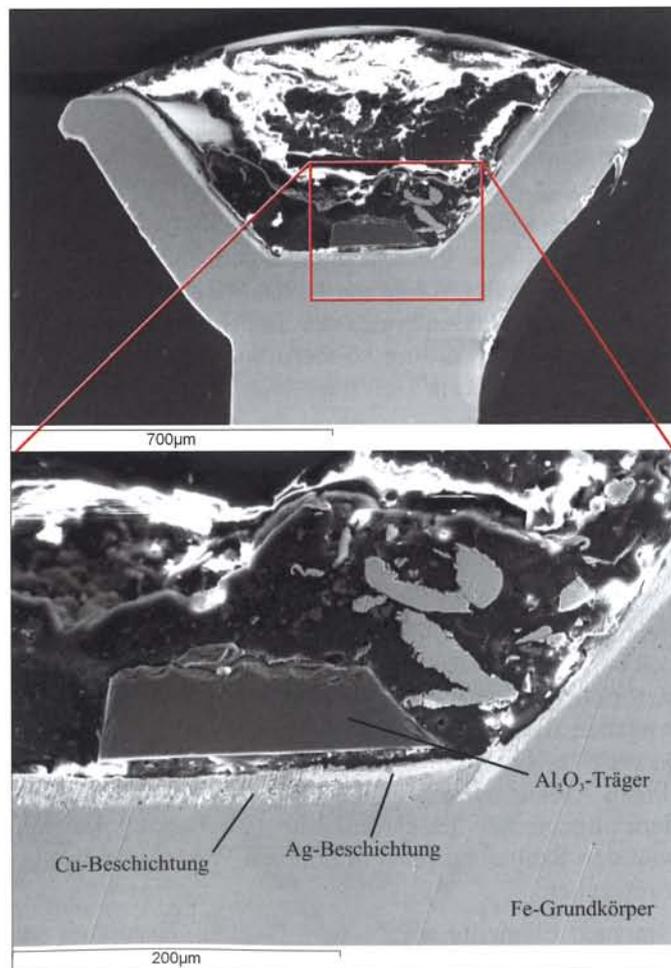


Abb. 10: REM-Aufnahme des Querschnitts einer LED nach Bauart 1

Einen Querschnitt durch die LED nach Bauart 1, deren grundlegender Aufbau der Skizze in Abbildung 5 (rechts) entspricht, zeigt Abbildung 10. Weitere Detailaufnahmen und EDX-Analysen weisen darauf hin, dass die muldenförmige Vertiefung im Grundkörper aus reinem Eisen naheinander mit Nickel, Kupfer und letztendlich Silber als Reflektor beschichtet ist, wobei Cu nur eine Schichtdicke von etwa 3 bis 4 μm erzielt sowie Ni noch dünner aufgetragen wurde.

Darüber hinaus sollte beachtet werden, dass der Leuchtstoff und der Halbleiter bei dieser Probenpräparation nicht erfasst wurden und somit nicht in der REM-Aufnahme erscheinen. Zur Kontaktierung des Halbleiters auf dem Al_2O_3 -Träger finden zwei Golddrähte mit jeweils rund 20 μm Durchmesser Verwendung.

Einen Querschnitt durch die andere Bauart stellt Abbildung 11 dar, welcher sich grundlegend von der ersten unterscheidet. Jedoch zeigt sich auch hier, dass vor allem Edelmetalle als Wertfraktion aus dem Recycling von LED-Lampen zu erwarten sind.

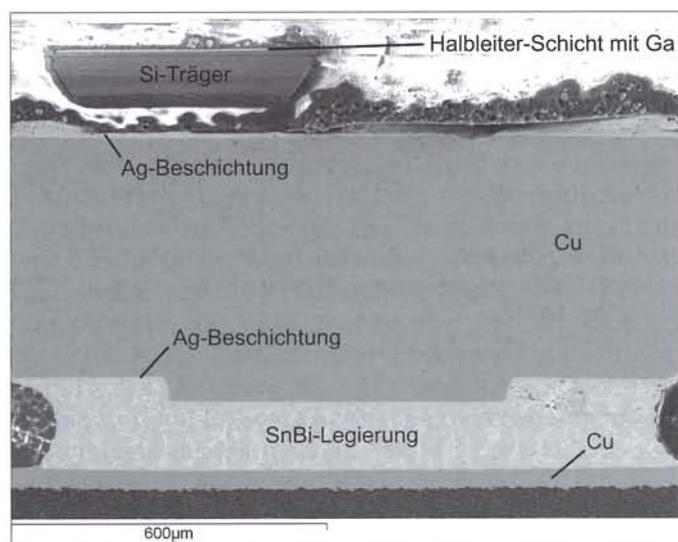


Abb. 11: REM-Aufnahme des Querschnitts einer LED nach Bauart 2

In diesem Fall lässt sich zwar noch die Halbleiter-Schicht anhand der Ga-Verteilung im EDX-Mapping identifizieren, während ebenso wie bei der ersten Bauart der Leuchtstoff nicht dargestellt wurde.

Die Gehalte an Kupfer, Silber und Gold in den Leuchtdioden als auch in der zu ihrem Betrieb erforderlichen und in der Lampe integrierten Elektronik legen nahe, diese Abfallfraktion nicht gemeinsam mit den Leuchtstofflampen einem Recycling zuzuführen, sondern zusammen mit anderen hochwertigen Elektronikschrotten zu behandeln. Auf diesem Wege wären zumindest das Kupfer sowie die enthaltenen Edelmetallanteile rückgewinnbar. Aufgrund der in den nächsten Jahren noch relativ geringen Mengen an zu erwartenden Alt-LED-Lampen sowie deren niedrigen Gehalten an Halbleiterwerkstoffen sowie Leuchtstoffen erscheint derzeit eine Verwertung hinsichtlich In, Ga, SE etc. als nicht wirtschaftlich. Ein derartiges Recycling wird zusätzlich durch die enorm hohe Anzahl verschiedener Elemente erschwert, welche vor allem in den Leuchtstoffen Verwendung finden.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Für allgemeine Beleuchtungsaufgaben fanden bisher überwiegend Glühlampen und Gasentladungslampen (Leuchtstofflampen, Energiesparlampen, etc.) Verwendung, während die LEDs noch nicht konkurrenzfähig waren. Die ständige Weiterentwicklung der Leuchtdioden führt jedoch mittlerweile dazu, dass diese nunmehr bezüglich Lichtausbeute und somit Stromverbrauch während ihrer Lebensdauer mit den Energiesparlampen vergleichbare Resultate liefern. Gleichzeitig werden aktuell die aus energetischer Sicht ineffizienten Glühlampen durch gesetzliche Vorgaben vom Markt verdrängt. Diese Umstände führen dazu, dass die Beleuchtungsindustrie gegenwärtig einem starken Wandel unterzogen ist, welcher in Summe zu einer Verringerung des Energieverbrauchs führen wird. Darüber hinaus lassen sich bei den LEDs noch weitere Effizienzsteigerungen erwarten, wodurch bei gleichzeitiger Kostensenkung durch Erzielung wesentlich größerer Stückzahlen diese langfristig gegenüber den Gasentladungslampen an Bedeutung gewinnen könnten. Nachdem der Rohstoffeinsatz für hochwertige und aufwändig herzustellende Elemente (vor allem der Seltenen Erden) bei den LED wesentlich geringer als bei den Leuchtstofflampen ausfällt, erscheint auch die Herstellung derartiger Leuchten mit einem niedrigeren Energieverbrauch verbunden zu sein. Hinsichtlich des Recyclings ist nach aktuellem Kenntnisstand und aufgrund der in den nächsten Jahren zu erwartenden Rücklaufmengen eine gemeinsame Behandlung mit hochwertigem Elektronikschrott als zielführend anzusehen, um vor allem die Wertmetalle Kupfer, Silber und Gold zurückzugewinnen. Nachdem diese Bauteile jedoch auch Metalle, wie Indium, Gallium etc. enthalten, welche bezüglich ihrer globalen Verfügbarkeit als sehr kritisch eingestuft sind, sollen weitere Untersuchungen und Prozessentwicklungen zu einer Technologie führen, welche zukünftig bei ausreichend großen Anfallmengen an Alt-LED-Lampen eine wirtschaftliche Rückgewinnung möglichst vieler Wertmetalle erlaubt.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG) und dem Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend (BMWFJ) für die finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] EDISON, T. A. (1880): Electric lamp. – US 223898.
- [2] Carl Auer von Welsbach – Das Lebenswerk eines österreichischen Genies. – Internet: <http://pluslucis.univie.ac.at/PlusLucis/001/welsbach.pdf> (Zugriff: 1.5.2012).
- [3] LASSNER, E. & SCHUBERT, W.-D. (1999): Tungsten: Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys, and Chemical Compounds. – New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- [4] PFEIFER-YOUSIF, C. (2008): Lampen – System- und Wirtschaftlichkeitsanalyse, Entsorgungspraxis in Österreich. – Diplomarbeit, LA Biologie und Warenlehre, Universität Wien.

- [5] BORN, M. & JÜSTEL, T. (2003): Umweltfreundliche Lichtquellen. – Physik Journal, **2**: 43-49.
- [6] BORN, M. & JÜSTEL, T. (2006): Chemie in Lampen – Elektrische Lichtquellen. – Chemie in unserer Zeit, **40**: 294-305.
- [7] Elektroaltgeräteverordnung (EAG-VO). – Internet: <http://www.lebensministerium.at/umwelt/abfall-ressourcen/abfall-altlastenrecht/awg-verordnungen/eagvo.html> (Zugriff: 6.5.2012).
- [8] TENTA, E. (2012): Recycling von Seltenen Erden aus Leuchtstoffen unter Berücksichtigung der Quecksilber-Problematik. – Recyclinglehrgang-Abschlussarbeit, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich.
- [9] Kapp-Trenn-Verfahren. – Internet: http://www.osram.at/osram_at/Ueber_uns/Gesellschaft_und_Umwelt_-_Global_Care/Umweltbewusstes_Entsorgen/Kapp_Trenn_Verfahren/index.html# (Zugriff: 6.5.2012).
- [10] Rhodia develops innovative process for the recycling of rare earths. – Internet: http://www.rhodia.com/en/news_center/news_releases/Rare_earth_130111.tcm (Zugriff: 30.4.2012).
- [11] DE MICHELIS, I. et al. (2011): Treatment of exhaust fluorescent lamps to recover yttrium: Experimental and process analyses. – Waste Management, **31**: 2559-2568.
- [12] DURAO, W.A. JR. et al. (2008): Mercury reduction studies to facilitate the thermal decontamination of phosphor powder residues from spent fluorescent lamps. – Waste Management, **28**: 2311-2319.
- [13] GOCK, E. et al. (2000): Verfahren zum Recycling von Dreiband-Leuchtstoffen. – DE11918793.
- [14] RABAH, M.A.: Recyclables recovery of europium and yttrium metals and some salts from spent fluorescent lamp. – Waste Management, **28**: 318-325.
- [15] RADEKE, K.-H. et al. (1997): Verfahren zur Wiederaufbereitung quecksilber- und phosphathaltiger Seltenerdleuchtstoffgemische. – DE 19617942.
- [16] RESENDE, L. V. & MORAIS, C. A. (2010): Study of the recovery of rare earth elements from computer monitor scraps – leaching experiments. – Minerals Engineering, **23**: 277-280.
- [17] SCHIMROSCZYK, B. (2004): Recycling von Yttriumeuropiumoxid aus Altleuchtstoffen. – Dissertation, Gemeinsame Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal.
- [18] WOJTALEWICZ-KASPRZAK, A. (2007): Erzeugung von synthetischen Selten-Erd-Konzentraten aus Leuchtstoffabfällen. – Dissertation, Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften, TU Clausthal.
- [19] LED ist die Zukunft. – Internet: <http://www.on-light.de/home/news/article/led-ist-die-zukunft.html> (Zugriff: 6.5.2012).
- [20] LED (Licht emittierende Dioden). – Internet: <http://www.ecobility.com/energiewissen/led-technologie.html> (Zugriff: 6.5.2012).

Dipl.-Ing. Dr.mont. Stefan Luidold
 Dipl.-Ing. Dr.mont. Holger Schnideritsch
 Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie, Montanuniversität Leoben
 Franz-Josef-Straße 18
 8700 Leoben
 Austria