



Deutsches
Patent- und Markenamt

Erfinderaktivitäten 2013

Schwerpunkt: Lichttechnik



Inhalt

Vorwort	3
■ Was ist Licht? <i>Dr. Thomas Flaschke</i>	4
■ LED – das Leuchtmittel der Zukunft <i>Robert Terkl</i>	10
■ Anorganische und organische lumineszierende Materialien <i>Dr. Sandra Pröckl, Dr. Imke Salmon, Dr. Sven Dabek</i>	22
■ OLEDs – Entwicklung einer Technologie zur Marktreife <i>Mark Haslinger</i>	33
■ Biolumineszenz <i>Dr. Leonhard Riedel</i>	39
■ Technische Entwicklungen in der Fahrzeugaußenbeleuchtung: LEDs, OLEDs und Laserdioden als innovative Lichtquellen der Zukunft <i>Anika Kohlstedt, Dr. Torsten Schröder</i>	47
■ Adaptive, automobiler Frontscheinwerfer und situationsabhängige Beleuchtung im Fahrzeugumfeld <i>Dr. Stefan Bahr</i>	59
■ Innenraumbeleuchtung bei Cabriolets <i>Dr. Andreas Monokroussos</i>	67
■ Dreidimensionale Vermessung mit Licht <i>Dr. Uwe Griesinger, Dr. Johann Winter</i>	73
■ Das Licht: ein Werkzeug für die Qualitätsprüfung <i>Dr. Armelle Mittermeier</i>	82

Vorwort

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

in der neuen Ausgabe der Erfinderaktivitäten geben Ihnen die Autorinnen und Autoren die Gelegenheit, in die faszinierende Welt des Lichts einzutauchen.

Wussten Sie eigentlich, welche Rolle die Erfindung der Glühbirne bei der Entdeckung der Quantentheorie gespielt hat?

Auf den nächsten Seiten finden Sie die Antwort dazu und auch viele Neuigkeiten aus dem Bereich der Lichttechnik. Eindrucksvolle Entwicklungen sind beispielsweise: faltbare OLED-Displays, transparente Bildschirme, leuchtende Folien, lumineszierende Stoffe, Laser-Frontscheinwerfer, adaptive Matrix-LED-Scheinwerfersysteme oder die optische Pinzette.

Die Artikel wurden von den mit den jeweiligen Fachgebieten befassten Patentprüferinnen und Patentprüfern geschrieben. Grundlage für ihre Beiträge waren die jeweils maßgeblichen Patentdokumente sowie die zugängliche Fachliteratur.

Die in den Artikeln genannten Schriften umfassen den bis zum Redaktionsschluss am 11. April 2014 der Öffentlichkeit bekannten Stand der Technik.

Viel Spaß beim Lesen wünscht Ihnen,

Dr. Thomas Flaschke
(Redaktion)

Was ist Licht?

Dr. Thomas Flaschke, Patentabteilung 1.26

Fünfundzwanzig Jahre intensiven Nachdenkens haben mich der Antwort auf die Frage „Was ist Licht?“ nicht näher gebracht. Natürlich bildet sich heute jeder Wicht ein, er wisse die Antwort. Doch da täuscht er sich [1].

Albert Einstein, 1954

1 Einleitung

Aus vielen Eindrücken kennen wir die Phänomene, die auftreten, wenn Licht auf eine Oberfläche trifft; es wird reflektiert, gebrochen, gestreut und absorbiert. Das vereinfachte Modell wie es in der geometrischen Optik [2] verwendet wird, in dem davon ausgegangen wird, dass Licht aus geradlinigen Lichtstrahlen besteht, kann für die Erklärung einer großen Anzahl von Phänomenen herangezogen werden. Verschiedene Eigenschaften des Lichts lassen sich mit dem Lichtstrahlenmodell leicht verständlich beschreiben. Allerdings stellt sich bei genauerer Betrachtung heraus, dass mit diesem Bild nicht alle Erscheinungen erklärt werden können. Außerdem sagt es wenig darüber aus, was Licht eigentlich ist.

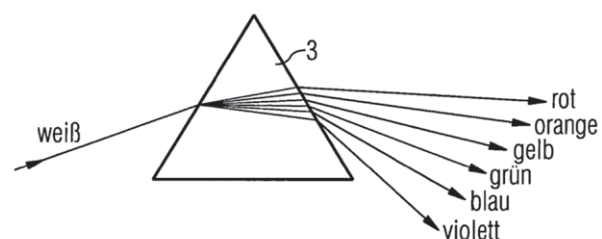
2 Theorien in der Zeit vor der Erfindung der Glühlampe

Bereits im 17. Jahrhundert erkannte man, dass die klassische Deutung von Licht als Bündel geradliniger Strahlen unvollständig sein muss. Beugungs- und Interferenzmuster lassen sich so nicht erklären. Der niederländische Physiker **Christiaan Huygens** bemerkte um 1650, dass sich Licht ähnlich wie eine Wasserwelle ausbreitet. Sein Wellenmodell wurde jedoch von der Wissenschaft vorerst nicht ernst genommen, da man die Korpusteltheorie von Isaac Newton favorisierte.

■ Korpusteltheorie

Der englische Physiker und Begründer der Gravitationstheorie **Isaac Newton** (1643 – 1727), stellte im Jahr 1672 die Hypothese auf, dass Licht aus kleinen Teilchen, sogenannten Korpusteln besteht, die von

der Sonne aus geradlinig durch den Raum gestoßen werden. Die Lichtteilchen können von Hindernissen abprallen und die Richtung ihrer Flugbahn verändern. Bei einem seiner berühmtesten Versuche bohrte er ein kleines Loch in den Fensterladen einer Dunkelkammer und hängte ein Glasprisma davor. Der farblose Strahl des Sonnenlichts wurde auf der weißen Wand aufgefangen – er war bunt. Newton zerlegte das Sonnenlicht in seine Spektralfarben. Das Prisma 3 bricht blaues und violettes Licht stark, rotes Licht hingegen erfährt nur eine leichte Brechung (vergleiche Figur 1).



Figur 1: Die spektrale Zerlegung des Lichts mittels eines Prismas 3 (nach Newton aus der DE 103 16 807 A1).

Newton erkannte auch, dass die Farbe nicht dort ist, wo sie zu sehen ist. Beispielsweise ist ein Salatblatt nicht grün. Der Grund, dass ein Blatt uns grün erscheint, liegt darin, dass dessen Oberfläche bevorzugt den grünen Spektralanteil des Lichts reflektiert, während sie die anderen Komponenten teilweise oder ganz absorbiert.

■ Wellentheorie

Im Jahr 1802 konnte der englische Arzt **Thomas Young** (1773 – 1829) die Welleneigenschaften des Lichts nachweisen. Mit seinem Doppelspaltversuch zeigte er, dass sich Licht wie eine Welle ausbreitet.

Bei dem Versuch ließ er das Sonnenlicht durch ein kleines Loch im Fensterladen in einen abgedunkelten Raum treten [3]. Den so entstandenen Lichtkegel projizierte er auf zwei enge, parallel ausgerichtete Spalten. Hinter diesem Doppelspalt fächerten sich die beiden Lichtstrahlen wellenförmig auf und bildeten auf einem Schirm ein Interferenzmuster aus hellen und dunklen Lichtstreifen. Phänomene wie die Beugung, Interferenz und Polarisierung des Lichts waren nun durch die Wellentheorie erklärbar, an denen die Korpuskeltheorie zuvor gescheitert war. Mit dieser Theorie hatte Young auch einen entscheidenden Schlüssel für das Verständnis des Farbsehens entdeckt. Er erkannte, dass Farben entstehen, wenn diese Lichtwellen in unterschiedliche Wellenlängen aufgeteilt werden. Young stellte ebenfalls fest, dass Farbe eine physiologische Empfindung ist. Die Farbe entsteht erst, wenn der Farbreiz im Auge eines Betrachters eine Farbempfindung produziert. Die Interferenzexperimente von **Augustin Jean Fresnel** bauten die Theorie weiter aus. Fresnel erkannte, dass das Licht aus Transversalwellen besteht. Bis dahin hatte man angenommen, dass sich Licht wie der Schall longitudinal ausbreitet [4].

■ Elektromagnetische Lichttheorie

Bestätigt wurde die Wellentheorie etwa 50 Jahre später durch den schottischen Physiker **James Clerk Maxwell** (1831 – 1879). Seiner Vorstellung zu Folge ist das Licht eine elektromagnetische Welle, bei der ein zeitabhängiges Magnetfeld ein elektrisches Feld erzeugt und umgekehrt. Maxwell entwickelte 1864 vier Differentialgleichungen, welche zu den grundlegendsten und wichtigsten Gleichungen in der Physik zählen. Aus den Maxwellgleichungen folgt, dass sich die elektromagnetischen Wellen im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Damit schien endgültig klar: Das Licht besteht aus Wellen.

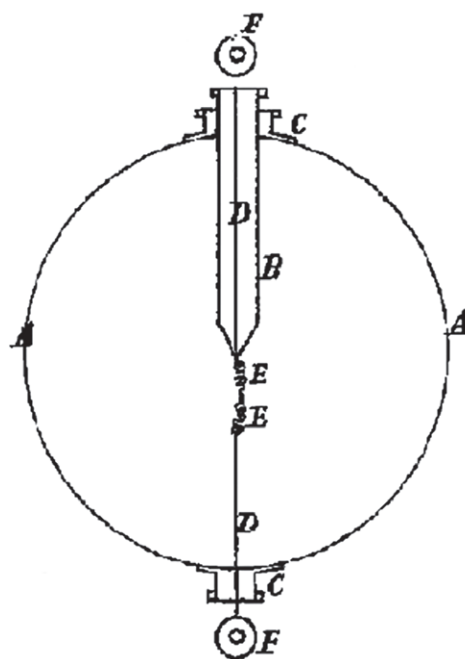
3 Die Eigenschaften eines Wärmestrahlers

Wärmestrahler – wie die Sonne oder eine Glühlampe – geben Licht ab. Die Geschwindigkeit, mit der sich Licht im Vakuum und annähernd in Luft bewegt, beträgt

rund 300 000 Kilometer pro Sekunde. Die Lichtlaufzeit von der Sonne zur Erde beträgt damit etwa 8 Minuten. Maxwell konnte zeigen, dass sich Licht als eine Welle ausbreitet. Nur ein geringer Anteil dieser elektromagnetischen Wellen ist allerdings sichtbar. Die Wellenlänge des für das menschliche Auge wahrnehmbaren Lichts umfasst den Bereich von 380 (violett) bis 780 Nanometer (rot). Das gesamte Spektrum geht weit darüber hinaus. Es umfasst Radio- und Mikrowellen, Infrarotstrahlung, UV-Licht sowie Röntgen- und Gammastrahlung. Je höher die Temperatur eines Objekts ist, desto größer wird der Lichtanteil im sichtbaren Bereich.

4 Die Erfindung der Glühlampe

In einer Glühlampe wird ein elektrischer Leiter, der sogenannte Glühdraht, durch elektrischen Strom auf eine hohe Temperatur von etwa 2 000 °C erhitzt. Dadurch strahlt er Licht ab. Das weltweit erste Patent für eine Glühlampe (GB 9053 A) erhielt der Engländer **Frederick de Moleyns** bereits im Jahr 1841. Als Glühdraht verwendete Moleyns gewendelte Platinfäden, deren Zwischenräume mit Kohlepulver gefüllt waren. Die Glühfäden E befanden sich in einem luftleer gepumpten Glaskolben A (vergleiche Figur 2).



Figur 2: Weltweit erstes Patent für eine Glühlampe mit einem Vakuumkolben A und gewendelten Platinfäden E aus dem Jahr 1841 (GB 9053 A).

Frederick de Moleyn hatte erkannt, dass das Vakuum ein zu schnelles Verglühen des Glühdrahts verhinderte. Eine Batterie versorgte die Glühlampe über die Kontakte F mit Strom. Da Platin jedoch einen Schmelzpunkt von etwa 1 770 °C hat, war die Lichtausbeute eher gering und eine Massenfertigung fand nicht statt. Die hohen Materialkosten trugen ebenfalls zum Scheitern bei.

Als Entwickler der ersten brauchbaren Glühlampe gilt der deutsche Uhrmacher **Heinrich Goebel**, der 1854 eine Lampe mit einer verkohlten Bambusfaser als Glühdraht baute. Mit der Beleuchtung seines Uhrmacherladens in New York schuf er die erste Lichtreklame der Welt [5]. Aber auch seine Glühlampe konnte sich wirtschaftlich nicht durchsetzen.

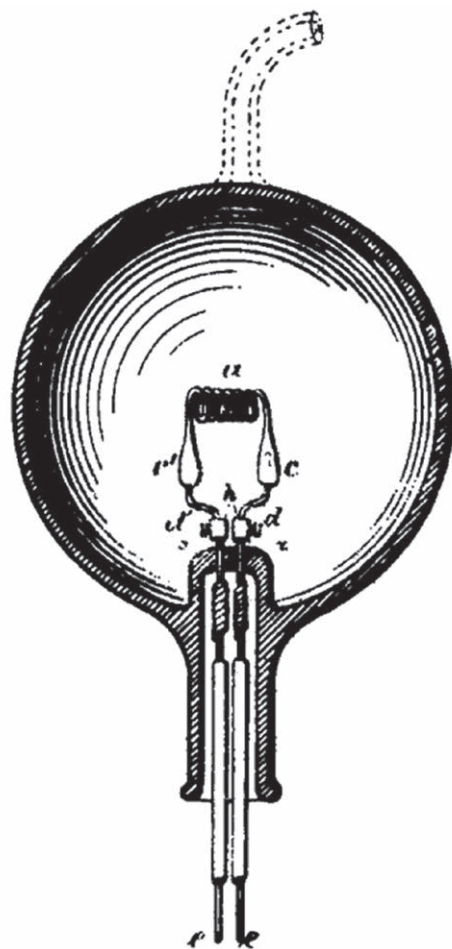
Der britische Physiker **Joseph Wilson Swan** entwickelte 1860 eine Glühlampe, bei der er verkohltes Papier als Glühfaden einsetzte. In den darauf folgenden Jahren tüftelte er an der Optimierung des Glühfadens und erhielt am 27. November 1880 ein britisches Patent (GB 4933 A) für seine Glühlampe mit einem Glühfaden aus karbonisierter Baumwolle.

Als eigentlicher Erfinder der Glühlampe gilt heute der amerikanische Unternehmer **Thomas Alva Edison**, der der Öffentlichkeit im Jahr 1879 seine elektrische Glühlampe präsentierte. Edison hatte einen geeigneten Glühdraht gefunden, der gleichmäßiges warmes Licht spendete und rund 40 Stunden lang brennen konnte. Die Lampe rußte nicht und musste nicht nachgefüllt werden. Am 27. Januar 1880, etwa drei Monate nach der Patentanmeldung, wurde ihm hierfür das Patent US 223 898 A mit der Bezeichnung „Electric Lamp“ erteilt. Seine Glühlampe bestand aus einem evakuierten Glaskolben mit einem Kohleglühfaden aus verkohlten Bambusfasern a (vergleiche Figur 3). Verglichen mit Platin konnte bei der Verwendung des hochohmigen Kohleglühfadens mit einer gut doppelt so hohen Temperatur gearbeitet werden. 1881 wurde das neue elektrische Licht auf der ersten Elektrizitätsausstellung in Paris vorgestellt. Schon bald begannen Metropolen wie New York und Berlin auf elektrische Beleuchtung umzurüsten [5].

Edison arbeitete aber nicht nur an der Optimierung der Glühlampe, sondern entwickelte auch leistungsstarke Dynamomaschinen, Leitungsnetze, Schaltungen, Stromzähler und Sicherungen. Bis heute hat sich der von Edison entwickelte Schraubsockel bewährt, der die Bezeichnung Edisons (zum Beispiel E 27) trägt.

5 Theorien in der Zeit nach der Erfindung der Glühlampe

Im Jahr 1887 wurde in Berlin die Physikalisch-Technische Reichsanstalt gegründet, deren Aufgabe es war, die Potenziale der elektrischen Lichterzeugung zu untersuchen. Man wollte verstehen wie das Lichtspektrum einer Glühlampe physikalisch erzeugt wird, und von welchen Parametern das von einem Wärmestrahler ausgesandte Licht beeinflusst wird [6].



Figur 3: Edison-Glühbirne mit einem Kohleglühfaden a aus verkohlten Bambusfasern aus dem Jahr 1879 (Grundlagenpatent US 223 898 A).

■ Quantenhypothese

Die Arbeiten des deutschen Physikers und Direktors der neu geschaffenen Physikalisch-Technischen Reichsanstalt **Max Planck** führten zur Quantenphysik. Planck entdeckte bei seinen Experimenten zur Hohlraumstrahlung im Jahr 1900, dass das Licht eines Wärmestrahlers nicht in Wellen ausgesandt wird, sondern in kleinsten, nicht teilbaren Energiepaketen, den sogenannten Quanten. Dabei entdeckte er die Konstante h – das später nach ihm benannte Plancksche Wirkungsquantum – um die Energiepakete mit der Wellenlänge verknüpfen zu können [7]. Planck nahm an, dass die Quanten des Lichts, die sogenannten Photonen, eine feste Energie E besitzen. Diese ist durch die Frequenz f des Lichts, also die Farbe des Lichts, und durch die Konstante h festgelegt. Es gilt die Gleichung: $E = hf$.

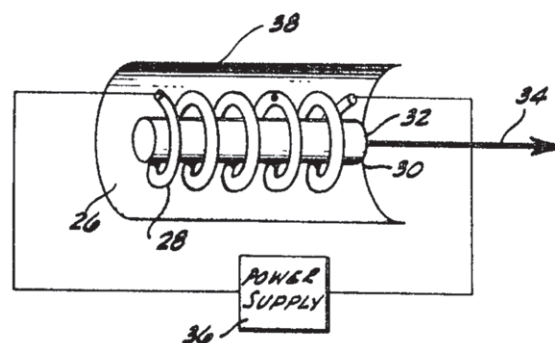
Die Energie eines Lichtquants wächst damit proportional mit der Frequenz. Daraus folgt, dass die Energie eines Quants umso größer ist, je kürzer die Wellenlänge ist. Quanten von ultravioletter Licht sind äußerst energiereich. Wie klein das Plancksche Wirkungsquantum h ist, kann man daran sehen, dass eine Glühlampe pro Sekunde etwa 300 Trillionen Photonen aussendet [6].

■ Der Photoeffekt

Der in den Jahren von 1902 bis 1909 beim Schweizer Patentamt in Bern als Patentprüfer tätige **Albert Einstein** hat die Quantenhypothese von Max Planck weiterverfolgt. Er übertrug die von Planck bei der Emission von Licht entdeckte Quantelung der Strahlungsenergie auf die Ausbreitung des Lichts im Raum und seine Wechselwirkung mit Materie. In seiner Arbeit „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“ aus dem Jahr 1905 erklärte Einstein den lichtelektrischen Effekt, nach dem aus einer mit kurzwelligem Licht bestrahlten Metallplatte Elektronen herausgelöst werden. Dabei dringen die Photonen in das Metall ein und geben ihre gesamte Energie an die Elektronen der Metalloberfläche ab. Die Geschwindigkeit, mit der die Elektronen ihre Bindung oder auch das Metall verlassen, hängt dabei von der Wellenlänge des Lichts und nicht von dessen Intensität ab [8].

Auf dem Photoeffekt beruht beispielsweise die Arbeitsweise von Halbleitern, Bildwandlern, Digitalkameras und Solarzellen. Auch die Arbeitsweise des Lasers geht aus dem lichtelektrischen Effekt hervor, ohne den es viele Geräte aus der Unterhaltungselektronik, der Informationstechnik, der Analytik oder der Medizintechnik nicht gäbe.

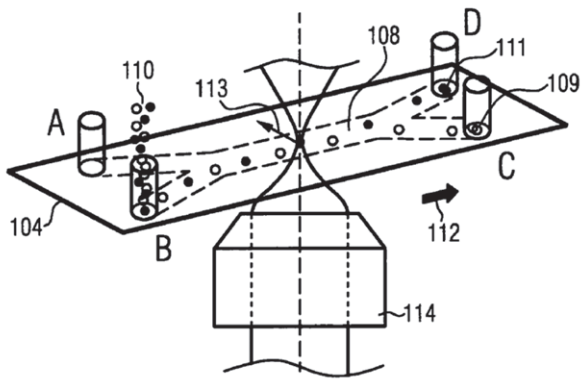
Bei dem in der US 3 451 010 A beschriebenen Laser (Figur 4) werden von einer Blitzlampe 28 im aktiven Lasermaterial 32 so viele Atome angeregt, dass die spontane Emission einzelner Atome zu einem lawinenartigen Anwachsen stimulierter Emissionen und damit zum Laservorgang 34 führt [9].



Figur 4: Laseranordnung mit Blitzlampe 28 und Lasermaterial 32 (US 3 451 010 A).

Eine interessante – in der Biophotonik eingesetzte – Anwendung der Lasertechnik ist die optische Pinzette, mit der berührungslos kleinste Objekte wie zum Beispiel Zellen, Blutplättchen und Bakterien, festgehalten oder bewegt werden können. Ermöglicht wird dies durch einen Laserstrahl, der mit einer Linse fokussiert wird. Die DE 10 2008 060 332 B4 beschreibt eine optische Pinzette, die zum Sortieren von Mikropartikeln eingesetzt wird. Figur 5 zeigt ein Kanalsystem 113, welches mit den zu sortierenden Partikeln 110 durchströmt wird. Ein Infrarotlaser wird dabei durch ein Mikroskopobjektiv fokussiert. Auf diese Weise werden hohe Feldgradienten in dem Hauptkanal 108 erzeugt, sodass die Partikel 110 quer zur Strahlachse starke Kräfte erfahren und folglich sortiert werden können.

Im Jahr 1922 erhielt Einstein für die Interpretation des Photoeffekts – und nicht etwa für seine viel bekanntere Relativitätstheorie – den Nobelpreis.



Figur 5: Mikrofluidische Sortiervorrichtung mit optischer Pinzette (DE 10 2008 060 332 B4).

■ Relativitätstheorie

Mit seinen beiden Aufsätzen „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ [10] und „Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?“ [11] aus dem Jahr 1905 begründete Einstein die spezielle Relativitätstheorie. Letztgenannter Artikel führte auch zu der allbekannten Gleichung $E = mc^2$.

Einstein zeigte, dass Photonen, also Lichtteilchen, keine Ruhemasse besitzen. Sie bewegen sich mit der im jeweiligen Medium gültigen Lichtgeschwindigkeit. Allerdings besitzt jedes Photon eine bestimmte Energie und weist deshalb aufgrund der Masse-Energie-Äquivalenz auch eine dynamische Masse auf. Diese Masse bewirkt, dass Photonen von Gravitationsfeldern abgelenkt werden und dabei Energie verlieren oder gewinnen können. Der speziellen Relativitätstheorie liegt das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit zugrunde, die besagt, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts in allen Inertialsystemen gleich und von der Geschwindigkeit der Lichtquelle unabhängig ist [9].

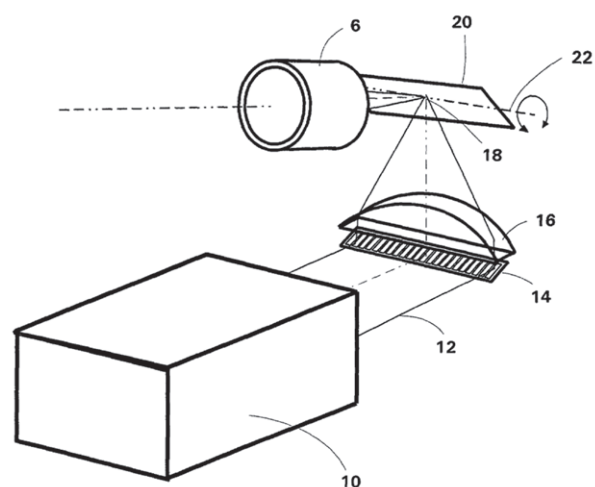
■ Unschärferelation

Die von **Werner Heisenberg** im Jahr 1927 gefundene Unschärfebeziehung besagt, dass Ort und Impuls eines Teilchens nicht gleichzeitig genau gemessen werden können. Je genauer man den Ort misst, desto ungenauer wird die Messung des Impulses. Das bedeutet, je genauer die Position eines Photons bekannt ist, desto ungenauer kennt man seine Wellenlänge und umgekehrt. Demnach wird man eine unendlich ausgedehnte Lichtwelle am ehesten als Welle bezeichnen, das eng begrenzte Wellenpaket

dagegen als Teilchen auffassen (Welle-Teilchen-Dualismus) [6]. Die Heisenbergsche Unschärferelation liefert auch eine Begründung für das bei der Laserprojektion (Figur 6) als Speckle bezeichnete, störende Interferenzphänomen (vergleiche DE 199 45 026 C2).

■ Der Casimir-Effekt

Der sogenannte Casimir-Effekt wurde im Jahr 1948 von dem niederländischen Physiker **Hendrik Casimir** theoretisch vorhergesagt und 1956 im Experiment bestätigt [12]. Er besagt, dass sich zwei Metallplatten gegenseitig anziehen, wenn sie sich im Vakuum und am absoluten Nullpunkt der Temperatur etwa einen halben Mikrometer gegenüberstehen. Die Kraft, die die Platten zusammendrückt, rührt von quantenmechanischen Schwankungen der elektromagnetischen Lichtwellen. Von außen drücken mehr Photonen gegen die Metallplatten als von innen. Die Energiedichte der Vakuumfluktuationen – also der aufgrund der Heisenbergschen Unbestimmtheitsbeziehung zufällig auftretenden und wieder verschwindenden Photonen – hängt vom Abstand der parallelen Metallplatten ab. In der Nanotechnik hat die Casimir-Kraft unerwünschte Auswirkungen, da die Nano-Bauteile aufgrund des Effekts aneinander kleben können. Gemäß der Lehre der DE 34 41 084 A1 soll es möglich sein, die Casimir-Kräfte zu nutzen und so zu beeinflussen, dass die Nullpunktenergie des Vakuums in nutzbare Energie umgewandelt werden kann.



Figur 6: Laserprojektor, bei dem mit einem Laser 10 ein Lichtbündel 12 erzeugt wird, welches auf eine Zeilenmatrix 14 fällt, mit einem Linsensystem 16 auf einen Galvanometer-Spiegel fokussiert und über eine Projektionsoptik 6 als Bild sichtbar gemacht wird (DE 199 45 026 C2).

6 Fazit

Die Eigenschaften des Lichts haben zu den beiden bedeutendsten und erfolgreichsten Theorien des 20. Jahrhunderts geführt: zur Relativitätstheorie und zur Quantentheorie. Zur Relativitätstheorie, weil die Lichtgeschwindigkeit unabhängig von der Geschwindigkeit der Lichtquelle und des Lichtempfängers immer den gleichen Wert hat, und zur Quantentheorie, weil das Licht nur in Energiequanten emittiert und absorbiert wird.

Unter bestimmten Beobachtungsbedingungen verhält sich Licht so, als handele es sich um eine Welle, unter anderen scheint es aus Teilchen zu bestehen. Je nachdem wie wir das Licht wahrnehmen, ist Licht eine Welle oder ein Teilchen. Interessant ist die Theorie des deutschen Physikers Karl-Otto Greulich aus dem Jahr 2007, nachdem Lichtwellen einen Teilchencharakter vorgaukeln können. Greulich verdeutlicht dies am Beispiel einer Wasserwelle: „Läuft Wasser mit geringer Energie an den Strand, empfinden wir dies als Welle. Brandet nach einem Seebeben ein Tsunami an Land, wirkt das Wasser plötzlich hart wie eine Betonwand.“ [13] Dies zeigt wie Wellen bei höheren Energiedichten zunehmend Teilcheneigenschaften annehmen und es auch vom Detektor abhängt, ob Licht als Welle oder als Teilchen auftritt.

Licht lässt sich mathematisch sehr gut greifen. Auf der ganzen Welt werden mit Licht großartige Erfindungen gemacht. Dennoch ist die wahre Natur des Lichts noch immer ein großes Rätsel.

Nicht-Patentliteratur

- [1] GRIBBIN, J.: Schrödingers Kätzchen, 2. Auflage, Frankfurt am Main: Fischer Taschenbuch Verlag, 1998, S. 175 – ISBN 978-3596141517
- [2] HERING, E.: Physik für Ingenieure, 2. Auflage, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1989, Seite 403–435 – ISBN 3-18-400903-3
- [3] YOUNG, T: Experiments and calculations relative to physical optics, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 94, 1–16, 1804.
- [4] WALTHER, Th. WALTHER, H.: Was ist Licht – Von der klassischen Optik zur Quantenoptik, 3. Auflage, München: Beck-Verlag, 2010 – ISBN 978-3-406-44722-8
- [5] HOLZINGER, A.: Von der Wachskerze zur Glühlampe, Frankfurt am Main: Harri Deutsch-Verlag, 1998 – ISBN 978-3-8171-1566-2
- [6] ZEILINGER, A.: Einsteins Schleier, Die neue Welt der Quantenphysik, 5. Auflage, München: Goldmann-Verlag, 2005 – ISBN 978-3-442-15302-2
- [7] WEIZÄCKER, C.-F. von: Der begriffliche Aufbau der theoretischen Physik, Stuttgart: Hirzel Verlag, 2004, Seite 244–245 – ISBN 978-3777612560
- [8] EINSTEIN, A.: Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. In: Annalen der Physik, 4. Folge, Band 17, Leipzig: Verlag Johann Ambrosius Barth, 1905, Seite 132–148
- [9] GEBRANZIG, U.: Das Einsteinjahr, In: Erfinderaktivitäten 2004/2005, Deutsches Patent- und Markenamt, 2006, Seite 37–44 – ISSN 2193-8180
- [10] EINSTEIN, A.: Zur Elektrodynamik bewegter Körper. In: Annalen der Physik, Band 17, Leipzig: Verlag J.A. Barth, 1905, Seite 891–921
- [11] EINSTEIN, A.: Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig. In: Annalen der Physik, Band 18, Leipzig: Verlag J.A. Barth, 1905, Seite 639–641
- [12] LAMBRECHT, A.: Der Casimir-Effekt – Das Vakuum kommt zu Kräften, In: Physik in unserer Zeit, Nr. 2, 36, Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2005, Seite 85–91 – ISSN 0031-9252
- [13] KOTLIK, A.: Was ist Licht? In: Fokus Online. Bearbeitungsstand 11.05.2007.
URL: http://www.focus.de/wissen/weltraum/odenwalds_universum/frage-von-a-kotlik_aid_55913.html [abgerufen am 10.04.2014]

LED – das Leuchtmittel der Zukunft

Dipl.-Ing. Robert Terkl, Patentabteilung 1.34

Die großen Fortschritte in der Weiterentwicklung der LED (Englisch: Light Emitting Diode, Deutsch: Leuchtdiode) seit den 1990er Jahren haben dazu geführt, dass heute weiße LEDs zur Verfügung stehen, die aufgrund ihrer Lichtstärke als Ersatz für bisherige Leuchtmittel Verwendung finden können.

Neben der hohen Energieeffizienz besitzt die LED noch weitere Vorteile wie eine lange Lebensdauer, hohe Schaltfestigkeit sowie geringe Baugröße und Gewicht. Das hat dazu geführt, dass inzwischen eine Vielzahl von neuen Anwendungen mit LEDs zur Verfügung steht.

Der nachfolgende Artikel beschreibt die Vor- und Nachteile dieses Leuchtmittels und stellt exemplarisch einige innovative Lösungen vor, die mögliche zukünftige Einsatzgebiete dieser neuen Technologie aufzeigen.

1 Einleitung

Seit der Inbetriebnahme der ersten dauerhaften Straßenbeleuchtung in Deutschland 1882 durch Sigmund Schuckert sowie der Verbesserung der Glühlampe durch Thomas Alva Edison ist die Elektrifizierung unaufhaltsam vorangeschritten. Obwohl sich das Grundprinzip der Glühlampe in den letzten 100 Jahren nicht wesentlich geändert hat, haben sich nun durch neue, den Umweltschutz betreffende Regelungen die Anforderungen an energieverbrauchende Geräte, insbesondere auch an Leuchtmittel verändert.

Geltende und zukünftige Verordnungen der Ökodesign (ErP)-Richtlinie [4] beziehungsweise des Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetzes (EVPG) [5], welche den Rahmen für eine umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte vorgibt, fordern unter anderem energieeffiziente Leuchtmittel. Sie führen dazu, dass bestehende Lampen mit hohem Energieverbrauch vom Markt genommen werden müssen. Durch das stufenweise umzusetzende Glühlampenverbot [6] besteht die Notwendigkeit eines energieeffizienten Lampenersatzes. Dabei sind nicht nur Glühlampen, sondern auch andere Lampen wie beispielsweise Quecksilberdampf-Hochdrucklampen (HQL), die 2015 verboten werden, betroffen.

Aus diesem Grund werden bei der Darstellung der nachfolgenden Innovationen insbesondere die Punkte

Energieeffizienz und Nachhaltigkeit betrachtet und im Weiteren auch auf neue Funktionen, die sich nun mit diesem Leuchtmittel realisieren lassen, eingegangen. Das Aufzeigen verschiedener Anwendungsgebiete für LEDs rundet die Ausführungen ab.

2 Entwicklung der LED

Mit der Entwicklung der Halbleitertechnologie begann auch die Erforschung der Lichtemission von Halbleitern. Sie führte in den 1960er Jahren auf der Basis von Galliumarsenid (GaAs) zur Entwicklung der ersten roten und gelben LEDs, im Weiteren in den 1970er Jahren mit Galliumphosphor (GaP) zur grünen LED und schließlich in den 1990er Jahren mit Galliumnitrid (GaN) zur LED im kurzwelligen Lichtspektrum (blau, UV). Weißes Licht konnte somit bereits durch die gleichzeitige Abstrahlung von Licht aller drei Grundfarben erzeugt werden [3].

Mit der Entwicklung der Konversions-LED, welche über eine Phosphor-Schicht Lichtanteile einer blauen LED umwandelt (DE 196 55 185 B9), war die Erzeugung von weißem Licht mit einer einzelnen LED möglich [8]. Inzwischen stehen dem Anwender auch kaltweiße oder warmweiße LEDs zur Verfügung. Die Verwendung organischer LEDs als Beleuchtungsmittel ist derzeit aufgrund der geringen Lebensdauer noch begrenzt.

3 Licht und Lichtausbeute

LEDs sind im Gegensatz zu Glühlampen keine Wärmestrahler und erzeugen ein nahezu monochromatisches Licht in einem begrenzten Spektralbereich. Obwohl bei weißen LEDs, die nach dem Konversionsprinzip funktionieren, durch die photolumineszierende Schicht ein relativ breites Lichtspektrum erzeugt wird, dominiert oftmals das blaue Licht der blauen Basis-LED, was das etwas kühl wirkende Licht dieser Leuchtdioden erklärt. Dies kann je nach Anwendungsfall zu ungewünschten Effekten führen wie beispielsweise dem Hervorstechen bestimmter Farbtöne.

Die effizientesten weißen LEDs erreichten eine Lichtausbeute von 276 Lumen/Watt. Kommerziell erhältliche weiße LEDs haben derzeit eine Lichtausbeute von meist 50–110 Lumen/Watt.

Die Ausbeute ist stark von der Lichtfarbe abhängig, bei warmweißen LED liegt sie deutlich unter der von kaltweißen [3]. Die Steigerung der Lichtausbeute und die preiswertere Herstellung der Halbleiter sind Ziele weiterer Entwicklungen.

4 Energieeffizienz und Nachhaltigkeit

Da LEDs keine Wärmestrahler wie beispielsweise Glühlampen sind, wird die zugeführte Energie mit hohem Wirkungsgrad in Licht umgewandelt, das heißt, sie sind 3- bis 10-mal effizienter als Glühlampen und ähnlich effizient wie Leuchtstoffröhren.

Die Effizienz von LEDs erhöht sich bei Betrieb mit einer niedrigeren Leistung als der Nennleistung. Grund dafür ist unter anderem die damit verbundene geringere Erwärmung des LED-Chips, die noch dazu zu einer Verlängerung der Lebensdauer führt. Auch ist durch die geringere Verlustleistung eine einfache Kühlung meist schon ausreichend [1], [2].

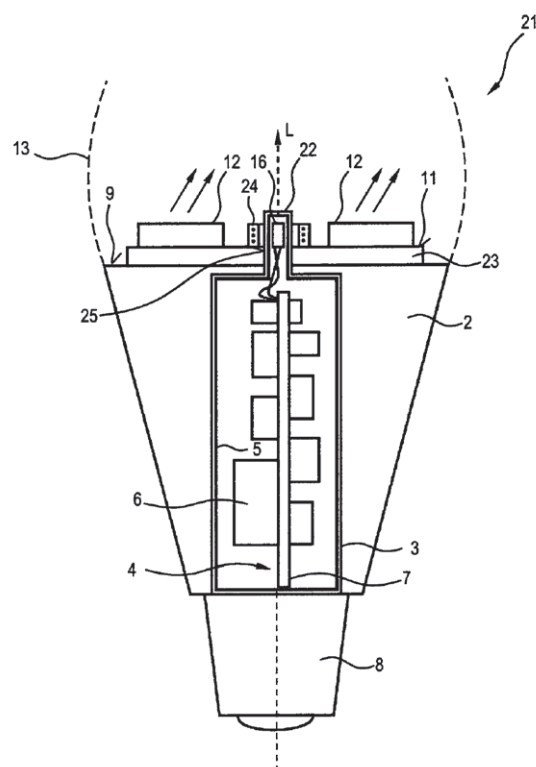
Unter Nachhaltigkeit wird ein Handlungsprinzip zur langfristigen und wiederholbaren Nutzung von Ressourcen verstanden, um deren Wirkung zu erhalten. Dieses Prinzip wird zunehmend auf die Herstellung und die Wiederverwertung von Industrieprodukten angewandt.

Obwohl LEDs mit Galliumarsenid als Halbleiter einen giftigen und umweltgefährlichen Bestandteil besitzen, ist die Schadstoffmenge in den Leuchtmitteln aber im Vergleich zur Schadstoffbelastung durch die Produktion gering. Im Gegensatz zu roten oder gelben LEDs enthalten weiße LEDs kein Galliumarsenid.

Da LED-Lampen im Gegensatz zu Kompaktleuchtstofflampen kein Quecksilber enthalten, wohl aber elektronische Bauteile, müssen auch sie in Deutschland aufgrund des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes (ElektroG) im Elektronikschrott gesondert entsorgt werden [7].

4.1 Lebensdauer von LEDs

Als Lebensdauer (Licht-Degradation) einer LED wird die Zeit bezeichnet, nach der die Lichtausbeute im Mittel auf 70 % des Anfangswerts abgesunken ist. Leuchtdioden werden nach und nach schwächer, fallen aber in der Regel nicht plötzlich aus. Die Alterung ist annähernd linear. Neben dem verwendeten Halbleitermaterial ist die Alterung besonders durch Betriebsbedingungen wie Wärme und Strom beeinflusst. Hohe Temperaturen verkürzen die Lebensdauer drastisch.

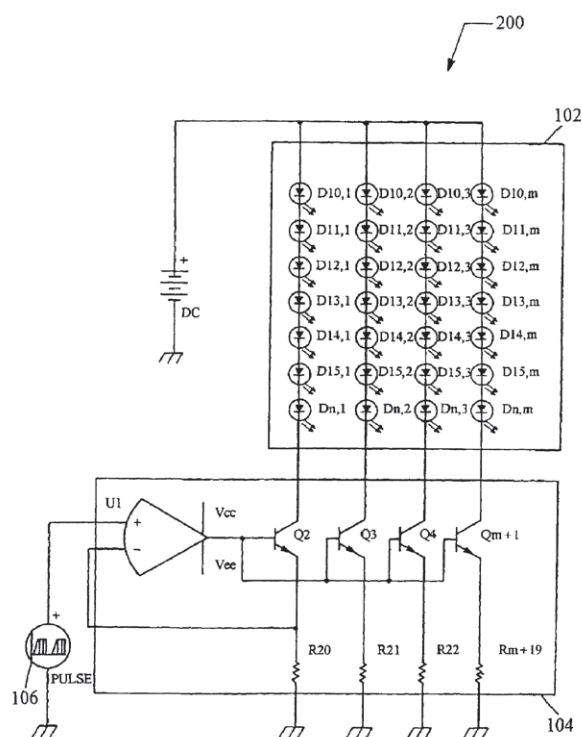


Figur 1: Retrofit-LED-Glühlampen mit integriertem Kühlkörper 2 (DE 10 2010 029 249 B4).

Aufgrund der Trägheit des menschlichen Auges werden diese Lichtpulse zeitlich gemittelt und nicht einzeln wahrgenommen. Die Lichtpulse können allerdings bei bewegten Objekten, beispielsweise im Straßenverkehr zu stroboskopischen Effekten führen oder auch bei Filmaufnahmen stören. Eine Lösung dieses Problems zeigt zum Beispiel die Druckschrift DE 10 2007 002 809 A1 auf. Dabei werden mehrere LEDs durch phasenverschobene PWM-Signale so angesteuert, dass ein gleichmäßiger Lichtfluss entsteht und dadurch stroboskopische Effekte vermieden werden.

Um eine höhere Lichtausbeute zu erreichen, werden LEDs grundsätzlich in Reihenschaltung betrieben. Um die Lichtleistung weiter zu erhöhen oder auch die Ausfallssicherheit des Leuchtmittels zu verbessern, werden mehrere LED-Stränge parallel betrieben. Eine solche Anordnung zeigt beispielsweise die Figur 4, die in der Patentschrift US 6 864 641 B2 weiter beschrieben ist. Der Betrieb kann auch unter dem Hintergrund der Farbsteuerung erfolgen, wenn Stränge mit LEDs unterschiedlicher Lichtfarbe mit separaten einstellbaren Stromquellen betrieben werden.

Werden LEDs matrixartig in sogenannten LED-Arrays angeordnet wie sie beispielsweise bei Fahrzeugschein-



Figur 4: Betrieb von LEDs über Stromquellen (US 6 864 641 A).

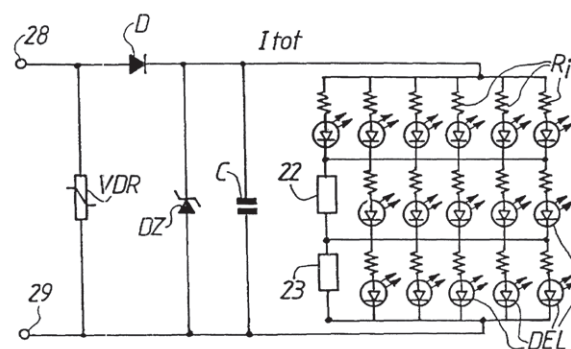
werfern vorkommen, sind besondere Maßnahmen zu treffen, um Helligkeitsschwankungen einzelner LEDs aufgrund der fertigungsbedingten Streuung von Kennwerten zu vermeiden. Die Verwendung von Serien- und Parallelwiderständen, um eine möglichst gleichmäßige Stromaufteilung in einem LED-Array zu erzielen, zeigen beispielsweise die Druckschrift DE 100 25 810 A1 sowie die Patentschrift DE 69 709 206 T2 (siehe Figur 5).

5.1 LED am Vorschaltgerät

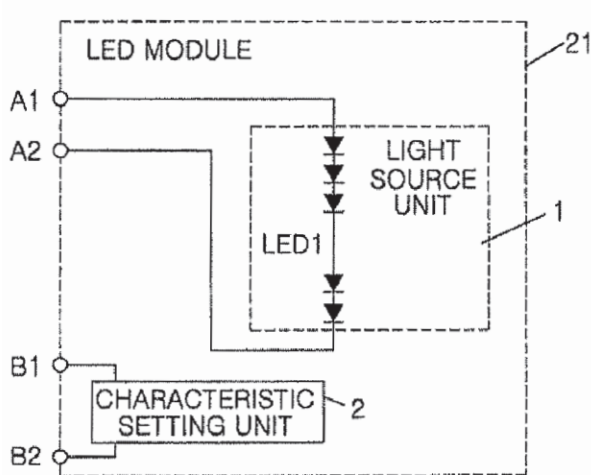
Für den Betrieb von LEDs an einer Konstantstromquelle ist insbesondere Gleichspannung erforderlich, die in vielen Fällen aus der Wechselspannung des Versorgungsnetzes gewonnen wird. Dazu werden heutzutage mehrstufige Schaltwandler eingesetzt, welche energieeffizient arbeiten, eine geringe Baugröße aufweisen und bezüglich ihrer Netzurückwirkung, das heißt Blindstromanteil und elektromagnetischer Verträglichkeit (EMV), optimiert sind. Diese Vorteile werden allerdings zum Preis höherer Schaltungscomplexität und damit höherer Ausfallswahrscheinlichkeit erkauft [8].

Ein Vorschaltgerät bietet neben der optimierten Energieversorgung jedoch oft auch die Möglichkeit, zusätzliche intelligente Funktionen zu realisieren wie sie beispielsweise für die Lichtsteuerung oder Vernetzung mit Hausanlagen erforderlich sind.

Zunehmend werden auch Universalvorschaltgeräte angeboten, die für eine Vielzahl von Leuchtmitteln verwendbar sind und diese bereits selbstständig erkennen können. In der Druckschrift US 2011/0260648 A1 (siehe Figur 6) erfolgt die Erkennung zum Beispiel durch Auslesen einer Kennung eines Leuchtmittels.



Figur 5: Maßnahmen zur Kompensation von LED-Bauteilstreuungen bei Fahrzeugscheinwerfern (DE 69 709 206 T2).



Figur 6: Retrofit-LED-Leuchtröhre mit integrierter Lasterkennung (US 2011/0260648 A1).

Ebenso kann durch die Bestimmung der Lastkennlinie des Leuchtmittels das Vorschaltgerät in den gewünschten Betriebsmodus versetzt werden und dadurch eine optimale Anpassung an den Lampentyp erzielt werden wie in der Druckschrift DE 10 2012 209 780 A1 beschrieben wird.

Vorschaltgeräte können auch direkt in ein Lampengehäuse integriert sein, beispielsweise in einen Anschlusssockel einer Retrofit-Lampe.

Insgesamt bezieht sich der Großteil der aktuellen Patentanmeldungen auf Verbesserungen bei Vorschaltgeräten, beziehungsweise dem zugehörigen Betriebsverfahren für die LEDs.

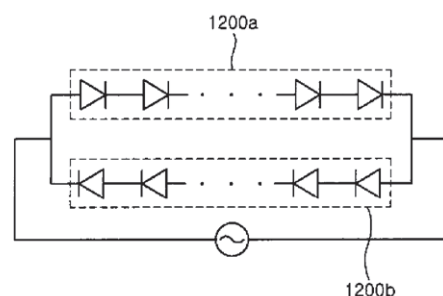
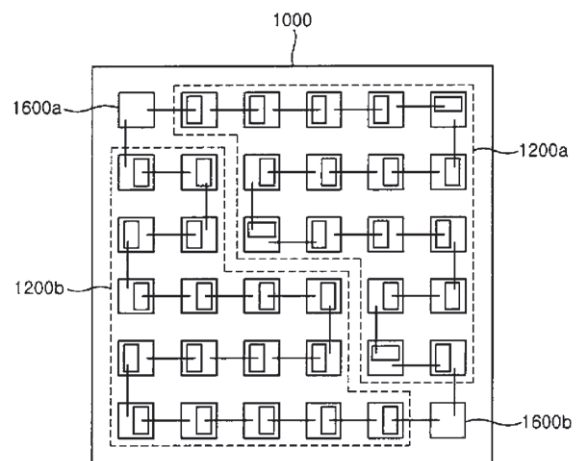
Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich ein minimaler Verbrauch und ein Optimum an Funktionalität durch ein direkt an das spezielle Leuchtmittel angepasstes Vorschaltgerät erreichen lässt.

5.2 LED direkt am Netz

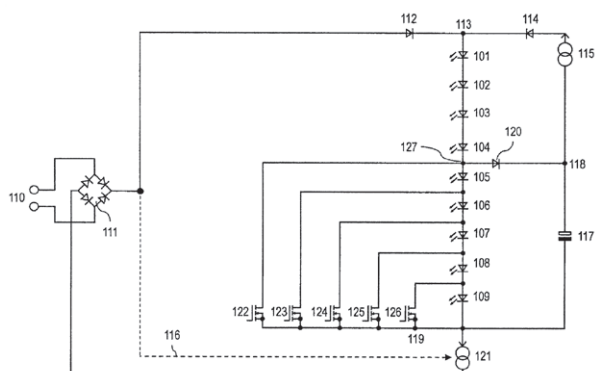
Aus Kostengründen ist die Verwendung eines Vorschaltgeräts oft nicht möglich. Bei preisgünstigen Lösungen werden die LEDs direkt am Versorgungsnetz betrieben. Dies hat neben dem geringen Preis den Vorteil, dass die Lebensdauer des Leuchtmittels nicht durch zusätzliche Bauteile beschränkt wird. Eine in diesem Sinne minimalistische Lösung, bei der die lichtemittierenden Elemente gemeinsam mit den Kontaktelektroden in zwei

Zellblocks auf einem einzelnen Substrat angeordnet sind, ist in Figur 7 dargestellt und wird in der Patentschrift DE 11 2006 002 702 B4 detailliert beschrieben.

Um die Leuchtwirkung der LEDs weiter zu verbessern, wird vielfach der Ansatz verfolgt, die Anzahl der LEDs stufenweise dem sinusförmigen Verlauf der Versorgungsspannung folgend zuzuschalten. Das macht allerdings den Aufwand zusätzlicher Schaltelemente erforderlich. Solche Lösungen zeigen unter anderem die Druckschriften DE 10 2011 003 931 A1 und WO 2010/013172 A1, in denen neben der Netzgleichrichtung die Leuchtmittel auch bereits über Konstantstromquellen betrieben werden. Die Figur 8 zeigt eine dieser Schaltungsanordnungen mit Bypass-Elementen zur Anpassung an die gleichgerichtete, pulsierende Betriebsspannung. Bei einem Betrieb direkt an der Netzspannung muss zusätzlich ein Berührungsschutz vorgesehen werden, da keine galvanische Trennung der Leuchtmittel von der Netzspannung vorhanden ist. Zudem besteht oft der Nachteil einer eingeschränkten Steuerbarkeit wie etwa einer Helligkeitseinstellung durch Dimmen.



Figur 7: Betrieb von LEDs direkt am Netz (DE 11 2006 002 702 B4).



Figur 8: Betrieb von LEDs an pulsierender Wechselspannung und mit Bypass-Elementen 122–126 (DE10 2011 003 931 A1).

6 Retrofit-LED-Lampen

Unter dem Begriff „Retrofit“ wird das Nachrüsten und Modernisieren von bestehenden Anlagen verstanden. Um mit möglichst geringem Aufwand dieses Ziel zu erreichen, werden alte Leuchtmittel durch LED-Leuchtmittel ersetzt, die in die alten („retro“) Sockel hineinpassen („fit“).

Retrofit-LED-Lampen, das heißt LED-Lampen, mit verschiedenen Sockeln und gleichen Bauformen wie klassische Lampen bieten dabei eine Alternative mit sehr guten Werten beim Energieverbrauch. Bei einem Lampenwechsel müssen auch die lichttechnischen Eigenschaften Beachtung finden. LED-Lampen bieten dabei Vor- und Nachteile.

Einerseits wird durch den alleinigen Austausch des Leuchtmittels das Energiesparen möglichst einfach gemacht, denn bereits vorhandene Installationen oder Lampen müssen nicht verändert werden. Ein Umstieg ist dadurch besonders einfach.

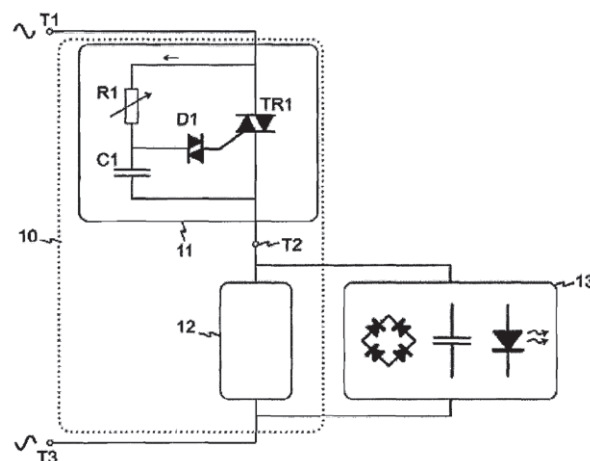
Andererseits kommt es durch die Verwendung von bereits vorhandenen installierten Anlagen wie beispielsweise konventionellen Dimmern für Glühlampen oder Vorschalt- und Zündgeräte für Leuchtstoffröhren zu neuen technischen Herausforderungen [10], [11].

So lassen sich preisgünstige LED-Lampen nur eingeschränkt mit TRIAC-Dimmern bedienen oder es wird für deren Betrieb ein zusätzlicher Aufwand an Elektronik erforderlich. Die Druckschrift DE 101 19 473 C1

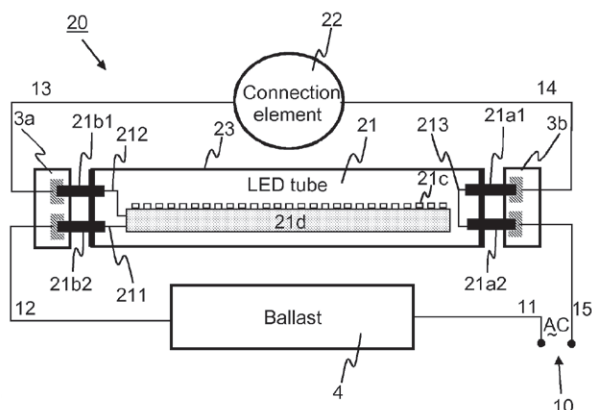
zeigt wie durch eine Adaption des Stellbereichs des Dimmers auch unterschiedliche Arten von Leuchtmittel betrieben werden können. Die Figur 9 beziehungsweise die Druckschrift US 2009/0251059 A1 veranschaulicht wie mit einem herkömmlichen Glühlampendimmer auch Niederlasten, die LED-Leuchten im Allgemeinen darstellen, optimal betrieben werden können.

Bei dem großen Angebot an LED-Lampen verschiedenster Hersteller sowie der Vielzahl vorhandener Installationsgeräte ist Kompatibilität nicht immer gewährleistet [12].

Des Weiteren kommt beim Einsatz von Retrofit-LED-Leuchtröhren in konventionellen Leuchtstoffröhrenfassungen die Problematik des Berührungsschutzes, das heißt der Sicherstellung eines gefahrlosen Lampentausches zum Tragen. Eine Lösung dieses Problems zeigt die Druckschrift DE 20 2011 109 987 U1, bei der der elektrische Kontakt erst durch die eingesetzte Lampe mit einem Relais hergestellt wird. In Figur 10 aus der WO 2011/124670 A1 werden die Anschlüsse auf einer Seite der LED-Röhre durchgeschleift, um somit keine elektrische Verbindung zur den Kontakten der anderen Seite zu haben. Aus der Figur ist auch sehr gut zu erkennen wie die LED-Röhre in einer herkömmlichen Installationsumgebung für Leuchtstoffröhren betrieben wird. Der Starter wird hierbei nicht mehr benötigt und kann durch ein Verbindungselement 22 ersetzt werden.



Figur 9: Betrieb einer LED-Lampe mit einem konventionellen TRIAC-Dimmer (US 2009/0251059 A1).



Figur 10: Anwendung einer Retrofit-LED-Röhre in der üblichen Installationsumgebung für gewöhnliche Leuchtstoffröhren (WO 2011/124670 A1).

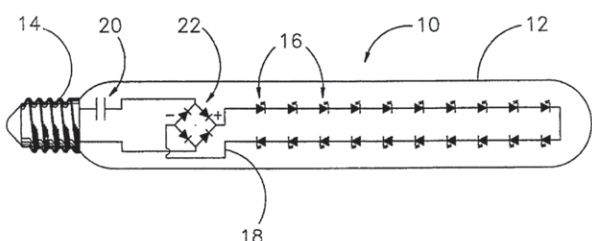
7 Bauformen von Retrofit-Lampen

7.1 Retrofit-LED-Glühlampe

Die bekannteste Form einer Retrofit-Lampe stellt die Retrofit-LED-Glühlampe dar. Beispiele solcher Retrofit-LED-Lampen mit einem von den klassischen Glühlampen bekannten, standardisierten Schraubsockel E-27 zeigt die Druckschrift WO 2006/104553 A1 oder die US 5 463 280 A (vergleiche Figur 11). Dabei sind die sich auf einem Trägermaterial befindlichen LEDs 16 im Glaskolben 12 der Lampe untergebracht und werden direkt über die mittels der Brückenschaltung 22 gleichgerichtete Netzspannung betrieben.

7.2 Retrofit-Alternative für Halogenlampen

Einen typischen LED-Ersatz für eine Hochvolt-Halogenlampe mit einem üblichen GU-10 Anschluss zeigt die Druckschrift US 2009/0309501 A1. Eine solche Lösung lässt sich natürlich auch einfach auf eine Niedervolt-Halogenlampe übertragen.



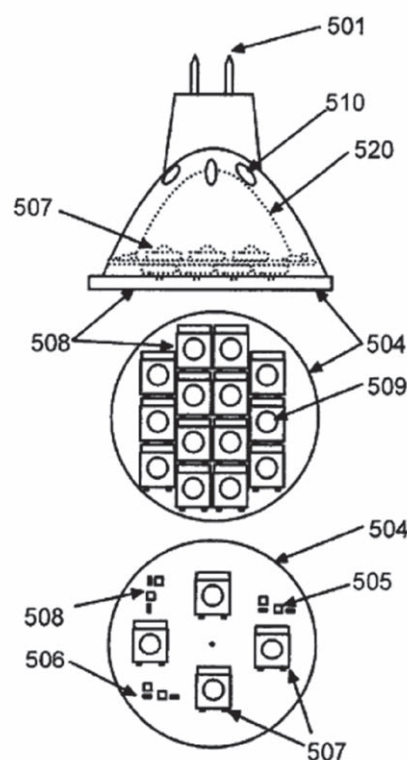
Figur 11: Typischer Aufbau einer Retrofit-LED-Glühlampe mit einer E-27 Schraubfassung (US 54 63 280 A).

7.3 Retrofit-LED-Leuchtröhre

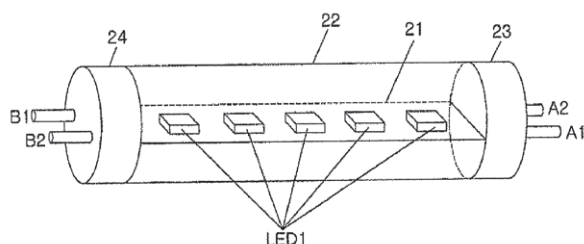
Für einen Ersatz von Leuchtstoffröhren durch eine Retrofit-LED-Leuchtröhre ist im Wesentlichen der geringere Wartungsaufwand aufgrund der längeren Lebensdauer der LED-Röhre entscheidend, da der Aspekt des Energieverbrauchs bei Leuchtstoffröhren und LED-Röhren nahezu gleich ist. Dem stehen allerdings die derzeit noch wesentlich höheren Anschaffungskosten einer LED-Röhre entgegen. Beispiele für eine Retrofit-LED-Leuchtröhre zeigen die Offenlegungsschriften DE 10 2012 002 710 A1 und US 2011/0260648 A1.

Gut zu erkennen ist dabei in der Figur 11 die lineare Anordnung der LED-Bausteine auf einem Träger wie zum Beispiel einer Leiterplatte. Ebenso lässt sich auf dem Träger auch die Ansteuerelektronik unterbringen. Dadurch ist oft schon eine ausreichende Kühlung sichergestellt, die allerdings in manchen Fällen durch integrierte Kühlkörper verbessert werden kann.

Das volle Potenzial der LED kann jedoch zumeist nur genutzt werden, wenn optimal angepasste Vorschalt- und Bediengeräte verwendet werden. Dies macht oftmals den Tausch beziehungsweise die Nachrüstung, bestehender Anlagen erforderlich.



Figur 12: Retrofit-LED-Lampe als Ersatz für eine Hochvolt-Halogenlampe (US 2009/0309501 A1).



Figur 13: Retrofit-LED-Leuchtröhre (US 2011/0260648 A1).

Jedoch lassen sich dann beispielsweise neue Funktionen wie eine Steuerung der Lichtfarbe über den Dimmer oder Lichtszenensteuerungen realisieren.

8 Neue Funktionen mit LEDs

Der zusätzliche Vorteil, den LEDs neben der bereits genannten Langlebigkeit und Energieeffizienz bieten, liegt vor allem in der kleinen Bauform. Damit besteht die Möglichkeit der Integration in kleine Geräte wie Smartphones, Kameras sowie der flächigen Gestaltung von Beleuchtungsmitteln als flexible LED-Bänder [13]. Durch die schnelle Ansteuerung, insbesondere durch pulsbetriebene LEDs, können auch Daten innerhalb des Lichtstroms übertragen werden.

Mit der Verwendung von intelligenten Vorschaltgeräten, die über die Versorgungsleitungen oder drahtlos vernetzt sind, lassen sich weitere Funktionen wie eine situations- oder ortsabhängige Beleuchtung realisieren.

8.1 Lichtszenensteuerung

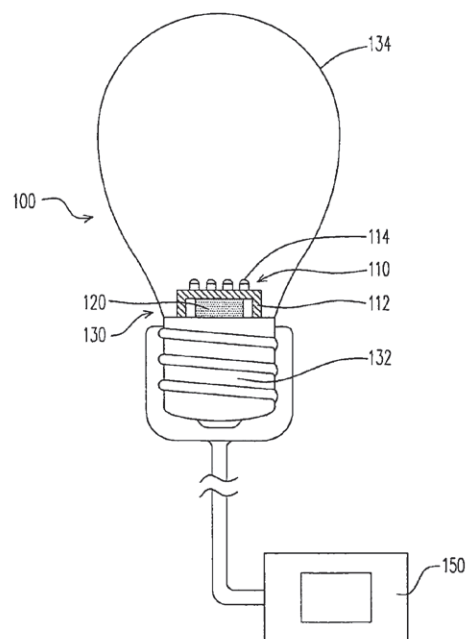
Unter Lichtszenensteuerung wird die gezielte Beeinflussung des zeitlichen Verlaufs eines Lichtstroms verstanden. Dies kann beispielsweise das langsame Hoch- oder Herunterfahren der Lichtstärke durch Dimmen sein. Auf diese Weise können für den Betrachter angenehmere Lichtübergänge geschaffen werden. Beispielsweise zeigt die Druckschrift DE 10 2010 015 518 A1 die Anwendung von Lichtszenensteuerung zur Simulation von Sonnenauf- oder Sonnenuntergängen in einer Flugzeugkabine, um dadurch den Tag-/Nachtwechsel nachzubilden.

Lichtszenensteuerung spielt gerade auch in der Unterhaltungs- und Bühnentechnik eine große Rolle, mit der durch einprogrammierte Lichtszenarien Stimmungen und dramatische Effekte erzeugt werden können wie die Druckschrift DE 10 2006 045 744 A1 zeigt.

8.2 Farbsteuerung

Ein wesentlicher Unterschied zu bekannten Leuchtmitteln ist die einfache Steuerung der Lichtfarbe bei LED-Leuchtmitteln. Dies wird in einem engeren Bereich bereits durch eine Variation des Konstantstroms erreicht, kann aber auch durch die Kombination mehrfarbiger LEDs in einem Leuchtmittel in einem weiteren Farbbereich wie beispielsweise von Warmweiß bis Kaltweiß oder sogar über Rot/Grün/Blau, erfolgen.

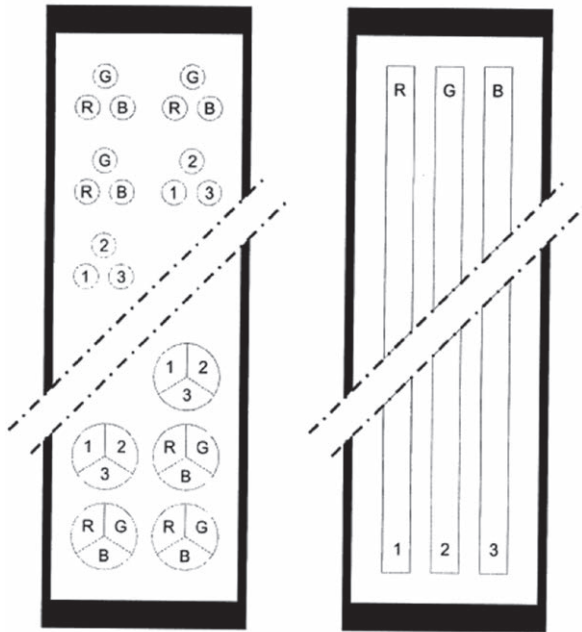
Die Druckschrift EP 2 026 634 A1 (siehe Figur 14) zeigt wie bei einer mehrfarbigen LED-Retrofit-Glühlampe durch vordefinierte Tastersignale die gewünschte Lichtfarbe eingestellt werden kann.



Figur 14: Steuerung der Lichtfarbe über den Lichtschalter (EP 2 026 634 A1).

Die DE 20 2006 001 686 U1 zeigt mehrfarbige Lichtquellen zur Simulation von Naturerscheinungen wie Sonnenauf- oder Sonnenuntergängen, Mondphasen oder

Gewitterszenarien, die in einer Leuchte für Pflanzen und Tiere eingesetzt werden. In Figur 15 werden dabei auch LEDs verwendet, die sich durch ihre einfache Steuerbarkeit auszeichnen.

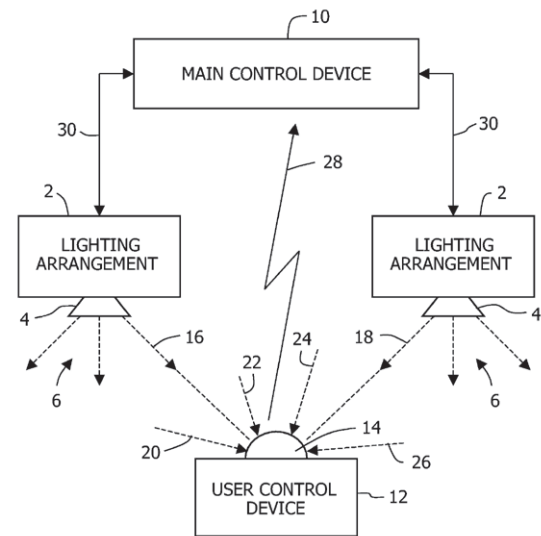


Figur 15: Leuchte mit mehrfarbigen LEDs (R, G, B) für Pflanzen und Tiere (DE 20 2006 001 686 U1).

8.3 Datenübertragung

Durch die Möglichkeit LEDs im Pulsbetrieb zu verwenden, ergibt sich auch die Möglichkeit, Information auf den emittierten Lichtstrom aufzumodulieren und damit, für das menschliche Auge nicht sichtbar, Daten zu einem optischen Empfangsgerät zu übertragen. Auf diese Weise kann wie in der Druckschrift US 2008/0203928 A1 dargestellt, beispielsweise die Leuchtenkennung oder Betriebsdaten einer Lampe ausgelesen werden, was die Installation oder Wartung einer Beleuchtungsanlage einfacher macht. In Figur 16 ist ein derartiges Empfangsgerät zum Auslesen von Installationsdaten für Beleuchtungsmittel zu erkennen.

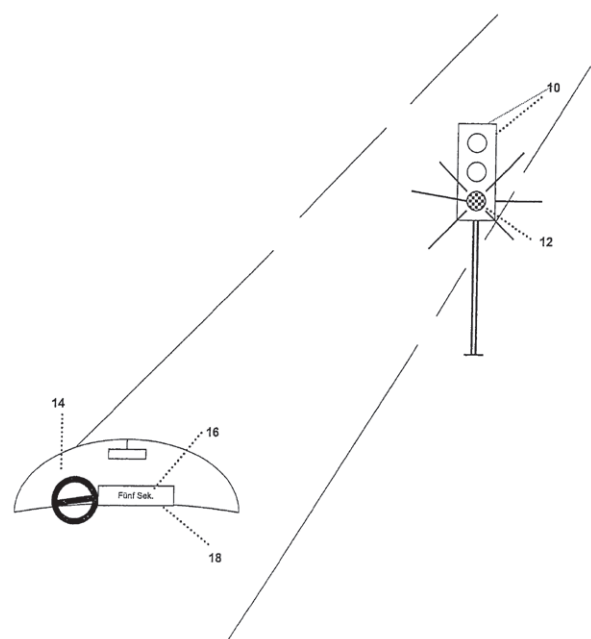
Die Figur 17, Patentschrift DE 10 2005 061 786 B4 zeigt hingegen wie in dem Lichtsignal einer Verkehrsampel, Daten über den aktuellen Zustand der Signalanlage an ein Fahrzeug übertragen werden können. Diese können von einem Fahrerassistenzsystem weiterverarbeitet und an den Fahrzeuginsassen übermittelt werden.



Figur 16: Übertragung von Lampendaten über das gepulste Licht der LEDs an ein Empfangsgerät 12 (US2008/0203928 A1).

9 Anwendungsgebiete für LEDs

Seit der anfänglichen Nutzung von LEDs als einfache Anzeige- und Signalleuchten haben sich durch die stetige Verbesserung der Leistungsfähigkeit und insbesondere durch die Entwicklung der blauen und weißen LED die Anwendungsgebiete für LED stark erweitert. So sind LEDs als Leuchtmittel in vielen Bereichen des täglichen Lebens zu finden.



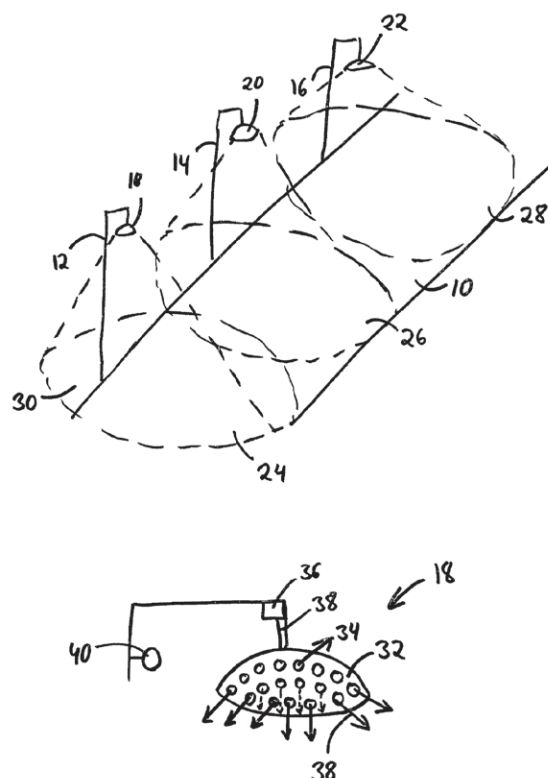
Figur 17: Übertragung von Informationen eines Verkehrszeichens an ein Fahrzeug über den modulierten Lichtstrom von LEDs (DE10 2005 061 786 B4).

Hier sind nur einige exemplarisch angeführt:

■ Fahrzeugbeleuchtung

Wer kennt nicht die grellen, auch auf weite Entfernung sofort erkennbaren Fahrzeugscheinwerfer? Neben der starken Lichtausbeute der LEDs sind, bedingt durch die geringe Größe, vielfältige geometrische Anordnungen der Lichtquellen möglich. Dies erlaubt eine designspezifische Gestaltung, die ein Alleinstellungsmerkmal darstellt und damit die sofortige Erkennbarkeit eines Fahrzeugs ausmacht. Auch die Ausfallsicherheit und Wartung von Fahrzeugscheinwerfern konnte durch LEDs verbessert werden.

Beispiele für die Verwendung von LEDs in Fahrzeugscheinwerfern zeigen die Druckschriften US 2005/0200287 A1 und DE 69 415 732 T2.

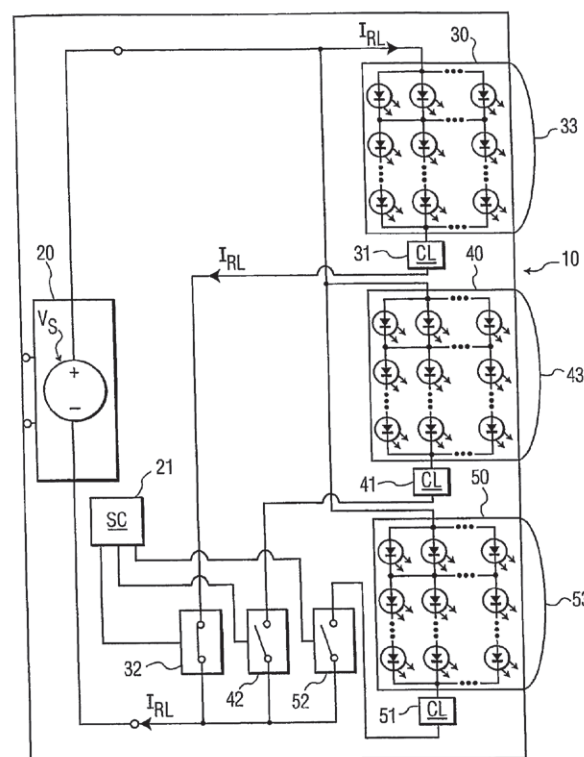


Figur 18: Straßenbeleuchtung mit LED-Lampen (DE 10 2007 061 160 A1).

■ Straßenbeleuchtung, Verkehrszeichen

LED-Leuchtmittel werden auch zunehmend für Straßenbeleuchtungszwecke eingesetzt. Durch sie entstehen, bedingt durch ihre Langlebigkeit, geringere Energie- und zudem auch weniger Wartungskosten. Die Patentschrift DE 10 2007 061 160 A1 zeigt die Verwendung von LED-Lampen, um eine situationsgerechte Lichtverteilung, je nach Verkehrslage, zu ermöglichen. Wie in Figur 18 dargestellt, werden dabei über Lichtsensoren 40 die Umweltbedingungen wie Wettersituationen und Lichtverhältnisse erfasst und passend zur Verkehrssituation (Unfall, Baubetrieb) die Helligkeit eingestellt.

Die Anwendung von LEDs in Verkehrszeichen wie beispielsweise einer Ampel zeigt die Patentschrift US 2006/0152175 A1 oder auch die Druckschrift US 5 457 450 A. Figur 19 zeigt Arrays aus roten, grünen und gelben LEDs als Ersatz für Glühlampen. LEDs sind deshalb beim Einsatz als Signallicht im Vergleich zu anderen Lichtquellen besonders effizient, weil zur Erzielung einer monochromen Farbcharakteristik keine Farbfilter verwendet werden müssen. Diese würden den größten Teil des Spektrums absorbieren.



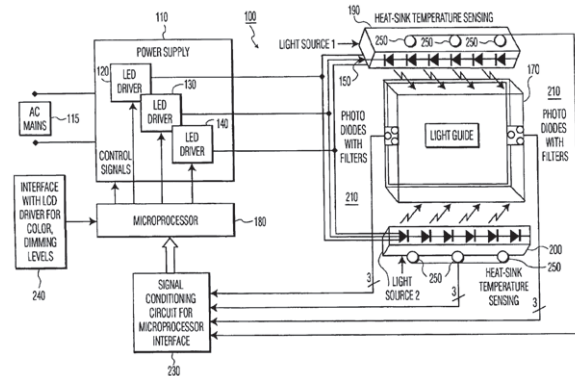
Figur 19: Verkehrsampel mit Signallampen aus roten, gelben und grünen LED-Arrays (US 2006/0152175 A1).

■ Bildschirm-Hintergrundbeleuchtung

LEDs werden zunehmend als Hintergrundbeleuchtung oder zur direkten Erzeugung des Bildes bei Fernsehern und Bildschirmen eingesetzt. Sie ermöglichen durch ihre geringe Größe eine geringere Bautiefe, haben einen geringeren Strombedarf und eine größere Langzeitstabilität als die bisher üblichen Kaltkathodenlampen. Das macht die Verwendung von LEDs, besonders in mobilen Geräten, interessant. Die Figur 20 zeigt eine derartige LED-Hintergrundbeleuchtung für ein elektronisches Display, welches in der Patentschrift US 6 753 661 B2 beschrieben wird. Zur Vermeidung von Farbverschiebungen werden mit Sensoren die Temperaturen und das Licht der Leuchtdioden erfasst und in der Stromregelung berücksichtigt. Die geschickte Platzierung der Sensoren erlaubt eine gleichmäßige Verteilung des Lichts und der Farben über das gesamte Anzeigefeld.

10 Trend

Die Entwicklungen der letzten Jahrzehnte haben dazu geführt, dass inzwischen neben den bekannten Beleuchtungsmitteln wie Glühlampe, Leuchtstoffröhre oder Halogenlampe eine Reihe neuer Leuchtmittel, beispielsweise Kompaktleuchtstofflampen oder auch LED-basierte Leuchtmittel, vermehrt angeboten werden. Insbesondere die Entwicklung lichtstarker und langlebiger weißer LEDs hat zu einer Vielzahl von neuen Anwendungen für dieses Leuchtmittel geführt. Neben dem Vorteil einer hohen Lebensdauer ergeben sich, bedingt durch die geringe Größe, Möglichkeiten zur Integration in Kleinstgeräte oder zu neuen Formen des Lichtdesigns. Auch lassen sich durch das schnelle Schaltverhalten und die einfache Steuerbarkeit von LEDs viele neue Funktionen mit derartigen Leuchtmitteln realisieren. Zwar gibt es noch Verbesserungspotenzial im Punkt der Lichtqualität; die vielen Vorteile die LEDs bieten, sprechen aber für sich [14], [15]. Durch den geringen Energieverbrauch und auch unter dem Einfluss von gesetzlichen Vorgaben den Umweltschutz betreffend, wird die Verbreitung der LED als Leuchtmittel weiter voranschreiten.



Figur 20: Bildschirm-Hintergrundbeleuchtung mit LEDs (US 6,753,661 B2).

Nicht-Patentliteratur

- [1] KRÜCKENBERG, J.: Hochleistungs LEDs in der Praxis. Francis Verlag. Pöng 2007. – ISBN 978-3-7723-5498-4
- [2] HEIDEN, S.: Licht spezial, LED – Lichtlösungen mit Leuchtdioden. Verlag Pflaum. München. 2004. – ISBN 978-3790509137
- [3] Leuchtdiode; URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Led> [recherchiert am 10.04.2014].
- [4] Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009; URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32009L0125> [recherchiert am 10.04.2014].
- [5] Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz – EVPG; URL: <http://www.bmwi.de/DE/Service/gesetze,did=212540.html> [recherchiert am 10.04.2014].
- [6] Glühlampenverbot in der EU; URL: <http://www.leds.de/Gluhlampenverbot-in-der-EU/> [recherchiert am 10.04.2014].
- [7] Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten; URL: <http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/elektrog.pdf> [recherchiert am 10.04.2014].
- [8] Streit über Patente für weiße LED beigelegt; <http://www.heise.de/newsticker/meldung/Streit-ueber-Patente-fuer-weisse-LED-beigelegt-67021.html> [recherchiert am 10.04.2014].

- [9] THIEL, U. L.: Schaltnetzteile erfolgreich planen und dimensionieren. Francis Verlag. Poing 1995. – ISBN 3-7723-7682-7
- [10] WILKE, B.: Retrofits bieten mehr. Elektronik lighting 2011 – Sonderausgabe MSC, 2011.
- [11] LEMME, H.: Glühbirne raus, LED rein. Elektronik, Ausgabe 1, 2011, Seite 28–31
- [12] Wie kann ich meine Glühbirne durch LEDs ersetzen?; URL: <http://ledsolarlampe.de/led-faq/gluehlampen-led-ersetzen/> [recherchiert am 10.04.2014].
- [13] GILLICH, H.: Leuchtdioden und ihre Anwendungen. Frech Verlag. Stuttgart 1986. – ISBN 978-3772453588
- [14] LED Lighting Technologies – Winning Approaches. LED professional Symposium+Expo 2013. Luger Research e.U. Dornbirn 2013. – ISBN 978-3-9503209-2-3
- [15] LED professional Review. Luger Research e.U., Issue 34. Nov/Dec 2012. – ISSN 1993-890X

Anorganische und organische lumineszierende Materialien

Dr. Sandra Pröckl, Dr. Imke Salmon, Dr. Sven Dabek, Patentabteilung 1.44

Die Verwendung lumineszierender Materialien hat in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Vor allem der Stufenplan der Europäischen Union für den Klimaschutz [1], durch den seit 2009 schrittweise nicht energieeffiziente Glühlampen vom Markt genommen werden, der dadurch bedingte Bedarf an alternativen Leuchtmitteln sowie der Trend zu immer energiesparenderen und dünneren Displaytechnologien haben diese Entwicklung vorangetrieben.

1 Einleitung

Die Entwicklung von lumineszierenden Materialien schlägt den Bogen von der Alchemie zur Hochtechnologie.

Vom „Bologneser Leuchtstein“, welcher im Jahre 1602 von Vincentius Cascariolus auf der Suche nach dem Stein der Weisen entdeckt und 1640 in „Litheosphorus Sive De Lapide Bononiensi“ von Fortunius Licetus beschrieben wurde [2], bis zur Energiesparlampe und LED (= light emitting diode; Licht-emittierende Diode) vergingen rund 500 Jahre intensiver Forschung.

Die wirtschaftliche Relevanz dieser Materialien nahm durch die Jahrhunderte zu. Das erste deutsche Patent auf diesem Gebiet wurde 1905 für ein „Verfahren zur Herstellung von Leuchtmassen“ erteilt, welche imstande sind „die längste Winternacht hindurch nicht nur im Dunkeln sichtbar zu sein, sondern wirklich zu leuchten“ (DE 187194 A).

Organische beziehungsweise metallorganische lumineszierende Materialien sind eine deutlich neuere Entwicklung im Vergleich zu den anorganischen Materialien. Das Phänomen der Fluoreszenz organischer Materialien wurde allerdings bereits 1845 von Sir John Herschel an Chininsulfat beschrieben [3], ohne dass er wusste, woher diese Lichterscheinung kam. Eine kommerzielle Verwendung wurde erst später angedacht, als man für Tagesleuchtfarben, die für Verkehrsschilder gebraucht werden, fluoreszierende Pigmente verwendete (DE 665 353 A aus dem Jahre 1935).

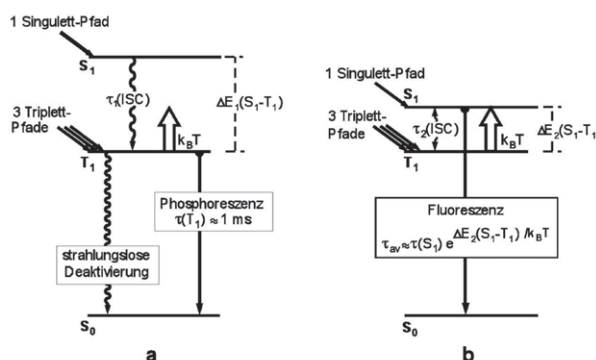
Aktuelle Anmeldungen beschäftigen sich mit Fragestellungen zu Effizienz, Langlebigkeit, kostengünstiger Herstellung lichtemittierender Vorrichtungen, aber auch damit, die Bauelemente möglichst klein, dünn und flexibel zu gestalten.

Die Europäische Kommission benennt lumineszierende Materialien als eine Schlüsseltechnologie der nächsten Generation und fördert die Forschung in groß angelegten Rahmenprogrammen (beispielsweise LUMINET) [4]. Hierbei spielen nicht nur der Energieverbrauch, sondern auch die Abhängigkeit von Rohstoffressourcen wie den Seltenen Erden, eine große Rolle.

2 Was ist Lumineszenz?

Lumineszenz, die Emission von sichtbarem Licht, ist ein Prozess, der auf Elektronenübergänge innerhalb eines chemischen Systems zurückzuführen ist. Hierbei werden Elektronen zunächst durch Energiezufuhr in einen energetisch höheren Zustand gebracht. Das „Zurückfallen“ des Elektrons in den energetisch tieferen (angestrebten) Zustand erfolgt dann unter Abgabe von Energie, teilweise in Form von Photonen (Figur 1). Physikalisch-chemisch ist die Art der Lumineszenz noch feiner in Phosphoreszenz und Fluoreszenz differenzierbar. Diese Prozesse unterscheiden sich hinsichtlich des messbaren Effekts in Wellenlänge und Dauer der Lumineszenz. Während Fluoreszenz ein schneller Prozess ist, kann die Phosphoreszenz, da sie quantenphysikalisch „verboten“ ist, sehr lange

dauern. Damit Phosphoreszenz überhaupt möglich ist, muss zuvor ein sogenanntes „Intersystem Crossing“ (ISC) erfolgen, ein strahlungsloser Übergang aus dem Singulett- in den Triplettzustand. Phosphoreszenz kann gegebenenfalls auch als „Nachglühen“ wahrgenommen werden, das heißt, auch nach Entfernen der Anregungsquelle erscheint das Material noch einige Zeit später „leuchtend“.



Figur 1: Deaktivierungsprozesse bei Elektronenübergängen (S_0 Grundzustand, S_1 , T_1 angeregte Zustände), die zu Lumineszenz führen (aus DE 10 2011 080 240 A1).

Die „Energiezufuhr“ kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Bei der im Rahmen dieses Artikels hauptsächlich angesprochenen Photolumineszenz wird Energie in Form von Licht dem System zugeführt. Hierbei kann es sich sowohl um sichtbares Licht als auch um UV (Ultraviolett)- oder IR (Infrarot)-Strahlung handeln. Ebenso ist Energiezufuhr in Form eines elektrischen Feldes (Elektrolumineszenz), durch eine chemische Reaktion (Chemilumineszenz) oder beispiels-

weise Temperaturerhöhung (Thermolumineszenz), Reibung (Tribolumineszenz) oder Ultraschall (Sonolumineszenz) möglich.

Elemente, die in geeigneter Umgebung Lumineszenz zeigen können, finden sich nahezu im gesamten Periodensystem, jedoch mit einem Schwerpunkt bei den Übergangsmetallen (Figur 2). Insbesondere sind im Bereich der anorganischen Lumineszenzmaterialien die Lanthanoiden (die sogenannten Seltenerdmetalle) hervorzuheben, im Bereich der metallorganischen Verbindungen liegt der Fokus bei den „leichteren“ sogenannten d-Block-Elementen.

3 Anorganische lumineszierende Materialien

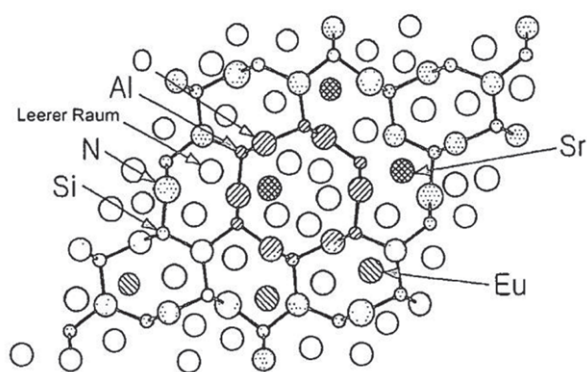
3.1 Aufbau und Struktur

Anorganische lumineszierende Materialien bestehen ganz allgemein aus einem Wirtsgitter, in dem Aktivator-Ionen eingelagert sind. Chemisch bestehen die Wirtsgitter häufig aus Oxiden, Nitriden, Phosphor-, Bor- oder Halogenverbindungen der Metalle der 3. und 4. Periode des Periodensystems wie Magnesium, Calcium, Silicium, Gallium oder Aluminium. Entscheidend sind die Kristallgruppen, in denen derartige Verbindungen kristallisieren. Diese unterscheiden sich in ihrer Symmetrie und der Anordnung der Atome zueinander.

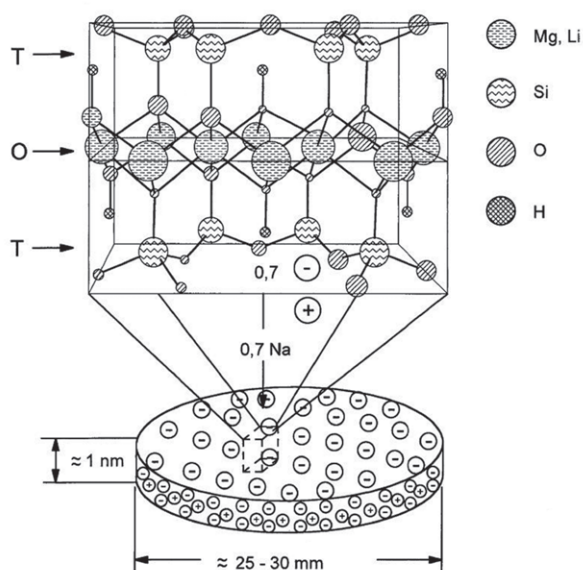
Einige Wirtsgitter wie SiAlON (Silicium-Aluminium-Oxy-Nitrid)- (Figur 3), Oxynitrid- und Granat-Wirtsgitter sind besonders geeignet zur Herstellung lumineszierender Materialien. Zunehmend wird jedoch auch die Dotierung von Zeolithen oder Schichtsilikaten (Figur 4) genutzt.

Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
↓ Period																		
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra		104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo
	Lanthanides		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
	Actinides		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

Figur 2: Periodensystem der Elemente (gemeinfrei auf Wikipedia [5])
hellgrau: Aktivatorelemente in anorganischen Lumineszenzmaterialien [6],
dunkelgrau: Heteroatome in organischen Lumineszenzmaterialien.



Figur 3: Kristallstruktur eines β -SiAlON-Leuchtstoffs (aus DE 11 2011 100 522 T5).



Figur 4: Schematische Darstellung eines Schichtsilikates mit Ausschnittsvergrößerung der lagenartigen Struktur (aus DE 10 2009 024 673 A1).

	M = Sr	M = Ca	M' = Mg	Leuchtfarbe
a:	3	0	b: 1	blau
	0	3	1	grün
	0,5	1,5	1	grünlich-gelb
	1,0	1,0	1	grün
	1,5	0,5	1	bläulich-grün
	1	0	2	blau
	0	1	2	gelb

Tabelle 1: Leuchtfarben von Verbindungen des Typs $a\text{MO} \cdot b\text{M}'\text{O} \cdot c\text{SiO}_2 \cdot d\text{R}:\text{Eu}_x, \text{Ln}_y$ ($\text{R} = \text{B}_2\text{O}_3$, $x = 0,005$, $y = 0,04$ und $\text{Ln} = \text{Neodym}$) in Abhängigkeit der verwendeten Gitterelemente (siehe DE 697 31 119 T2).

Die Wirtsgitter können in unterschiedlich starke Wechselwirkung mit dem Aktivator-Ion treten, was zu verschiedenen Eigenschaften führt. Lumineszierende Materialien mit schwachen Wechselwirkungen zwischen Wirtsgitter und Aktivator-Ion zeigen charakteristische Linienemissionsspektren, also relativ scharfe Wellenlängen. Materialien mit starken Wechselwirkungen zeigen dagegen verbreiterte Banden [6].

3.2 Herstellung

Entscheidend für eine hohe Lichtausbeute ist bei anorganischen lumineszierenden Materialien die Kristallinität. Daher sollten sie wenig Gitterdefekte und Verunreinigungen enthalten.

Ein allgemeines Herstellungsverfahren für dotierte Wirtsgitter ist die Kalzinierung. Hierbei werden Gemische aus den entsprechenden Metall-Verbindungen bei Temperaturen zwischen 100 und 2 000 °C getempert, anschließend zerkleinert, gewaschen, getrocknet und gesiebt. Durch diese Hochtemperaturbehandlung bilden sich aus relativ einfachen Ausgangsverbindungen (zum Beispiel Carbonate, Oxide, Nitride oder Silikate) dotierte Gitterstrukturen (siehe DE 10 2004 060 708 A1). Alternativ lassen sich bestehende Strukturen nasschemisch mit Aktivator-Ionen beladen wie die bereits erwähnten Schichtsilikate (DE 10 2009 024 673 A1) oder auch Zeolithe (DE 697 00 519 T2) [7].

3.3 Verwendung und Eigenschaften

Schwerpunktmäßig werden anorganische lumineszierende Materialien in Beleuchtungs- und Displayanwendungen benötigt, jedoch ist auch die Verwendung als Sicherheitsmerkmale auf Dokumenten von großer Bedeutung.

Anorganische lumineszierende Materialien können in ihren Emissionsspektren das gesamte Spektrum des sichtbaren Lichts verwirklichen. Ihre Farbe (charakterisiert durch Emissionsspektrum beziehungsweise Wellenlänge) kann durch viele Faktoren beeinflusst werden. Bereits kleine Veränderungen in der Zusammensetzung eines Leuchtstoffs können deutliche

Farbwechsel hervorrufen. Hierbei ist nicht nur die Wahl des Aktivator-Ions, sondern auch die Variation des Wirtsgitters relevant. Am Beispiel eines Silikat-Leuchtstoffs zeigt die DE 697 31 119 T2, dass schon der Austausch eines Metalls im Wirtsgitter durch ein höheres Homologes, chemisch eng verwandtes Metall, einen erheblichen Farbwechsel bedeuten kann.

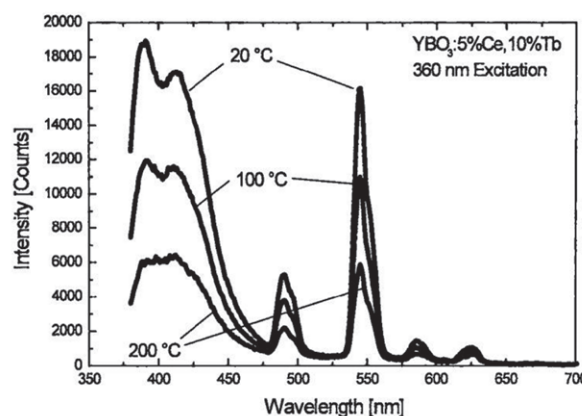
Aber auch Faktoren wie Temperatur oder Konzentration eines Aktivator-Ions können die Emission beeinflussen. So zeigt die DE 10 2010 007 566 A1, dass die Intensität der Emission von $\text{YBO}_3:\text{Ce}$ bei steigender Temperatur deutlich sinkt, während sich die Farbe nicht ändert (Figur 5).

Zudem enthält diese Schrift auch Beispiele für stark von der Anregungswellenlänge abhängige Verbindungen. Das Spektrum von $\text{Tb}_2\text{W}_3\text{O}_{12}$ zeigt insbesondere hinsichtlich der Intensität eine deutliche Abhängigkeit von der eingestrahlteten Wellenlänge. Während eine deutliche Emission bei Einstrahlung von UV-Licht (366 nm) im grünen Wellenlängenbereich zu beobachten ist, reicht die Energie von violettem Licht (400 nm) offensichtlich nicht mehr zur Anregung von Lumineszenz-Prozessen (Figur 6).

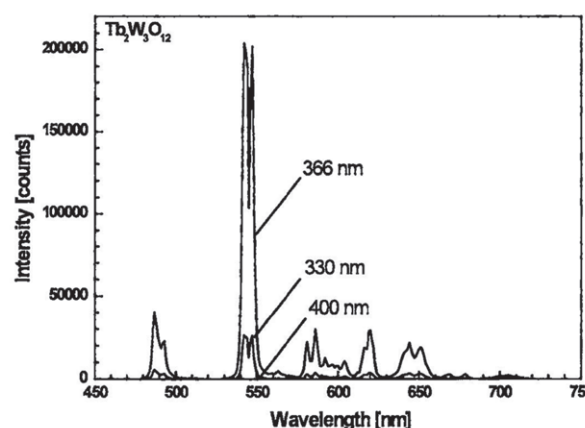
Die Emissionsspektren von unterschiedlich dotierten Verbindungen des Typs $\text{Sr}_3\text{La}_{1-x-y}(\text{PO}_4)_3:\text{Ce}_x\text{Tb}_y$, eines mit Cer und Terbium in unterschiedlichen Mengenverhältnissen dotierten Phosphatgitters, zeigen sowohl eine Verschiebung der Emissionsmaxima wie auch eine Abhängigkeit der Intensität von der Dotierung (aus DE 10 2009 044 508 A1, Figur 7).

Durch Kombination mehrerer Leuchtstoffe sind der Fantasie bezüglich Farbe eines Beleuchtungselements grundsätzlich keine Grenzen gesetzt. Von besonderem Interesse ist jedoch im Hinblick auf den Ersatz von herkömmlichen Glühlampen die Erzeugung von weißem Licht.

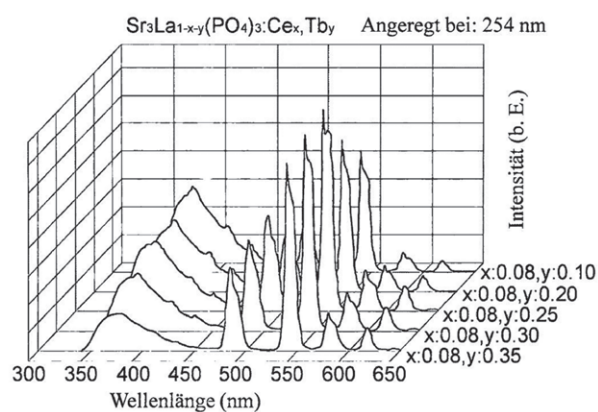
Der Fachmann bedient sich bei derartigen Fragestellungen gern des CIE-Farbraums (CIE = Commission internationale de l'éclairage, Internationale Beleuchtungskommission), in dem Farbe und Sättigung dargestellt werden können.



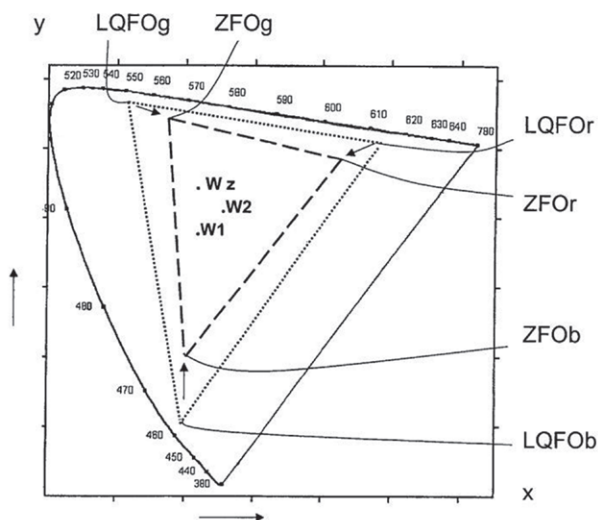
Figur 5: Emissionsspektren von $\text{YBO}_3:\text{Ce,Tb}$ als Funktion der Temperatur (aus DE 10 2010 007 566 A1).



Figur 6: Emissionsspektren von $\text{Tb}_2\text{W}_3\text{O}_{12}$ bei unterschiedlichen Einstrahlwellenlängen (aus DE 10 2010 007 566 A1).



Figur 7: Emissionsspektren bei unterschiedlichen Terbium-Dotierungsverhältnissen (aus DE 10 2009 044 508 A1).



Figur 8: CIE-Farbdreieck zur Bestimmung des Zielfarborts (aus DE 10 2005 028 671 B4).

Die vom Auge wahrgenommene Farbe einer Lichtquelle kann durch additive Farbmischung eingestellt werden. Für die geeignete Auswahl von Leuchtstoffen, die in der Summe weißes Licht erzeugen, wird das sogenannte Farbdreieck herangezogen, welches eine Abhängigkeit des Weißindrucks der Mischung von den Farben und Intensitäten der Leuchtstoffe illustriert (Figur 8).

Um eine weiße leuchtstoffkonvertierte-LED zu erhalten, nennt die DE 11 2007 001 712 T5 drei Methoden: das Auftragen eines gelben Leuchtstoffs auf einen blauen LED-Chip; das Kombinieren eines blauen LED-Chips mit einem grünen und einem roten Leuchtstoff sowie das Mischen von Leuchtstoffen in drei Farben und ein UV- oder Violett-LED-Chip.

Zur Erzeugung eines Weißlichts durch Überlagerung von rotem, grünem und blauem Licht lehrt die Patentliteratur eine Vielzahl von möglichen Substanzkombinationen. So verwendet die DE 10 2004 060 708 A1 eine Kombination von Europium-dotierten Lithium-Lanthan-Niobat als roten Fluoreszenzfarbstoff mit blauen und grünen Fluoreszenzmaterialien, um eine Weißlichtdiode zu erzeugen. Die DE 201 08 013 U1 geht den Weg der Kombination von blauen, grünen und gelben Fluoreszenzmaterialien, wobei das gelbe Fluoreszenzmaterial einen hohen Emissionsanteil im roten Spektralbereich aufweisen muss (Figur 9).

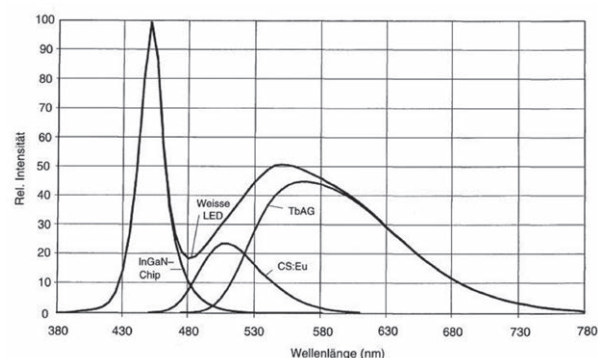
Durch die Auswahl der Fluoreszenzfarbstoffe lässt sich die Farbwahrnehmung einer Lampe sehr selektiv steuern. Auch bei klassischen Quecksilberentladungslampen wird das Licht durch geeignete rote Leuchtstoffe wie $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ oder $\text{Mg}_4\text{GeO}_{5.5}\text{F}:\text{Mn}$, die den hohen grün-blauen Anteil des Quecksilberplasmas dämpfen, verbessert [6].

Eine weitere wichtige Verwendung von anorganischen lumineszierenden Materialien ist der Einsatz in Sicherheitselementen.

Nicht nur bei Banknoten oder Kreditkarten, auch zum Schutz vor Produktpiraterie werden versteckte oder sichtbare Sicherheitselemente immer interessanter. In der DE 10 2010 007 566 A1 werden durch Kombination von zwei lumineszierenden Pigmenten auf Basis eines Granat-Wirtsgitters eine Vielzahl von unterscheidbaren Sicherheitselementen erzeugt.

Aufgrund der Abhängigkeit der Emission eines Leuchtstoffs von Anregungswellenlänge und/oder Temperatur (vergleiche Figuren 5 und 6) eröffnen sich neue Wege bei der Differenzierung und Identifikation. So kann durch temperaturabhängige Messungen beziehungsweise Messung bei verschiedenen Anregungswellenlängen und variablen Konzentrationen der Dotierungselemente eine sehr exakte Identifikation von Original und Fälschung erfolgen.

Um die Fälschung derartiger Sicherheitsmerkmale zusätzlich zu erschweren, werden Tarnkomponenten vorgeschlagen, die bei der Elementaranalyse von beispielsweise Banknoten Rückschlüsse auf die tatsächliche Merkmalszusammensetzung erschweren (vergleiche DE 10 2011 122 246 A1). Dazu wird ein Lumineszenzmaterial mit einer chemisch und strukturell ähnlichen



Figur 9: Emissionsspektrum einer Weißlicht-LED durch additive Farbmischung (aus DE 201 08 013 U1).

Tarnkomponente versetzt, welche dann bei der Analyse derart ähnliche Ergebnisse liefern, sodass nicht mehr nachvollziehbar ist wie das Lumineszenzmaterial aufgebaut ist. Für die Verbindung $Y_{2,91}Pr_{0,09}Cr_2Al_3O_{12}$ als lumineszierende Komponente eines Sicherheitsmerkmals ist eine mögliche tarnende Komponente zum Beispiel 34 % $GdGaO_3$, 34 % $FeAl_2O_4$, 1 % Tb_2O_3 , 1 % Nd_2O_3 . Zur „Enttarnung“ der lumineszierenden Komponente müsste in diesem Beispiel für die Wirtsgitter-Bestandteile aus den Elementen Yttrium, Gadolinium, Gallium, Aluminium, Eisen und Chrom zuerst die richtige Kombination ausgewählt werden. Diese müsste dann jeweils mit verschiedenen Kombinationen der möglichen Aktivatorelemente Praseodym, Neodym und Terbium getestet werden.

Die Kombination mehrerer anorganischer Verbindungen ermöglicht beliebig komplexe Sicherheitselemente, welche nur schwer fälschbar sind. Dies ist ein Vorteil gegenüber den organischen lumineszierenden Materialien, deren chemische Struktur sich ausgehend vom Emissionsspektrum ableiten und somit auch nachahmen lässt.

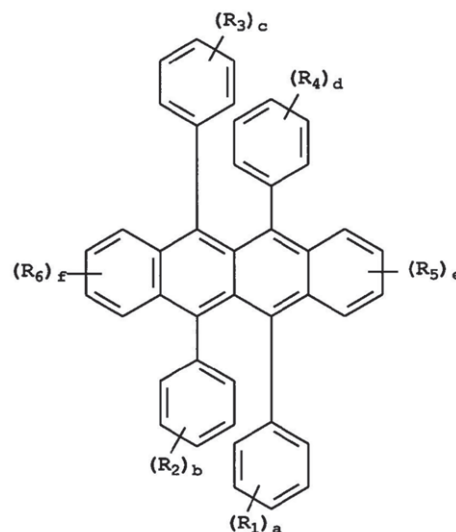
4 Organische und metallorganische lumineszierende Materialien

4.1 Organische lumineszierende Materialien

Die Farbigkeit und die Lumineszenz organischer Verbindung beruhen auf der Konjugation von π -Systemen. Im Allgemeinen sind aromatische Verbindungen farblos, da die π -Elektronen über das gesamte Ringsystem verteilt sind. Werden jedoch so genannte Auxochrome wie stickstoff- oder sauerstoffhaltige Gruppen oder auch Metalle, in das System eingefügt, führt das zu einer Farbverschiebung in den sichtbaren Bereich [8]. Auch durch Kondensation mehrerer aromatischer Ringe kann eine Farbintensivierung herbeigeführt werden. Während Benzol selbst im UV-Bereich fluoresziert, fluoreszieren kondensierte Benzolringe wie Naphthacen im sichtbaren Bereich [9].

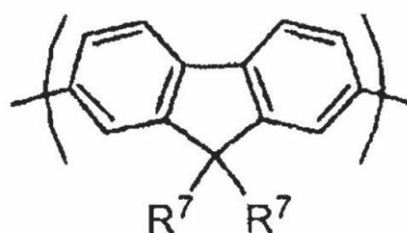
Elektrolumineszenz organischer Verbindungen wurde zuerst an Acridinorange [10] und wenig später an Anthracen entdeckt [11]. Wirtschaftlich interessant sind

sowohl niedermolekulare organische Verbindungen als auch Polymere, beziehungsweise Kombinationen aus beiden. Als Weiterentwicklung von Anthracen wurden substituierte Naphthacene entwickelt. Diese haben eine hohe Stabilität und emittieren gelbes Licht (DE 60 2005 006 247 T2, Figur 10).



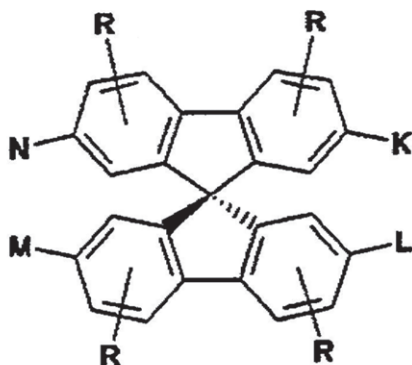
Figur 10: Naphthacenverbindung als gelber Emittier in einer OLED (aus DE 60 2005 006 247 T2).

Eine häufig eingesetzte Verbindung ist Fluoren. Es fluoresziert als Monomer unter UV-Licht violett. Doch zur besseren Haltbarkeit der OLEDs (= organic light emitting diode, organische Leuchtdiode) wird in der DE 11 2012 000 624 T5 ein Polymer mit Fluoren-Wiederholeinheiten eingesetzt (Figur 11). 9,9-Diaryl-substituierte Fluoren-Wiederholeinheiten (R^7 = Aryl) sollen die Lebensdauer einer OLED im Vergleich zu 9,9-Dialkyl-substituierten Fluoren-Wiederholeinheiten (R^7 = Alkyl) erhöhen, was sich in höheren Glasübergangstemperaturen des Polymers zeigt. Lebensdauer bedeutet hier die Zeit, die benötigt wird, um die Leuchtdichte eines Polymers bei konstanter Stromstärke um einen bestimmten Prozentsatz zu senken.



Figur 11: Fluoren-Wiederholungseinheiten eines lumineszierenden Polymers (aus DE 11 2012 000 624 T5).

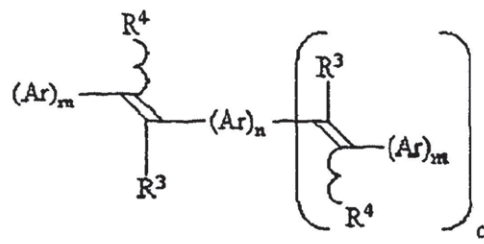
Für den Einsatz in elektrolumineszierenden Bauteilen kann das Fluoren an der 9-Position durch Silicium oder Stickstoff substituiert werden (DE 11 2009 001 784 T5, DE 10 2011 054 855 A1). Durch den Einbau von Siliciumatomen kann das LUMO (lowest unoccupied molecular orbital; niedrigstes unbesetztes Molekülorbital)-Energie-niveau im Polymer gesenkt werden. Auch die Annelierung von Thiophen- oder Selenophenringen führt zu einer Senkung des Energieniveaus. Durch den Einbau von Stickstoffatomen wird die Triplettenergie erhöht und somit eine verbesserte Emissionseffizienz erreicht. Auch Spiroverbindungen von Fluoren werden als lichtemittierende Verbindungen eingesetzt (DE 44 11 969 A1, Figur 12). Spiroverbindungen zeigen eine verringerte Tendenz zu kristallisieren und erhöhen damit die Lebensdauer von Elektrolumineszenzvorrichtungen. Durch den Einsatz unterschiedlicher Substituenten, die auch polymer sein können, lassen sich die Eigenschaften und damit auch die Emission variieren.



Figur 12: Spiroverbindung von Fluoren (aus DE 44 11 969 A1).

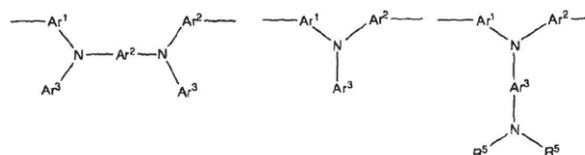
Des Weiteren können auch Polymere mit konjugierten Doppelbindungen wie Poly(arylenvinylene) als Fluoreszenzmaterialien eingesetzt werden (DE 11 2011 102 125 T5). Durch den Einsatz unterschiedlicher Aromaten in der Polymerkette beziehungsweise als Substituenten an den Aromaten und/oder der Doppelbindung können die unterschiedlichsten Fluoreszenzfarben erzielt werden.

Zur Abdeckung eines breiten Farbspektrums und zur Stabilisierung der blau emittierenden Styrylamine werden in der DE 10 2005 058 558 A1 Anthracenderivate mit polymeren Styrylaminen mit konjugierten Doppelbindungen kombiniert.



Figur 13: Wiederholeinheit eines Poly(arylvinylen) (aus DE 11 2011 102 125 T5).

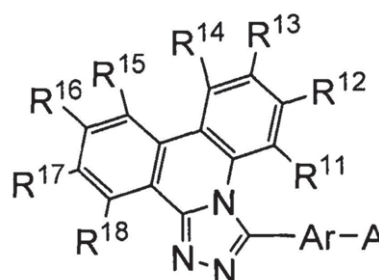
Durch den Einbau eines oder mehrerer Stickstoffatome in die Polymerkette werden stabile Polymere erzielt, die blaues Licht emittieren (DE 11 2011 103 455 T5, Figur 14).



Figur 14: Stickstoffhaltige Polymere, die blaues Licht emittieren (aus DE 11 2011 103 455 T5).

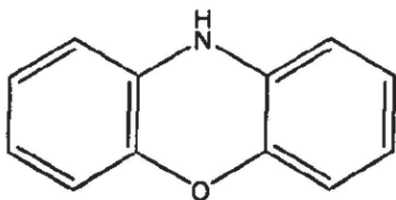
Die DE 11 2011 102 597 T5 offenbart Triazolderivate, die eine hohe Stabilität aufweisen und blaues bis violettes Licht emittieren (Figur 15). Die Triazolderivate haben eine hohe Triplett-Anregungsenergie, was zu einer höheren Lichtausbeute führt. Das lichtemittierende Element kann somit mit niedriger Spannung betrieben werden, hat einen geringen Stromverbrauch und weist eine lange Lebensdauer auf.

In der DE 11 2009 001 829 T5 werden Polymere mit einer Phenoxazin-Grundstruktur offenbart (Figur 16). Phenoxazin alleine emittiert im nicht sichtbaren Bereich, in ein Polyfluoren eingebaut, emittiert es im blauen Bereich. Die Annelierung von Arylsystemen



Figur 15: Strukturformel von Triazolderivaten (aus DE 11 2011 102 597 T5).

an den Seitenringen führt zu einem erhöhten Lumineszenzwirkungsgrad. Je nach Konjugation entstehen blau oder grün emittierende Verbindungen.

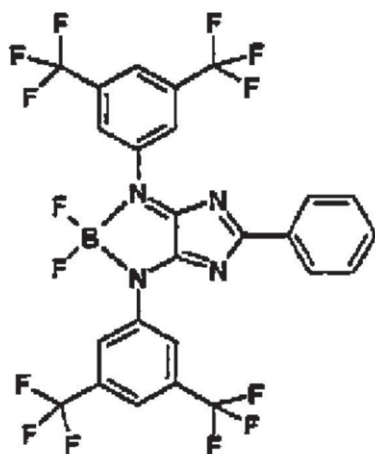


Figur 16: Strukturformel von Phenoxazin
(aus DE 11 2009 001 829 T5).

4.2 Metallorganische lumineszierende Materialien

Aufgrund der geringen Lebensdauer und Effizienz organischer lumineszierender Verbindungen ist man dazu übergegangen, metallorganische lumineszierende Verbindungen weiterzuentwickeln. Die Herstellung dieser Komplexe ist zwar seit Langem bekannt, aber für den technischen Einsatz wurden sie erst in den letzten Jahren interessant. In erster Linie werden hierfür schwere Metalle herangezogen, die durch ein rasches Intersystem Crossing eine Emission aus Triplettzuständen und damit Phosphoreszenz erlauben, worunter in erster Linie d- und f-Block Elemente fallen.

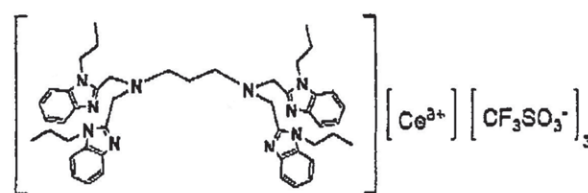
Bereits in den 1920er Jahren wurden Leuchtstoffe auf Basis von bororganischen Verbindungen entwickelt. Dies dürften einige der ältesten lumineszierenden Pigmente auf metallorganischer Basis sein. Die DE 407 944 A offenbart die Herstellung der bororganischen Leuchtstoffe durch Vermischen einer Borsäurelösung



Figur 17: Strukturformel einer bororganischen Verbindung
(aus DE 11 2007 000 789 B4).

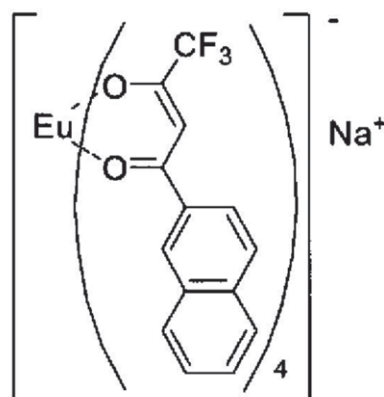
mit diversen organischen Substanzen und anschließendes Entwässern. Die entstehenden Pigmente leuchten von gelbgrün wie Uranin-Borphosphor, bis blau wie Terephthalsäure-Borphosphor oder Anthracen-Borphosphor. Die DE 11 2007 000 789 B4 zeigt ebenfalls eine bororganische Verbindung als lumineszierende Verbindung (Figur 17). Das Zentralatom ist hier von elektronenziehenden Liganden umgeben und als Resultat zeigt die Verbindung rote Lumineszenz.

Auch Seltenerdmetalle werden in lumineszierenden metallorganischen Komplexen verwendet. Durch die Komplexierung von Cer, Praseodym, Ytterbium oder Lutetium mit einem verbrückten Benzimidazolkomplex und Triflat wird ein blau emittierender Komplex erhalten, der eine lange Lebensdauer auch bei erhöhten Temperaturen aufweist.



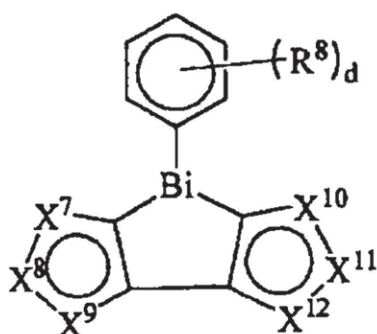
Figur 18: Strukturformel eines Komplexes aus einem verbrückten Benzimidazol, Cer und Triflat (aus DE 11 2010 004 188 T5).

Analog zu den anorganischen lumineszierenden Pigmenten werden auch Europiumverbindungen eingesetzt. Die DE 10 2011 104 169 A1 beschreibt ein strahlungsemitierendes Bauelement, das in der strahlungsemitierenden Schicht einen Europiumkomplex aufweist (Figur 19). Die OLED, die diesen Komplex enthält, leuchtet rot.



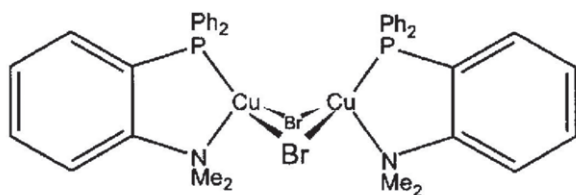
Figur 19: Strukturformel eines rot emittierenden Europiumkomplexes (aus DE 10 2011 104 169 A1).

Doch auch hier ergeben sich die Probleme der Rohstoffabhängigkeit vor allem von China, sowie die hohen Kosten des Abbaus. Um dies zu umgehen, wurden Versuche unternommen, häufiger vorkommende Halbedelmetalle wie Bismut oder Kupfer zu verwenden, die außerdem eine geringe Toxizität aufweisen. Bismut ist das schwerste stabile Element des Periodensystems und sollte aufgrund dieser Eigenschaft „verbotene“ Übergänge aus dem Triplettzustand begünstigen. In der DE 11 2011 100 845 T5 wird ein Bismut-Heterozyklus als lumineszierendes Material in einer Dünnschicht für eine OLED eingesetzt.



Figur 20: Strukturformel eines Bismut-Heterozyklus (aus DE 11 2011 100 845 T5).

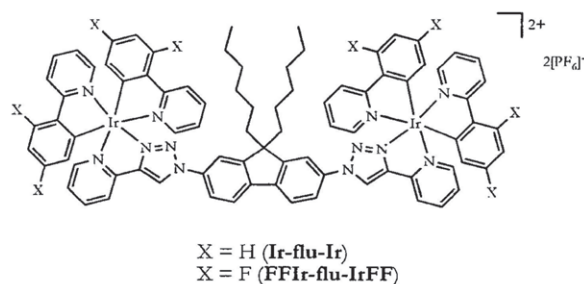
In den Druckschriften DE 10 2011 079 856 A1 und DE 10 2011 080 240 A1 werden zweikernige Kupferkomplexe, die von Phosphan-Amin-Heterozyklen umgeben sind, als lumineszierende Pigmente verwendet. Sie emittieren blaues beziehungsweise blau-grünes Licht.



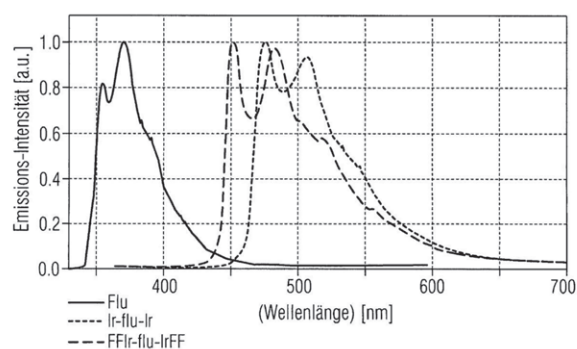
Figur 21: Strukturformel eines bromverbrückten Kupferkomplexes (aus DE 10 2011 079 856 A1).

Neuere Entwicklungen verwenden vorwiegend Edelmetallkomplexverbindungen. Durch die Kombination der unterschiedlichen Metalle mit verschiedenen Liganden kann eine breite Farbpalette abgedeckt werden.

Iridiumkomplexe werden durch die Vielfarbigkeit der Komplexe hierfür am häufigsten verwendet. In der DE 10 2008 033 929 A1 kann durch Substitution des Wasserstoffs durch Fluor im Liganden (Figur 22) eine Blauverschiebung des Emissionsspektrums erreicht werden ohne die Emissionsintensität zu verändern (Figur 23).



Figur 22: Strukturformel eines zweikernigen Iridiumkomplex mit Wasserstoff oder Fluor als Substituent (aus DE 10 2008 033 929 A1).



Figur 23: Emissionsspektrum des Iridiumkomplexes mit Wasserstoff beziehungsweise Fluor als Substituent (aus DE 10 2008 033 929 A1).

4.3 Verwendung

Organische und metallorganische lumineszierende Materialien können in OLEDs, organischen Solarzellen und Displays oder anderen lichtemittierenden elektrochemischen Vorrichtungen verwendet werden. Auch zum Kennzeichnen von Gegenständen, um sie maschinell erkennbar zu machen, können sie eingesetzt werden.

Fluoreszierende organische Materialien macht man sich bei der Sequenzierung von DNA, sowie zur Fluoreszenzdetektion von Aminosäuren, Antikörpern und Proteinen zunutze. Sie können auch zu diagnostischen Zwecken eingesetzt werden.

In der Literatur finden sich auch immer wieder Ansätze, anorganische und organische Materialien zu kombinieren. Insbesondere im Bereich der Beleuchtungselemente und der Darstellung von Weißlicht finden sich zahlreiche Beispiele hierfür. So beschreibt die DE 197 56 360 A1 eine lichtemittierende Vorrichtung zur Erzeugung von weißem Licht, welche als blau und grün emittierende Lumineszenzmaterialien anorganische Verbindungen vorschlägt, als rot emittierende unter anderem auch organische Europium-Komplexe offenbart.

Die DE 10 2009 022 682 A1 kombiniert unterschiedlich dotierte Granate mit niedermolekularen organischen Lumineszenzfarbstoffen, um eine Fluoreszenz im gelben Bereich zu erzielen.

5 Fazit

Die Faszination lumineszierender Materialien hält an, trotz oder gerade weil sich die technische Anwendbarkeit dieser Verbindungen enorm weiterentwickelt hat. Strukturell sind lumineszierende Materialien äußerst vielfältig. Von einfachen Mineralen, welche durch Einbau von Schwermetall-Ionen Phosphoreszenz zeigen, reicht die Palette über metallorganische Verbindungen bis zu hochkomplexen organischen Polymeren.

Das herausragende Merkmal lumineszierender Materialien ist jedoch ohne Zweifel die variable Steuerung ihrer Farbigkeit. Die Farben anorganischer Materialien lassen sich bereits durch simples Austauschen chemisch ähnlicher Komponenten beeinflussen oder durch Variation von Gewichtsanteilen. Die organischen und metallorganischen Materialien zeigen eine große Farbvielfalt durch Kontrolle von Faktoren wie Polymerkettenlänge und/oder Substitution.

Beide Materialklassen haben Vor- und Nachteile. Lassen sich die anorganischen lumineszierenden Materialien nur durch verhältnismäßig aufwändige Hochtemperaturverfahren herstellen, sind sie doch wenig empfindlich gegenüber Umwelteinflüssen und somit langlebig.

Im Gegensatz dazu sind die organischen und metallorganischen Materialien über klassische Syntheserouten zugänglich, jedoch naturgemäß nicht im gleichen Maße stabil.

Der Trend geht hin zu den organischen Materialien, da dort nicht die bereits angesprochene Rohstoffabhängigkeit besteht und die Herstellung günstiger ist. Auch die Kombination von anorganischen und organischen Materialien wird immer wieder beschrieben. Eine vollständige Unabhängigkeit von Rohstoffen wie den Seltenen Erden wird jedoch nur schwer realisierbar sein.

Nicht-Patentliteratur

- [1] Verordnung (EG) Nr. 244/2009 der Kommission vom 18. März 2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Haushaltslampen mit ungebündeltem Licht, URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?jsessionid=Hk3xTPDKKCZcds7GSxBQYW2zdNjCJrDRtJc7j3Clfmb0Ts3yM2XZ!-364644298?uri=CELEX:32009R0244> [abgerufen am 04.06.2014]
- [2] RODA, A.: The Discovery of Luminescence: „The Bolognian Stone“, recherchiert unter http://www.isbc.unibo.it/Files/10_SE_BoStone.htm [abgerufen am 10.04.2014]
- [3] HERSCHEL, J. F. W.: On a Case of Superficial Colour Presented by a Homogeneous Liquid Internally Colourless. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1845, 135, Seite 143–145. ISSN 0261-0523
- [4] Presseinformation der Ruhr-Universität Bochum, recherchiert unter <http://aktuell.ruhr-uni-bochum.de/pm2013/pm00076.html.de> [abgerufen am 10.04.2014]
- [5] Periodic_table.svg: Cepheus derivative work: InverseHypercube [Public domain], via Wikimedia Commons, URL: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:White_periodic_table.svg?uselang=de [abgerufen am 10.04.2014]
- [6] JÜSTEL, T., NIKOL, H., RONDA, C.: Lumineszierende Materialien. In: Angewandte Chemie, 1998, 110, 3250–3271. ISSN 1521-3757

- [7] MAAS, H., CURRAO, A., CALZAFERRI, G.: Eingeschlossene Lanthanoide als lumineszierende Materialien. In: Angewandte Chemie, 2002, 114, Nr. 14, Seite 2607–2608. ISSN 1521-3757
- [8] Römpp Lexikon Chemie, Stichwort: Chromophore, Dezember 2009. URL: <http://www.roempp.com> [abgerufen am 10.04.2014]
- [9] Römpp Lexikon Chemie, Stichwort: Fluoreszenz, August 2008. URL: <http://www.roempp.com> [abgerufen am 10.04.2014]
- [10] BERNIUS, M. T. et al.: Progress in Light-Emitting Polymers. In: Advanced Materials, 2000, 12, Nr. 23, Seite 1737–1750. ISSN 1521-4095
- [11] HELFRICH, W.; SCHNEIDER, W. G.: Recombination Radiation in Anthracene Crystals. In: Physical Review Letters, 1965, 14, Nr. 7, Seite 229–232. ISSN 1079-7114

OLEDs – Entwicklung einer Technologie zur Marktreife

Dipl.-Phys. Mark Haslinger, Patentabteilung 1.33

Die OLED-Technologie avancierte in den letzten Jahrzehnten zu einer großen Hoffnungsträgerin für sowohl energieeffiziente als auch leuchtstarke Lichtquellen mit neuen Anwendungs- und Designmöglichkeiten.

Nach einem historischen Überblick werden anhand der Beispiele „Displays“ und „Beleuchtungstechnik“ bereits kommerziell erfolgreiche Anwendungen und zu erwartende Entwicklungen beschrieben.

1 Einleitung

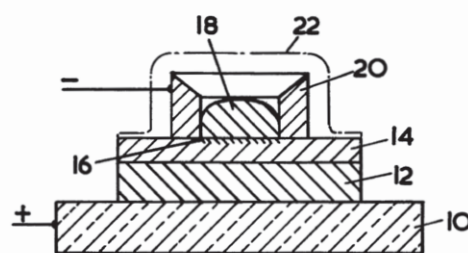
Die Abkürzung „OLED“ steht für „Organic Light Emitting Diode“, also „organische Leuchtdiode“. Das Adjektiv „organisch“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass in einem solchen Bauelement Verbindungen aus der organischen Chemie als elektrooptisch aktive Materialien eingesetzt werden, im Gegensatz zur konventionellen Leuchtdiode („LED“), die dafür kristalline, anorganische Materialien verwendet.

1.1 Glühwürmchen

Grellbunt lumineszierende Smartphone-Displays, in allen Helligkeits- und Farbschattierungen dimmbare Raum- und Gerätebeleuchtungen, hauchdünnes „elektronisches Papier“, vollkommen transparente Kameradisplays – kein Mensch dachte noch vor einigen Jahrzehnten an solche schrillen Features. Als in den fünfziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts Wissenschaftler der Universität Nancy Stoffe wie Acridinorange in dünnen Filmen aus Zellophan lösten und diesen Stoff, eingerahmt von zwei elektrischen Kontakten, einem Wechselfeld aussetzten, leuchtete dieser verblüffenderweise [1].

Unter Laborbedingungen wurden an ein vierzig Millimeter großes Bauelement mit einer Dicke der Zellophanschicht von 22 Mikrometern Spannungen von bis zu 2 500 Volt angelegt – für den Praxisbetrieb unbrauchbar.

Weitere schüchterne Leuchtversuche mit diversen organischen Materialien in Laboratorien rund um die Welt folgten. Den nächsten nennenswerten Erfolg erzielte man in den siebziger Jahren erneut mit Polymeren, dem Grundstoff der die Welt in dieser Zeit immer mehr erobernden Plastikfolien. Zwischen zwei Elektroden leuchtete diesmal eine nur noch einen halben bis eineinhalb Mikrometer dünne Folie aus Polyvinylcarbazol, wiederum versehen mit verschiedenen Farbstoffen. Den prinzipiellen Aufbau eines solchen Bauelements zeigt die Offenlegungsschrift DE 25 45 784 A1 aus dem Jahre 1976.



Figur 1: Licht emittierendes Bauelement mit Elektroden (10, 20), Ladungsträgertransportschichten (12, 18) und einer leuchtenden Folie (14) aus Polyvinylcarbazol (aus DE 25 45 784 A1).

Ein aus heutiger Sicht entscheidender Durchbruch in der Forschung fand 1987 statt. Die zwei Wissenschaftler Tang und Van Slyke realisierten erstmals einen zwischen Elektroden befindlichen zweischichtigen Aufbau, bestehend aus einer nur für den Transport elektrischer Ladungsträger verantwortlichen Schicht und einer an diese angrenzende Leuchtschicht. Bis heute ist eine

solche „Heterojunction“ zweier solcher organischer Schichten Grundlage von Standard-OLEDs [2]. Begeistert präsentierten die beiden Forscher der Öffentlichkeit ihr Resultat. Sie verwendeten zwei jeweils einen knappen Mikrometer dicke Schichten aus aromatischem Diamin und Aluminium-tris (8-hydroxychinolin).

Für die Spannungsversorgung ihres Bauelements reichten nun auf einmal einige handelsübliche Batterien aus. Sein Wirkungsgrad lag bei einem Prozent, die maximale Lichtstärke des zehn Quadratmillimeter großen Bauelements entsprach mit zehn Millicandela etwa der eines Glühwürmchens.

1.2 Deutscher Zukunftspreis

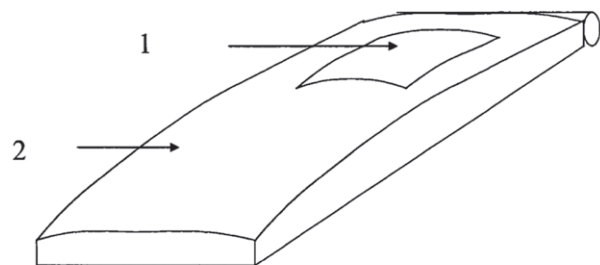
Vielseitige Aktivitäten folgten in den 1990er Jahren. Neue Bauelement-Architekturen, neue Materialien, neue Konzepte waren gefragt. Es ging um neue Produktideen und künftige Marktanteile. Die Zahl der Patentanmeldungen in diesem Bereich stieg rasant an. Schon im Jahr 2003 waren OLEDs ein Thema in der Publikationsschrift „Erfinderaktivitäten“ des DPMA [3]. Es wurden eine Reihe von Ideen, deren Ausgestaltungen und deren Anwendungsmöglichkeiten vorgestellt. Anlass genug, gut zehn Jahre später, danach zu fragen, was aus ihnen geworden ist.

Im Jahr 2011 wurde den Gründern einer Firma, die in dieser „Goldgräberzeit“ der OLED-Geschichte von Anfang an mit dabei war, der vom Bundespräsidenten ausgelobte und mit 250 000 Euro dotierte „Deutsche Zukunftspreis“ verliehen, für den „Anwendungs- und Marktfähigkeit sowie die Schaffung von Arbeitsplätzen“ genauso ein Kriterium sind wie „herausragende Innovationen“ [4].

2 OLED-Displays nach dem Stand der Technik

„Ebenfalls 2003 wurde im kalifornischen San José ein Handy mit Aktiv-Matrix-OLED präsentiert, das sehr farbtreu ist und sich unter anderem auch zur Wiedergabe von Video-Effekten eignet“, war in den Erfinderaktivitäten 2003 zu lesen.

In der damaligen Epoche mussten zuerst einmal grundsätzliche Fragen gelöst werden. Einer der ersten Anwendungsfälle waren Mobiltelefone. Wie ordnet man deren Gehäuse, deren OLED-Display und die zugehörige Treiberelektronik sinnvoll an? Darauf gibt die Patentschrift DE 10 2004 005 370 B4 eine Antwort. Sie zeigt ein gewölbtes Displayformat, das einen Teil des ebenso geformten Gehäuses bedeckt, zusammen mit einem Anordnungskonzept für weitere Komponenten und einem Herstellungsverfahren. Hier kann die OLED-Technologie schon einen Vorteil gegenüber herkömmlichen Technologien ausspielen. Durch die geringe Dicke und hohe Flexibilität der leuchtenden Folien ist eine Krümmung des Displays besonders gut möglich.



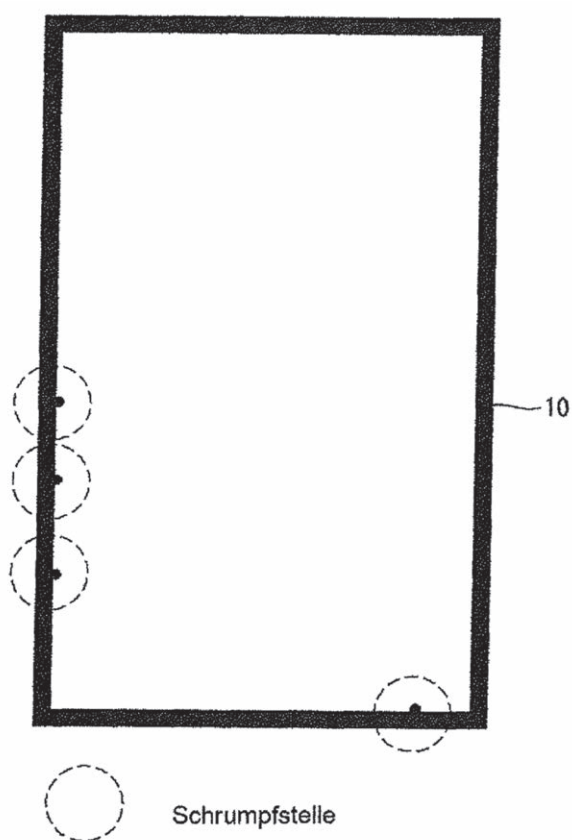
Figur 2: Gehäuse 2 mit OLED-Anzeigeelement 1 (aus DE 10 2004 005 370 B4).

Bei der Herstellung von OLED-Displays für Smartphones wie auch für Notebooks und Tablet-PCs, lässt sich nun mit revolutionären prozesstechnischen Konzepten arbeiten. Die im Jahr 2004 angemeldete Patentschrift DE 10 2004 013 449 B3 beschreibt ein Verfahren, das zum Drucken ultradünner Leiterbahnen für die Stromversorgung einzelner Pixel eine mit Silber-Nanopartikeln versehene Tinte verwendet, die mithilfe eines Tintenstrahl Druckkopfs aufgetragen wird.

Bis zur heutigen Zeit ist die Optimierung und Stabilisierung solcher elektrisch leitender Schichten ein Thema. Lösungsansätze beschrieben beispielsweise die Offenlegungsschriften DE 10 2012 203 530 A1 und die DE 10 2012 107 977 A1. Erstere beschreibt eine abgestufte, durch eine Passivierungsschicht gestützte und so stabilisierte Leitschicht, die zweite eine Konstruktion, die durch einen verringerten elektrischen Widerstand der leitenden Schichten eine gleichförmige Helligkeit des Displays in jedem seiner Pixel sicherstellt.

Ein großes Problem, das sich vor zehn Jahren stellte und unverändert aktuell ist, war, die OLED-Displays vor dem Eindringen von Feuchtigkeit zu schützen. Ansonsten besteht die Gefahr, dass sich die organischen Materialien zersetzen. Eine Vielzahl von Lösungsmöglichkeiten wurde in Patentanmeldungen vorgeschlagen, und bis heute ist es tatsächlich gelungen, für den Gebrauch Geräte mit Lebensdauern von etlichen Jahren herzustellen.

Beispielsweise beschreibt Figur 3 aus der Offenlegungsschrift DE 10 2012 109 438 A1 das Problem des Auftretens von Schrumpfstellen in der Lichtemissionschicht durch Eindringen von Wassermolekülen.



Figur 3: Schrumpfstellen in der Lichtemissionsschicht über dem Substrat 10 (aus DE 10 2012 109 438 A1).

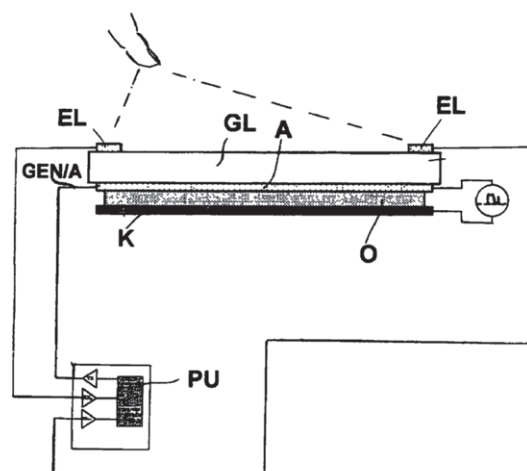
Verhindert werden soll eine solche Degenerierung der Licht emittierenden Schicht durch eine Kombination von Isolierungsfilmen und Passivierungsfilmen, die hinsichtlich ihrer Geometrie und ihrer Materialien beschrieben werden.

Die meisten der großen Smartphone-, Notebook- und Tablet-PC-Hersteller haben heute OLED-Displays in ihrem Portfolio. Gegenüber herkömmlichen LCDs zeichnen sich diese neben ihrer großen Flexibilität durch leuchtende, satte Farben und eine gute Abstrahlcharakteristik über den ganzen Raumwinkel aus. Dass diese Entwicklung in einer immensen Produktpalette der Smartphone-Generation münden würde, war zum damaligen Zeitpunkt in keinsten Weise abzusehen. Ein Schattendasein im kommerziellen Markt fristen hingegen die technisch komplexeren Anzeigevorrichtungen für großflächigere Anwendungen wie Computer-Displays in allen Varianten sowie Fernsehbildschirme. Die beiden beispielhaft vorgestellten und viele weitere technische Fortschritte haben aber zumindest zur Herstellung verschiedenster Prototypen geführt.

3 Zukünftige OLED-Displays

Touchscreen-OLED-Displays sind heute Stand der Technik, sowohl für Mobiltelefone als auch für Notebooks. Aber wie könnte ein Sensor-Display von morgen funktionieren?

Einen interessanten Ausblick gibt uns die Offenlegungsschrift DE 10 2011 017 383 A1.



Figur 4: Positionssensoreinrichtung mit Elektroden EL, Scheibenschicht GL, Leuchtmittelschichtstruktur O und Auswerteschaltung PU (aus DE 10 2011 017 383 A1).

Um lästige Streifen und Fettflecken zu vermeiden, das Gerät mechanisch weniger zu beanspruchen und den Bedienungskomfort zu erhöhen, wird ein berührungsloser Sensor-Modus vorgeschlagen. Durch elektrostatische oder feldelektrische Effekte nehmen über dem OLED-Display („Leuchtmittelschichtstruktur“) am Rand eines „Scheibenlayers“ gelagerte Elektroden das Signal eines sich nähernden Fingers auf und senden dieses an die Auswerteschaltung.

So kann das Gerät bei einer ersten Annäherung des Fingers in den Aktivmodus geschaltet werden und bei dessen weiterer Näherung die unter der Fingerposition liegende Funktion angesprochen werden. Die Offenlegungsschrift beschreibt die Verwendung eines solchen „No-Touch-Modus“ für Mobiltelefone, Tablet-PCs und E-Books.

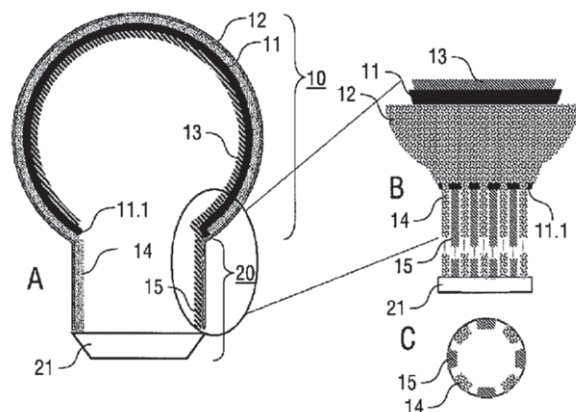
Mit der „nächsten Generation“ befasst sich ebenfalls die Offenlegungsschrift DE 10 2013 102 833 A1, nämlich mit „flexiblen Anzeigen (Displays), die dazu hergestellt werden, um gebogen, gekrümmt, verformt, oder ähnliches, zu werden“. Ziel ist also, vom jetzt schon dünnen und leichten, aber immer noch starren Display zu einem knitter- und zusammenlegbaren, „elektronischen Papier“ zu gelangen. Das gesamte Leuchtelement ist dabei extrem dünn, was Herausforderungen an dessen Prozessierung aufwirft. Die genannte Patentanmeldung beschreibt ein darauf abgestimmtes Laserprozessierungsverfahren, das es erlaubt, Displays dieser Abmessungen exakt zu strukturieren.

Von den Patentämtern noch unveröffentlicht, aber schon in der Presse angekündigt, ist eine Patentanmeldung, die ein ausklappbares und semitransparentes OLED-Display für eine Digitalkamera beschreibt [5]. Der fotografierten Person und dem Photographen ist es möglich, während der Entstehung des Photos Augenkontakt durch das semitransparente OLED-Display hindurch zu halten, was in Zukunft neue photographische Effekte zur Folge haben könnte.

4 Entwicklungen und Perspektiven in der Beleuchtungstechnik

Noch nicht absehbar war vor zehn Jahren das nun eingeleitete schnelle Ende der Glühfadenlampe („Glühbirne“). Deren Verschwinden vom Markt schafft wiederum Raum für neue Ideen und Konzepte. Die OLED-Technologie besticht im Segment der Beleuchtungstechnik durch niedrige Herstellkosten, einen guten Wirkungsgrad sowie zusätzliche Raum- und Farbgestaltungsmöglichkeiten.

Bei der klassischen Birnenform einer Lampe bleibt die Offenlegungsschrift DE 10 2011 110 156 A1. Ein gewölbter Hohlkörper wird auf der Innenseite mit Elektroden und Emissionsmaterial beschichtet, mit Kontaktfindern und Kontaktsockel versehen und das Produkt ist die Glühbirne für Nostalgiker – jedoch sparsamer hinsichtlich des Energieverbrauchs und sogar farblich abstimmbaar.



Figur 5: Innen hohler Leuchtkörper (10) mit zwei Elektroden-schichten (12, 13), einer Emissionsschicht (11) sowie Kontaktfindern (14, 15) (aus DE 10 2011 110 156 A1).

An einer klassischen zweidimensional-flachen Decken- oder Wandleuchte orientiert sich die Gebrauchsmusterschrift DE 20 2008 003 754 U1. Eine als dünne Schichtfolie gestaltete OLED wird zwischen zwei Glasplatten fixiert. Für die Funktion der rahmenlosen OLED-Leuchte sind nur noch Kontakt- und Halterungspunkte notwendig, der ultraflache Aufbau lässt sich elegant in Wände oder Decken integrieren.

Eine alternative Ausgestaltung beschreibt die Offenlegungsschrift DE 10 2011 002 480 A1: die OLED-Leuchte wird hier in einem Steckrahmen eingefasst, der mit wenigen Handgriffen zerlegt werden kann, wonach das flexible OLED-Element dann aufrollbar ist. Das teilweise aufgerollte Leuchtelement wird dann wieder durch einen Rahmen passender Größe aufgespannt. Dadurch ist die Ausdehnung der Lichtquelle auf einfache Weise veränderbar und an wechselnde Bedürfnisse anpassbar.

Die Offenlegungsschrift DE 10 2012 207 690 A1 beschreibt eine Leuchtkette zur Verwendung als Wandleuchte. Die einzelnen OLED-Module der Kette sind gegeneinander um die gemeinsame Achse schwenkbar angeordnet, sodass eine im Raum optimal wirkende gekrümmte Anordnung möglich ist.

Die Anzeige von Ziffern, Symbolen oder Schriftzeichen in verschiedensten Haushalselementen mittels OLED-Hinterleuchtung ist in der Offenlegungsschrift DE 10 2010 002 885 A1 dargelegt.

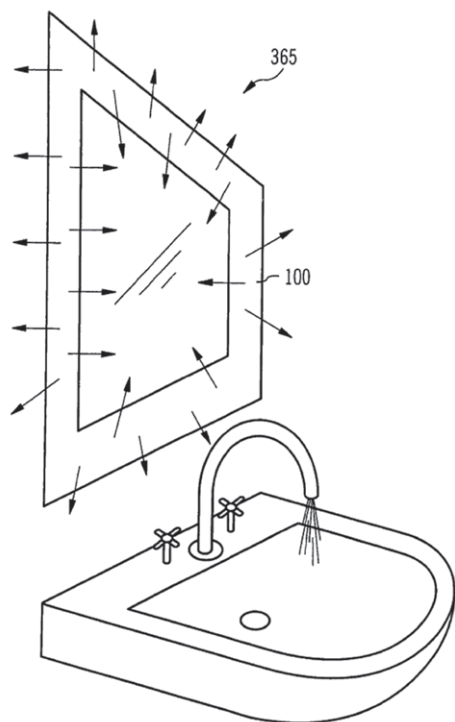
Ein breites Sammelsurium von Ideen zur Verwendung eines OLED-Leuchtmittels zeigt die Offenlegungsschrift

DE 10 2006 060 781 A1 auf. Beispielsweise können Raumteilerelemente ein- oder beidseitig beleuchtet sein, ebenso Regalwände oder -querlagen, Fensterläden oder Vorhänge, wobei die mechanischen Steckverbindungen gleichzeitig als elektrische Kontaktelemente der leuchtenden Flächen dienen.

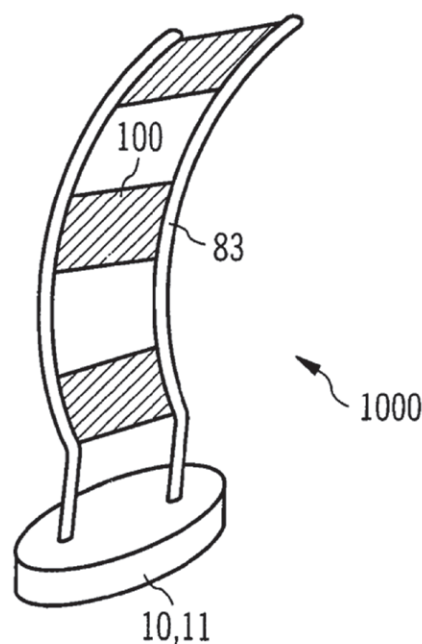
Eine zusätzliche Anwendungsidee ist ein „leuchtender Spiegel“: im eingeschalteten Zustand dient er als leuchtende Fläche, während er im ausgeschalteten Zustand kaum von einem gängigen Spiegel zu unterscheiden ist (siehe Figur 6).

Weiterhin wird ein Beleuchtungselement vorgeschlagen, das die Flexibilität und die Formbarkeit der OLED-Baelemente nutzt. Aus diesen physikalischen Gegebenheiten ergeben sich für Lichtdesigner neue, interessante und ansprechende Gestaltungsmöglichkeiten. Ein Ausführungsbeispiel dazu ist ebenfalls in der genannten Offenlegungsschrift abgebildet.

Einige auf diesem Ansatz beruhende Leuchtsysteme sind inzwischen auch schon zur Marktreife gelangt [6].



Figur 6: Spiegel 365 mit Leuchtmittel 100, der zwischen beleuchtender und spiegelfunktionstauglicher Position hin- und hergeschaltet werden kann (aus DE 10 2006 060 781 A1).



Figur 7: Beleuchtungseinrichtung 1000, deren Leuchtmittel 100 mittels Stangen 83 befestigt sind, geeignet als Steh- oder Tischlampe (aus DE 10 2006 060 781 A1).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ausschlaggebend für die erfolgreiche Markteinführung der OLED-Displays im Smartphone-Segment waren sicherlich die dort vorherrschenden kurzen Produktzyklen. Einerseits werden ständige Neuerungen gefordert, andererseits geringere Anforderungen an Lebensdauern der Produkte gestellt. Dies gilt nicht in gleicher Weise für den Markt der großflächigeren und damit auch technisch aufwändiger zu realisierenden Bildschirme wie für PCs oder Fernseher. Dennoch scheint durch die Vielzahl der Innovationen auch in diesem Segment ein Durchbruch der OLED-Technologie in den kommenden Jahren möglich.

Auch komplett neue Anzeige-Typen, die die technischen Vorteile der OLED-Technologie voll ausschöpfen können, wie das biegsame „elektronische Papier“, sind Kandidaten für einen kommerziellen Erfolg in den kommenden Jahren.

Trotz einer Vielzahl von Innovationen gab es ebenfalls noch keinen Durchbruch der OLED-Technologie auf dem Gebiet der Beleuchtungstechnik. Eine mögliche Initialzündung könnte das inzwischen beschlossene „Aus“ für die Glühfadenlampe sein. Die Akzeptanz der Verbraucher hinsichtlich OLED-Leuchtelementen bleibt aber anzuwarten. Sollte sich diese durchsetzen können, ist in deren Sog auch ein Aufwind für andere, bereits in der letzten Dekade angedachte Produkte wie lumineszierende Aufkleber oder leuchtende Kleidung denkbar.

Nicht-Patentliteratur

- [1] BERNANOSE, A.; COMTE, M.; VOUAUX, P.: Sur un nouveau mode d'émission lumineuse chez certains composés organiques. In: J. Chim. Phys., Vol. 50, 1953, Seite 64–68.
- [2] TANG, C.W.; VANSLYKE, S.A.: Organic electroluminescent diodes. In: Appl. Phys. Lett., Vol. 51, 1987, Seite 913–915.
- [3] HASLINGER, M.: Neue Displays und Leuchtflächen auf der Basis von OLEDs, DPMA Erfinderaktivitäten 2003. Deutsches Patent- und Markenamt, München 2004, Seite 45–50.
- [4] Wikipedia – die freie Enzyklopädie, Stichwort: Deutscher Zukunftspreis, URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Deutscher_Zukunftspreis [recherchiert am 30.4.2014]
- [5] Smile! You're On Transparent Camera. Wall Street Journal, Digits, 19.März 2014. URL: <http://blogs.wsj.com/digits/2014/03/19/smile-youre-on-transparent-camera/> [abgerufen am 30.4.2014]
- [6] OLED-Designleuchten: Effizienz, Technologie und Zukunftsdesign. Osram, News&Wissen. 2014. URL: http://www.osram.de/osram_de/news-und-wissen/oled-home/oled-designleuchten/index.jsp [abgerufen am 30.4.2014]

Biolumineszenz

Dr. Leonhard Riedel, Patentabteilung 1.41

Wer ist nicht fasziniert vom Leuchten der Glühwürmchen und wer hat nicht schon einmal von dem Meeresleuchten gehört oder jenen marinen Tiefseewesen, die mit ihren Leuchtorganen in der ewigen Dunkelheit auf Jagd gehen. Biolumineszenz beschreibt die Fähigkeit von lebenden Zellen Energie in Form von Lichtquanten abzugeben. Erzeugt wird das „kalte“ Licht durch Umsetzung von Naturstoffen (den Luciferinen) mithilfe spezifischer Biokatalysatoren, den sogenannten Luciferasen. Biotechnologen haben einige Luciferin/Luciferase-Systeme isoliert und für Anwendungen in medizinisch-therapeutischen Bereichen nutzbar gemacht. Einige Forscher wollen mithilfe der Biolumineszenz der Energiekrise entgegenwirken und ökonomische Lichtlieferanten in Form von selbstleuchtenden Pflanzen bereitstellen. Dieser Artikel will einen kurzen Überblick über die wichtigsten Systeme und Anwendungen liefern und dabei vielleicht auch ein wenig unseren Geist „erhellen“.

1 Lumineszierende Organismen

Biolumineszenz (Biós, griechisch „Leben“ und *lumen*, lateinisch „Licht“) wird jenen optischen Strahlungserscheinungen zugeordnet, die beim Übergang von einem durch eine chemische Reaktion angeregten Zustand zum Grundzustand entstehen, wobei diese in lebenden Zellen oder Geweben stattfindet. Es wird angenommen, dass sich 40–50 biologische Lichtemissionssysteme parallel und unabhängig voneinander entwickelt haben. Am häufigsten sind sie in Organismen der Tiefsee anzutreffen [1]. Biolumineszenzsysteme haben sich in Bakterien, eukaryotischen Einzellern (Protozoen), Pilzen, einzelligen Algen (die einzigen natürlichen Pflanzen) und einigen höher organisierten Organismen entwickelt. Leuchtbakterien und Protozoen wie die das Meeresleuchten verursachenden Dinoflagellaten, bestehen aus nur einer Zelle. Hier findet die Biolumineszenz in einem strukturell abgegrenzten Bereich der Zelle statt. Bei mehrzelligen Tieren spricht man von Leuchtorganen, in denen die Lichterzeugung mittels spezialisierter Leuchtzellen (Photocyten) oder photogener Bakterien, symbiotischer Leuchtbakterien, stattfindet. Solch eine Symbiose ist streng artspezifisch und wird insbesondere in Angler- und Laternenfischen der Tiefsee gefunden. Von den

im Meerwasser freilebenden Leuchtbakterien, die im Übrigen auch in Lebensmitteln wie Fisch, Fleisch und Eiern anzutreffen sind, ist vor allem das gramnegative Bakterium „*Vibrio fischeri*“ untersucht worden. Von den über 100 000 untersuchten Pilzarten sind allerdings bisher nur 71 als biolumineszent identifiziert worden. Hierzu zählt auch der Hallimasch („*Armillaria mellea*“), deren fadenförmige Strukturen (Myzelien) zur Biolumineszenz befähigt sind. Frisch vom Myzel durchwuchertes Holz kann in völliger Dunkelheit ein Leuchten erzeugen („Leuchtendes Holz“) [2].

Im Gegensatz zu den im Meer lebenden Arten findet man an Land eher selten lichtemittierende Organismen. Besonders bekannt sind einige Leuchtkäferarten, die – mit Ausnahme der polaren Regionen – auf der ganzen Welt anzutreffen sind, darunter der heimische „Große Leuchtkäfer“ („*Lampyrus noctiluca*“) (Figur 1) sowie der „Amerikanische Leuchtkäfer“ („*Phontius pyralis*“). Letzterer auch geläufig als „Firefly“ [3].

Die biologische Bedeutung der Biolumineszenz liegt in der optischen Kommunikation unter Artgenossen, insbesondere dem Auffinden von Sexualpartnern; zum Beispiel reagiert das Glühwürmchenweibchen nur auf das bestimmte Lichtecho eines Männchens. Das „Bio-licht“ kann auch der Abwehr von Feinden als Warn-

und Drohsignal oder der Tarnung dienen. Beispielsweise können die Lichtsignale verwandte Käfersorten anlocken, die dann als Beute enden.

Das rätselhafte Phänomen „Angel's Glow“, welches durch den amerikanischen Bürgerkrieg und den 1. Weltkrieg bekannt wurde, konnte – erst viel später – auf Biolumineszenz zurückgeführt werden. In der berühmten Schlacht in Shiloh am Tennessee River (1862), bei der etwa 3 500 Soldaten getötet und 16 000 verwundet wurden, haben überwiegend solche Verletzte überlebt, deren Wunden nachts ein bläuliches Leuchten zeigten. Heute geht man davon aus, dass eine Infektion mit dem Bakterium „*Photorhabdus luminescens*“ über seine symbiontische Beziehung zu einem Fadenwurm (Nematode) eine antibakterielle Wirkung entfaltet. Das Bakterium bildet ein Toxin, das für viele Insekten pathogen ist. Es wird in den von Nematoden befallenen Insekten-Larven freigesetzt und tötet diese (durch insektizide Proteine). In der Hämolymphe der Insektenlarven scheiden die Bakterien neben dem tödlichen Toxin auch ein lumineszierendes Protein sowie antibiotisch wirksame Substanzen aus. Im Hinblick auf die Verwundeten konnte so – neben einem erkennbaren Glimmen im Dunkeln – die Wunde offenbar frei vom Befall anderer Bakterien bleiben [4].



Figur 1: Weibchen des „Großen Leuchtkäfers“ („*Lampyris noctiluca*“) (Foto gemeinfrei auf Wikipedia [3]).

2 Luciferin/Luciferase-Systeme

Die Erzeugung des biogenen Lichts beruht auf dem Prinzip, dass ein Naturstoff (ein Stoff mit einer biologischen Funktion) mithilfe eines spezifischen Biokatalysators (in der Regel ein Enzym) umgesetzt wird. Der Naturstoff wird allgemein als Luciferin (Lucifer = Lichtbringer) und der dafür geeignete Katalysator immer als Luziferase bezeichnet. Sowohl Luciferine als auch Luciferasen sind art- oder gruppenspezifisch, was bedeutet, dass die Gen-kodierten Luciferasen strukturell unterschiedliche Enzyme sind und die jeweils dazu gehörenden Luciferine unterschiedliche Naturstoffe darstellen. Das bedeutet aber auch, dass Luciferin einer bestimmten Spezies nicht durch die Luciferase einer anderen Spezies umgesetzt werden kann [5]. Biolumineszente Systeme sind nicht evolutionär konserviert. Phylogenetische Studien weisen vielmehr darauf hin, dass die bekannten Luciferin/Luciferase-Systeme mindestens 40 unabhängige Ursprünge besitzen [1].

Interessanterweise ist oft nicht bekannt wie die Luciferine im lebenden System her- oder bereitgestellt werden wie die Luciferasen die Reaktion tatsächlich katalysieren oder welche Struktur und welcher Zustand der eigentliche Emitter hat. Meistens geht die eigentliche „Lichtreaktion“ mit der Abspaltung einer kleinen Molekülgruppe am Luciferin einher, währenddessen Energie in Form von Licht abgegeben wird. Da das Licht keine Wärme erzeugt, können 80–90% der eingesetzten Energie in Leuchtkraft umgesetzt werden.

Die photophysikalischen Prozesse entsprechen denen der Lumineszenz, demnach die Strahlung beim Übergang vom angeregten Zustand zum Grundzustand entsteht. In den meisten Fällen wird das Luciferin durch die Luciferase unter Verbrauch von Sauerstoff in einen Übergangszustand überführt (vergleiche Figur 2). In Abhängigkeit des Luciferin/Luciferase-Systems werden für die katalysierte Reaktion bestimmte essentielle Hilfsstoffe (Cofaktoren) wie den universell und unmittelbar in der Zelle verfügbaren Energieträger Adenosintriphosphat (ATP) sowie Magnesium- (Mg^{2+}) beziehungsweise Calcium- (Ca^{2+}) Ionen benötigt. Das „oxidierte“ Luciferin befindet sich hierbei erst in einem Übergangszustand I und gelangt dann häufig nach

Abspaltung von Kohlendioxid (Decarboxylierung) und weiteren Zwischenschritten in einen elektronisch angeregten Zustand P^* , der den eigentlichen Lichtemitter darstellt. Dieser fällt nach wenigen Nanosekunden in seinen Grundzustand P zurück und emittiert einen Lichtquant $h\nu$. Um in den angeregten Zustand P^* zu gelangen, ist biochemisch gesehen viel Energie nötig. Die Emission von Photonen mit einer Wellenlänge von 500 nm (grün, Energie etwa 2 eV/Photon) benötigt etwa 250 kJ/mol [6].

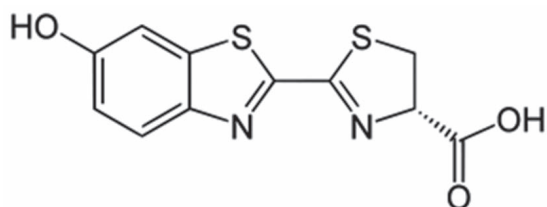


Figur 2: Schema einer allgemeinen Luciferinreaktion [6]. Luciferine L werden durch Luciferasen unter Verbrauch von Sauerstoff umgesetzt. Es entsteht über einen Zwischenschritt I letztlich ein Molekül in einem elektronisch angeregten Zustand P^* , der nach sehr kurzer Zeit wieder den Grundzustand P erreicht und dabei ein Photon emittiert.

3 Modellsysteme

Einige Arten der Luciferin/Luciferase-Systeme konnten untersucht und isoliert werden. Insbesondere konnte das System des amerikanischen Leuchtkäfers „*Photinus pyralis*“ („Firefly“), des gramnegativen Bakteriums „*Vibrio fischeri*“ (heute „*Aliivibrio fischeri*“) und der Qualle „*Aequorea victoria*“ erfolgreich in Diagnostik, Gentechnik sowie der chemischen und medizinischen Grundlagenforschung eingesetzt werden.

In „*Photinus pyralis*“ setzt die Luciferase ein relativ stabiles Substrat, die heterozyklische Verbindung Benzothiazol (D-Luciferin oder LH_2), unter Verbrauch von Sauerstoff um.



Figur 3: Strukturformel von D-Luciferin aus „*Photinus pyralis*“ [6].

Schon in den 1940er Jahren konnte gezeigt werden, dass für die Reaktion ATP sowie Mg^{2+} -Ionen als Cofaktoren benötigt werden ([6], [7]). Luciferasen aus Leuchtkäfern der Familie „*Lampyridae*“ (Glühwürmchen)

sind sehr ähnlich aufgebaut; Unterschiede zeigen sich in der Farbe des emittierten Lichts [8].



Figur 4: Biolumineszenzreaktion in „*Photinus pyralis*“. D-Luciferin wird mit ATP und Mg^{2+} unter O_2 -Verbrauch nach Decarboxylierung zu dem energetisch angeregten Oxyluciferin umgesetzt, das unter Abgabe eines Photons (rotes oder gelb-grünes Licht) in seinen Grundzustand zurückfällt (DE 44 29 291 A1).

Mitte der 1980er Jahre konnte die Luciferase erfolgreich in das Genom des Bakteriums „*E. coli*“ eingebaut und dort exprimiert (hergestellt) werden [9]. Zahlreiche Modifikationen zur Verbesserung der katalytischen Effizienz und Stabilität wurden an den Genen der Luciferase-Enzyme aus diversen Leuchtkäferarten vorgenommen. Hierzu gibt es eine Vielzahl von Patentanmeldungen über Luciferase-Mutanten, die eine erhöhte Stabilität aufweisen (beispielsweise US 7 906 298 B1, EP 1 721 969 B1) oder zur Ausstrahlung anderer Wellenlängen fähig sind (EP 0 689 587 B1). Da die Luciferin/Luciferase Reaktion ATP benötigt [10], kann das Luciferin/Luciferase-System zum hochspezifischen, für minimale Mengen geeigneten, Nachweis von ATP eingesetzt werden (Nachweisgrenze 10^{-11} Mol; zum Beispiel WO96/22376 A1, EP 0449 621 A1). Die emittierte Lichtmenge ist proportional zur vorhandenen Stoffmenge an ATP in der zu untersuchenden Probe. Da ATP nur in lebenden Organismen vorkommt, nutzt man das System auch in der Lebensmittelindustrie und in Hygienekontrollen, um bakterielle Kontaminationen durch die Biolumineszenzreaktion nachzuweisen [11] (EP 0 168 933 B1). Hierbei werden die in der Probe enthaltenen Bakterien in einer Pufferlösung aufgeschlossen und das freigesetzte ATP durch die Luciferin/Luciferase-Lumineszenz erfasst. Da man in etwa weiß wie viel ATP ein Bakterium enthält, kann über die gemessene Lichtintensität eine Aussage über den Bakteriengehalt einer Probe getroffen werden. Anwendungen finden sich beispielsweise in der Bestimmung der Stoffwechselaktivität von Zellkulturen in Fermentationsprozessen (DE 4 429 291 A1) oder im Zusammenhang mit intrazellulären ATP-Messungen (US 6 812 012 B1).

Durch eine visuelle Nachweismöglichkeit von Genübertragungen in Zellen findet das „Firefly-Lumineszenz“-

System ebenfalls Verwendung in der Diagnostik und der medizinischen Grundlagenforschung. Im Bereich der Krebsforschung werden Karzinome mit dem Luciferasegen markiert, um das Wachstum von Tumoren oder die Bildung von Metastasen und deren Verbreitung optisch zu verfolgen. Der Nachweis, dass ein Gentransfer in die Zielzelle tatsächlich erfolgreich ist, lässt sich oft erst in einem viel späteren Entwicklungsstadium überprüfen. Daher werden die relativ leicht nachweisbaren Luciferasegene mit dem eigentlichen Zielgen gekoppelt in die Zelle übertragen. Mithilfe einer Luciferase als Marker können nach Zufuhr von Luciferin und einer geeigneten Photodetektorvorrichtung (zum Beispiel einer CCD-Kamera) solche Zellen oder Gewebe nachgewiesen werden, in denen das Luciferase-Gen ins Genom integriert ist (EP 1 016 419 B1) [12]. Die Genübertragung kann unter anderem mithilfe eines Genshuttle-Virus erfolgen und; der weitere Nachweis über Single-Photon-Emissions-Computertomografie (SPECT) oder Positronenemissionstomographie (PET) (EP 1 414 994 B1). Ebenso eignen sich rekombinant hergestellte, licht-emittierende Organismen zur Diagnose und Therapie von Erkrankungen, die mit entzündetem Gewebe assoziiert sind (EP 1 509 617 B1).

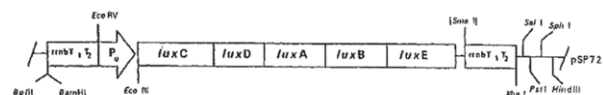
Im Bakterium „*Vibrio fischeri*“ wird als bakterielles Luciferin ein Flavinmononukleotid (FMN) für die lichtgebende Reaktion genutzt, wobei FMN normalerweise als Coenzym für verschiedene Oxidoreduktasen fungiert. Oxidoreduktasen katalysieren sowohl die Elektronenabgabe (= Oxidation), als auch die Elektronenaufnahme (= Reduktion). Für die Biolumineszenz-Reaktion (siehe Figur 5) wird molekularer Sauerstoff und ein langkettiger Aldehyd (hier Hexadecanal) benötigt, der in eine Carbonsäure (R-COOH) umgesetzt wird. Im Falle von „*Vibrio*“ besitzt die Luciferase die Aktivität einer Flavin-abhängigen Monooxygenase, die die Übertragung genau eines Sauerstoffmoleküls (O_2) auf ein Substrat katalysiert.



Figur 5: Allgemeine Gleichung der Biolumineszenzreaktion in Bakterien. Die reduzierte Form des FMN ($FMNH_2$) und der Aldehyd werden sauerstoffabhängig zur oxidierten Form (FMN) und einer Carbonsäure (R-COOH) umgesetzt [6].

In vitro liegt der Wellenlängenpeak des emittierten Lichts bei 490 nm, welches dem blau-grünen Bereich des Lichtspektrums entspricht. In vivo werden dagegen Wellenlängen von 472 nm bis 545 nm beobachtet, da die Anregungsenergie auf fluoreszierende Proteine (Fluorophore) wie etwa dem gelbfluoreszierenden Protein (YFP) übertragen wird. Die Energie wird nicht in Form eines Photons, sondern über einen strahlungsfreien Energietransfer an das Protein übertragen, auch bekannt als Förster-Resonanzenergietransfer oder „fluorescence resonance energy transfer“, kurz FRET. Für eine solche Energieübertragung muss der Luciferin/Luciferase-Komplex direkt an dem jeweiligen fluoreszierenden Protein gebunden sein.

Da die Biolumineszenzreaktion besonders wegen der Regenerierung der Komponenten sehr viel Energie verbraucht, gibt es hierfür in den Zellen einen Kontrollmechanismus. Für das Überleben eines Symbionten in einem Leuchtorgan seines Wirtes bedeutet das, dass eine biolumineszente Aktivität nur zugelassen wird, wenn dies auch nötig ist. Ermöglicht wird diese Regulation durch einen funktionellen Genabschnitt, der zusammen mit kodierten Genprodukten und Kontrollregionen das sogenannte lux-Operon bildet [13]. Operons sind als Funktionseinheiten der DNA hauptsächlich aus Prokaryoten bekannt, wobei das lux-Operon mit der Architektur „luxCDABEG“ zwischen den verschiedenen Arten lumineszierender Bakterien hochkonserviert ist (vergleiche Figur 6 aus EP 0 922 106 B1).



Figur 6: Schematische Darstellung des lux-Operon als induzierbares, genetisches Konstrukt zur Verwendung in einer als Biosensor fungierenden Zelle (EP 0 922 106 B1).

Alle Proteine, die etwas mit der Biolumineszenzreaktion assoziiert sind, werden durch die lux-Gene codiert (lateinisch „lux“ = Licht). Die Einheit umfasst vor allem die für eine selbstinduzierte Herstellung (Autoinduktion) notwendigen Gene, die durch eine Regulationseinheit (Operator) kontrolliert werden. Damit werden bei Bedarf die zur Biolumineszenz notwendigen Gene verstärkt ab-

gelesen und die Proteine vermehrt synthetisiert. Dieser Regulationsmechanismus führt bei einer Zelldichte von 10^{10} bis 10^{11} Zellen/ml zu einer nachweisbaren Biolumineszenz in Leuchtorganen von Kalmaren und Fischen.

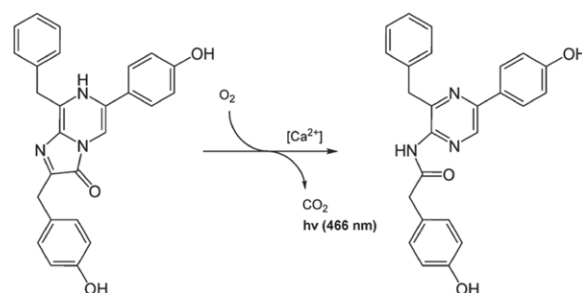
Isolierte und klonierte DNA Abschnitte aus dem lux Operon werden unter anderem genutzt, um andere Organismen mit der Fähigkeit der Biolumineszenz auszustatten, zum Beispiel einen anderen Mikroorganismus (EP 1 212 429 B1). Mit einem bakteriellen Luciferase-Genkomplex transformierte Mikroorganismen werden in Nachweisverfahren für toxische Substanzen in flüssiger oder gasförmiger Umgebung eingesetzt (DE 3 833 628 A1) oder als lichtproduzierende Biosensoren zur Erfassung von Umweltsignalen (EP 0 922 106 B1).

4 Das Photoprotein Aequorin

Ein anderes lichtemittierendes System, das ohne einen enzymatischen Katalysator auskommt, ist aus den biolumineszenten Quallen der Gattung „*Aequorea*“ bekannt. In „*Aequorea victoria*“ umfasst das System das selbstleuchtende Photoprotein Aequorin sowie ein weiteres Fluorophor, das so genannte „grün-fluoreszierende Protein“ („green fluorescent protein“, kurz GFP). Aequorin wurde ursprünglich 1961 von Osamu Shimomura aus „*Aequorea victoria*“ isoliert, wofür ihm 2008 (zusammen mit Martin Chalfie und Roger Tsien) für die „Entdeckung und Weiterentwicklung des grün fluoreszierenden Proteins“, der Nobelpreis für Chemie verliehen wurde [14].

Bei Aequorin liegt die lichtgebende Komponente Coelenterazin als *bona fide* Luciferin gebunden vor [15]. Aequorin besteht somit aus dem eigentlichen Apoprotein, dem Apoaquorin (189 Aminosäuren) sowie dem viel kleineren Molekül „Coelenterazin“ [16], dass mit hoher Affinität als prosthetische Gruppe über eine Peroxidbrücke (kovalent) an das Protein gebunden ist. Somit wird auch das für die Reaktion notwendige oxidierende Agens O_2 praktischerweise gleich mitgeführt. Die Lichtreaktion erfolgt durch Zugabe von Calciumionen, nachdem die drei Bindungsstellen am Photoprotein mit Calciumionen besetzt werden und sich als Folge die Konformation des Proteins so ändert, dass eine intramolekulare Reaktion ausgelöst wird (siehe

Figur 7). Hierbei entsteht das Anion von Coelenteramid, das nach CO_2 -Abspaltung (Decarboxylierung) in einen elektronisch angeregten Zustand gebracht wird. Nach Relaxation in den Grundzustand wird ein Lichtquant mit einer Wellenlänge von $\lambda_{max} \sim 470$ nm emittiert, weshalb es auch als das „blau-fluoreszierende Protein“ („blue fluorescent protein“, kurz BFP) bezeichnet wird [15]. Aequorin kann nach Freisetzung der gebundenen Calciumionen durch molekularen Sauerstoff und einem neuen Molekül Coelenterazin regeneriert werden.



Figur 7: Aequorin katalysiert die Oxidation von Coelenterazin (links) zu Coelenteramid [16].

Da die Lichtreaktion des Aequorins von Calciumionen abhängig ist [17], kann das System als intramolekularer Calciumsensor verwendet werden. Dies war insbesondere nach Klonierung der cDNA von Apoaquorin (1985) möglich [18]. Das Gen wurde in verschiedenen Ausführungen als Patent angemeldet, zum Beispiel US 5 292 658 A, EP 302 381 B1, EP 0 187 519 B1. Beispielfhaft ist auch der Einsatz zum Nachweis der Änderung intrazellulären Calciumkonzentration (EP 1 084 406 B1, EP 1 666 488 B1) und die Nutzung in einem Bindungsassay, um spezifische Komponenten im Blut nachzuweisen (EP 0 956 507 B1). Durch Einschleusen von Apoaquorin in Organellen (abgegrenzte Bereiche in einer Zelle) mithilfe einer dem Gen vorgeschalteten Signalsequenz kann die Calciumkonzentration auch in Mitochondrien [19] und im Zellkern [20] gemessen werden.

5 Das Grün fluoreszierende Protein – GFP

Dass *Aequorea victoria* insgesamt blau-grün fluoresziert liegt daran, dass GFP in der Lage ist, die vom Aequorin stammende Anregungsenergie über die strahlungslose

Energieübertragung (FRET) zu absorbieren und die Energie in Form von grüner Fluoreszenz zu emittieren. Große Bedeutung hat GFP in der Zell- und Molekularbiologie erlangt, nachdem es 1994 gelang, GFP als Marker für andere Proteine zu nutzen [21]. Es kann mit beliebigen anderen Proteinen fusioniert werden und gilt in fast allen eukaryotischen Zellen als nicht-toxisch. Bei der Herstellung von GFP-Fusionsproteinen wird die DNA des zu untersuchenden Proteins mit der GFP-DNA verknüpft und über ein Transportvehikel (Vektor) in die Zielzelle gebracht, die dann das Fusionsprotein selbst herstellt. Diese Methode findet Anwendung in der Diagnose (EP 1 064 360 B1) und/oder in Hoch-Durchsatz-Screeningverfahren (EP 1 265 990 B1). Mithilfe der optisch anregbaren Fluoreszenz des GFP eignet es sich besonders für die Untersuchung biologischer Prozesse *in vivo*, beispielsweise in einem Verfahren zur Beobachtung der Progression oder Metastase eines Tumors (EP 0 979 298 B1).

Mittels Fluoreszenzmikroskopie kann über das zum Leuchten angeregte GFP die zeitliche und räumliche Lokalisation des Zielproteins in der Zelle bestimmt werden. Aktuelle Verfahren der Fluoreszenzmikroskopie (Vertico-SMI, STED-Mikroskopie, 3D-SIM-Mikroskopie, Photoactivated Localization Microscopy) können mittels der photoaktivierbaren fluoreszierenden Proteine markierte Strukturen über die optische Auflösungsgrenze hinaus auflösen. Mittlerweile gibt es modifizierte GFP mit anderen Fluoreszenzspektren wie CFP (cyan) und YFP (yellow) sowie verbesserte Varianten wie das „enhanced GFP“ (eGFP) (US 6 172 188 B1).

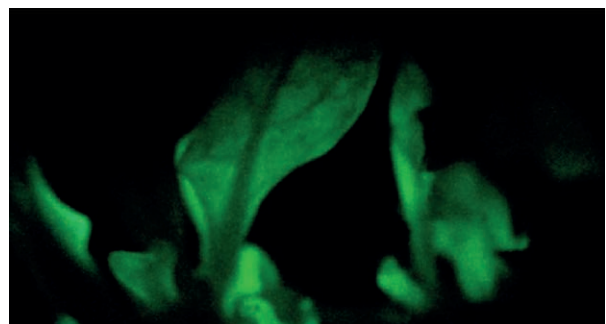
Darüber hinaus finden sich auch skurrile Anwendungen, etwa die Herstellung von genetisch manipulierten, leuchtenden Tierformen wie den Zebrafärbchen („*Danio rerio*“). Dieser in den USA käufliche und unter dem Markennamen GloFish [22] bekannte Aquarienfisch ist tatsächlich Gegenstand eines Patents (US 8 581 024 B2) mit dem Titel „Blue transgenic fluorescent ornamental fish“. Allerdings ist der Vertrieb und die Zucht gentechnisch veränderter Organismen (GVO) in der Europäischen Union gemäß Richtlinie 2001/18/EG (Freisetzungsrichtlinie) beziehungsweise in Deutschland durch das Gesetz zur Regelung der Gentechnik (Gentechnikgesetz) verboten.

6 Leuchtmittel durch Biolicht?

Neben den vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten in der medizinisch-therapeutischen Forschung gibt es Bestrebungen, lichterzeugende GVO zu konstruieren, um diese als aktive Lichtquelle einzusetzen. Eines der Hauptprobleme dabei ist, dass die chemische Reaktion nachzuliefernde Chemikalien (Edukte) benötigt, die darüber hinaus nicht als Abfall anfallen. Ein Glühwürmchen hat das Problem insofern nicht, da es das bei der Reaktion entstehende Oxiluciferin wieder aufbereitet.

Die theoretische Überlegung, ein komplettes lichterzeugendes System in einen Organismus zu überführen (siehe Übersichtsartikel [23]), haben Pflanzenforscher bereits in den 1980ern durch die erste leuchtende Pflanze umgesetzt [24]. Damals wurde das Luciferasegen von „*Photinus pyralis*“ mittels eines Pflanzentumor-induzierenden Plasmids aus „*Agrobacterium tumefaciens*“ in Protoplasten (Einzelzellen mit entfernter Zellwand) einer Tabakpflanze transferiert. Die transgenen Pflanzen produzierten kurzzeitig ein schwaches Licht, wenn Sie mit einer millimolaren Lösung des Luciferins sowie ATP versorgt wurden.

Ein anderes Forscherteam erzeugte im Jahr 2010 mithilfe des lux-Operons aus „*Photobacterium leiognathi*“ und den luxCDABEG-Genen die erste schwach selbstleuchtende (autolumineszierende) Tabakpflanze [25] (siehe Figur 8).

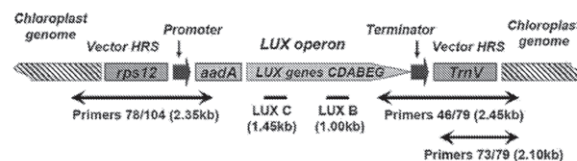


Figur 8: Visualisierung der Autolumineszenz transgener Tabakpflanzen, die das bakterielle lux-Operon im Genom von Chloroplasten enthalten (US 2013/0074221 A1).

Zur Transformation wurde eine geeignete Expressionskassette in das Genom von Chloroplasten (photosynthetisch aktive Organelle) junger Tabakpflanzenblätter mittels des sogenannten Mikroprojektil-Bombardements

eingeschleust (angemeldet als WO 2011/106001 A2) (siehe Figur 9).

Eines der größten Herausforderungen bei der Erzeugung leuchtender Organismen ist die Regenerierung der oxidierten Luciferine. Hierbei gelang es einem britischen Team im Jahr 2010 Bakterien mit Luciferase und Luciferin so auszustatten, dass die Einzeller kontinuierlich leuchteten [26]. Neben diversen Verbesserungen der beteiligten Komponenten wurde unter anderem die zuvor gemachte Entdeckung berücksichtigt, dass sich die oxidierten Luciferine mithilfe eines Enzyms, dem „luciferin regenerating enzyme“ (LRE), recyceln lassen [27]. Aus den USA stammt das Projekt „Glowing Plant“ mit der Idee, ein Luciferin/Luciferase System in Bäume einzubringen [28]. Hierbei geht es nicht nur um leuchtende Pflanzen, sondern um die Förderung der sogenannten synthetischen Biologie, einem Fachgebiet im Grenzbereich von Molekularbiologie, organischer Chemie, Ingenieurwissenschaften, Nanobiotechnologie und Informationstechnik. Diese interdisziplinäre Zusammenarbeit hat das Ziel, biologische Systeme mit neuen Eigenschaften zu erzeugen, die in der Natur nicht vorkommen und mit deren Hilfe medizinische oder andere nutzbringende Produkte produziert werden sollen. Auf der einen Seite vielversprechend, auf der anderen jedoch auch beunruhigend, wenn man sich vorstellt, dass dabei ein auf dem Computer-Reisbrett entworfener künstlicher Organismus (GVO) zum (über-)leben erweckt wird. Bedenken gibt es – wie auch schon bei den „gewöhnlichen“ GVO's – insbesondere aufgrund des nicht oder nur schwer kalkulierbaren Risikos, das gentechnisch veränderte Pflanzen mit sich bringen, wenn sie unkontrolliert in die Natur gelangen. Wenn es darum geht, Organismen oder Leuchtpflanzen zu generieren, die soviel Licht produzieren, damit sie als Wegbeleuchtung dienen oder zum Lesen genutzt werden können, muss die Lichtausbeute noch einmal deutlich gesteigert werden. Ob und wann solch ein Organismus im Rahmen eines synthetischen Biologie-Projekts „geschaffen“ werden kann, ist nicht sicher – zumindest aber können die in Rede stehenden Pflanzen bereits vorbestellt werden (siehe [28]). Faszinierende Bilder über lumineszierende Organismen finden Sie auf der Internetseite „Bright & Beautiful Bioluminescence“ (<http://biolum.tumblr.com/>).



Figur 9: Schematische Darstellung der in das Chloroplastengenom integrierten Transformationskassette, die das lux-Operon aus „*Photobacterium leiognathi*“ umfasst. Zur Überprüfung einer erfolgreichen Transformation werden PCR Produkte aus unterschiedlichen Bereichen des Konstrukts untersucht (PCR-Fragmente repräsentiert als Doppelpfeil) (nach US 2013/0074221 A1).

Nicht-Patentliteratur

- [1] HADDOCK HDS. [et al.]: Bioluminescence in the Sea. Annu. Rev. Mar. Sci., Vol. 2, 2010, Seite 443–493.
- [2] KESEL A.: Leuchtende Pilze. Internationaler Studiengang Bionik, 2005, Seite 1–11.
- [3] WOFL: Leuchtkäfer. Übersichtsartikel aus Wikipedia, URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtkäfer> [abgerufen am 02. Mai 2014].
- [4] Photorhabdus luminescens: The Angel's Glow. URL: <http://www.thenakedscientists.com/HTML/articles/article/angel-glow/> [abgerufen am 02. Mai 2014].
- [5] WILSON T. [et al.]: Bioluminescence. Annual Review of Cell and Developmental Biology, Vol. 14, No. 1, 1998, Seite 197–230.
- [6] Luziferine: Übersichtsartikel aus Wikipedia, URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Luciferin> [abgerufen am 02. Mai 2014].
- [7] SHIMOMURA O.: Bioluminescence: Chemical Principles and Methods. World Scientific, New Jersey, London, 2006, ISBN 978-981-256-801-4.
- [8] DAY J.C. [et al.]: Evolution of beetle bioluminescence: the origin of beetle luciferin. Luminescence, Vol. 19, No. 1, 2004, Seite 8–20.
- [9] DE WET JR. [et al.]: Cloning of firefly luciferase cDNA and the expression of active luciferase in Escherichia coli. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Vol. 82, 1985, Seite 7870–7873.
- [10] NEUFELD HA. [et al.]: A rapid method for determining ATP by the firefly luciferin-luciferase system: Experientia, Vol. 31, No. 3, 1975, Seite 391–392.
- [11] HAWRONSKY JJM. [et al.]: ATP: a universal hygiene monitor. In: Trends Food Sci. Technol., Vol. 8, 1997, Seite 79–84.

- [12] LIM E. [et al.]: In vivo bioluminescent imaging of mammary tumors using IVIS spectrum, *J Vis Exp*, 26, 2009, pii 1210.
- [13] SEPTER AN. [et al.]: Coordination of the Arc regulatory system and pheromone-mediated positive feedback in controlling the *Vibrio fischeri* lux operon, *PLOS*, Vol. 7, No. 11, 2012, Seite 1–11.
- [14] SHIMOMURA O.: The discovery of aequorin and green fluorescent protein, *Journal of Microscopy*, Vol. 217, Seite 3–15.
- [15] SHIMOMURA O. [et al.]: Mechanism of the luminescent intramolecular reaction of aequorin, *Biochemistry*, Vol. 13, No. 16, 1974, Seite 3278–3286 – ISSN 0006-2960
- [16] Coelenterazin: Übersichtsartikel aus Wikipedia, URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Coelenterazin> [abgerufen am 02. Mai 2014].
- [17] SHIMOMURA O. [et al.]: Calcium binding, quantum yield, and emitting molecule in aequorin bioluminescence, *Nature*, Vol. 227, 1970, Seite 1356–1357 – ISSN 0028-0836
- [18] INOUE S. [et al.]: Cloning and sequence analysis of cDNA for the luminescent protein aequorin, *Proc Natl Acad Sci USA*, Vol. 82, No. 10, 1985, Seite 3154–3158.
- [19] RIZZUTO R. [et al.]: Rapid changes of mitochondrial Ca^{2+} revealed by specifically targeted recombinant aequorin, *Nature*, Vol. 358, No. 6384, 1992, Seite 325–327 ISSN 0028-0836.
- [20] BRINI M. [et al.]: Nuclear Ca^{2+} concentration measured with specifically targeted recombinant aequorin, *EMBO J.*, Vol. 12, No. 12, 1993, Seite 4813–4819.
- [21] CHALFIE M. [et al.]: Green fluorescent protein as a marker for gene expression, *Science*, Vol. 263 (5148), 1994, Seite 802–805.
- [22] GloFish Experience the Glow, URL: <http://www.glofish.com/> [abgerufen am 02. Mai 2014].
- [23] GREER III. LF. [et al.]: Imaging of light emission from the expression of luciferases in living cells and organisms: a review, *Luminescence*, Vol. 17, 2002, Seite 43–74.
- [24] OW DW. [et al.]: Transient and stable expression of the firefly luciferase gene in plant cells and transgenic plants, *Science*, Vol. 234, No. 4778, 1986, Seite 856–859.
- [25] KRICHEVSKY A. [et al.] Autoluminescent Plants, *PLoS ONE*, Vol. 5, No. 11, 2010, Seite 1–5.
- [26] E.glowli cambridge, URL: <http://2010.igem.org/Team:Cambridge> [abgerufen am 02. Mai 2014].
- [27] GOMI K [et al.]: Oxyluciferin, a luminescence product of firefly luciferase, is enzymatically regenerated into luciferin, *J Biol Chem*, Vol. 276, No. 39, 2001, Seite 36508–36513.
- [28] Glowing Plant: Natural Lighting without Electricity, URL: <http://www.glowingplant.com/> [abgerufen am 02. Mai 2014].

Technische Entwicklungen in der Fahrzeug- außenbeleuchtung: LEDs, OLEDs und Laser- dioden als innovative Lichtquellen der Zukunft

Dipl.-Phys. Anika Kohlstedt, Dr. Torsten Schröder, Patentabteilung 1.54

Neue Lichtquellen erobern die Außenbeleuchtung des Fahrzeugs. LED-basierte Scheinwerfer und Rückleuchten bieten neben einem attraktiven Design auch die Möglichkeit, die Lichtfunktionen am Fahrzeug noch variabler zu gestalten. Die neueren Lichttechnologien, basierend auf Laserdioden und organischen Leuchtdioden (OLEDs), bieten gegenüber LED-, Halogen- oder Xenon-basierter Fahrzeugbeleuchtung noch mehr Sicherheit auf Straßen, höhere Lichteffizienz und eine Vielzahl neuer Designmöglichkeiten. Der Artikel stellt unterschiedliche optische Lösungskonzepte vor, mit denen verschiedene Lichtfunktionen realisiert werden.

1 Einleitung

Seit den 1990er Jahren wächst der Anteil der LED-Beleuchtung bei Fahrzeugen. Während LEDs aufgrund geringerer lichttechnischer Anforderungen an die Heckleuchten im Vergleich zu Frontscheinwerfern zunächst in der Heckbeleuchtung eingesetzt wurden, hielten sie mit steigenden Lichtstärken Einzug in die Fahrzeugfront. In Hauptlichtfunktionen wie Abblend- oder Fernlicht wurden sie zunächst in Premiumfahrzeugen eingesetzt wie dem Lexus LS 600h im Jahr 2006, als erstes Auto mit LED-Abblendlicht, dem Cadillac Escalade Platinum in 2008 und dem Audi R8 in 2009. Seitdem finden LEDs in zahlreichen Scheinwerfern Verwendung [1]. Die Argumente, alle Halogen-Scheinwerfer durch optimierte LED-Konfigurationen zu ersetzen, sind: weniger Stromverbrauch, geringere CO₂-Erzeugung, lange Lebensdauer, kleine Baugröße, weniger Gewicht und nicht zuletzt eine verbesserte Lichtleistung und Sicherheit mit Vorteilen bei Nachtfahrten [2].

Neben der Entwicklung von LED-basierten Scheinwerfersystemen werden seit einigen Jahren auch Laser- und OLED-basierte Lichttechnologien in die Entwicklung der nächsten Fahrzeugbeleuchtungsgeneration mit einbezogen. Bei einem bekannten deutschen

Autohersteller soll der Laser-Scheinwerfer bereits 2014 mit dem BMW i9 in Serie gehen [3]. Die nochmals höhere Effizienz gegenüber LEDs wird einen wichtigen Beitrag zur Energieeinsparung und Verbrauchsreduzierung leisten.

OLEDs gelten als nächster großer Entwicklungsschritt für die Signallichtfunktionen [4] und für die Innenraumbeleuchtung. Die OLEDs sind flexible, hauchdünne Flächenlichtquellen, die eine Vielzahl neuer Designmöglichkeiten eröffnen und Effizienzverluste durch Lichtleiter, Filter oder Milchglasscheiben reduzieren.

2 Vormarsch der LED-Lichtquellen

LEDs werden aufgrund ihrer hohen Energieeffizienz und langen Lebensdauer heutzutage in einer Vielzahl von Anwendungsbereichen wie Raumbeleuchtung, Effektbeleuchtung, Taschenlampen, LCD-Bildschirmen, Medizintechnik und sogar teilweise in der Straßenbeleuchtung eingesetzt. So verbraucht eine LED weniger als ein Drittel der Energie einer herkömmlichen Glühlampe zur Erzeugung derselben Lichtstärke und erreicht diese in einer Zeit von nur wenigen Millisekunden in vollem Ausmaß [5]. Diese Vorzüge führten auch zum Einzug der LED in die Fahrzeugbeleuchtung.

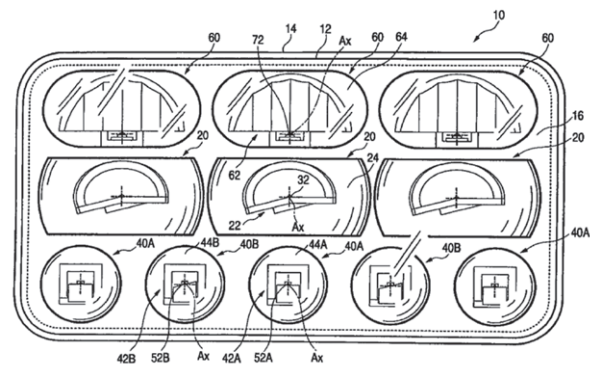
2009 brachte Audi den R8 mit einem adaptiven Frontscheinwerfer heraus, der vollständig auf LED-Technik basiert [6]. Die Zukunft jedoch soll den LED-Matrixscheinwerfern gehören, welche nicht mehr aus einzelnen Modulen für die unterschiedlichen Lichtfunktionen bestehen, sondern in denen die LEDs entsprechend der Fahrsituation einzeln beziehungsweise in Gruppen angesteuert werden. Dadurch wird die Leuchtdichte herabgesetzt oder es werden gezielt Bereiche des Sichtfelds ausgeleuchtet oder ausgeblendet.

Jedoch müssen die Kfz-Beleuchtungen den Erfordernissen der gültigen ECE-Regelungen (ECE = Economic Commission for Europe) genügen [7]; sie sollen den Rahmen für eine zuverlässige und sichere Funktion abstecken. Dies betrifft unter anderem die Beleuchtungsstärke der Lichtverteilung in bestimmten Messpunkten, die eine gute Erkennbarkeit ohne Blendung anderer Verkehrsteilnehmer garantieren soll. Dass es trotzdem zu einem Blendeindruck durch LED-Module mit Signalwirkung kommen kann, liegt nicht zuletzt an dem eigentlichen Plus der LED – der gestalterischen Freiheit. So kann es bei sehr kompakt gestalteten LED-Leuchten zu einer hohen Lichtstärke auf einer kleinen Fläche – also einer hohen Leuchtdichte – kommen. Trotz Einhaltung der ECE-Vorgaben entsteht eine Blendwirkung [6]. Hier bleibt immer noch neuer Raum für die Anpassung der LED-Leuchten an die Fahrerbedürfnisse durch eine weitere Verbesserung der adaptiven Ansteuerung und Entwicklung neuer Optikkomponenten, die einen optimalen Kompromiss zwischen Design, Kosteneffizienz und Sicherheit bilden. Im Folgenden sollen einige Entwicklungsschritte in der LED-Technik anhand von Patentanmeldungen der letzten Jahre vorgestellt werden.

2.1 Frontscheinwerfer mit LED-Modulen und LED-Matrix

Das Patent DE 103 40 433 B4 zeigt einen Frontscheinwerfer auf LED-Basis (vergleiche Figur 1), der aus Gruppen von LED-Modulen besteht, die in Summe eine gewünschte Lichtverteilung, hier entweder ein Abblend- oder ein Fernlichtbündel, erzeugen. Zur Erzeugung des Fernlichts werden, wie auch bei der Verwendung anderer Lichtquellen üblich, Module

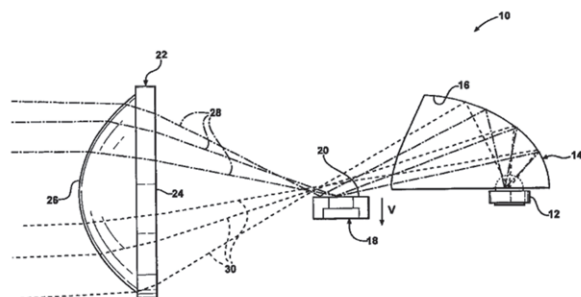
vom Reflexionstyp (60) verwendet. Die Lichtquelle liegt im Brennpunkt eines Reflektors, der das Licht in gewünschter Weise auf eine das Modul abschließende Lichtscheibe richtet. Die Lichtverteilung kann hierbei durch die Form des Reflektors und den Einsatz von optischen Elementen auf oder in der Lichtscheibe gesteuert werden. Das Abblendlicht wird durch Module (20) vom Projektionstyp erzeugt. Dazu wird das von der Lichtquelle kommende Licht durch den Reflektor entlang einer Blendkante fokussiert, die durch eine Blende im zweiten Brennpunkt des Reflektors erzeugt wird. Diese Kante realisiert die gesetzlich vorgeschriebene Hell-Dunkel-Grenze, welche durch eine der Blende im Strahlengang nachgeordnete Linse auf die Straße projiziert wird. Weitere Module (40), welche ebenfalls eine Blendkante aufweisen, die jedoch direkt am Ort der Lichtquelle definiert wird, werden als Direktprojektionstyp bezeichnet. Sie sorgen für eine punktuelle Ausleuchtung von Bereichen, in denen eine höhere Beleuchtungsstärke erforderlich ist. Durch den gleichzeitigen Betrieb mehrerer Module werden die gesetzlich vorgeschriebenen Beleuchtungsstärken erreicht und zum Wechsel zwischen Abblendlicht und Fernlicht die einzelnen Gruppen ein- beziehungsweise ausgeschaltet.



Figur 1: Fahrzeugscheinwerfer mit verschiedenen LED-Modulen zur Erzeugung einer definierten Lichtverteilung (aus DE 103 40 433 B4).

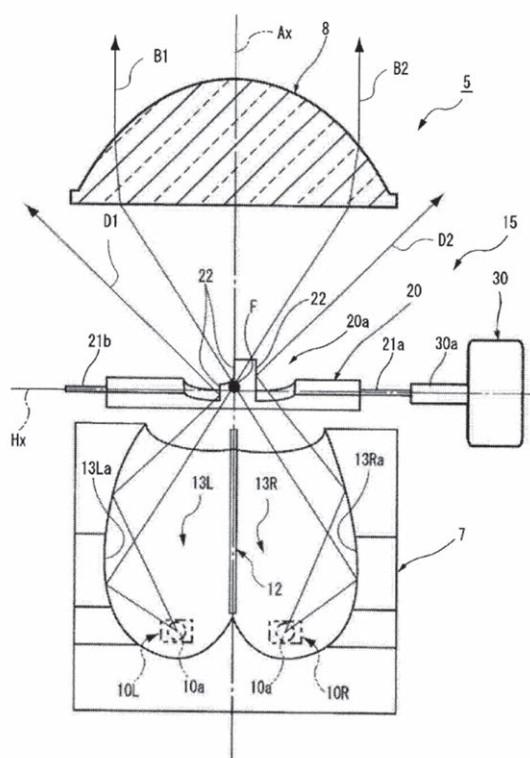
Daneben gibt es Abblendlichtmodule, die gleichzeitig zur Ausbildung einer Fernlichtverteilung ausgebildet sind. So zeigt die Patentanmeldung DE 10 2006 051 029 A1 ein Abblendlichtmodul (10) (vergleiche Figur 2), bei dem die Blende (18) beweglich gestaltet ist und aus dem Strahlengang heraus bewegt werden kann. So kann die Hell-Dunkel-Grenze definiert verschoben

werden und die Blende gelangt im Falle des Fernlichts komplett aus dem Strahlengang heraus. In diesem Beispiel sorgt der Einsatz des adaptiven Projektionsmoduls für die Erzielung einer hohen Beleuchtungsstärke von Fern- und Abblendlicht mit einer nur geringen Anzahl von Modulen.



Figur 2: LED-Projektionsmodul eines Fahrzeugscheinwerfers, das mittels einer beweglichen Blende 20 die Funktion eines Abblend- und Fernlichts übernehmen kann (aus DE 10 2006 051 029 A1).

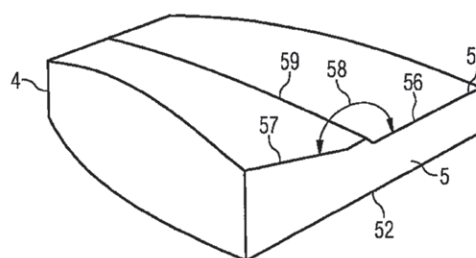
Solch bewegliche Blenden können wie im obigen Beispiel linear bewegt werden oder auch als Drehblende ausgeführt sein wie zum Beispiel in der Druckschrift EP 2 418 121 A2 (vergleiche Figur 3). Je nach aktueller Drehposition befindet sich ein anderes charakteristisches Profil der Blendkante im zweiten Fokus des Reflektors.



Figur 3: Projektionsmodul eines Fahrzeugscheinwerfers mit beweglicher Blende, die gezielt mittige Bereiche für entgegenkommende Fahrzeuge ausblenden kann (aus EP 2 418 121 A2).

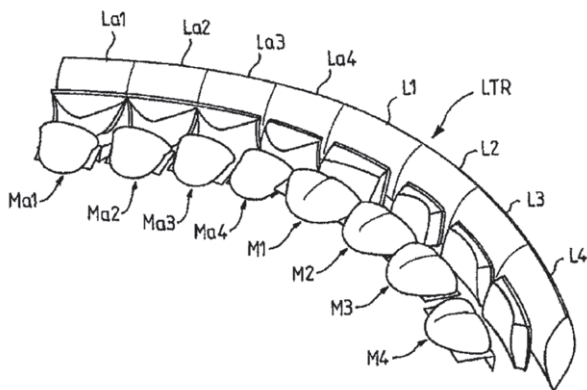
Im hier gezeigten Beispiel übernimmt die Blende zusätzlich die Funktion der gezielten Ausblendung mittiger Bereiche für entgegenkommende Fahrzeuge.

Neben diesen eher klassisch aufgebauten Modulen gibt es immer neue Bestrebungen die Abstrahlcharakteristik und Lichtausbeute durch Entwicklung speziell angepasster Primäroptiken zu verbessern. Diese können wie in der Offenlegung DE 10 2005 017 528 A1 (vergleiche Figur 4) beispielsweise als lichtdurchlässiger Vollkörper ausgebildet sein, an dessen Grenzflächen das Licht, das von einer LED-Lichtquelle in die Lichteintrittsfläche (4) eingekoppelt wird, reflektiert wird. Im genannten Beispiel wird durch einen sogenannten Compound Parabolic Concentrator (CPC) neben der Lichtleitung auch die Projektion der charakteristisch geformten Lichtaustrittsfläche (5) realisiert. Außerdem steuert der CPC durch die Geometrie der Grenzflächen gezielt die Verteilung der Beleuchtungsstärke.



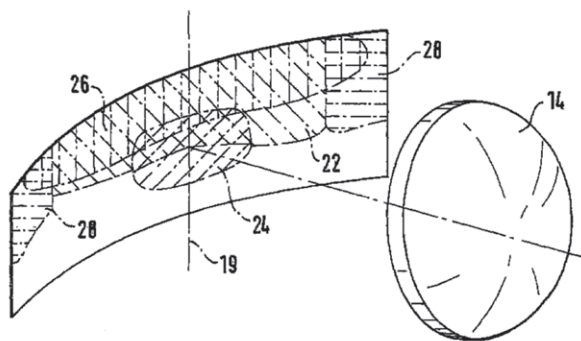
Figur 4: Primäroptik für ein LED-Modul, das durch die Form seiner Oberfläche und des Querschnitts der Austrittsfläche eine definierte Abschnideline für ein Abblendlicht erzeugt (aus DE 10 2005 017 528 A1).

Andere Typen von Primäroptiken werden wiederum als zusätzliche Komponente in ein bestehendes LED-Modul integriert, um die Lichtverteilung, welche durch ein spezielles Design der Leuchte entsteht, an die gesetzlichen Vorgaben anzupassen. In der Druckschrift US 7 934 861 B2 (vergleiche Figur 5) ist eine Reihe von Abblendlichtmodulen in einer geschwungenen Linie angeordnet, die für ein charakteristisches Scheinwerferdesign sorgen soll. Hier sind Korrekturmodule jeweils zwischen den Blendkanten und Linsen angeordnet, deren Form an die jeweilige Modulposition und die gewünschte Abstrahlrichtung angepasst wurde.



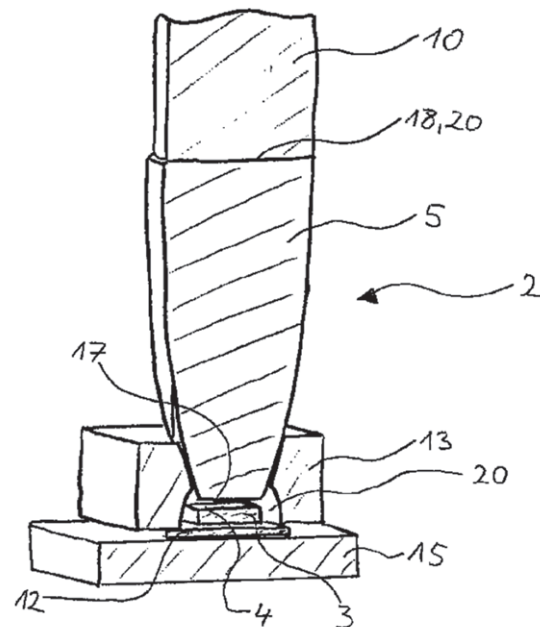
Figur 5: Reihe aus Projektionsmodulen mit Primäroptiken, welche die Lichtverteilung des gebogenen Scheinwerferdesigns an die gesetzlichen Vorgaben anpassen (aus US 7 934 861 B2).

Eine weitere Alternative zum Einsatz der klassischen Beleuchtungsmodule ist die Verwendung einer LED-Matrix. Sie bietet den Vorteil der Reduktion der Anzahl optischer Einheiten im Frontscheinwerfer, was zu einer Reduktion von Herstellungskosten führen kann. Außerdem bildet die LED-Matrix eine kompakte Einheit mit geringer Bautiefe, wodurch sie flexibler an unterschiedliche Designvorstellungen anpassbar ist. Dies führt zu mehr gestalterischer Freiheit bezüglich der Integration des Scheinwerfers in das Karosseriedesign des Fahrzeugs. Bereits 2001 wird in der Offenlegungsschrift zum späteren Patent DE 100 09 782 B4 dieses Prinzip vorgestellt (vergleiche Figur 6), in dem gezielt einzelne Teilmengen (22, 24, 26, 28) der LEDs einer Matrix angesteuert werden, um verschiedene Lichtfunktionen zu erfüllen. Zudem können diese LEDs unterschiedliche Farben erzeugen, die verschiedene Signalfunktionen übernehmen oder flächig weißes Licht für den Hauptscheinwerfer bereitstellen.



Figur 6: Schematische Darstellung einer Matrix von Halbleiterlichtquellen, die durch Ansteuerung unterschiedlicher Bereiche der Matrix unterschiedliche Lichtverteilungsmuster erzeugen kann (aus DE 100 09 782 B4).

Die Lichtausbeute und charakteristische Lichtverteilung solcher Matrizen kann durch die bereits erwähnten Primäroptiken, zum Beispiel in Form von CPCs wie sie in der Druckschrift DE 103 14 524 A1 gezeigt werden (vergleiche Figur 7), weiter optimiert werden. Dort wird die Divergenz der LEDs gezielt gesteuert und durch zusätzliche Reflektorkörper, die das LED-Element umschließen, werden Verluste vermieden. Die Primäroptiken bilden eine Matrix und sind weitestgehend lückenlos angeordnet. Eine Sekundäroptik sorgt für eine Lichtmischung und/oder eine Steuerung der Gesamtlichtverteilung der Matrix.



Figur 7: Primäroptik einer LED in einem Matrix-Scheinwerfer, die als Konzentrator ausgebildet ist und zusätzlich einen Reflektor 20 über der LED aufweist. Der Reflektor sorgt für eine verlustfreie Einkopplung in den Konzentrator. Der Konzentrator ermöglicht eine gezielte Steuerung der Divergenz des abgestrahlten Lichts (aus DE 103 14 524 A1).

Andere Ansätze verfolgen, wie in der Druckschrift DE 10 2011 054 229 A1, eine Vergrößerung der Divergenz des Lichts der einzelnen Lichtquellen der Matrix, um für eine homogene Lichtverteilung ohne Schatten zwischen den Matrixelementen zu sorgen. Hierzu ist jeder Lichtquelle ein Voroptikelement zugeordnet, das in Abstrahlrichtung für eine Aufweitung des Lichts sorgt. Die einzelnen Voroptikelemente sind über einen Zusammenführungsabschnitt mit einem abschließenden Mischabschnitt einstückig miteinander verbunden.

Im A8 von Audi wurde ein Scheinwerfer vom Matrix-Typ bereits realisiert [8]. Dort werden 25 Fernlicht-Leuchtdioden verwendet, die so angesteuert werden, dass einzelne Bereiche gezielt ausgeblendet werden können, um eine Blendung anderer Verkehrsteilnehmer zu vermeiden. Dieses blendfreie Dauerfernlicht gewährleistet Sicherheit durch eine bessere Ausleuchtung des Sichtfelds und bietet den Vorteil, dass keine mechanischen Komponenten zur Variation der Lichtverteilung benötigt werden.

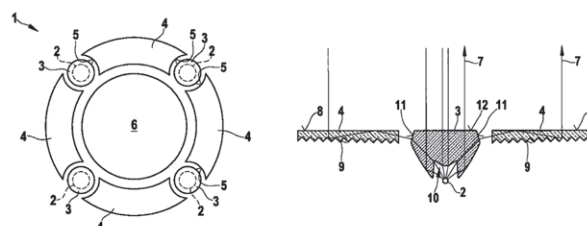
Zurzeit sind solche LED-Vollscheinwerfer noch im Oberklassesegment der Automobilhersteller angesiedelt. Doch zeigen die Entwicklungen der letzten Jahre einen deutlichen Trend, der mit den Schlagwörtern Effizienz, Adaptivität, Wohlbefinden und Sicherheit in Richtung einer Anwendung der LED-Technik in allen Klassen-segmenten weist.

2.2 LED-Technik für Signalleuchten

Die Vorzüge der LED-Technik wurden ebenfalls in der Entwicklung neuer Signalleuchten für Front- und Heckscheinwerfer berücksichtigt. Durch vielfältige Designvarianten schaffen die Autohersteller ein charakteristisches Tag- und Nachtdesign mit Wiedererkennungswert und sorgen durch Innovationen in der Entwicklung neuer Optikelemente und dynamischer Ansteuerungen der Lichtquellen für eine intuitivere Wahrnehmung von Signalen.

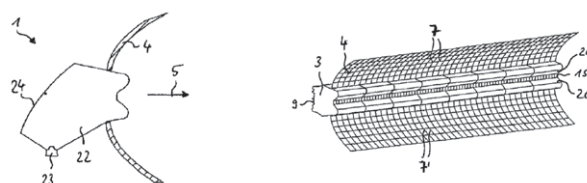
Für die Bereitstellung eines Tagfahrlichts gehören LEDs bereits zum Stand der Technik. Zur optimalen Bauraumausnutzung und Erzeugung eines markanten Designs wird das Licht der LEDs in Lichtleiterstrukturen eingekoppelt, die andere Lichtmodule umrahmen oder gezielte Akzente setzen. Das Patent DE 10 2005 043 992 B4 zeigt eine solche Leuchtengestaltung (Figur 8), welche vier LED-Lichtquellen (2) für das Signallicht verwendet, die über Lichtleiter (4) optisch miteinander verbunden werden. Jeder Lichtquelle ist hierbei eine Vorsatzoptik (3) zugeordnet, um das Licht zum einen in Richtung der Einkoppelflächen der Lichtleiter zu lenken und zum anderen direkt in die Hauptabstrahlrichtung (7) abzugeben. Die Lichtleiter weisen auf ihrer Rückfläche (9)

Auskoppelemente auf, die dafür sorgen, dass das Licht senkrecht auf die Abstrahlfläche (8) trifft und den Lichtleiter in Hauptabstrahlrichtung verlässt, um für ein geschlossenes Lichtdesign zu sorgen. Jedoch sind die Flächen der Lichtleiter dunkler als die Bereiche, in denen das Licht der LEDs direkt abgestrahlt wird, sodass sie hauptsächlich eine Designfunktion erfüllen.



Figur 8: Links: Frontansicht eines Fahrzeugscheinwerfers mit einer kreisförmigen Lichtleiterstruktur 4, zur Erzeugung einer optisch geschlossenen Signallichtfunktion. Rechts: Querschnitt einer LED mit zugehöriger Primäroptik und anschließender Lichtleiterstruktur (aus DE 10 2005 043 992 A1).

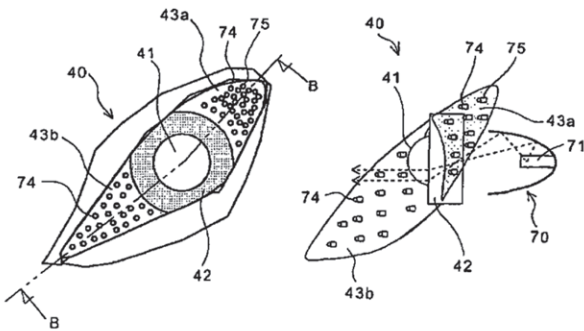
Bei der in der Druckschrift DE 103 14 257 A1 gezeigten Leuchte dient die Lichtleiterstruktur hingegen als Hauptlichtquelle und geht über eine reine Designfunktion hinaus (Figur 9). Eine langgestreckte Vorsatzoptik (3) ist vor einer Reihe LEDs angeordnet. Hier wird das Licht direkt, aber trotzdem linienförmig, abgestrahlt. Zudem ist die Vorsatzoptik in einen Reflektor (7) eingebettet, wodurch das optische Erscheinungsbild einer Gasentladungslampe imitiert wird.



Figur 9: LED-Modul mit einer langgestreckten Primäroptik (3, 22), deren Lichtaustrittsfläche (20) zentral in einen Reflektor (4) eingebettet ist (links: Querschnitt des Moduls, rechts: perspektivische Ansicht des Moduls) (aus DE 103 14 257 A1).

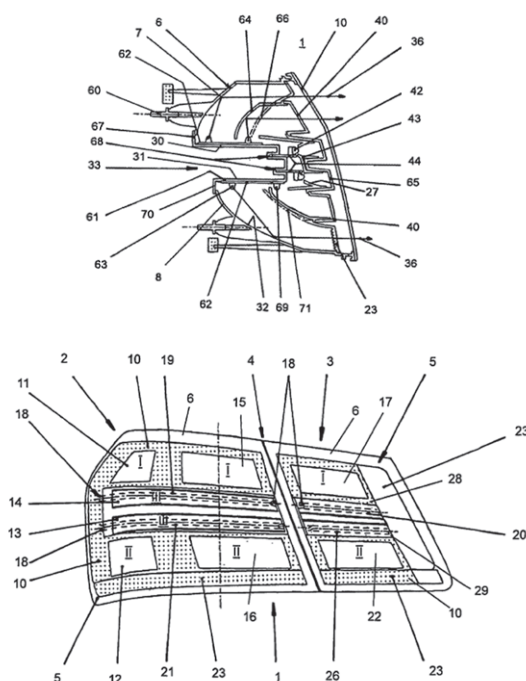
Eine weitere bekannte Anwendung ist der Einsatz von LEDs für Blinklichter. In der Offenlegungsschrift DE 10 2006 017 234 A1 wird zum Beispiel ein Motorradscheinwerfer mit augenförmigem Design gezeigt (vergleiche Figur 10). Die Pupille wird durch das

Hauptlicht (42) gebildet und die seitlichen Bereiche (43) sind mit LEDs bestückt. Der über der Pupille liegende Bereich (43a) erfüllt hierbei die Funktion eines Blinklichts mit entsprechend farblich abgestimmten gelben LEDs.



Figur 10: Rechter Frontscheinwerfer eines Motorrads mit augenförmigem LED-Design (aus DE 10 2006 017 234 A1).

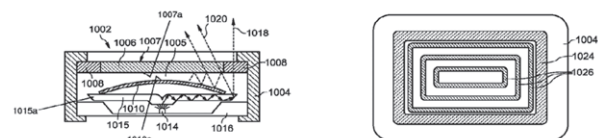
Neben der Ausgestaltung nur einzelner Signallichtfunktionen in LED-Technik in Frontscheinwerfern zeigt die Patentschrift EP 1 970 250 B1 (vergleiche Figur 11) eine Heckleuchte, die komplett auf LED-Lichtquellen basiert. Sie besteht aus einer Lichtscheibe (10), hinter der einzelne Leuchtfelder ausgebildet sind. Diese übernehmen unterschiedliche Lichtfunktionen wie die eines Bremslichts, Blinklichts, Rücklichts oder Nebelschlusslichts.



Figur 11: LED-Heckleuchte (oben: Querschnitt, unten: Frontansicht) (aus EP 1 970 250 B1).

Zu jedem Leuchtfeld gehört ein Reflektor mit einer LED im Brennpunkt. Die Reflektoren werden von einer inneren Lichtscheibe (40) abgeschlossen. Um ein möglichst homogenes Leuchtendesign zu gewährleisten, sorgen stabförmige Lichtleiter (19, 21) im hinteren, reflektierend ausgestalteten Gehäusebereich für eine Ausleuchtung der gesamten Lichtscheibenfläche. So wird ein einzelnes Leuchtfeld erst beim Betrieb der entsprechenden Lichtquelle sichtbar.

Eine weitere rein gestalterische Maßnahme stellt die optische Tiefengestaltung der eigentlich flach ausgebildeten LED-Signalleuchten dar. Ein solcher 3D-Effekt kann zum Beispiel virtuell erzielt werden, indem die reflektierten Bilder eines geschlossenen Designs im Verlauf nach innen immer schwächer werden und so einen Eindruck von Tiefe suggerieren. Diese Technik wird in der Druckschrift US 8 475 020 B2 gezeigt.

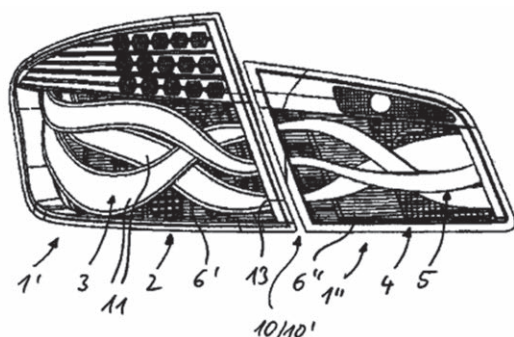


Figur 12: LED-Signalleuchte mit virtuell erzieltm 3D-Effekt (links: Querschnitt, rechts: Frontansicht) (aus US 8 475 020 B2).

Ein Lichtleiter (1015) wird von einem Reflektor (1010) verdeckt. Nur die Auskoppelflächen überragen den Randbereich des Reflektors. Der Teil des Lichts, der gerade nach oben abgestrahlt wird, tritt direkt durch die Lichtscheibe der Leuchte nach außen. Der Teil, der in einen nach innen über den Reflektor geneigten Bereich abgestrahlt wird, wird zwischen dem Reflektor und einem halbdurchlässigen Schirm (1007) reflektiert. So entstehen zur Mitte der Leuchte hin verkleinerte Abbilder des Auskoppelbereichs des Lichtleiters mit kleiner werdender Lichtstärke. Der Form dieser virtuellen 3D-Bilder sind hierbei keine Grenzen gesetzt.

Natürlich besteht auch die Möglichkeit, die Tiefengestaltung über tatsächlich dreidimensional gestaltete Lichtleitelemente zu erreichen. Dies wird zum Beispiel in der Offenlegungsschrift DE 10 2010 050 955 A1 (vergleiche Figur 13) gezeigt. Dort ist eine Lichteinheit (2), beispielsweise zur Erzeugung einer Bremslichtfunktion,

hinter einer weiteren Lichteinheit (3) angeordnet. Diese erzeugt ein Schlusslicht in Form von geschwungenen, sich gegenseitig überlappenden flächigen Lichtleitern.

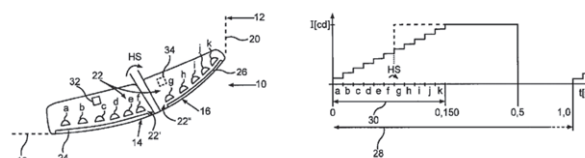


Figur 13: LED-Heckleuchte mit sich überlappenden Lichtleiterstrukturen zur Erzeugung eines Schlusslichts (aus DE 10 2010 050 955 A1).

Zwischen den Lichteinheiten ist zudem ein teildurchlässiger Spiegel (6) angeordnet. Im ausgeschalteten Zustand der hinteren Lichteinheit sorgt er dafür, dass diese nach außen nicht sichtbar ist. Außerdem werden die von den Lichtleitelementen kommenden Lichtstrahlen am Spiegel reflektiert, sodass der Tiefeneindruck der sich überlappenden Struktur noch verstärkt wird.

Auch wenn die LED-Technik viele verschiedene Leuchtendesigns ermöglicht, liegt die Hauptaufgabe der Signalleuchten nach wie vor in der Signalwirkung. Der Vorteil der LED liegt hierbei ganz klar in der kurzen Ansprechzeit [5]. Bei einer LED-Bremsleuchte wird somit eine schnelle Reaktion von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern ermöglicht. Zudem ist durch eine dynamische Ansteuerung der LEDs die Verbesserung der intuitiven Wahrnehmung eines Bremsvorgangs oder einer Abbiegeabsicht möglich. Der Mercedes SLK ist zum Beispiel bereits mit einem getakteten Bremslicht ausgerüstet, das während des Bremsvorgangs an Helligkeit zunimmt und durch ein Pulsieren bei einer Notbremsung den nachfolgenden Verkehr warnt [9]. Die Offenlegungsschrift DE 10 2011 119 231 A1 veranschaulicht das Prinzip eines dynamischen Blinklichts (vergleiche Figur 14), das im Audi A8 bereits zur Anwendung kommt. Dort werden die LEDs einzeln oder in Gruppen nacheinander angesteuert, sodass das Blinksignal in jene Richtung wandernd zunimmt, in die das Fahrzeug abbiegen wird. Dieser intuitive Ein-

druck kann durch eine Ausgestaltung der zugehörigen Lichtleitelemente in Form eines Pfeils beispielsweise noch verstärkt werden wie im Konzeptfahrzeug C-Beyond von Visteon [10].



Figur 14: Dynamisches LED-Blinklicht, dessen LEDs (a bis k) während der Aufleuchtphase (30) nacheinander zugeschaltet werden, sodass sich die Gesamtintensität (I) stufenweise erhöht (aus DE 10 2011 119 231 A1).

3 OLEDs in der Fahrzeugaußenbeleuchtung

Die Anwendung von OLEDs im Leuchtendesign birgt viel Gestaltungsfreiraum für raumsparende flächige Leuchten. Häufig wird die OLED-Technologie heute für dekorative Zwecke in der Innenraumgestaltung oder Architektur eingesetzt. Durch Verwendung von immer flexibleren Trägermaterialien werden auch die Anwendungsmöglichkeiten immer vielfältiger. Ein weiterer Reiz der OLED-Technik besteht in der Möglichkeit, die Leuchtfläche im ausgeschalteten Zustand nach Belieben spiegelnd, neutral weiß oder transparent erscheinen lassen zu können. Im eingeschalteten Zustand können OLEDs in unterschiedlichen Farben leuchten und je nach Ansteuerung der Elektroden eine geschlossene Fläche oder auch sich bewegende Muster und Formen bilden. Hierbei wird eine scharf umgrenzte, homogen ausgeleuchtete Fläche realisiert. Das dünne Design ermöglicht zudem eine Überlagerung mehrerer OLEDs und somit ein dreidimensionales Erscheinungsbild [11].

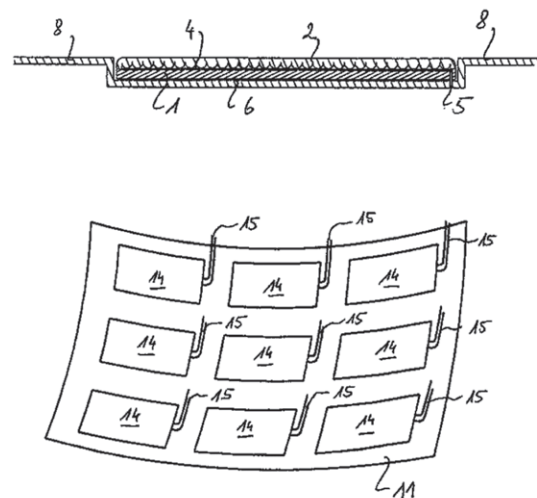
Die Bestrebungen, diese Vorzüge der dünnen Flächenlichtquellen auch für Signalleuchten in Fahrzeugscheinwerfern zu verwenden, sind vorhanden. Jedoch stehen hier immer noch die Forderungen nach einer zeitlich konstanten Leuchtstärke und der Wärmebeständigkeit der OLED im Raum, die für eine serielle Anwendung als Signalleuchte vorauszusetzen sind. In einer Heckleuchte herrschen zum Beispiel Temperaturen von 85 °C oder mehr, denen die Leuchten standhalten müssen [12]. 2011 gelang die Entwicklung einer OLED

mit einer Temperaturbeständigkeit von über 300 h Standhaltezeit bei 85 °C. Im Jahr 2012 ist dieses Ergebnis noch um den Faktor 15 verbessert worden. Im selben Jahr wurde der Prototyp eines OLED-Heckscheinwerfers auf der „electronica“ in München präsentiert. Dieser wird den ECE-Regularien betreffend Farbe und Lichtstärke gerecht (mindestens 610 nm Wellenlänge für rotes Licht und eine Leuchtstärke von 4 cd für das Rücklicht). Der Verlust der Leuchtkraft über die Betriebsdauer ist hierbei durch eine entsprechend angepasste Anfangslichtstärke von 6 cd erreicht worden. Ein anderer Prototyp für eine Heckleuchte ist von einem Zusammenschluss mehrerer deutscher OLED-Firmen und Forschungseinrichtungen im sogenannten So-Light Projekt realisiert worden [13]. Auch Audi hat bereits 2012 seine Roadmap für die Anwendung von OLEDs in Rückleuchten sowie das Projekt „The Swarm“ präsentiert [14]. Hierbei ist das komplette Heck als Leuchtfläche in Form eines OLED-Displays ausgestaltet, auf der ein Schwarm fluktuierender Leuchtpunkte seine Manöver den Bewegungen des Autos folgen lässt. Im Folgenden sollen im Rahmen dieser Bestrebungen der OLED-Anwendung für Kraftfahrzeugleuchten exemplarisch einige Patentanmeldungen der letzten Jahre vorgestellt werden.

3.1 OLED-Anmeldungen zu Signalleuchten im Kraftfahrzeug

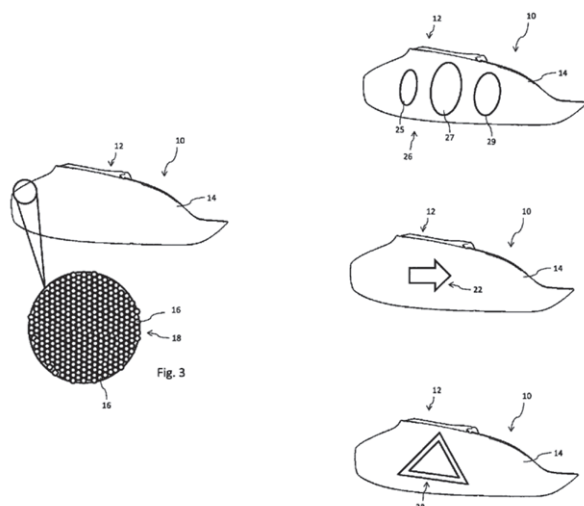
Bereits im Jahr 2002 wurde mit dem Gebrauchsmuster DE 202 07 799 U1 die Anwendung von OLED-Folienelementen (4, 14) für Signalleuchten mit einer geringen Bautiefe vorgeschlagen, die sich in ihrer Form flexibel an die Kontur der Karosserie (8) anpassen lässt (vergleiche Figur 15). Die OLEDs bestehen hierbei aus mindestens einer Kathode, einer organischen Halbleiterschicht und einer transparenten Anode, durch die das Licht der Halbleiterschicht abgestrahlt wird. Die OLEDs sind in einen flachen Träger (1) aus Metall oder Kunststoff eingebettet, welcher auf der Rückseite eine kleine Öffnung für die Anschlussdrähte (5, 15) der Elektroden aufweist und in Lichtaustrittsrichtung durch eine lichtdurchlässige Scheibe (2) abgeschlossen wird.

Das britische Patent GB 2 405 755 B zeigt eine komplette Rückleuchte eines Kraftfahrzeugs, gebildet aus einer einzigen OLED-Fläche. Hierbei übernehmen bestimmte Bereiche jeweils eine andere Signalfunktion. Ein Mikroprozessor steuert die einzelnen OLEDs an, um die passende Farbe und Lichtstärke bereitzustellen. Bereiche, deren Lichtfunktion gerade nicht aktiv ist, können die Farbe der Karosserie annehmen, um die Leuchte optisch in diese zu integrieren. Außerdem wird die Möglichkeit der Integration einer transparenten OLED-Struktur in das Heckfenster vorgeschlagen. Jedoch wird auch hier die Problematik der Temperaturbeständigkeit aufgegriffen, indem davon abgeraten wird, die Nebelschlussleuchte in das OLED-Panel zu integrieren, um einen Burn-Out zu vermeiden. Eine solche Signalleuchte birgt außerdem die Möglichkeit, Warnungen in Textform abzugeben. Eine ganz ähnliche Anmeldung, DE 10 2012 004 759 A1, zeigt zusätzlich noch die Ausbildung verschiedener optischer Signale innerhalb einer OLED-Fläche für eine Rückleuchte (10), zum Beispiel in Form zweidimensionaler geometrischer Muster (vergleiche Figur 16). Die einzelnen OLED-Pixel (16) werden wie bei einem Display einzeln angesteuert, sodass zum Beispiel ein blinkender Pfeil (22) ein Blinklicht realisiert oder ein dynamisches Bremslicht durch eine zunehmende Anzahl von abgegrenzten Leuchtstrukturen unterschiedlicher Größe die Stärke des Bremsvorgangs verdeutlicht. Außerdem ist die Abbildung eines Warndreiecks als Warnlicht möglich.



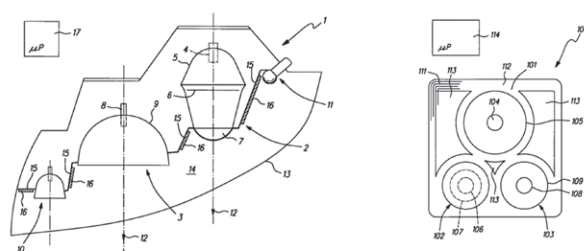
Figur 15: Raster aus OLED-Folienelementen (14) auf einem flexiblen Trägermaterial (1, 11). Oben: Querschnitt eines OLED-Elements bestehend aus einem in die Karosserie (8) eingeklebten Trägersubstrat (1), der OLED-Folie (4), einer abschließenden Lichtaustrittsscheibe (2) und der Verdrahtung (5). Unten: Draufsicht auf das komplette Raster (aus DE 202 07 799 U1).

Die Steuerung des Displays wird wiederum durch unterschiedliche Signalgeber – ähnlich einer herkömmlichen Rückleuchte – ausgelöst und die entsprechend abgespeicherten Leuchtmuster aufgerufen.



Figur 16: Schematische Darstellung einer OLED-Heckleuchte, deren Pixel durch gezielte Ansteuerung die unterschiedlichsten Muster erzeugen können (aus DE 10 2012 004 759 A1).

Neben diesen OLED-Komplettlösungen finden sich in vielen Anmeldungen Verweise auf die Möglichkeit der Ausbildung einer einzelnen Signallichtfunktion über eine OLED-Lichtquelle. Das Patent DE 10 2007 021 865 B4 (vergleiche Figur 17) zeigt beispielsweise den Abdeckrahmen (15) eines Scheinwerfers (1), der mit mehreren OLEDs (16) versehen ist, die zum Beispiel die Funktion eines Standlichts, Blinklichts oder auch eines Tagfahrlichts übernehmen können. Weiter zeigt die Offenlegungsschrift eine Heckleuchte mit bereichsweise angeordneten OLEDs (113) für eine Signalfunktion. Neben den herkömmlichen Lichtmodulen (101, 102 103) nehmen die OLED-Segmente wenig Bauraum ein und



Figur 17: Links: Querschnitt eines Frontscheinwerfers. Rechts: Frontansicht einer Heckleuchte. Auf den Abdeckrahmen der Leuchtmole sind jeweils mehrere OLED-Elemente (16, 113) angeordnet, die unterschiedliche Signalfunktionen übernehmen können (aus DE 10 2007 021 865 B4).

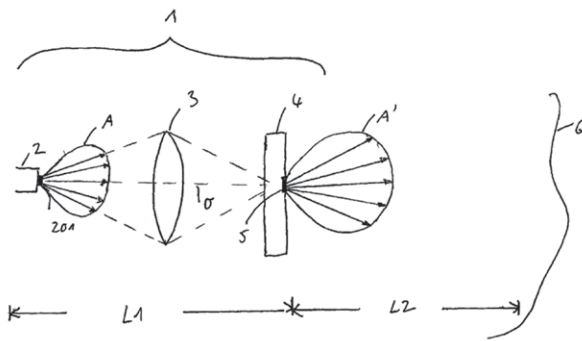
kennzeichnen das Tag- oder Nachtdesign des Fahrzeugs durch eine charakteristische Form der Leuchtfläche.

4 Laser angeregte Weißlichtquellen für Kfz-Scheinwerfer

Während der letzten 40 Jahre waren Designanforderungen und die Einführung neuer Lichtfunktionen die wesentlichen Triebkräfte für die Entwicklung der Kfz-Frontbeleuchtung. Die Bauhöhe von Abblend- und Fernlichtscheinwerfern sank drastisch von 130 mm in den 70ern bis weniger als 40 mm heute [15]. Die Verringerung dieser Abmessungen wurde ermöglicht durch die Weiterentwicklung kompakterer Optiken und nicht zuletzt durch die Einführung von Weißlicht-LEDs mit etwa 3 W elektrischer Leistung.

Der Trend zu immer dünneren Kfz-Scheinwerfern hält heute unvermindert an. Derzeit laufen in der Automobilindustrie experimentelle Untersuchungen für Fernlichtscheinwerfer mit nur 10 mm Bauhöhe [15]. Diese zeigten bislang, dass LEDs zu geringe Leuchtdichten aufweisen, um die gesetzlich geforderten Lichtverteilungen für Kfz-Scheinwerfer mit geringer Bauhöhe (< 10 mm) zu erfüllen. Daraufhin wurden Laserdioden mit Phosphorkonvertern zur Weißlichterzeugung in solche Systeme eingesetzt. Laser angeregte Weißlichtquellen strahlen gegenüber Weißlicht-LEDs Licht höherer Leuchtdichte ab, sodass die gesetzlichen Anforderungen an die Beleuchtungsstärken der erzeugten Lichtverteilung erreicht werden können.

Die Lichterzeugung in solchen Weißlichtquellen geschieht durch Fokussieren einer Laserpunktlichtquelle, zum Beispiel einer Laserdiode, mittels einer geeigneten Optik auf einen im Brennpunkt derselben angeordneten Phosphorkonverter. DE 10 2011 085 378 A1 (vergleiche Figur 18) zeigt das Beispiel einer Beleuchtungseinrichtung, die eine derartige Optik aufweist.



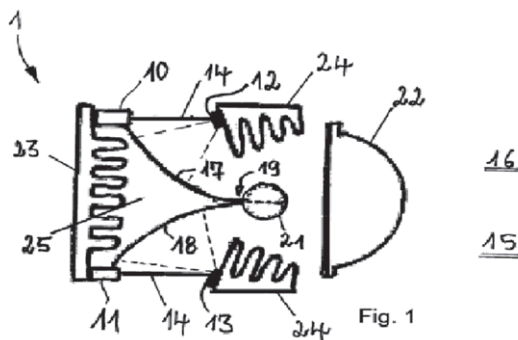
Figur 18: Kfz-Beleuchtungseinrichtung mit Laserdiode (aus DE 10 2011 085 378 A1).

Hier beträgt die Abmessung (L1) der Beleuchtungseinheit (1) in horizontaler Richtung etwa 15 mm. Der Abstand (L2) zwischen der Phosphorkonvertierungsschicht (4) und der Freiformfläche (6) liegt zwischen 3 und 10 cm. Die Strahlung der blauen Laserdiode (2) wird auf eine Phosphorkonvertierungsschicht (4) aus Cer-dotiertem Yttrium-Aluminiumgranat (Ce:YAG) fokussiert. Auf solche einfache Weise lässt sich eine punktförmige Weißlichtquelle (20–500 μm) mit sehr hoher Leuchtdichte (100–1 000 cd/mm^2) generieren, sodass entsprechende Abmessungen der Beleuchtungseinrichtung kompakt gewählt werden können. Durch die nachgeschaltete optische Einrichtung können problemlos frei geformte Lichtverteilungen je nach Verwendungszweck der Beleuchtungseinrichtung generiert werden. Die Ausgestaltung des Reflektors (6) als Freiformfläche ermöglicht die Erzeugung von blendfreiem Fernlicht mit einer Hell-Dunkel-Grenze von sehr hohem Kontrast. Damit kann der Schattenbereich, in dem sich der Gegenverkehr befindet, möglichst schmal gemacht werden kann. Aber auch qualitativ hochwertige Abblendlichtverteilungen und Signal-

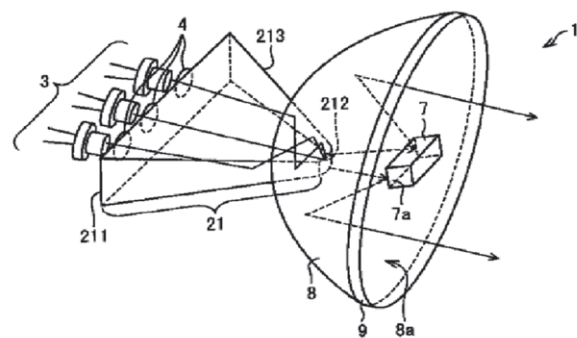
lichter wie Markierungslicht, Abbiegelicht, Nebellicht, Blinklicht, Bremslicht, Rückfahrcheinwerferlicht oder dynamisches Spotlicht können geschaffen werden.

Das in Figur 19 der DE 10 2012 100 140 A1 gezeigte Lichtmodul für Abblend- und Fernlicht weist zwei nebeneinander angeordnete Abblendlichtreflektoren (17) und zumindest einen Fernlichtreflektor (18) auf. Jedes der Konverterelemente (12) wird durch drei Laserstrahlquellen mit jeweiligen Laserstrahlen, zum Beispiel bei 480 nm, angeregt. Dadurch emittieren die Konverterelemente nach Art eines Lambert'schen Strahlers weißes Licht und leuchten die Abblendlichtreflektoren aus. Das in die Abblendlichtreflektoren eingestrahelte Licht wird reflektiert und kann mit der Linse (22) vor das Lichtmodul projiziert werden. Die Hell-Dunkel-Grenze wird durch eine Abblendlichtkante (19) bereitgestellt, vor der ein Blendenelement (21) in Form einer drehbaren Walze ein adaptives Abblendlicht (15) erzeugt. Die Laserstrahlquellen (11) zur Erzeugung des Fernlichts (16) können nebeneinander angeordnet sein. Neben einer Reihe kann auch eine Matrix von Konverterelementen (12, 13) vorgesehen werden, wobei jedem Konverterelement (12, 13) eine Laserstrahlquelle (10, 11) zugeordnet ist. Die Fernlichtfunktion kann auch ein Autobahnlicht, ein markierendes Licht, ein segmentiertes Fernlicht oder ein blendfreies Fernlicht sein.

In der US 8 569 942 B2 werden die Vorteile eines Laserbasierten Kfz-Scheinwerfers gegenüber Scheinwerfern mit LEDs oder konventionellen Halogen- und Hochdruck-Gasentladungslampen (HID-Lampen) besonders deutlich. Figur 20 zeigt einen Laserbasierten Fernlichtscheinwerfer vom Reflexionstyp. Er umfasst drei



Figur 19: Zweiteiliges Lichtmodul für Abblend- und Fernlicht mit Laser angeregten Phosphorkonvertern (12, 13) (aus DE 10 2012 100 140 A1).



Figur 20: Fernlichtscheinwerfer vom Reflexionstyp mit drei Laserdioden (aus US 8 569 942 B1).

Laserdioden (9 mm Durchmesser) mit einer gesamten optischen Ausgangsleistung von 12 W bei 405 nm und einer elektrischen Leistungsaufnahme von 40 W.

Die Laserstrahlen werden über asphärische Linsen (4) in einen kegelstumpfförmigen Lichtleiter (21) eingekoppelt, gebündelt und treffen hinter der Auskoppel­fläche (212) des Lichtleiters auf eine 1 bis 3 mm² große Eintrittsfläche eines Wellenlängenkonverters (7) für Weißlicht. Dieser befindet sich im Brennpunkt des Reflektors (8) und weist auf der Lichtaustrittsfläche des Wellenlängenkonverters (7) eine Leuchtdichte von 100 cd/mm² auf. Das ist 4- bis 5-fach höher als bei konventionellen Halogenscheinwerfern. Diese hohe Leuchtdichte ermöglicht den Bau von Laser-basierten Scheinwerfern mit deutlich geringeren Aperturdurchmessern des optischen Systems. Zwar lassen sich auch mit HID-Lampen hohe Leuchtdichten bis zumindest circa 75 cd/mm² erzielen, jedoch haben diese den Nachteil einer größeren Bauform und einer gerade für kurzzeitiges Aufblenden zu langsamen Einschaltzeit.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Einführung neuer ECE-Regelungen für sogenannte AFS-Funktionen (Adaptive Frontlighting System) im Jahr 2005 führte zu komplexen Scheinwerfern, die unter Verwendung von mechatronischen Elementen und zusätzlichen Optiksystemen den Funktionsumfang von Scheinwerfern deutlich erweiterten. Funktionen wie Kurvenlicht und Autobahnlicht gehören inzwischen zum Standard bei der Neuentwicklung von Lichtsystemen. Gerade bei adaptiven Lichtfunktionen wie Kurvenlicht, Autobahnlicht, automatisches blendfreies Fernlicht oder Fußgänger-Markierungslicht kommen die Vorteile der LED-Technik nicht zuletzt mit ihrer beinahe stufenlosen Dimmbarkeit voll zum Tragen. In Zukunft wird eine weitere Zunahme separat adressierbarer Ausleuchtungsbereiche zu einer stetigen Optimierung der Ausleuchtungssituation [15] und damit zu einem höherem Komfort und einer höheren Sicherheit für den Fahrer führen. Es wird vermutet, dass die LED-Technik das Xenonlicht 2016/2017 möglicherweise markttechnisch überholen wird. Bei den

Weltmarktanteilen verwendeter Lichtquellen in der Fahrzeugaußenbeleuchtung vom Stand 2011 ist jedoch der bisherige Anteil der LEDs mit 0,5 % gegenüber 10 % für Xenon- und 89 % für Halogenlichtquellen noch vernachlässigbar klein [6]. Dies liegt nicht zuletzt an der Preisgünstigkeit der herkömmlichen Lampen und deren Einsatz – vor allem in den aufstrebenden Märkten Südamerikas und Asiens. Die Lichttechnologien für die nächste Generation der Fahrzeugbeleuchtung, basierend auf Laserdioden [3] und OLEDs [17], stehen in Einzelfällen bereits auf dem Sprung zur Serienreife. Die Vorteile von Laserstrahlquellen gegenüber LEDs zeigen sich im Wesentlichen durch ihre höheren erzielbaren Leuchtdichten und Energieeffizienzen. Jedoch ist immer auch der Aspekt der Lasersicherheit für jedes einzelne Beleuchtungssystem zu betrachten. Gesetzliche Sicherheitsstandards bei Fahrzeugleuchten müssen noch an die neuen Lichtquellen angepasst werden [18]. Die Temperaturstabilität als wichtigste Hürde zum Serieneinsatz von OLEDs ist im Jahr 2012 erreicht worden [12]. Die homogenen Flächenstrahler lassen neue Designmöglichkeiten zu; sie können zum Beispiel in dynamisch ansteuerbare Segmente unterteilt werden und eignen sich besonders für Rückleuchten. Dabei genügen sie den Anforderungen für den Straßenverkehr, die international in den Normen der ECE definiert sind.

Auch in den kommenden Jahren ist mit innovativen Neuerungen im Bereich der Fahrzeugleuchten zu rechnen, sei es zur Erhöhung der Fahrsicherheit, des Fahrkomforts oder zur Verwirklichung eines unverwechselbaren Designs.

Nicht-Patentliteratur

- [1] KLEINKES, M.; SCHMIDT, Ch., KALZE F.-J.: Nächste Schritte in der Entwicklung von LED Scheinwerfern: In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift. Nov. 2012, Volume 114, Issue 11, Seite 862–867. ISSN 001-2785
- [2] NEUMANN, R.: LED Headlamps – Challenges to be a future standard. In: Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2013, Seite 1–5.

- [3] BMW i8 leuchtet als erstes Serienfahrzeug mit Laserlicht. Homepage von 'Springer für Professionals', 2012. URL: <http://www.springerprofessional.de/bmw-i8-leuchtet-als-erstes-serienfahrzeug-mit-laserlicht/4981810.html> [abgerufen am 09.04.2014]
- [4] BERLITZ, S.: Lighting Roadmap 2020. In: Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2013, Seite 6–15.
- [5] ERION, J.: LEDs in Exterior Vehicle Lighting. In: Photonics Spectra, Dez. 2006, Volume 40, Issue 12, Seite 50–52.
- [6] REICHENBACH, M.: Die LED überholt das Xenonlicht. In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift. Jan. 2011, Volume 113, Issue 1, Seite 16–19. ISSN 0001-2785
- [7] ECE/UN-Regelungen. Homepage des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2013. URL: <http://www.bmvi.de//SharedDocs/DE/Artikel/LA/un-ece-regelungen.html?nn=58354> [abgerufen am 09.04.2014]
- [8] BERLITZ, S.; HAMM, M.; FUNK, Ch.: Matrix-LED-Scheinwerfer von Audi. In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift. Mär. 2014, Volume 116, Issue 3, Seite 10–15. ISSN 0001-2785
- [9] ZYGAN, A.; KOSTANZER, U.; FIEGE, M.: Lichtsysteme. In: ATZextra. Apr. 2011, Volume 16, Issue 1, Seite 52–57. ISSN 2195-1454
- [10] PREUSSLER, S.; NEUMANN, R.; KUBENA, V.: LED-Vollscheinwerfer mit adaptivem Fernlicht. In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift. Jan. 2011, Volume 113, Issue 2, Seite 20–25. ISSN 0001-2785
- [11] JOBST, T.; KÜPPER, L.; LÜTTGENS, G.: OLED for automotive signalling applications. In: Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2013, Seite 205–208.
- [12] DIEKMANN, K.: Temperaturbeständige OLED für Rückleuchten. In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift. Apr. 2013, Volume 115, Issue 4, Seite 286–289. ISSN 0001-2785
- [13] DWORZAK, M.: OLED as automotive light source. In: Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2013, Seite 209–214.
- [14] Parkpiloten und Schwarmbeleuchtung – Ein Blick in Audis Technik-Entwicklung. Homepage von 'Springer für Professionals', 2012. URL: <http://www.springerprofessional.de/parkpiloten-und-schwarmbeleuchtung---ein-blick-in-audis-technik-entwicklung-15467/3952218.html> [abgerufen am 09.04.2014]
- [15] ALBOU, P., Boinet L., Ravier J.P.: Very thin headlamp with laser sources. In: Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2013, Seite 128–139.
- [16] Neue Scheinwerfer für mehr Sicherheit auf der Straße, Leibniz-Universität Hannover, Presseinformation vom 09.08.2012. URL: <http://www.uni-hannover.de/de/aktuell/presseinformationen/archiv/details/12282/index.php> [abgerufen am 09.04.2014]
- [17] Osram: OLEDs für Autos bald marktreif. In: Photonik, Fachzeitschrift für optische Technologien, Nr. 5, Seite 14 (2013)
- [18] NAKAYA, Y.: Laser / LED Hybrid Headlamp. In: Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2013, Seite 140–149.

Adaptive, automobile Frontscheinwerfer und situationsabhängige Beleuchtung im Fahrzeugumfeld

Dr. Stefan Bahr, Patentabteilung 1.56

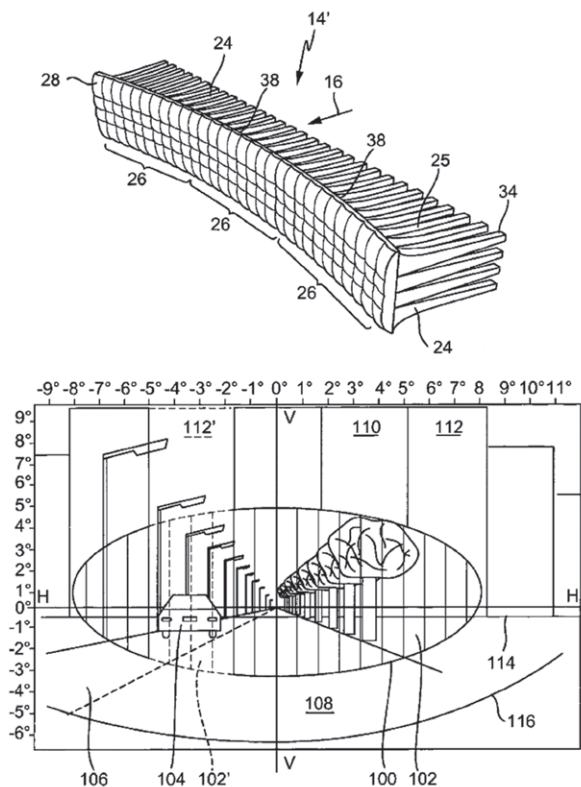
Die Funktionalität und das Aussehen von Frontscheinwerfern von Straßenfahrzeugen haben sich in den vergangenen Jahren zunehmend durch den Einsatz von halbleiterbasierten Leuchtmitteln verändert. Die fortschreitende Umfelderkennung der Fahrzeuge und die Vernetzung unter den einzelnen Fahrzeugen stellen dabei wichtige Elemente für neuartige Entwicklungen der Scheinwerfertechnologie dar. Der folgende Artikel gibt einen Überblick über die technischen Innovationen der vergangenen Jahre auf dem Gebiet der adaptiven, automobilen Frontscheinwerfer.

1 Einführung

Adaptive, automobile Frontscheinwerfer sind seit beinahe einem Jahrhundert im Einsatz. Die anfänglichen Entwicklungen betrafen zumeist recht einfache, mechanische Einstellungen der Frontscheinwerfer, die mithilfe des Lenkgestänges und der Lenkungs Vorrichtung erfolgte. Als erstes automobiles Serienfahrzeug mit adaptiven Frontscheinwerfern gilt der *Cadillac Type 57* aus dem Jahr 1918. In der Anfangszeit der adaptiven Frontscheinwerfersysteme war das Bestreben vor allem darauf gerichtet, eine möglichst gute Ausleuchtung der Fahrbahn bei Kurvenfahrten bereitzustellen (vergleiche hierzu auch DE 360 552 A und DE 548 325 A). In der Folgezeit betrafen viele Erfindungen die Problematik, einen optimalen Fahrkomfort für den Fahrer auch in schwierigen Verkehrssituationen durch eine ausreichende Beleuchtung der Umgebung sicherzustellen, ohne jedoch andere Verkehrsteilnehmer zu blenden. Dieses Problem ist auch heute noch Gegenstand zahlreicher Erfindungen. Zunehmend kommen komplexe Steuerungen und Schwenkvorrichtungen zum Einsatz. Abhängig von diversen Fahrparametern des Fahrzeugs werden zum Beispiel über fahrzeuginterne Sensoren die Umweltbedingungen (Temperatur, Druck), Witterungsverhältnisse (Regen, Schnee, Nebel, Trockenheit der Fahrbahn), Geschwindigkeit, Lenkradstellung, Gier-

winkel oder Querbewegung erfasst und die Ausrichtung sowie Abstrahlung der Frontscheinwerfer dementsprechend gesteuert und geregelt. Die Erfassung des Fahrzeugumfelds durch bildgebende Sensoren und deren automatische Auswertung ist hierbei in den vergangenen Jahren verstärkt in den Vordergrund getreten. Halbleiterbasierte Lichtsysteme mit einer Vielzahl an Lichtquellen, sogenannte Pixel-Licht-Scheinwerfer oder Matrix-Licht-Scheinwerfer, erlauben hierbei auf einfache Weise eine situationsgerechte Ausleuchtung einer jeden Fahrsituation [1, 2, 3, 4]. Ein Beispiel eines Matrix-Licht-Scheinwerfers wie er in modernen Frontscheinwerfern mit Halbleiterlichtquellen zum Einsatz kommt, ist aus der DE 10 2011 077 636 A1 bekannt und in Figur 1 dargestellt. Eine Vielzahl unterschiedlicher Lichtaustrittsflächen ist matrixartig angeordnet und zu einem Lichtmodul zusammengefasst. Die einzelnen Lichtaustrittsflächen ermöglichen die Beleuchtung unterschiedlicher Bereiche (100, 102) im Vorfeld des Fahrzeugs. Hierbei können selektiv einzelne Bereiche (102') im Vorfeld von einer Beleuchtung ausgenommen werden, um beispielsweise eine Blendung anderer Verkehrsteilnehmer (104) zu verhindern.

Die generelle Problematik der adaptiven Frontscheinwerfersysteme scheint sich in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten nicht groß geändert zu haben. Im



Figur 1: Eine Matrix (26), bestehend aus einer Vielzahl von optischen Elementen (24), die Einkopplflächen (34) und Austrittsoptiken (28) aufweisen. Sie erlaubt die Realisierung einer flexiblen Lichtverteilung (100), wobei mehrere Segmente (100, 102) im Zentrum eine Fernlichtverteilung bilden, die sich einer Abblendlichtverteilung (116) überlagert (aus der DE 10 2011 077 636 A1).

Mittelpunkt steht immer eine größtmögliche Ausleuchtung der Fahrsituation, vor allem in Gefahrensituationen und unübersichtlichen Verkehrslagen, wobei das Blenden anderer Verkehrsteilnehmer zuverlässig zu vermeiden ist. Durch die zunehmende Automatisierung der Einstellung des Fahrlichts ohne Eingreifen des Fahrers ist eine optimale Einstellung der Fahrzeugfrontscheinwerfer von einer zuverlässigen Umfelderkennung von einer Vielzahl unterschiedlicher Sensoren im Fahrzeug abhängig. Diese zuverlässige Umfelderkennung des Fahrzeugs und deren automatische Auswertung stellen jedoch auch heutzutage in technischer Hinsicht noch eine große Anforderung dar. Nach wie vor sind komplexe Verkehrssituationen mit einer Vielzahl an beweglichen Objekten schwierig zu erfassen und zu interpretieren. Die überwiegende Mehrheit der Erfindungen im Bereich der adaptiven Fahrzeugfrontscheinwerfer befasst sich hierbei mit Lösungsansätzen von einzelnen Aspekten wie beispiels-

weise die Blendvermeidung von Verkehrsteilnehmern oder die zielgerichtete Beleuchtung eines Objektes.

Generell besteht die Anforderung für Fahrzeugbeleuchtungssysteme möglichst verbrauchsarm zu sein und energetische Einsparpotenziale zu nutzen, ohne jedoch den Fahrkomfort zu beeinträchtigen.

Es sollen in diesem Beitrag der Stand der Technik der situationsabhängigen, adaptiven, automobilen Fahrzeugfrontscheinwerfern und Lösungsansätze zu den erwähnten Problematiken präsentiert werden.

2 Adaptive Frontscheinwerfer

2.1 Verwendete Systeme

Die zunehmende Verwendung von halbleiterbasierten Leuchtmitteln in Scheinwerfern ermöglicht neue konzeptionelle Ansätze der automobilen Frontbeleuchtung mit modularen Konstruktionen. Eine Vielzahl von Einzelleuchten ermöglicht durch eine additive Überlagerung von Einzellichtverteilungen die Erzeugung vieler variabler Gesamtlichtverteilungen [3, 10, 11, 12]. Hierbei spielt vor allem die halbleiterbasierte Lichterzeugung mit LED-Dioden und LASER-Dioden eine entscheidende Rolle, da mit ihr kostengünstige, platzsparende, modulare und variable Beleuchtungen des Fahrzeugumfelds realisierbar werden [5, 6, 7, 8].

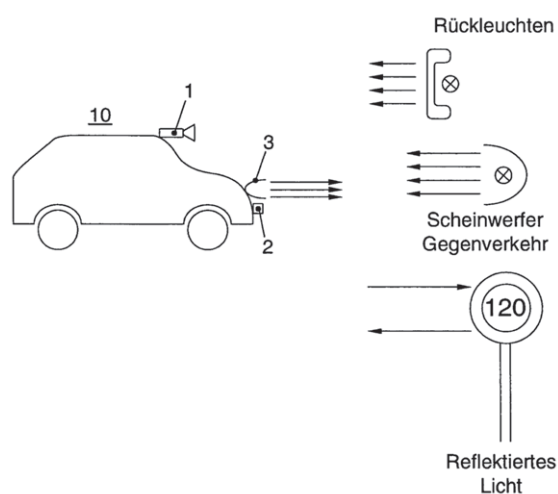
Andere modulare Techniken der Lichterzeugung, wie beispielsweise eine subtraktive Erzeugung einer Lichtverteilung mit einem Pixel-Licht-Scheinwerfer mit mikromechanischen Spiegelsystemen, befinden sich noch in der Entwicklungsphase und konnten sich bisher noch nicht am Markt durchsetzen [1, 2, 3, 4, 9].

2.2 Kamergestützte Frontscheinwerfer

Kamergestützte Systeme zur Steuerung der Frontscheinwerfer sind schon längere Zeit bekannt und ermöglichen das automatische Abblenden von einer Fernlichtverteilung auf eine Abblendlichtverteilung [13, 14].

In der Offenlegungsschrift DE 101 56 649 A1 ist ein System zum automatischen Abblenden von Scheinwerfern (3) beschrieben. Mit einer Kamera (1) werden Leuchtpunkte im Vorfeld des Fahrzeugs erkannt. Es wird automatisch ermittelt, ob es sich um ein vorausfahrendes Fahrzeug, ein entgegenkommendes Fahrzeug oder um ein Licht reflektierendes Objekt, beispielsweise ein Verkehrsschild, handelt (vergleiche Figur 2). Im Fall der Detektion von anderen Verkehrsteilnehmern wird ein automatisches Abblenden der Scheinwerfer (3) veranlasst, hingegen werden bei Detektion eines Licht reflektierenden Objekts die Scheinwerfer (3) nicht abgeblendet.

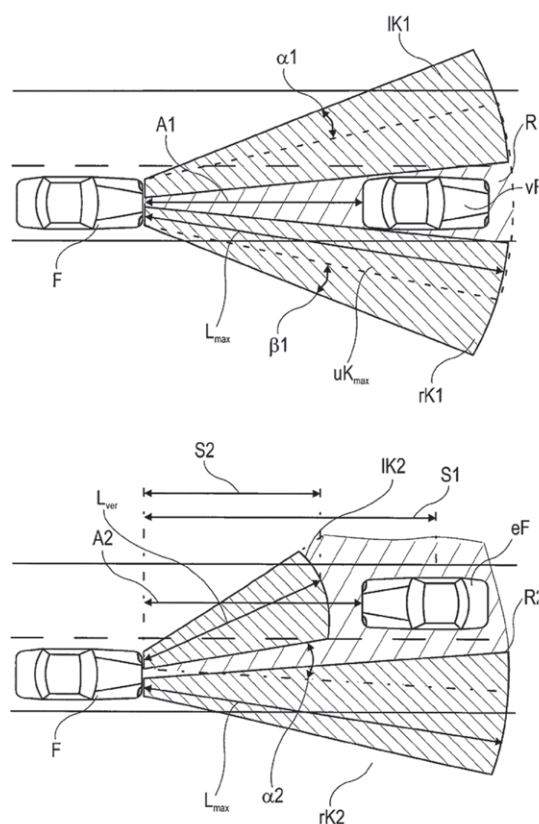
Aus der DE 10 2007 038 077 A1 ist ein System zur Steuerung der Scheinwerfer eines Fahrzeugs (F) bekannt, wobei andere Verkehrsteilnehmer (vF, eF) mithilfe einer Erfassungseinrichtung erkannt werden und blendfreie Bereiche für entgegenkommende und vorausfahrende Verkehrsteilnehmer geschaffen werden (vergleiche Figur 3). Hierbei werden Teilbereiche im Vorfeld des Fahrzeugs (F) mit einer Fernlichtverteilung ausgeleuchtet, wobei selektiv Bereiche abgeblendet werden können. Einerseits wird dies durch ein horizontales Verschwenken der Scheinwerfer erreicht, andererseits ist eine vertikale Verschwenkung möglich, um eine Leuchtwerte der Scheinwerfer entsprechend des Abstands zu anderen Verkehrsteilnehmern einzustellen.



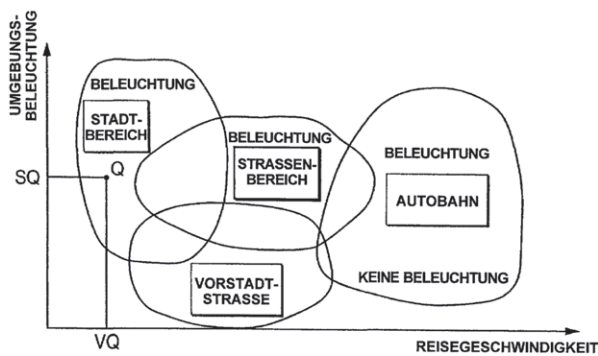
Figur 2: Schematische Darstellung einer automatischen Abblendsteuerung, wobei bei Detektion eines entgegenkommenden oder vorausfahrenden Fahrzeugs durch eine Kamera (1) oder einen Fotosensor (2) eine Umschaltung eines Scheinwerfers (3) von einer Fernlichtverteilung auf eine Abblendlichtverteilung erfolgt (aus der DE 101 56 649 A1).

Dem Fahrer des Fahrzeugs (F) wird hierbei die Möglichkeit gegeben, ständig mit einer Fernlichtverteilung zu fahren, wobei automatisch Raumbereiche, die von anderen Verkehrsteilnehmern befahren werden, von der Fernlichtverteilung ausgenommen werden.

In der DE 100 50 741 A1 ist ein System zur Steuerung von Scheinwerfern eines Fahrzeugs veröffentlicht, in dem die Ermittlung einer Fahrzeugumgebung aufgrund der Umgebungshelligkeit und aufgrund der Reisegeschwindigkeit möglich ist (wie in Figur 4 dargestellt). Hierbei wird mithilfe einer Kamera die Umgebungshelligkeit des Fahrzeugs ermittelt und daraus in Kombination mit der Reisegeschwindigkeit ein Rückschluss auf eine Fahrzeugumgebung gezogen. So wird beispielsweise zwischen einem „Stadtgebiet“, einer „Vorstadtstraße“ und einer „Autobahn“ unterschieden und die Scheinwerfer entsprechend der Fahrzeugumgebung eingestellt.



Figur 3: In einer Fahrsituation, in der ein entgegenkommendes (eF) oder vorausfahrendes (vF) Fahrzeug erkannt wird, werden die Lichtkegel (IK1, rK1) des Fahrzeugs (F) zur Seite geschwenkt oder die Lichtkegel (IK2, rK2) des Fahrzeugs (F) in ihrer Leuchtwerte verändert, sodass ein Blenden anderer Verkehrsteilnehmer verhindert wird (aus der DE 10 2007 038 077 A1).

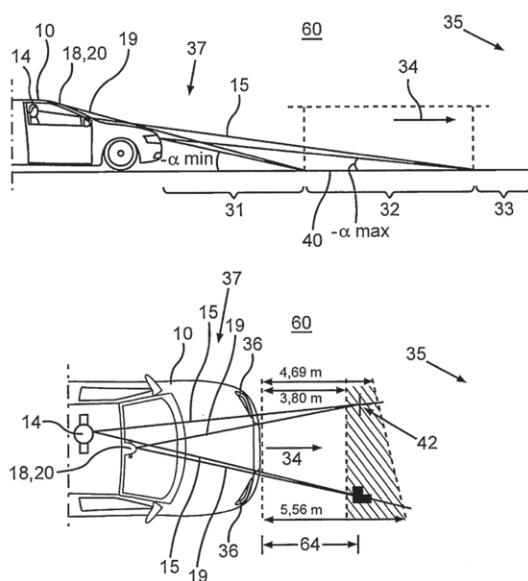


Figur 4: Detailsicht einer Scheinwerfersteuerung, die auf Grundlage der Umgebungshelligkeit und der Reisegeschwindigkeit eine Scheinwerfereinstellung durchführt, wobei die jeweilige Fahrumgebung („Stadt“, „Vorort“, „Autobahn“) entsprechend der markierten Bereiche im Diagramm ermittelt wird und eine adäquate Scheinwerfereinstellung erfolgt (aus der DE 100 50 741 A1).

2.3 Justage der Frontscheinwerfer

Durch die variablen Beleuchtungsmöglichkeiten der Fahrbahnoberfläche mit Matrix-Scheinwerfern oder Pixel-Licht-Scheinwerfern ist es auf einfache Weise möglich, diese Scheinwerfer zur Justage zu verwenden und Fehlstellungen der Scheinwerfer zu korrigieren.

Aus der DE 10 2012 007 908 A1 (vergleiche Figur 5) ist eine Scheinwerferanlage zum Ausgleich von Ausrichtfehlern eines Scheinwerfers bekannt. Dazu werden



Figur 5: Zur Justage der Scheinwerfer (36) werden Lichtmuster (42) in einem für den Fahrer (14) des Fahrzeugs (10) nicht einsehbaren Bereich (32) auf die Fahrbahn (40) projiziert und mittels einer Kamera (18) erfasst, wobei anhand des erfassten Lichtmusters Ausrichtfehler der Scheinwerfer (36) verringert werden können (aus der DE 10 2012 007 908 A1).

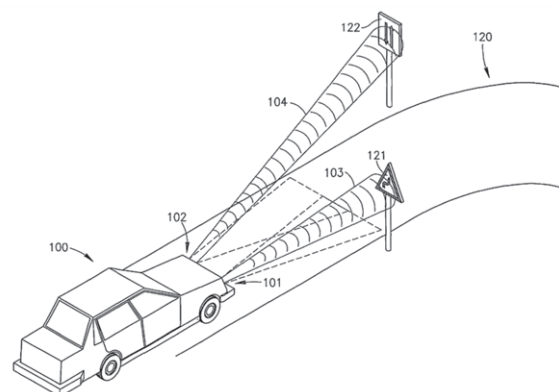
mithilfe der Scheinwerfer (36) Justiermarkierungen (42) auf die Straßenoberfläche (40) in einem vom Fahrer (14) nicht einsehbaren Bereich projiziert.

Eine am Fahrzeug angebrachte Kamera (18) erfasst die im Vorfeld des Fahrzeugs erzeugten Justiermarkierungen und eine automatische Auswertung bestimmt die Position der Markierungen. Ein Vergleich mit einer definierten Sollausleuchtung erlaubt schließlich eine Korrektur von Ausrichtungsfehlern der Scheinwerfer.

2.4 Markierungslicht

Durch die Umfelderkennung mit einer Kamera und die Verwendung eines Matrix-Scheinwerfers oder eines Pixel-Licht-Scheinwerfers ist es zudem möglich, automatisch Objekte im Fahrzeugumfeld zu erfassen, und separat zu beleuchten oder gezielt von einer Beleuchtung auszusparen. Die Markierungslichtfunktion eines Fahrzeugs ermöglicht es somit, Objekte, die sich außerhalb der Reichweite der Abblendlichtverteilung befinden, einzeln zu beleuchten und solche, die sich innerhalb der Abblendlichtverteilung befinden, hervorzuheben. Die Aufmerksamkeit des Fahrers wird dadurch frühzeitig auf potenzielle Gefahrenstellen gelenkt [15, 16].

In der WO 2002/004 247 A1 ist ein Scheinwerfersystem mit einer Umfelderkennung publiziert, in dem bei einer Umfelderkennung Verkehrszeichen am Fahrbahnrand automatisch erkannt werden.



Figur 6: Ein mit einer dynamischen Umfelderkennungseinrichtung ausgestattetes Fahrzeug (100) kann erkannte Verkehrsschilder (121, 122) individuell mit Frontscheinwerfern (101, 102) beleuchten und eine optimale Wahrnehmung durch den Fahrer sicherstellen (aus der WO 2002/004 247 A1).

Die Pixel-Licht-Scheinwerfer werden dabei abhängig von den Positionen der detektierten Verkehrszeichen angesteuert und optimal ausgeleuchtet. Hierbei kann auch die Farbe des Verkehrszeichens oder die Distanz des Verkehrszeichens bei der Ansteuerung der Pixel-Licht-Scheinwerfer berücksichtigt werden, um eine optimale Wahrnehmung durch den Fahrer des Fahrzeugs zu gewährleisten.

2.5 Navigationsgestützte Frontscheinwerfer

Die Umfelderkennung eines Fahrzeugs kann – abgesehen von direkten Erfassungsmitteln wie beispielsweise Kameras – auch mit einem satellitengestützten Navigationsgerät erfolgen. Die DE 10 2007 007 321 B4 zeigt eine Scheinwerfersteuerung eines Fahrzeugs, wobei ein *Global-Positioning-System-Sensor* (GPS-Sensor) eine Absolutposition des Fahrzeugs bestimmt. Ein Vergleich mit hinterlegten Kartendaten erlaubt somit eine Ermittlung von Fahrbahnzustandsinformationen wie etwa das Befahren einer Rechtskurve oder einer Linkskurve, oder das Vorhandensein einer Kuppe oder einer Senke im weiteren Fahrbahnverlauf abhängig von der Absolutposition des Fahrzeugs. Die Scheinwerfer des Fahrzeugs werden anschließend entsprechend der Fahrbahnzustandsinformationen angesteuert, um eine optimale Ausleuchtung der Fahrbahn zu gewährleisten.

2.6 Projektion von Zusatzinformationen auf die Fahrbahn

Bei entsprechend hoher örtlicher Auflösung des Markierungslichts kann dieses nicht nur dazu verwendet werden, um Objekte mit einem Lichtspot hervorzuheben, sondern auch um Informationen auf die Fahrbahn zu projizieren. Diese Informationen können in Form von Lichtsymbolen oder Lichtzeichen in das direkte Sichtfeld des Fahrers eingeblendet werden und eine Unterstützung des Fahrers in Gefahrensituationen bereitstellen. Abgesehen von der Information des Fahrers können auch andere Verkehrsteilnehmer im Umfeld des Fahrzeugs die Lichtsymbole oder Lichtzeichen wahrnehmen. Es kann zum Beispiel ein Abbiegevorgang, ein Überholvorgang oder auch eine Gefahr durch

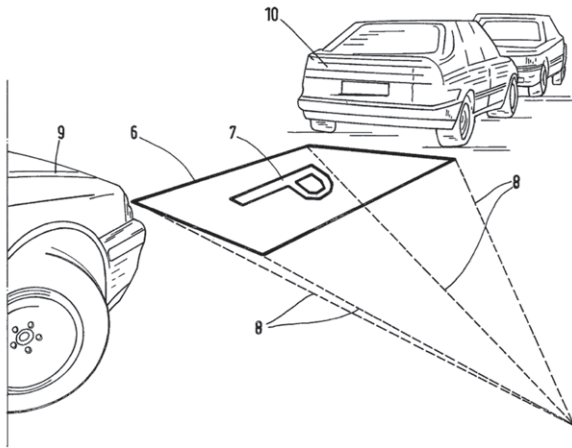
eine Panne des Fahrzeugs den anderen Verkehrsteilnehmern mitgeteilt werden (vergleiche hierzu die DE 10 2009 009 473 A1).

Die DE 100 34 381 C2 beschreibt eine Informationsanzeigevorrichtung für das Vorfeld eines Fahrzeugs, wobei in einem Sichtfeld des Fahrers fahrsituationsabhängige Hilfestellungen für den Fahrer eingeblendet werden. Hierbei ist es unter anderem möglich, Richtungsangaben bei einer bevorstehenden Verzweigung der Straße anzuzeigen oder über eine Annäherung an eine scharfe Kurve zu informieren. Ein derartiges Informieren des Fahrers durch einen optischen Brems- oder Lenkhinweis kann dem Fahrer helfen, in Gefahrensituationen adäquat zu reagieren. Es können auch Fahrzeugparameter des eigenen Fahrzeugs direkt in das Blickfeld des Fahrers auf die Fahrbahn projiziert werden wie beispielsweise der geringe Tankfüllstand des eigenen Fahrzeugs.

Aus der DE 10 2006 050 546 A1 ist ein Projektionsmittel für ein Kraftfahrzeug bekannt, wobei Lichtprojektionen (8) in der Umgebung des Kraftfahrzeugs eine flächige Markierung erzeugen, die einerseits Informationen für den Fahrer des Kraftfahrzeugs beinhalten, aber auch für andere Verkehrsteilnehmer im Umfeld bestimmt sein können (vergleiche Figur 7). Damit kann beispielsweise ein Parksymbol in einen Umfeldbereich eines Kraftfahrzeugs projiziert werden und somit für den Fahrer oder für andere Verkehrsteilnehmer die zukünftige Parkposition erkennbar sein. Die Projektion des Lichtsymbols kann hierbei flächig als zwei- oder dreidimensionales Projektionsobjekt auf der Fahrbahnoberfläche erfolgen oder aber auch schwebend im Raum als holografische Projektion ausgestaltet sein.

Das Projektionsobjekt kann ebenfalls als Warnsymbol verwendet werden und beispielsweise bei Fahrmanövern mit Kollisionsgefahr im Blickfeld des Fahrers eingeblendet werden, wobei auch blinkende oder sich zeitlich veränderliche Projektionen möglich sind.

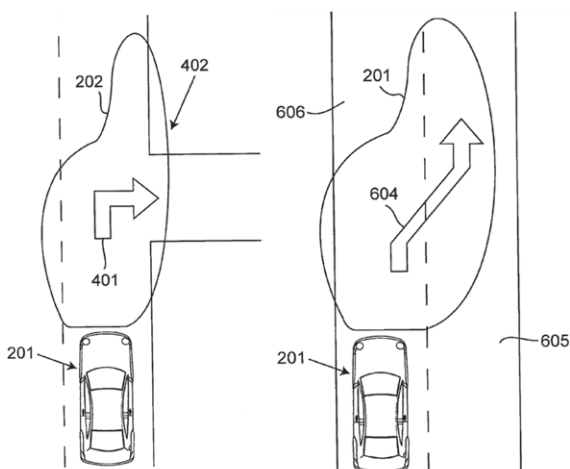
Die DE 10 2008 061 747 A1 (vergleiche Figur 8) beschreibt eine Scheinwerfersteuerung zur Erzeugung von optischen Fahrhinweisen auf der Fahrbahnoberfläche,



Figur 7: Ein mit einer Projektionseinheit ausgestattetes (nicht abgebildetes) Fahrzeug zeigt in seiner Umgebung eine flächige Markierung (6, 7) auf der Fahrbahn an, die eine zukünftige Parkposition des Fahrzeugs darstellen soll (aus der DE 10 2006 050 546 A1).

wobei sowohl eine kamerabasierte Umfelderkennung, als auch eine navigationsgestützte Scheinwerfersteuerung verwendet werden. Hierbei wird ein von einer Navigationseinheit erzeugter Navigationshinweis durch die Frontscheinwerfer in das Sichtfeld des Fahrers optisch eingeblendet.

Auf diese Weise können zum Beispiel auf Autobahnen oder Fernstraßen Spurwechselhinweise erzeugt werden, wenn die Fahrt zu einem bestimmten Ziel mit der Wahl einer bestimmten Fahrspur verbunden ist. Diese Spurwechselhinweise können in Form eines



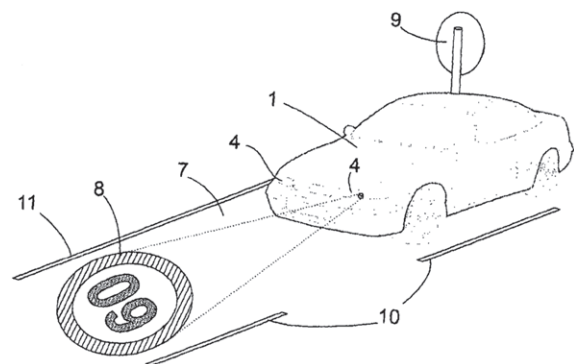
Figur 8: Von einer Navigationseinheit des Fahrzeugs (201) generierte Fahrhinweise können optisch in die Frontscheinwerferlichtverteilung (201, 202) integriert werden, wobei ein Abbiegen nach rechts durch einen Pfeil (401) dargestellt ist und ein Spurwechsel von einer aktuellen Fahrspur (606) auf eine benachbarte Fahrspur (605) durch einen Pfeil (604) erfolgt (aus der DE 10 2008 061 747 A1).

Pfeilsymbols (604) auf der Fahrbahn angezeigt werden, gleichzeitig kann auch die Zielfahrspur (605) durch eine erhöhte Lichtintensität der Lichtverteilung (202) des Fahrzeugs (201) ausgeleuchtet werden. Bei der Fahrt auf einer Fahrbahnkreuzung kann ein Pfeilsymbol (401) in eine abbiegende Straße weisen, wenn die Fahrt zu einem bestimmten Ziel ein Abbiegen an der Kreuzung notwendig macht.

Ein weiteres System zur Projektion von Informationen auf die Fahrbahn ist aus der DE 10 2010 034 853 A1 bekannt. Eine Umfelderkennungseinheit erfasst ein Verkehrsschild (9) – wie etwa eine Geschwindigkeitsbeschränkung – und wertet aus, ob eine Übertretung oder eine Gefahr einer Übertretung durch den Fahrer des Fahrzeugs (1) besteht (vergleiche Figur 9). Wenn die Verkehrsschildinformation des Verkehrsschildes (9) als relevant beurteilt wird, kann eine Bildgeneratoreinheit (4) ein Bild des betreffenden Verkehrszeichens (9) auf die Fahrbahn projizieren, sodass ein Komfortgewinn für den Fahrer entsteht. Alternativ kann auch bei Erfassen eines Überholverbotschildes und bei Annäherung oder Überschreitung des Mittelstreifens der Fahrbahnmarkierung durch das Fahrzeug das detektierte Überholverbotsschild auf die Fahrbahn projiziert werden.

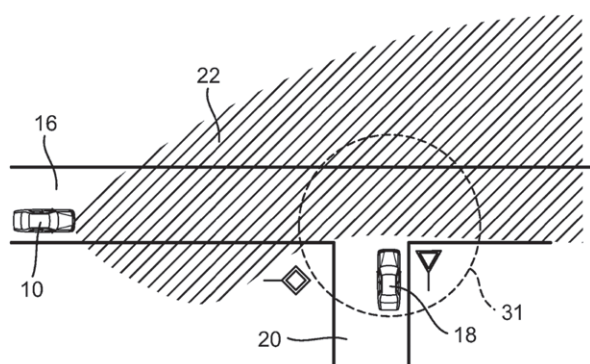
2.7 Car-to-X Kommunikation

Eine weitere Möglichkeit, eine situationsabhängige Scheinwerfersteuerung zu realisieren, besteht in der direkten Kommunikation zwischen unterschiedlichen Verkehrsteilnehmern [17].



Figur 9: Ein von einem Fahrzeug (1) identifiziertes Straßenschild (9) wird durch einen Frontscheinwerfer (4) auf die Fahrbahn projiziert und dem Fahrer des Fahrzeugs in seinem Blickfeld präsentiert (aus der DE 10 2010 034 853 A1).

Die Offenlegungsschrift DE 10 2011 076 644 A1 enthält eine Scheinwerfersteuerung eines Fahrzeugs (10). Durch drahtlose Datenkommunikation werden Umfeldinformationen erfasst und entsprechend dieser Umfeldinformationen wird die Lichtverteilung (22) der Scheinwerfer variiert (vergleiche Figur 10). Dabei werden Position (31) und Fahrtrichtung anderer Verkehrsteilnehmer (18) durch drahtlose Datenkommunikation dem Fahrzeug (10) mitgeteilt. Die Scheinwerfer des Fahrzeugs (10) werden anschließend so gesteuert, dass eine Blendung der anderen Verkehrsteilnehmer (18) vermieden wird.



Figur 10: Ein Fahrzeug (10) steuert die Ausleuchtung (22) der Fahrbahn abhängig von der ermittelten Position eines Verkehrsteilnehmers (18), um diesen Verkehrsteilnehmer nicht zu blenden (aus der DE 10 2011 076 644 A1).

Weiterhin ist aus der DE 10 2012 210 123 A1 eine Scheinwerfersteuerung bekannt, bei der die Abstrahlcharakteristik der Scheinwerfer eines Fahrzeugs in Abhängigkeit der Verkehrsdichte im Umfeld des Fahrzeugs erfolgt. Die Verkehrsdichte im Umfeld des Fahrzeugs wird dabei auf Grundlage von Informationsdaten ermittelt, beispielsweise aus Abstandsinformationen und Positionsinformationen anderer Verkehrsteilnehmer oder einer Anzahl von Fahrzeugen in einem Verkehrsabschnitt. Die ermittelten Verkehrsdichtedaten werden dann über einen Radiosender mittels drahtloser Kommunikation für eine Vielzahl an Fahrzeugen bereitgestellt, die diese Verkehrsdichtedaten dann wiederum zur Steuerung der Scheinwerfer verwenden.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Die Fahrzeugfrontbeleuchtung hat durch die Einführung von halbleiterbasierten Leuchtmitteln in den vergangenen Jahren eine beachtliche Weiterentwicklung erfahren. Der oftmals modulare Aufbau moderner Scheinwerfersysteme mit einer Vielzahl an Einzellichtquellen erzeugt durch additive Überlagerung der Einzellichtverteilungen eine Gesamtlichtverteilung, die sich flexibel an unterschiedliche Fahrsituationen anpassen lässt.

Die fortschreitende Vernetzung der fahrzeuginternen Sensorsysteme unter anderem durch Geschwindigkeitssensoren, Kameras, GPS, Navigationssysteme, Neigungssensoren, Lenkwinkelsensoren, Helligkeitssensoren und Regensensoren mit dem Beleuchtungssystem im Fahrzeug und den ausgewerteten Sensordaten, erlauben eine situationsgerechte Beleuchtung in vielen Verkehrslagen und so eine optimale Unterstützung der Fahrzeugführerinnen und -führer.

Gleichzeitig resultiert aus der zunehmenden Vernetzung mit fahrzeugexternen Informationsquellen wie zum Beispiel drahtlose Verbindungen zu anderen Verkehrsteilnehmern oder Übermittlung von Sensordaten anderer Fahrzeuge zur Steuerung der Fahrzeugbeleuchtung, eine fortschreitende Verbesserung und Automatisierung der Fahrzeugbeleuchtung auch in schwierigen, gefährlichen oder unübersichtlichen Verkehrssituationen.

Nicht-Patentliteratur

- [1] ENDERS, M.: Pixel Light. In: PAL 2001, Darmstadt: Progress in automobile lighting [Elektronische Ressource]. München: Utz, 2001, Seite 234–239. – ISBN: 3-89675-971-X
- [2] KAUSCHKE, R. [et al.]: Innovative Optical Concepts for Future Car Headlights. In: Proceedings of the International Symposium on Progress in Automobile Lighting. Bd. 5. München: Utz, 2003, Seite 487–495. – ISBN: 3-8316-0257-3

- [3] SCHIERMEISTER, N. [et al.]: LEDs Leuchtdioden-Systeme im Scheinwerfer. In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift, Vol. 105, 2003, Nr. 9, Seite 782–791. – ISSN 2192-8800
- [4] ROSLAK, J.: Entwicklung eines aktiven Scheinwerfersystems zur blendungsfreien Ausleuchtung des Verkehrsraums. Paderborn : HNI, 2005. – ISBN: 978-3-935433-78-5
- [5] HAMM, M.; HUHN, W.: Weltweit erster Voll-LED-Scheinwerfer im Audi R8. In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift, Vol. 110, 2008, Nr. 10, Seite 894–900. – ISSN: 2192-8800
- [6] GÖTZ, M. [et al.]: Künftige Entwicklungen von LED-Scheinwerfern. In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift, Vol. 111, 2009, Nr. 9, Seite 620–627. – ISSN: 2192-8800
- [7] PREUSSLER, S. [et al.]: LED Vollscheinwerfer mit adaptivem Fernlicht. In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift, Vol. 113, 2011, Nr. 1, Seite 20–25. – ISSN: 2192-8800
- [8] KLEINKES, M. [et al.]: Nächste Schritte in der Entwicklung Von LED-Scheinwerfern. In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift, Vol. 114, 2012, Nr. 11, Seite 862–867. – ISSN: 2192-8800
- [9] MICHENFELDER, S.; NEUMANN, C.: Projektorbasiertes Automobiles Pixellicht. In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift, Vol. 115, 2013, Nr. 11, Seite 922–927. – ISSN: 2192-8800
- [10] DECLOEDT, P.; AICHRIEDLER, L.: LED-Pixel-Lichtquellen für Frontscheinwerfer. In: HANSER automotive, 2013, Nr. 11, Seite 28–31. – ISSN 1860-5699
- [11] EICHHORN, K.; LACHMAYER, R.: Scheinwerfer von morgen – multifunktional und hoch integriert. In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift, Vol. 101, 1999, Nr. 12, Seite 1026–1031. – ISSN: 2192-8800
- [12] HAMM, M.; FRIEDRICH, A.: Intelligente, adaptive Scheinwerfersysteme: Die Fahrzeug-Außenbeleuchtung der Zukunft. In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift, Vol. 102, 2000, Nr. 12, Seite 1042–1047. – ISSN: 2192-8800
- [13] REILHAC, P. [et al.]: Innovative Lichtsysteme erhöhen die Verkehrssicherheit. In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift, Vol. 110, 2008, Nr. 3, Seite 210–217. – ISSN: 2192-8800
- [14] WEIBLER, K.: Kameragesteuerte Optimierung des Scheinwerferlichts. In: ATZelextronik, Vol. 4, 2009, Nr. 5, Seite 42–49. – ISSN: 2192-8878
- [15] EICHHORN, K. [et al.]: Aktives Licht Innovative Ansätze für die nächste Scheinwerfer-Generation. In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift, Vol. 107, 2005, Nr. 11, Seite 978–983. – ISSN: 2192-8800
- [16] SCHNEIDER, D.: Markierungslicht – eine Scheinwerferlichtverteilung zur Aufmerksamkeitssteuerung und Wahrnehmungssteigerung von Fahrzeugführern. München: Utz, 2011 (Darmstädter Lichttechnik). ISBN: 978-3-8316-4116-1
- [17] ARMBRUSTER, T.: Car-to-X-based Lighting Systems. In: ISAL: Proceedings of the International Symposium on Automotive Lighting. Bd. 10. München: Utz, 2013, Seite 433–440. – ISBN: 978-3-8316-4291-5

Innenraumbeleuchtung bei Cabriolets

Dr. Andreas Monokroussos, Patentabteilung 1.24

Der Innenraum eines Fahrzeugs hat mittels seiner vielfältigen Einwirkungen einen wichtigen Einfluss auf den Menschen. Insbesondere die Sinne der Insassen werden dabei positiv oder negativ durch das Licht beeinflusst. Mittels guter Beleuchtung sowohl tagsüber als auch nachts, wird ein Fahrzeugfahrer aufmerksamer, fühlt sich entspannter und fährt insgesamt sicherer. In diesem Artikel soll eine Übersicht zu wichtigen Beleuchtungsarten und ihre Unterbringungsmöglichkeiten zur Ausleuchtung des Fahrzeuginnenraums gegeben werden. Anhand von ausgewählten Patentanmeldungen werden verschiedene Lösungsmöglichkeiten vorgestellt. Mit einem Ausblick auf künftig mögliche Funktionen der Innenraumbeleuchtung wird dieser Artikel abgeschlossen.

1 Einführung

Das Hauptmerkmal der Innenraumbeleuchtung bei Kraftfahrzeugen besteht in der Ausleuchtung des Passagierinnenraums. Sie ermöglicht das Zurechtfinden der Fahrzeuginsassen, wenn das Außenlicht fehlt. Weiterhin führt ein heute immer wichtiger werdender „Wohlfühlfaktor“ dazu, dass Lichtkonzepte und ihre Unterbringungsmöglichkeiten im Fahrzeuginnenraum von den Herstellern neu überdacht werden. So können neben einzelnen Leuchten an speziellen Stellen im Fahrzeug auch mehrere gleichzeitig aufleuchten. Ihre unterschiedlichen Formen und Farben spielen hierbei eine wachsende Rolle für die Weitergabe von Informationen über das Fahrzeug an den Menschen.

Der Schwerpunkt dieses Artikels liegt bei speziellen Lösungen in Kraftfahrzeugen mit Faltverdecken, insbesondere solchen mit Stoffverdecken wie Cabriolets. Diese haben im Gegensatz zu Festverdecken wenige stabile Anbindungsmöglichkeiten. Dabei wird auf Cabrioletfahrzeuge mit bewegbaren Metallverdecken (englisch: „*retractable hardtop* – RHT“) nur kurz eingegangen.

2 Funktionen der Fahrzeuginnenraumbeleuchtung

Bei Cabriolets wird eine Innenraumbeleuchtung wichtig, wenn mit geschlossenem Faltverdeck gefahren werden

muss, sei es bei schlechtem Wetter, in der Dämmerung oder bei Nacht.

Eine allgemeine Definition, was unter Fahrzeuginnenraumbeleuchtung zu verstehen ist, besagt, dass die Fahrzeuginnenbeleuchtung alle im Innenraum eines Fahrzeugs verwendeten Leuchten umfasst. Das sind Leuchten, die der allgemeinen Beleuchtung des Innenraums dienen, und die Instrumentenbeleuchtung; dagegen zählen die Kontroll- und Signalleuchten nicht dazu.

Der allgemeinen Beleuchtung im Personenkraftwagen mit geschlossenem Aufbau dienen meistens im Fahrzeuginnendach angebrachte Leuchten. Üblicherweise können sie mit Türkontaktschaltern und weiteren Schaltern betätigt werden. Ähnlich sind Handschuhfach- und Gepäckraumbeleuchtungen gestaltet. Zusätzlich sollen Leseleuchten für den Fahrer blendfrei sein und in einem eingeschränkten Lichtkegel eine punktuelle Ausleuchtung erlauben. Als Lampen werden überwiegend Soffittenlampen und Lichtemitterdioden (LEDs) verwendet.

In Kraftfahrzeugen werden zur Instrumentenbeleuchtung indirekte, meist dimmbare Beleuchtungen mit Glassockellampen oder LEDs eingesetzt, um eine Blend- und Reflexionsfreiheit zu erreichen [1].

Die Beleuchtung im Fahrzeuginnenraum ist für die Bedienungssicherheit von Schaltern und die Wiedergabe von Informationen über verschiedene Betriebszustände

besonders wichtig. Allerdings darf die Beleuchtung den Fahrzeugfahrer nicht ablenken oder blenden. Leuchten am Fahrzeuginnenhimmel haben in erster Linie als Flächen-, Punktlicht oder Lichtleiter die Funktion den Innenraum des Fahrzeugs zu erhellen. Weitere Leuchten wie Lese-, Handschuhfach-, Fußraum-, Griffschalen- und Ausstiegsleuchten in den Türen beziehungsweise am Schweller und sogar an Aschenbechern und Getränkehaltern dienen hingegen der Orientierung.

In heutigen Fahrzeugen hat das Licht außerdem eine spezielle, die Sinne beeinflussende Bedeutung, eine sogenannte Ambientefunktion. Deutlich wird diese Funktion bei Fahrzeugen mit Festverdecken wie zum Beispiel beim Mini, wo der Fahrer die Farbe zur Ausleuchtung der Instrumente stufenlos von Blau in Rot dimmen kann. Bei Fahrzeugen im Luxussegment wie dem BMW 5er GT oder der aktuellen S-Klasse von Mercedes sorgen Lichtleiter nachts für eine gemütliche Innenraum-Atmosphäre. Und schließlich bietet der Hersteller Rolls-Royce für das „Phantom Coupé“ sogar einen Sternenhimmel mit 1 600 LEDs im Dach an. Die S-Klasse von Mercedes-Benz hat dagegen 120 LEDs, die aber in sieben wählbaren Tönen leuchten können [6], [4]. Durch die Beeinflussung der menschlichen Sinne soll auch die Sicherheit beim Fahren wie beispielsweise durch kaltes LED-Licht (bläulich-weißes Licht) gesteigert werden können. Dieser Farbton soll munter machen und Müdigkeit verdrängen [2]. Dagegen soll warmes LED-Licht (oranges Licht) den Wohlfühlfaktor beim Fahrzeugfahrer steigern und eine harmonische Fahrweise unterstützen [5]. Die Schaffung einer „Wohlfühl-Atmosphäre“ könnte somit ein sicheres, sparsames und entspanntes Fahren bewirken [2]. Solche Beleuchtungsfunktionen kommen immer häufiger nun auch in Fahrzeugen mit faltverdecken vor.

Die Leuchtelemente für den Fahrzeuginnenraum können grob in die Kategorien Innendachbeleuchtung, Leseleuchten, Ambientebeleuchtung und Orientierungsbeleuchtung eingeteilt werden. Der Fokus dieses Beitrags liegt auf den ersten drei Arten, da die Orientierungsbeleuchtung von Cabriolets sich von anderen Fahrzeugen kaum unterscheidet.

3 Die Problematik der Unterbringungsmöglichkeiten im Verdeck

Die sich bei faltverdecken ergebende spezielle Problematik liegt sowohl in der nicht festen Grundlage für die Anbringung der Leuchtmittel als auch in der dazu unerlässlichen Stromzuleitung. Das Verdeck hat nur wenige feste Elemente wie die Spriegel und das Gestänge, besteht aber ansonsten aus einem flexiblen Stoff. Bei Verdecken mit faltbaren Festelementen fehlt zwar der weiche Stoffbezug, aber diese Elemente teilen, bewegen und falten sich ebenfalls, bis sie im Kofferraum abgelegt sind und umgekehrt. Die Beleuchtungselemente verbleiben dabei immer an ihren Stellen, zum einen um die Bewegung des Verdecks nicht zu behindern und andererseits um stets zuverlässig zu funktionieren. Somit ergeben sich für Leuchtelemente hauptsächlich drei Anbindungsarten am Verdeck:

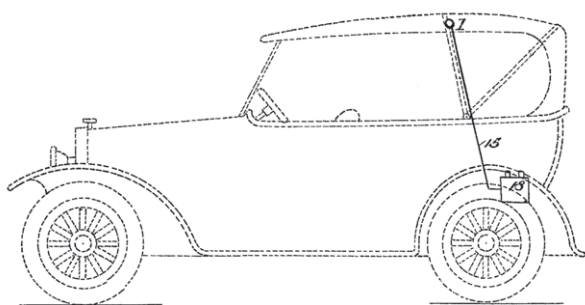
- am Rahmen der Heckscheibe,
- an Spriegelelementen und
- an der Innenseite des Stoffverdecks beziehungsweise am Innenhimmel.

Wenn der Anbringungsort im oder am Verdeck feststeht, folgt die Wahl des dazu geeigneten Beleuchtungsmittels. Heutige Lösungen greifen insbesondere auf LEDs zurück, da sie energiesparsam arbeiten, klein und robust sind. Im Folgenden werden exemplarische Lösungen vorgestellt, bei denen sich auch Überlappungen der Funktionskategorien, insbesondere bei der Deckeninnenbeleuchtung und der Ambientebeleuchtung, ergeben können.

4 Frühe Ansätze einer Innenraumbeleuchtung bei faltverdeckfahrzeugen

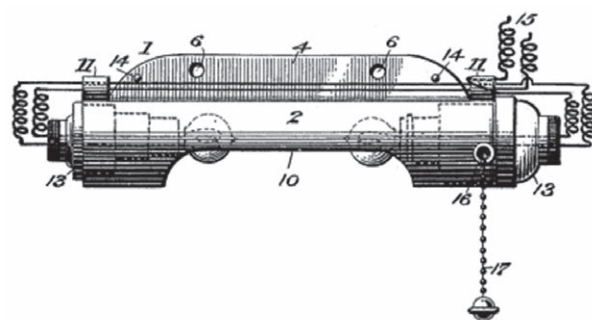
Schon in den Anfängen des Automobilbaus wurde die Bedeutung einer Innenraumbeleuchtung schnell klar, da bei der damals fast ausschließlich verwendeten dunklen Polsterung im Innenraum wenig zu erkennen war. So war ab einer bestimmten Tageslichtstärke kein Lesen mehr möglich und etwas, das in den Fußraum hinabgefallen war, war zumeist nicht mehr oder nur ganz schwer wieder auffindbar war. Auch notwendige

Werkzeuge für die damaligen Unterwegsreparaturen ließen sich im dunklen Innenraum nicht mehr leicht finden. Eine Instrumentenbeleuchtung gab es kaum oder gar nicht. Man behalf sich mit Handlampen oder kleinen Laternen, die allerdings nicht einfach am Fahrzeug angebracht werden konnten, um frei im Fahrgastraum zu suchen. Daher wurden erste Lösungen entwickelt, um bei Fahrzeugen mit Stoffverdecken eine Innenbeleuchtung zum Lesen und zum Erleuchten des Passagierinnenraums an eine geeignete Stelle anzubringen. So zeigt die Figur 1 ein typisches Fahrzeug aus den 1920er Jahren mit einem Stoffverdeck und dem dazugehörigen Gestänge und Querspiegeln. Das Verdeckgestänge war an der Karosserie befestigt. Als feste Unterlage für die Anbringung eines Innenraumlichts, das den darunter liegenden Raum beleuchtet, ohne den Fahrzeugfahrer abzulenken, wurde die Unterseite eines hinteren Spiegels ausgewählt.



Figur 1: Kraftfahrzeug mit Innenbeleuchtung der 1920er Jahre (US 1 376 822 A).

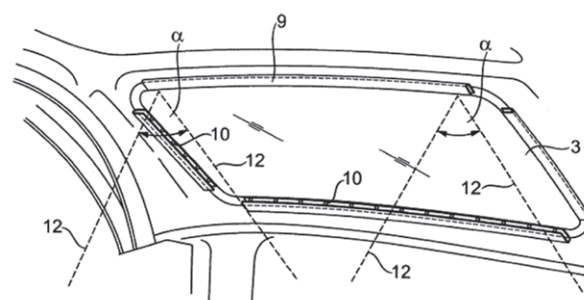
Wichtig war, dass die Beleuchtungseinrichtung 7 am Spiegel beim Zusammenfallen des Verdecks trotzdem erhalten blieb. Die elektrischen Leiter 15 wurden bevorzugt am Gestänge entlang befestigt, wo sie am wenigsten auffielen. Die Energie wurde aus der aufladbaren Fahrzeugbatterie oder einer eigenen Batterie 18 geliefert. Wurde nun Licht benötigt, konnte die Beleuchtungseinrichtung mithilfe einer herunterhängenden Schaltschnur 17 wie bei einer antiken Nachttischlampe eingeschaltet werden (Figur 2). Der Innenraum des Lichtgehäuses 2 wurde bevorzugt mit einer Reflexionsfarbe überstrichen, poliert, vernickelt, oder sogar mit einer Emailleschicht überzogen. Durch die Glühlampen konnte dann das Licht aus einer Blendenöffnung 10 in den Innenraum gestreut werden.



Figur 2: Innenraumlampe für ein faltverdeckfahrzeug um 1921 (US 1 376 822 A).

5 Die Anbindung am Scheibenrahmen

Um den Fahrzeuginnenraum nach dem Schließen des faltverdecks entsprechend auszuleuchten, ist es wichtig, nicht nur ausreichend Licht zu erzeugen, sondern besonders darauf zu achten, die Insassen und ganz besonders den Fahrzeugfahrer nicht zu blenden. Die Lichtquelle sollte daher möglichst weit vom Autofahrer entfernt angebracht sein. Als Lösung bietet sich an, den Randbereich der Heckscheibe als Anbindungsgrundlage zur Befestigung von Leuchtmitteln zu nutzen. Figur 3 zeigt wie beispielsweise zwei Lichtquellen 10 am oberen Seitenrand der Heckscheibe angebracht sind. Diese strahlen in einem Winkel α Licht 12 aus. Darüber hinaus ist es möglich, Lichtquellen am unteren und/oder seitlichen Scheibenrahmen anzubringen.



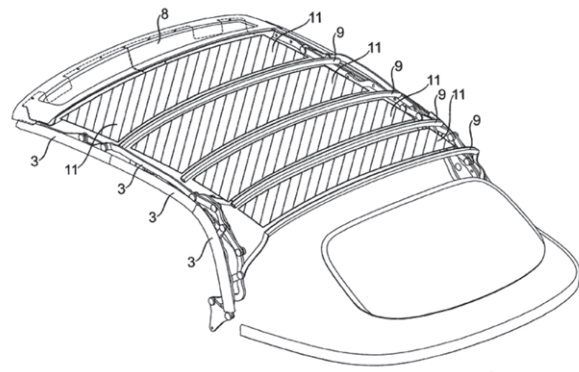
Figur 3: Lichtquellen angebunden am Rand einer Heckscheibe (DE 10 2008 025 768 A1).

Variationen ergeben sich hier durch die Erstreckung der Lichtquellen als Lichtleisten 10 mit unterschiedlich vielen LEDs. Es können somit entweder begrenzte Abschnitte des Scheibenrands für die Unterbringung der Leuchtmittel oder auch der gesamte Rand der Heckscheibe genutzt werden. Die Alternative zu LEDs wären

Lichtleiter. Durch eine Abdeckung oder mittels eines Teils der Halterung ist es möglich den Lichtausfall so einzustellen und zu lenken, dass nur die hinteren Sitzplätze beleuchtet werden, ohne den Autofahrer abzulenken. Ein besonderer Vorteil dieser Anbindungsmöglichkeit liegt in der Versorgung des Beleuchtungsmittels. Dazu wird die vorhandene Stromversorgung der Heckscheibenheizdrähte genutzt und über eine einfache Verkabelung Strom abgezweigt. Durch die randseitige Anordnung der Beleuchtung zusätzlich zu der an der oberen Seite des Heckscheibenrands, ergibt sich ein guter Kompromiss zwischen einer Raumbelichtung von oben und einer seitlichen Ambientebeleuchtung. Eine automatisierte Steuerung der Beleuchtung ist – je nach Fahrsituation – ebenfalls möglich.

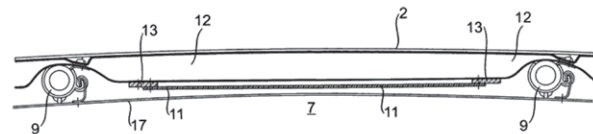
6 Die Anbindung am Stoffverdeck

Die Bauraumproblematik, insbesondere bei der Unterbringung von Leuchtmitteln im Innenraum eines Cabriolets, führt dazu, dass neben den geläufigen Lampen und LEDs außerdem besondere Leuchtmittel zur Anwendung kommen. Damit können nicht nur die oft benutzten festen Anbindungsmöglichkeiten des Verdecks genutzt werden, sondern sie ermöglichen auch die Festlegung an der weichen Verdeckschicht selber. Eine solche Leuchtmittellösung bietet die Elektrolumineszenzfolie. Mit ihr sind insbesondere flächige Ausgestaltungen der Beleuchtung möglich. Daneben bietet diese Folie noch weitere Vorteile wie den sehr flachen Aufbau, die gleichmäßige Ausleuchtung über eine gesamte Fläche und sogar die Möglichkeit das in verschiedenen Lumineszenzfarben zu machen. Eine weitere Besonderheit liegt hier in der erwähnten flexiblen Anbringung des Leuchtmittels am Verdeck selber. Ohne den Innenhimmel einzuschneiden, können zum Beispiel zweiteilige Klettbander zum Einsatz kommen, die die Leuchtfolie ausreichend fest an der Verdeckschicht halten. Wie in der Figur 4 gezeigt wird, besteht das Verdeck aus Spriegeln 9, der Dachspitze 8 und Verdeckgestängenteilen 12. Zwischen diesen Verdeckelementen sind Elektrolumineszenzfolien als ausgebildete Leuchtmittel 11 eingebaut.



Figur 4: Stoffverdeck mit Elektrolumineszenzfolien (DE 10 2007 042 851 A1).

Das Leuchtmittel 11 wird mittels als Klettbander ausgebildeten Klettverschlüssen 13 an der Polstermatte 12 der Verdeckschicht 2 zwischen den Spriegeln 9 befestigt. In der Figur 5 wird in einer Schnittansicht in Fahrzeuginnenraumrichtung dieser Aufbau dargestellt. Die Klettbander der Klettverschlüsse laufen dabei an den Seiten des Leuchtmittels 11 entlang.



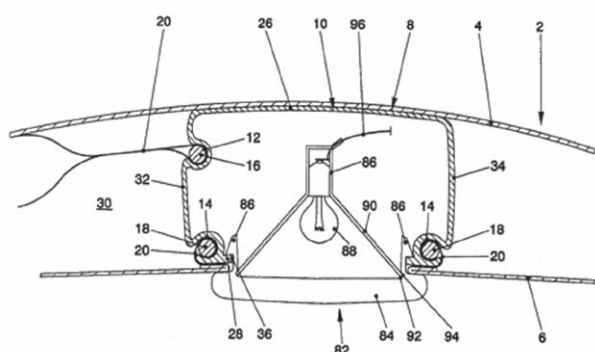
Figur 5: Schnittansicht des Stoffverdecks mit einem Beleuchtungsmittel (DE 10 2007 042 851 A1).

Hier zeigt sich die besondere Stärke dieses Beleuchtungsmittels. Es passt sich dünn und flexibel an die Kontur an und kann entsprechend leicht angebracht werden, sodass es bei der Ein- und Ausfaltung des Verdecks am Stoffbezug sicher hält.

7 Die Anbindung am Dachspiegel

Um Beleuchtungsmittel im Innenraum eines Cabriolets anzubringen, kommen bevorzugt die Dachspiegel des faltverdecks in Frage, da diese insbesondere aus Leichtmetall-Strangpressprofilen oder aus Kunststoff gefertigt sind und Hohlräume aufweisen. Diese Hohlräume bieten Platz für die Unterbringung funktionaler Bauteile wie Ablagefächer, Lautsprecher und Lampen zum Lesen sowie zur Ausleuchtung des Innenraums.

Die Leselampen stammen noch aus Zeiten, als vor allem der Beifahrer die Karte lesen und den Fahrzeugfahrer instruieren musste. Dieses Überbleibsel wird auch heute noch weiter verbaut, obwohl inzwischen zumeist Navigationsgeräte mit Bildschirmen im Fahrzeug vorhanden sind. Wie in Figur 6 beispielhaft gezeigt, ist durch eine Aussparung im Spriegel in Richtung des Innenraums dieser für die Aufnahme von einem Lampengehäuse vorbereitet.



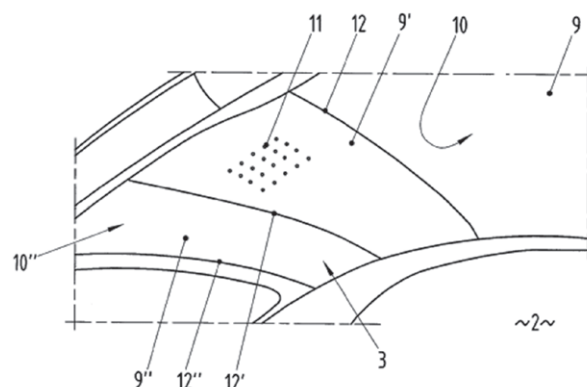
Figur 6: Spriegelquerschnitt mit einem Leuchtmittel (DE 101 13 100 A1).

Im gezeigten Spriegelausschnitt ist eine Lampe 82 eingefügt und mittels Clips 86 festgehalten. Durch die Clipanbindung lassen sich zum Beispiel aus einer Großserie genommene Lampen in die vorgefertigten Aussparungen 36 einfach einsetzen und befestigen, was Kosten spart. Außerdem schließt die Lampe 82 noch eine Streuscheibe 84, eine Lampenfassung 86 für eine Glühlampe 88 sowie einen zugehörigen Reflektor 90 mit ein. Die nötige Stromzuführung erfolgt über ein Steckerkabel 96, welches vor dem Einsetzen der Lampe 82 in die entsprechende Aussparung 36 in den hohlen Spriegel 8 verlegt wurde. Diese Anbindungslösung gilt als relativ einfach und bietet ein hohes Maß an Stabilität. Geschaltet wird beispielsweise über einen Schalter (hier nicht gezeigt) an der Instrumententafel.

8 Die Anbindung bei einem Metallklappdach

Fahrzeuge mit einem Metallklappdach zeichnen sich durch ein Faltdach aus, das meist aus zwei bis drei festen Verdeckabschnitten besteht und mittels einer

Mechanik den Innenraum eines Kabrioletts öffnet oder verschließt. Der Vorteil solch einer Verdeckstruktur ist, dass die Innenverkleidung, das heißt der Innenhimmel, sich flächig an dem jeweiligen Dachsegment anschmiegt. Spriegel wie beim Stoffverdeck unterbrechen nicht die innere Verdeckstruktur. Jedes Dachsegment hat ein separates und selbsttragendes Verkleidungselement, das den Innenhimmel bildet. Daraus ergibt sich eine größere Freiheit bei der Gestaltung der Verkleidungselemente am Innenhimmel. So kann wie in Figur 7 dargestellt der jeweilige Verkleidungsabschnitt eines Dachsegments 9, 9', 9'' eine dem Fahrzeuginnenraum 2 zugewandte, selbstleuchtende oder beleuchtete Oberfläche 10, 10', 10'' aufweisen. Vorzugsweise können hier beispielsweise fluoreszierende Folien (IC-Folien) Verwendung finden.



Figur 7: Innenansicht auf den geschlossenen Dachhimmel eines Metallklappdachs (DE 10 2006 042 201 A1).

Wenn nun in Richtung des Innenraums 2 noch zusätzlich eine lichtdurchlässige Maske 11 in Form einer perforierten Folie angebracht wird, dann ermöglicht diese unterschiedliche Motive am Innenhimmel 3 lichttechnisch darzustellen. So lässt sich ohne großen Aufwand der Eindruck eines Sternenhimmels über den Fondpassagieren erzeugen. Ein entsprechender Farbwechsel beziehungsweise Leuchtintensitätswechsel unterstützt hierbei die Ambientebeleuchtung. Alternativen wie die in Kapitel 2 dargestellten Möglichkeiten und solche die bei Festdachfahrzeugen Verwendung finden sind durch die Anzahl der LEDs schwerer und aufwändiger in ihrer Unterbringung und daher bei bewegbaren Verdecken weniger geeignet.

9 Fazit und Ausblick

Die Unterbringungsmöglichkeiten von Lichtquellen in faltbaren Verdecken sind – wie gezeigt – eingeschränkt. Es werden verschiedene Lösungsmöglichkeiten verfolgt, die jedoch schon sehr weit ausgereizt sind. Auf der Suche nach weiteren Verbesserungen für den Fahrzeuginnenraum rückt heute zusehends das Innenraumambiente in den Vordergrund. Wo die Ergonomie und der Komfort eine wichtige Rolle spielen, erfährt das Beleuchtungsmedium einen neuen Wandel [6]. Künftig werden immer mehr Aufgaben für die Innenraumbeleuchtung im Fahrzeug hinzukommen. Die reine Beleuchtungsfunktion wird eher „zweitrangig“ sein. Die heutigen Beleuchtungskonzepte zeigen Tendenzen, dass der Mensch mit Beleuchtung in Zukunft mehr unterhalten werden soll. Wichtig wird hierbei immer sein, dass es für ihn angenehm ist, er Freude empfindet und somit eine Zufriedenheit erfährt. Neben der geschickten Unterbringung von Lichtquellen wird es eher zu „speziellen Inszenierungen“ im Fahrzeuginnenraum mittels Beleuchtung kommen, zum Beispiel werden die Insassen durch Lichtakzente willkommen geheißen, bekommen durch punktuelle Beleuchtung ihren Platz zugewiesen und können mit dem richtigen Licht zur richtigen Zeit in die richtige Stimmung versetzt werden. Das Automobil soll für den Menschen als ein Stück Lebensraum verstanden werden, in welchem er sich wohlfühlen soll. So könnte ein Fahrzeugfahrer in künftigen Modellen zwischen verschiedenen Farbtemperaturen in einem Auto wählen können, abhängig von seiner Stimmung und Fahrzeugausstattung. Der Trend könnte sich hin in Richtung von unterschiedlichen, die jeweilige Situation angepasster Beleuchtung bewegen, je nachdem, wo das Auto gerade fährt, Autobahn, Landstraße oder Stadt. Es wäre sogar eine tages- und jahreszeitabhängige Helligkeits- und Temperaturanpassung bezogen auf den Biorhythmus des Fahrzeugfahrers möglich [6], [5], [3].

Nicht-Patentliteratur

- [1] Wikipedia: Fahrzeugbeleuchtung, Fahrzeuginnenbeleuchtung, URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Fahrzeugbeleuchtung> [recherchiert am 26.02.2014]
- [2] OSRAM: News & Wissen, Automotive Special, Design-Autolampen, Innenbeleuchtung; LED-Innenbeleuchtung; moderne Lichtakzente nach eigenem Wunsch, URL: http://www.osram.de/osram_de/news-und-wissen/automotive-special/design-autolampen---eyecatcher-in-stylischem-look/auto-led-innenbeleuchtung/index.jsp [recherchiert am 18.03.2014]
- [3] OSRAM: News & Wissen, Automotive Special, Design-Autolampen, Innenbeleuchtung, Ambientebeleuchtung; Ambientebeleuchtung mit LED – stylisches und flexibles Licht, URL: http://www.osram.de/osram_de/news-und-wissen/automotive-special/design-autolampen---eyecatcher-in-stylischem-look/auto-led-innenbeleuchtung/ambientebeleuchtung-mit-led/index.jsp [recherchiert am 18.03.2014]
- [4] Spiegel Online Auto: Ambiente-Beleuchtung: Lichtblick am Autohimmel, URL: <http://www.spiegel.de/auto/fahrkultur/ambiente-beleuchtung-autobauer-ruesten-innenraeume-mit-farblight-auf-a-939786.html> [recherchiert am 18.03.2014]
- [5] Die Welt: Wenn das Auto zum neuen Lebensraum wird, 06.02.2011, URL: <http://www.welt.de/motor/article12447504/Wenn-das-Auto-zum-neuen-Lebensraum-wird.html> [recherchiert am 18.03.2014]
- [6] Berlin.de: Das offizielle Hauptstadtportal, Themen, Auto&Motor, Zubehör; Auto-Hersteller feilen am perfekten Ambiente, 16.01.2012, URL: <https://www.berlin.de/special/auto-und-motor/zubehoer/1081483-44850-herstellerfeilenanderperfektenatmosph%C3%A4re.html> [recherchiert am 18.03.2014]

Dreidimensionale Vermessung mit Licht

Dipl.-Phys. Dr. Uwe Griesinger, Dipl.-Phys. Dr. Johann Winter, Patentabteilung 1.54

Licht ist ein vielseitig einsetzbares Werkzeug. Das zeigt sich insbesondere in der Nutzung von Licht für das dreidimensionale Vermessen von Oberflächen, für das eine ganze Reihe unterschiedlicher Lichtmesstechniken zur Verfügung stehen. Der Schwerpunkt dieses Artikels liegt auf den dreidimensionalen Vermessungsverfahren mit aktiver Beleuchtung. Nach einer kurzen Einordnung dieser Messtechniken in die gesamte Bandbreite der Lichtmessverfahren werden die Triangulationsmessmethoden mit aktiver Beleuchtung und die Deflektometrie detaillierter vorgestellt. Ausgewählte Beispiele verdeutlichen die neuen Entwicklungen auf diesen Gebieten.

1 Einleitung

Das exakte Orientieren und Wahrnehmen durch Vermessen der dreidimensionalen Umwelt ist nicht nur für die meisten Lebensformen wichtig, sondern gewinnt auch in vielen Bereichen der Technik zunehmend an Bedeutung. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit seien hier Sicherheitssysteme im Automobilbereich [1], autonom agierende Fahrzeuge (Roboter) [2], Qualitätssicherungssysteme [3] sowie die Medizintechnik (DE 10 2011 077 564 A1, DE 10 2004 007 455 A1) genannt.

Im Prinzip macht es jeder von uns jeden Tag vielfach: Mit unseren Augen und der damit verbundenen Auswertung in unserem Gehirn vermessen wir die Umwelt, um einen dreidimensionalen Eindruck unserer Umgebung zu erhalten. Zu diesem natürlichen Messverfahren gibt es auch die technischen Entsprechungen wie die dreidimensionale Auswertung von Stereoaufnahmen (Depth from Stereo) [4] und die Gewinnung von dreidimensionaler Information über die Schärfentiefe (Depth from [De-]Focus) [5], [6]. Diesen Verfahren ist gemeinsam, dass sie ohne eine besondere Beleuchtung auskommen (sogenannte passive Verfahren) und lediglich das Raum- beziehungsweise Umgebungslicht für die Messung verwenden.

In diesem Beitrag werden Messverfahren vorgestellt, die im Gegensatz zu den vorgenannten Verfahren eine spezielle Beleuchtung, eine sogenannte *aktive* Beleuch-

tung, für die dreidimensionale Vermessung einsetzen. Dazu gehören im weiteren Sinne auch die Time-of-Flight Messverfahren (Radarmesstechnik wie beispielsweise Abstandsradar, LIDAR); diese werden aber hier im Folgenden nicht diskutiert.

In einem ersten Teil dieses Beitrags sollen zunächst aktive 3D-Messverfahren vorgestellt werden, bei denen der zu vermessende Gegenstand mit einer speziellen Beleuchtung angestrahlt wird. Das auf dem Gegenstand gestreute Licht wird gemessen und aus diesen Messdaten wird die dreidimensionale Oberflächengeometrie des Gegenstands bestimmt. Diese aktiven Messverfahren ermöglichen eine höhere Genauigkeit und eine vereinfachte Auswertung der Ergebnisse im Vergleich zu den zuvor genannten passiven Verfahren.

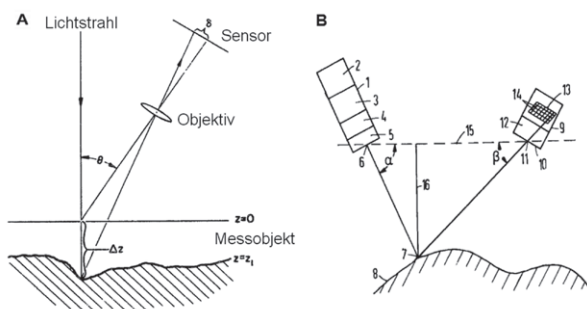
Der zweite Teil des Beitrags ist der 3D-Vermessung von spiegelnden oder teilweise spiegelnden Gegenständen mittels Deflektometrie gewidmet. Ebenso wie bei der aktiven Beleuchtung werden auch hier entsprechend der Gegenstandsgeometrie deformierte Lichtmuster ausgewertet. Ein spiegelnder Gegenstand kann jedoch nicht als Projektionsfläche für ein Lichtmuster dienen, da er Licht nicht diffus streut, sondern lediglich nach dem Reflexionsgesetz umlenkt, und insofern „unsichtbar“ ist. Ähnlichkeiten im Messaufbau dürfen hier also nicht über die Andersartigkeit des Messprinzips hinwegtäuschen.

2 Triangulationsverfahren mit aktiver Beleuchtung

2.1 Die Grundlagen

2.1.1 Die Lasertriangulation

Die Grundlage der hier vorgestellten aktiven optischen Messverfahren bildet die Lasertriangulation [7]. Hierbei wird ein Laserstrahl (bei geringen Anforderungen auch die Strahlung einer Leuchtdiode) auf das Messobjekt fokussiert. Eine Kamera nimmt das Bild des Messobjekts einschließlich des gestreuten Laserstrahls mithilfe einer seitlich angeordneten Kamera auf (vergleiche die Figur 1A). Eine solche Kamera umfasst neben dem Objektiv auch ein lichtempfindliches Sensorelement, das ein CCD- oder CMOS Chip, eine ortsauflösende Photodiode oder eine CCD-Zeile sein kann. Die Position und Ausrichtung des Laserstrahls und der Kamera wird vor der Messung bestimmt. Ändert sich nun die Entfernung des Messobjekts vom Sensor (Abstandsänderung Δz in Figur 1A), so ändert sich ebenfalls der Winkel θ , unter dem der Lichtpunkt beobachtet wird, und damit auch die Position seines Abbilds auf dem Sensor der Kamera (Verschiebung um δ auf dem Sensor, vergleiche Figur 1A). Aus der Positionsänderung wird mithilfe der Winkelfunktionen die Entfernung des Objekts vom Laserprojektor berechnet.



Figur 1:

A: Prinzip der Lasertriangulation als Stand der Technik aus der Offenlegungsschrift DE 31 22 712 A1 mit zugefügten Beschreibungen
B: Lasertriangulation zum berührungsfreien Messen eines Oberflächenprofils (aus DE 2 113 522 C).

Ein wichtiger Vorteil der Triangulation ist die Nutzung rein trigonometrischer Verfahren für die Positionsbestimmung des Messpunkts. Die Messung kann daher

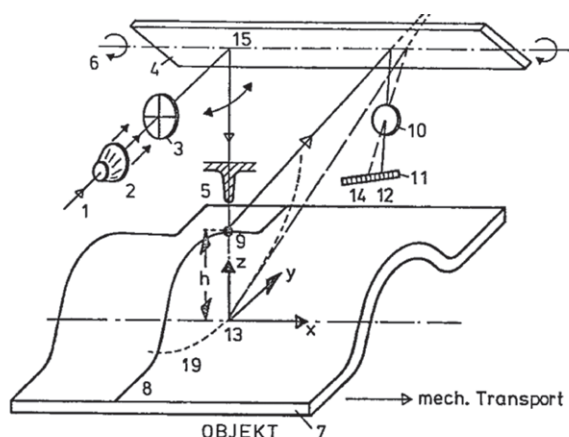
kontinuierlich erfolgen und eignet sich damit besonders für Abstandsmessungen an bewegten Objekten. Um die Fremdlichtempfindlichkeit und den Einfluss inhomogen reflektierender Oberflächen zu senken, muss der Messpunkt möglichst klein und hell sein, weshalb der Laser als bevorzugte Lichtquelle verwendet wird. Oft arbeitet ein solches Messsystem auch im Impulsbetrieb, um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern. Das Verfahren ist nur für geringe Entfernungen geeignet, da seine Empfindlichkeit in der vierten Potenz (Zweiwegdämpfung) mit dem Abstand zwischen Sender und Empfänger abfällt. Die Lichtquelle und die Kamera sind häufig zusammen in einem Gehäuse untergebracht.

Die Lasertriangulation zur Vermessung von Oberflächenprofilen ist ein bekanntes Verfahren, das auch schon seit vielen Jahren angewendet wird, beispielhaft seien hier die Offenlegungsschrift DE 31 22 712 A1 (siehe Figur 1A), die Patentschrift DE 2 113 522 C (siehe Figur 1B) oder die Patentschrift US 3 633 010 A genannt. Das zugrundeliegende Verfahren zur automatischen Abstandsmessung ist aber schon länger bekannt wie beispielsweise die Patentschrift US 3 376 411 A zeigt.

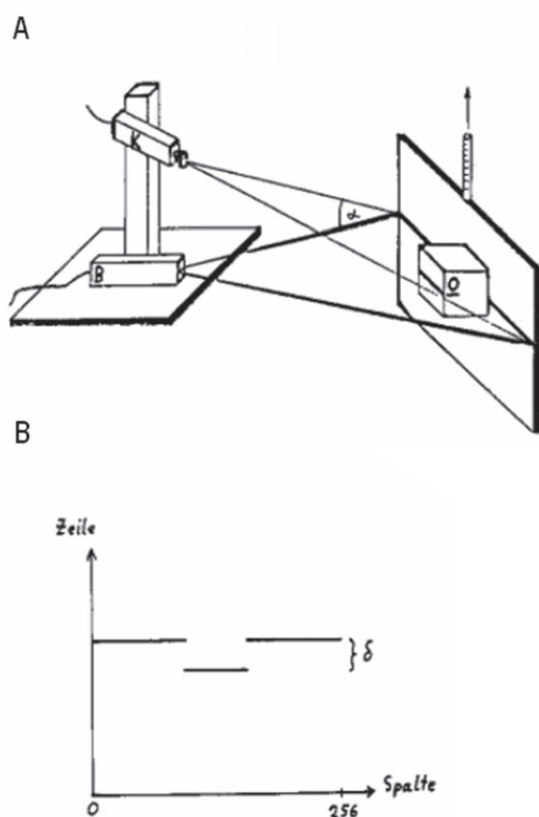
2.1.2 Das Lichtschnittverfahren

Anstatt einen einzelnen Laserlicht-Punkt abwechselnd an unterschiedliche Stellen zu projizieren, kann auch eine Lichtlinie projiziert werden. Durch die Verwendung einer Lichtlinie ist es möglich, das Vermessen von Oberflächenprofilen deutlich schneller durchzuführen.

Eine Möglichkeit, eine solche Linie zu erzeugen, besteht darin, sie mittels eines schnell rotierenden Drehspiegels, sozusagen im Zeitmultiplex-Verfahren, als Laserlinie zu projizieren. Die Messlinie wird durch das schnelle Aneinanderreihen von vielen Messpunkten gebildet. Ein Beispiel für dieses Messverfahren findet sich in der Offenlegungsschrift DE 33 15 576 A1 und der deutschen Patentschrift DE 33 37 251 C2. Mithilfe der letztgenannten Druckschrift, aus der die Figur 2 wiedergegeben ist, kann das Messprinzip verdeutlicht werden: Das Erzeugen des Messpunkts (9) auf dem Objekt erfolgt synchron zu der Messung mittels Triangulation, sodass



Figur 2: Triangulatorische Oberflächenvermessung mit einer Lichtlinie (aus DE 33 37 251 C2). Ein Lasermessstrahl (1) fällt durch eine Optik (2, 3) auf einen Drehspeigel (4) mit Drehachse (6) und wird dadurch auf die zu vermessende Oberfläche (7) reflektiert. Ein Teil des von der Oberfläche gestreuten Lichts wird – wiederum reflektiert an dem Drehspeigel (4) – von der Zeilenkamera (10, 11) detektiert.



Figur 3: Prinzip des Lichtschnittverfahrens aus der Patentschrift DE 34 23 135 C2

A: Messaufbau
B: Messergebnis

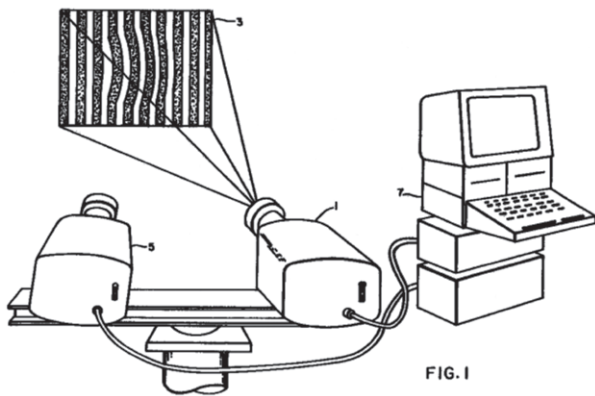
jeweils eine exakte Zuordnung des Messpunkts zu dem Bildpunkt (auf dem Sensor 11) durch die Drehspiegel-lage gegeben ist. Hier handelt es sich somit um eine schnelle Abfolge von Lasertriangulationsmessungen entlang einer Linie.

Eine weitere Möglichkeit für das Lichtschnittverfahren besteht darin, eine Lichtlinie mittels einer Zylinderlinse und/oder Blenden zu erzeugen. Frühe Beispiele für dieses Messverfahren sind in den Offenlegungsschriften US 3 773 422 A und DE 24 31 931 A1 publiziert. Im Gegensatz zu dem erstgenannten Lichtschnittmessverfahren ist bei einer gleichzeitig erzeugten Lichtlinie die eindeutige Zuordnung der Messpunkte zu den Bildpunkten nicht mehr einfach gegeben. Der Zeitgewinn durch das gleichzeitige Projizieren einer Lichtschnittlinie erfordert einen größeren messtechnischen Aufwand. So ist bei diesem Verfahren die Verwendung von zweidimensionalen Messsensoren notwendig, und es müssen aufwändigere Auswertalgorithmen und deutlich mehr Rechenleistung eingesetzt werden. Beispiele für diese zweite Lichtschnitttechnik finden sich in der Patentschrift DE 34 23 135 C2 (vergleiche Figur 3) oder auch in neueren Patentschriften wie der US 6 529 627 B1.

2.2 Die Musterprojektion

2.2.1 Die Grundlage und Problemstellung

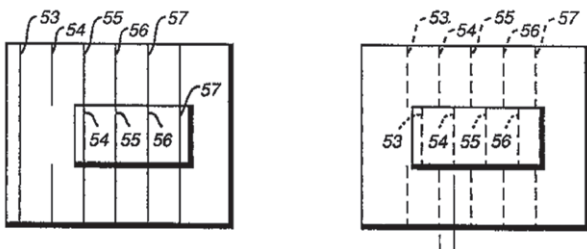
Um die Abtastgeschwindigkeit weiter zu erhöhen, ist der nächste logische Schritt anstatt einer eindimensionalen Linie ein zweidimensionales Muster zu verwenden. Durch die Projektion eines Gittermusters auf das Messobjekt können somit mehrere Lichtlinien gleichzeitig erzeugt werden. Im einfachsten Fall wird dazu ein Streifenmuster verwendet. Die Figur 4 aus der Patentschrift US 4 653 104 A zeigt das Messprinzip. Mittels eines Projektors (1) wird ein Messmuster (hier ein Streifenmuster) auf die zu vermessende Oberfläche projiziert. Eine Kamera (5) nimmt das Musterbild auf und überträgt die Daten zur Auswertung an einen Computer. Mithilfe der Lageänderung der Musterlinien, die durch die Oberflächenstruktur hervorgerufen wird, kann das dreidimensionale Oberflächenprofil berechnet werden.



Figur 4: Messprinzip zu dem Musterprojektionsverfahren (aus US 4 653 104 A).

Die Ortsauflösung dieses Messverfahrens ist umgekehrt proportional zu den Abständen der Lichtstreifen. Das hochaufgelöste Vermessen von Oberflächen mit relativ großen Höhenunterschieden führt jedoch dazu, dass Licht unterschiedlicher Streifen im selben Bereich abgebildet wird. Es ist somit nicht mehr möglich, die Musterpunkte den Bildpunkten zuzuordnen.

In der Figur 5 (aus der Patentschrift US 4 978 224 A) wird dieser Sachverhalt verdeutlicht. Sobald der Höhenunterschied zwischen der Grundplatte und dem zu vermessenden Objekt (hier ein quaderförmiger Gegenstand) zu groß wird oder die Abstände der Messlinien zu klein werden, tritt der Fall ein, der auf der linken Seite der Figur 5 gezeigt ist: Aus der Messung kann nicht mehr geschlossen werden, welche der Messlinien (53–57) auf dem Gegenstand abgebildet ist. Nur solange die Messsituation so ist wie auf der rechten Seite der Figur 5 erkennbar, kann eine eindeutige Zuordnung erfolgen.

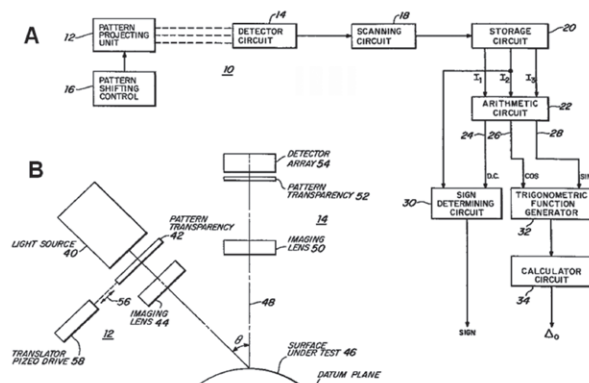


Figur 5: Zur Verdeutlichung des Korrespondenzproblems (aus US 4 978 224 A)

Diese Mehrdeutigkeit der Zuordnung hat entsprechende Messfehler zur Folge, da nur bei einer bekannten Zuordenbarkeit eines Punkts auf dem projizierten Messmuster zu einem Bildpunkt (auf dem Sensor) der Abstand und somit das Oberflächenprofil mit dem oben vorgestellten Triangulationsverfahren bestimmt werden kann. Diese Zuordnung wird in der Literatur auch Korrespondenz genannt. Das für dieses Messverfahren daraus entstehende Problem ist daher das sogenannte Korrespondenzproblem.

Eine Möglichkeit dieses Problem zumindest teilweise zu umgehen, bietet das sogenannte Phasenverschiebungsverfahren (Phase-Shift). Dabei wird ein Streifenmuster von einem Gitter oder Dia, mit relativ großen Streifenabständen mehrfach projiziert und jeweils ein Bild aufgenommen. Das Muster für jedes Einzelbild wird jeweils um einen bestimmten Betrag phasenverschoben und aufprojiziert. Das kann durch Verschieben des Gitters oder Dias erfolgen oder heutzutage oft durch elektronisches Verschieben eines durch einen LCD-Projektor erzeugten Musters.

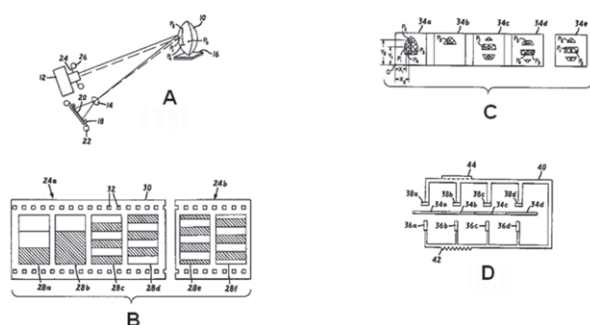
Die Figur 6 zeigt ein Beispiel für dieses Messverfahren. Durch die relativ großen Streifenabstände ist die Zuordenbarkeit des Messmusters in den meisten Fällen gegeben. Durch das wiederholte phasenverschobene Messen der Oberfläche wird eine gute Ortsauflösung erreicht. Nachteilig ist bei diesem Verfahren, dass Korrespondenzfehler nicht ausgeschlossen werden können. Außerdem wird durch das wiederholte Messen die Messzeit verlängert, was dieses Verfahren speziell für bewegte Objekte ungeeignet macht.



Figur 6: Prinzip des Phasenverschiebungsverfahrens (aus US 4 212 073 A)

A zeigt das Blockdiagramm der Steuerung und B zeigt den optischen Aufbau als Schnittbild.

Neben der Phasenverschiebungs-Methode wurde schon sehr früh ein Verfahren mit einer Folge von unterschiedlichen Messmustern verwendet. Ähnlich wie bei dem Phasenverschiebungsverfahren ermöglicht die Folge der Muster eine Zuordnung der Messmuster zu den Bildpunkten, ohne Nachteile bei der Ortsauflösung zu erleiden. Analog zu dem Phasenverschiebungsverfahren bedingt dieser Vorteil eine Sequenz von Messungen und damit eine längere Messzeit. Die Figur 7 zeigt dieses Messprinzip (siehe Figur 7A), die verwendeten Messmuster (siehe Figur 7B), die Messergebnisse (siehe Figur 7C) und eine Vorrichtung diese Messergebnisse auszuwerten (siehe Figur 7D).



Figur 7: 3D-Messverfahren (A) mit einer Sequenz unterschiedlicher Beleuchtungsmuster (B) und den Messergebnissen (C). Die Figur 7D zeigt die Auswertevorrichtung (aus DE 24 47 789 A1).

Da die Vorteile der Musterprojektionsmessverfahren (kurze Messzeiten, hohe Messgenauigkeit und dafür vergleichsweise geringe Rechenleistung) überwiegen, wurden eine Vielzahl von Verfahren entwickelt, um das Korrespondenzproblem zu lösen. Auch in den letzten Jahren lag einer der Schwerpunkte in der Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der aktiven optischen Messverfahren darin, weitere Methoden dafür zu entwickeln beziehungsweise zu verfeinern.

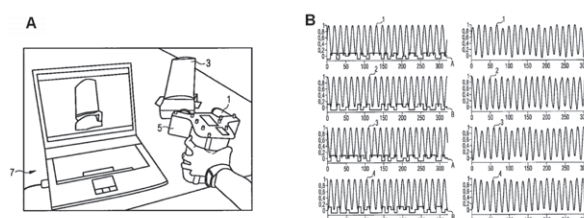
2.2.2 Lösungen für das Korrespondenzproblem

Einen guten Überblick zu den bekannten Verfahren für die Lösung des Korrespondenzproblems bietet die Veröffentlichung von J. Salvi et al. [8]. Insbesondere die Tabelle 1 in der Druckschrift [8] zeigt in übersichtlicher Form die verschiedenen Ansätze wie das Korrespondenzproblem für das dreidimensionale Vermessen von Oberflächen mittels Lichtmuster gelöst werden kann.

Die im ersten Teil genannten Verfahren umfassen Methoden, die basierend auf Folgen von Beleuchtungsmustern das Auflösungs-/Zuordnungsproblem lösen. In der zitierten Tabelle 1 in der Druckschrift [8] sind diese Verfahren als „Time-multiplexing“ Methoden zusammengefasst. Zu diesen Verfahren gehören auch die in Kapitel 2.2.1 vorgestellte Phasenverschiebungsmethode und das Verfahren mit einer Abfolge von unterschiedlichen Mustersequenzen.

Wie schon erwähnt, haben diese Methoden den Nachteil relativ langer Messzeiten, sodass diese Messverfahren besonders für bewegte Objekte nicht oder nur sehr eingeschränkt geeignet sind.

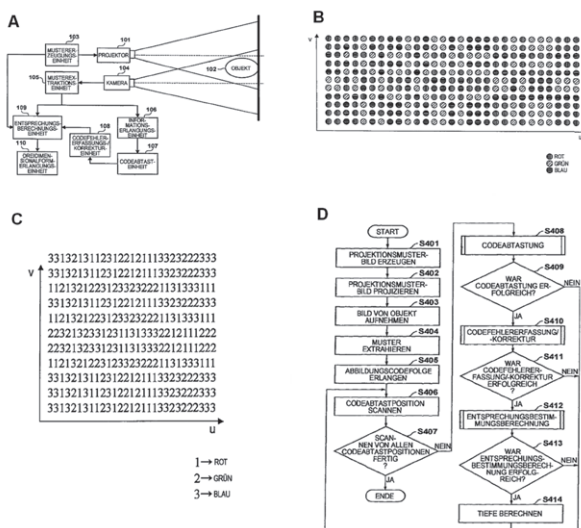
Die deutsche Offenlegungsschrift DE 10 2009 056 177 A1 zeigt hier eine Möglichkeit auf, wie basierend auf dem Phasenverschiebungsverfahren auch bewegte Messobjekte vermessen werden können. Dazu wird mithilfe von Modulationen der Intensitätsverlauf der verwendeten Messmuster geeignet verändert. Das aufmodulierte Muster (in der Druckschrift 10 2009 056 177 A1 „Modulationsbild“ genannt) wird im Gegensatz zu dem eigentlichen Messmuster nicht über das Messobjekt phasenverschoben. Fehler, die von der Relativbewegung des Messobjekts zu dem Messgerät herrühren, führen zu entsprechenden Verzerrungen im Messmuster. Daraus kann ein (jetzt verzerrtes) Modulationsbild zurückgewonnen werden. Da aber das ursprünglich aufmodulierte Muster bekannt und nominell ortsfest ist, kann aufgrund der Verzerrung auf die relative Bewegung des Messobjekts zurückgeschlossen und diese geeignet kompensiert werden (vergleiche dazu die Figur 8).



Figur 8: Die Offenlegungsschrift DE 10 2009 056 177 A1 eröffnet eine Möglichkeit, das Phasenverschiebungsverfahren auch für bewegte Messobjekte anzuwenden. Die Figur 8A zeigt ein Ausführungsbeispiel dieses Messverfahrens. In der Figur 8B wird die Integration zweier jeweils ortsfester Modulationssignale (A, B) in eine Phasenschiebe-Sequenz beschrieben. Die rechte Seite der Figur 8B zeigt das resultierende amplitudenmodulierte Messsignal.

Die Kompensation der Messfehler durch die relative Bewegung erfolgt hier durch Bewegungssimulation einer entgegengesetzten Bewegung, die die Bewegungsfehler rückgängig macht. Die entgegengesetzte Bewegung wird dabei durch eine künstliche, nachträgliche Verschiebung von Kamerabildern um eine Pixeldistanz simuliert, die mithilfe des Modulationsbilds optimiert wird.

Die Grundidee weiterer Verfahren zur Lösung des Korrespondenzproblems beruht darauf, Musterbereiche (im einfachsten Fall die Linien eines Streifenmusters) zumindest lokal eindeutig und damit unterscheidbar zu machen. In der Tabelle 1 der Druckschrift [8] werden diese Methoden mit „Spatial Neighborhood“ und „Direct Encoding“ bezeichnet. Gelingt es, um in einem einfachen Beispiel zu bleiben, benachbarte Streifen mittels eines Codes (zum Beispiel eines Farbcodes) voneinander unterscheidbar zu machen, wird dadurch mithilfe dieses Codes die Zuordnung des Messmusters zu den Bildpunkten in dem aufgenommenen Bild wieder möglich.



Figur 9: Dreidimensionales Messverfahren gemäß DE 11 2011 102 991 T5 (Figur 9A) mit speziellem Projektionsmusterbild (ein Beispiel zeigt Figur 9B) auf der Basis einer Projektionscodefolge (Figur 9C). Die Figur 9D zeigt das Ablaufdiagramm des Verfahrens mit der jetzt möglichen Codefehlererfassung/-korrektur (S410, S411).

Dabei ist wichtig, dass die Codeinformation in dem gemessenen Bild noch vorhanden ist. Durch die Wechselwirkung mit der Oberflächentextur und Farbe führen

reine Farbcodes oft zu Messfehlern und sind daher für viele Anwendungen ungeeignet.

Eine Möglichkeit durch Kodierungsverfahren Messfehler zu reduzieren, enthält die Offenlegungsschrift DE 11 2011 102 991 T5. Mithilfe von speziellen zweidimensionalen Abfolgen von kodierten Lichtmustern (Farbcodes entsprechend der Figur 9B, oder anderer unterscheidbarer Eigenschaften) kann das dort beschriebene Messverfahren durch eine sogenannte Codefehlererfassung/-korrektur (vergleiche in Figur 9D die Schritte S410 und S411) erweitert werden. Dadurch wird es möglich, Messfehler zu erkennen und gegebenenfalls zu korrigieren.

Außer den genannten Verfahren gibt es noch weitere Ansätze, die bekannten Verfahren zur aktiven dreidimensionalen Oberflächenmessung zu verbessern. Das Ziel dieser Anstrengungen ist es, die Fehleranfälligkeit des Messverfahrens, die Messzeit und/oder den Rechenaufwand bei der Auswertung zu reduzieren, ohne dabei die Ortsauflösung zu verschlechtern. Durch diese optimierten Verfahren und Algorithmen ist man heute zunehmend in der Lage, auch bewegte Objekte mit großer Genauigkeit dreidimensional zu vermessen. Das ist besonders für autonom agierende Automaten wie Roboter eine wichtige sensorische Grundlage.

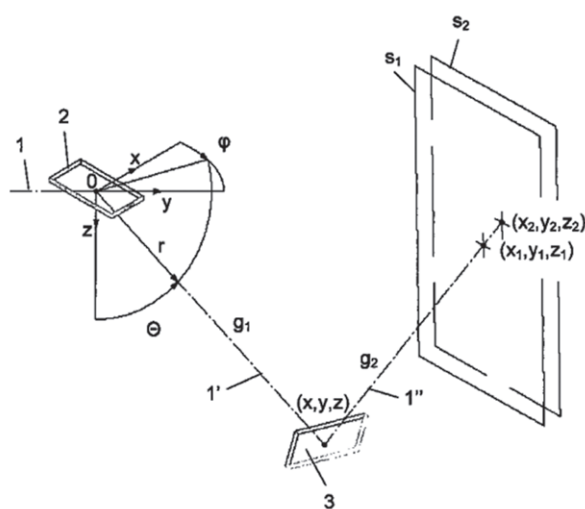
3 Deflektometrie

3.1 Grundsätzliche Vorgehensweisen

Eine Vielzahl zu inspizierender und dreidimensional (beispielsweise bezüglich einer Welligkeit oder einer Delle) zu erfassender Objektoberflächen besitzt eine spiegelnde oder teilweise spiegelnde Oberfläche. Neben optischen Bauelementen wie Spiegel oder Linsen können hier Waferscheiben, Flachglasscheiben, glanzlackierte Karosseriebauteile, polierte oder verchromte Metallteile und Kunststoffprodukte mit glatter, glänzender Oberfläche angeführt werden.

Ein konzeptionell einfacher und direkter Ansatz, den Verlauf einer spiegelnden Oberfläche zu bestimmen, besteht darin, diese durch einen einzelnen Lichtstrahl mit bekanntem Ausgangspunkt O und jeweils vorge-

gebener Strahlrichtung θ , φ abzuscanen (Figur 10, DE 10 2006 033 779 A1). Der an der Oberfläche reflektierte Strahl wird mit seinem Auftreffpunkt auf einem flächigen Detektor und mit seiner Strahlrichtung erfasst. Zur Strahlrichtungserfassung kommt dabei eine Hintereinanderanordnung eines ersten teildurchlässigen Schirms und eines zweiten Schirms zum Einsatz, so dass aus dem mit einer Kamera beobachteten Versatz beider Auftreffpunkte die Strahlrichtung messbar wird. Ein Punkt der spiegelnden Oberfläche wird schließlich als Schnittpunkt der analytisch beschriebenen Geraden g_1 und g_2 berechnet.



Figur 10: Scannende Abtastung eines spiegelnden Messobjekts 3 mit einem einzelnen Lichtstrahl gemäß DE 10 2006 033 779 A1.

Wie bei der Triangulation im Falle einer zu vermessenden diffus streuenden Fläche ist es auch bei spiegelnden Flächen wünschenswert, mehr als einen Punkt gleichzeitig zu erfassen. Dies lässt sich ähnlich dem Lichtschnittverfahren mit der Aufnahme von Musterbildern erreichen.

Dazu werden bevorzugt Linien-, Raster- oder Schachbrettmuster sowie sinusförmige Grauwertverteilungen bekannter Geometrie auf einer Mattscheibe, einer Leuchtfläche oder einem Bildschirm als zu spiegelnde Objekte bereitgestellt.

Die zu vermessenden spiegelnden Oberflächen ihrerseits treten im Strahlengang nicht selbst als abbildbare Objekte in Erscheinung. Sie sorgen vielmehr lediglich dafür, dass die in ihnen gespiegelten Objekte als virtuelles Bild erscheinen. Die Gegenstandsweite im Strahlengang einer dieses Bild aufnehmenden Kamera ist nicht

der Kameraabstand zur spiegelnden Oberfläche sondern der Abstand zur Mustervorlage. Ist die spiegelnde Oberfläche nicht eben, ergibt sich ein verzeichnetes Bild der Mustervorlage. Diese Verzeichnung kann genutzt werden, um die Abweichung von der Ebenheit der spiegelnden Oberfläche zu rekonstruieren. Typischerweise werden bei der Auswertung unter Nutzung des Reflexionsgesetzes (Einfallswinkel = Ausfallswinkel) zunächst die Normalenvektoren der spiegelnden Oberfläche in jedem ihrer Punkte berechnet. Daraus ergeben sich lokale Oberflächensteigungen und durch Integration die Oberflächenformen.

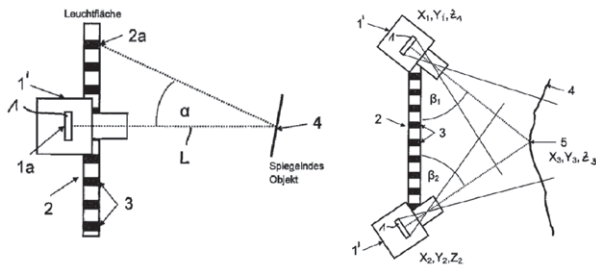
Eine Folge mehrerer Mustervorlagen mit verschiedenen Perioden, Frequenzen oder Phasen erlaubt es ausreichend Daten zur Lösung der Berechnungsgleichungen zu gewinnen.

Wird ein leuchtender Punkt einer Mustervorlage auf ein Pixel der aufnehmenden Kamera abgebildet, ist daraus die Lage und Orientierung eines spiegelnden Oberflächenelements, über den der Lichtweg verläuft, nicht eindeutig erschließbar. Ein Oberflächenelement in geringem Abstand zum Muster mit starker Verkipfung kann das gleiche Resultat zuwege bringen wie ein Oberflächenelement in großem Abstand mit schwacher Verkipfung. Das verdeutlicht Figur 11, linke Seite. Außerdem ist die Kenntnis des Abstands L zu zumindest einer Stützstelle nötig, um zum Ergebnis zu gelangen.

Ein bekannter Abstand L kann durch Vorgaben zur Probenpositionierung erzwungen werden – was die Flexibilität des Messverfahrens einschränkt.

Es ist aber auch möglich, den Abstand L während der Oberflächenvermessung zu bestimmen, zum Beispiel stereofotogrammetrisch durch Hinzuziehung einer weiteren Kamera (DE 10 2010 015 566 A1; Figur 11, rechte Seite). Beide Kameras triangulieren (mit unterschiedlicher Beobachtungsrichtung) einen markanten Punkt auf der spiegelnden Oberfläche und bestimmen dadurch den Abstand dieses Punktes. Dies gelingt nach der DE 10 2010 015 566 A1 folgendermaßen – obwohl der markante Punkt als ein Punkt auf der spiegelnden Oberfläche nicht reell abgebildet wird und insofern für die Kameras unsichtbar ist und bleibt:

Die Bilddatensätze der aufgenommenen Mustervorlage in beiden Kameras werden nach den Bildsensor-Flächenkoordinaten differenziert und liefern so für jede Kamera ein Krümmungsbild der spiegelnden Oberfläche. Mit Hilfe eines Ortes besonderer Krümmung der spiegelnden Oberfläche, beispielsweise besonders starker Krümmung, der in beiden Krümmungsbildern auffindig zu machen ist, erhält man ein korrespondierendes Bildpunktpaar zu ein und demselben Punkt der spiegelnden Oberfläche. Mit der stereometrischen Behandlung dieses korrespondierenden Bildpunktpaars schließt man auf den Abstand dieses Punkts, ohne ihn reell zu sehen.



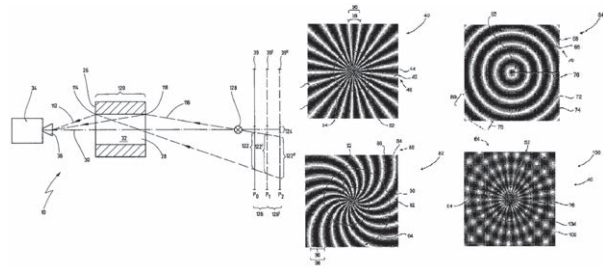
Figur 11: links: Prinzipskizze zur Deflektometrie; rechts: Stereo-Anordnung zur Abstandsbestimmung einer spiegelnden Oberfläche gemäß DE 10 2010 015 566 A1.

Andere bekannte Möglichkeiten, um Mehrdeutigkeiten von Abstand und Neigung zu beseitigen, sind die richtungskodierte Deflektometrie (DE 100 14 964 A1) oder der Vorschlag, zwei beleuchtete Rastermuster an unterschiedlichen bekannten Positionen anzuordnen (DE 101 27 304 A1). Ebenso können, bei teilweise spiegelnd teilweise diffus reflektierenden Oberflächen, Kombinationen aus deflektometrischen und triangulatorischen Verfahren genutzt werden (DE 102 17 068 A1).

3.2 Spezielle Messaufgaben

Die Deflektometrie kann eine Vermessung schwer zugänglicher spiegelnder Oberflächen ermöglichen, beispielsweise von Rohrrinnenwandungen (DE 10 2009 010 988 A1). Die Figur 12 zeigt dazu links einen Messaufbau mit verschiedenen positionierbaren Mustervorlagen, von denen Lichtstrahlen über eine Reflexion an der Rohrrinnenwandung zur Bildaufnahmekamera gelangen. In ihrer rechten Hälfte zeigt die Figur 12

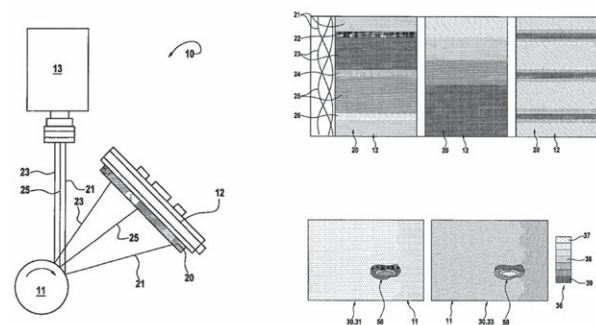
einige vorgeschlagene Vorlagemuster, die vorteilhafte Auswertemöglichkeiten bieten.



Figur 12: Deflektometrische Vermessung einer spiegelnden Rohrrinnenwand gemäß DE 10 2009 010 988 A1.

Die DE 10 2010 001 715 A1 beinhaltet ein deflektometrisches Vorgehen, bei dem die Mustervorlage farbige Streifen aufweist und eine Farb-Zeilenkamera das Licht aufnimmt, das an einem vorbeierotierenden Messgegenstand reflektiert wird (Figur 13, linke Seite). Die Farben der Mustervorlage sind durch Kombination sinusförmig modulierter Rot-Grün-Blau-Anteile von Musterzone zu Musterzone verschieden (Figur 13, rechte Seite oben).

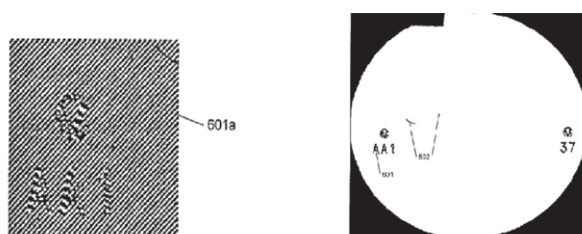
Je nach Neigung der Oberfläche an einem Messpunkt findet gemäß dem Reflexionsgesetz genau ein Farbton den Weg zur Kamera: die Neigungswinkel werden auf diese Weise farbcodiert. Durch die Rotation des Messgegenstands ergibt sich ein zusammengesetztes Farbbild, in dem Unregelmäßigkeiten der Oberfläche durch Farbunterschiede farblich erkennbar werden (siehe Figur 13, rechte Seite unten).



Figur 13: Deflektometrie mit farbigen Streifen an einem rotierenden rotationssymmetrischen Messobjekt gemäß DE 10 2010 001 715 A1.

Neben dem Rechengang, bei dem aus deflektometrisch gewonnenen Streifenmustersaufnahmen zunächst Normalenvektoren und dann Oberflächenverläufe gewon-

nen werden, sind auch Auswertemethoden bekannt, die einen Oberflächenverlauf durch Fourier-Transformation sichtbar werden lassen (EP 2 212 681 B1). Dazu zeigt die Figur 14, linke Seite, ein Streifenmusterbild wie es nach Reflexion an einem Brillenglas mit insbesondere der Gravur „AA1“ aufgenommen wird. Dieses Bild wird in zwei Dimensionen fourieranalysiert. Im erhaltenen Fourierspektrum wird das zentrale Hauptmaximum eliminiert und das auf die Nebenmaxima reduzierte Spektrum zurücktransformiert. Es entsteht die Darstellung aus Figur 14, rechte Seite, in der die Gravur „AA1“ unmittelbar sichtbar wird.



Figur 14: Auswertung deflektometrischer Streifenmuster mittels Fouriertransformation gemäß EP 2 212 681 B1.

4 Ausblick

Die sehende Wahrnehmung der Umgebung ist für den Menschen Grundlage vieler seiner kognitiven und kognitionsgeleiteten Tätigkeiten. Für immer intelligentere Maschinen und Automaten – ermöglicht durch die Fortschritte in den Informationstechnologien – werden in Analogie dazu „künstliche Augen“ eine immer größere Bedeutung erlangen. Dabei ist es gerade diese Parallele zum menschlichen Sehen, die die Fortentwicklung dreidimensionaler Vermessung mit Licht auch in Zukunft anregen wird. Denn mit ihrer Hilfe lassen sich – im wahrsten Sinne des Wortes – anschauliche und intuitiv nachvollziehbare Daten gewinnen und in technische Konzeptionen umsetzen.

Nicht-Patentliteratur

- [1] SUN, T.-Y. et al.: The Study on Intelligent Vehicle Collision-Avoidance System with Vision Perception and Fuzzy Decision Making. In: Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2005, 112–117, ISBN 0-7803-8961-1
- [2] BEN-TZVI, P., XU, X.: An Embedded Feature-Based Stereo Vision System for Autonomous Mobile Robots. In: IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments (ROSE), 2010, 1–6, ISBN 978-1-4244-7147-8
- [3] BIERI, L.-S., JACOT, J.: Three-dimensional vision using structured light applied to quality control in production line. In: Proc. SPIE Vol.5457, Optical Metrology in Production Engineering, 2004, 463–471, ISBN 978-0-8194-5379-2
- [4] HOFF, W., AHUJA, N.: Surfaces from Stereo: Integrating Feature Matching, Disparity Estimation, and Contour Detection. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.11, No.2, 1989, 121–136, ISSN 0162-8828
- [5] BILLIOT, B. et al.: 3D Acquisition System Based on Shape from Focus Technique. In: Sensors 2013, 13, pp. 5040–5053, ISSN 1424-8820
- [6] FAVARO, P., SOATTO, S.: A Geometric Approach to Shape from Defocus. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.27, No.3, 2005, 406–417, ISSN 0162-8828
- [7] Wikipedia „Lasertriangulation“ im Artikel „Abstandsmessung (optisch)“, Bearbeitungsstand: 11.11.2013, URL: [http://de.wikipedia.org/wiki/Abstandsmessung_\(optisch\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Abstandsmessung_(optisch)), recherchiert am 04.03.2014
- [8] SALVI, J. et al.: Pattern codification strategies in structured light systems. In: Pattern Recognition, Vol. 37, 2004, 827–849

Das Licht: ein Werkzeug für die Qualitätsprüfung

Dr. Armelle Mittermeier, Patentabteilung 1.51

In diesem Beitrag wird die Anwendung des Lichts als aussagekräftiges Werkzeug für die Kontrolle von Oberflächen bei der Qualitätsüberwachung anhand von ausgewählten Beispielen gezeigt.

Der Einsatz einer automatisierten optischen Qualitätskontrolle an industriell hergestellten Waren und Produkten ist sowohl während der Fertigung als auch im Betrieb unverzichtbar geworden. Das von der Oberfläche einer Ware oder eines Produkts zurückgeworfene Licht enthält eine Signatur mit Informationen über die Beschaffenheit der Oberfläche und erweist sich somit als ein wertvolles Werkzeug für die Qualitätsbeurteilung. Eine schnelle computergestützte Auswertung dieser Informationen ermöglicht eine zeitnahe Reaktion auf gegebenenfalls erkannte Fehler oder Defekte.

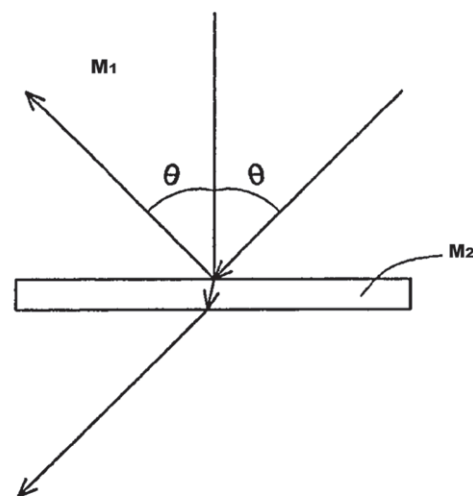
1 Einleitung

In den gegenwärtigen, von einem strengen marktwirtschaftlichen Wettbewerb geprägten Zeiten zeichnen sich erfolgreiche Unternehmen, die Waren und Produkte industriell herstellen, durch eine qualitätsbewusste Vorgehensweise ganz besonders aus. Um Kundenzufriedenheit sicherzustellen, müssen diese bestimmte Kriterien erfüllen. Das gilt sowohl für neu gefertigte Produkte, die den zugesagten Spezifikationen entsprechen müssen, als auch für bereits verkaufte Produkte, für die eine bestimmte Lebensdauer garantiert wird. Um dies garantieren zu können, kommt der Qualitätskontrolle im Fertigungsprozess und während des Einsatzes der Produkte beim Kunden eine besondere Rolle zu. Somit begleitet die Qualitätskontrolle die Produkte vom Beginn der Fertigungskette bis zum Ende ihrer Lebensdauer. Beispiele hierfür sind die Eingangskontrolle von Rohstoffen, die für die Produktion benötigt werden, die Überwachung des Fertigungsprozesses und die regelmäßige Überwachung der Funktionsfähigkeit der Produkte beim Kunden. Egal an welcher Stelle die Qualitätskontrolle stattfindet, sie muss effizient sein. Das heißt, sie muss zuverlässig, reproduzierbar und schnell zu Aussagen über den Status der Ware oder der Produkte führen.

2 Automatisierte optische Qualitätskontrolle

2.1 Physikalisches Messprinzip

In der geometrischen Optik wird der geradlinige Strahlengang des Lichts berücksichtigt und analysiert. Nach dem Descartes Gesetz [1] breitet sich das Licht in einem homogenen Medium geradlinig aus. An der Grenzfläche zwischen zwei unterschiedlichen Medien M_1 und M_2 wird der Strahlengang gebrochen. Nur ein Teil des Strahls tritt in das angrenzende Medium ein. Der andere Teil wird hingegen reflektiert (Figur 1) [2].



Figur 1: Reflexion und Brechung des Lichtstrahls an einer Grenzfläche (aus der Druckschrift DE 10 2009 008 170 A, in Anlehnung an [2]).

Das Verhältnis zwischen dem einfallenden Strahl und dem gebrochenen Strahl hängt direkt von dem Einfallswinkel β_1 , unter dem das Licht an der Grenzfläche auftrifft sowie von den Brechungsindizes [1] n_1 und n_2 der angrenzenden Medien ab. Der Ausfallwinkel β_2 , unter dem das gebrochene Licht in das angrenzende Medium durchtritt, wird durch die Snellius-Descartes Gleichung gegeben [2]:

$$n_1 * \sin \beta_1 = n_2 * \sin \beta_2$$

Bildet sich an der Oberfläche einer Ware ein Riss oder wird die Oberfläche mit einer Verschmutzung belegt, entsteht eine neue Grenzfläche, an der das Licht anders gebrochen und reflektiert wird. Durch Beleuchten der zu kontrollierenden Oberfläche und Erfassen des zurückgeworfenen Lichts können wertvolle Rückschlüsse auf die Beschaffenheit der neuen Grenzfläche gezogen werden. Dafür werden Abweichungen zu einer als ideal angesehenen und in einem Modell hinterlegten Soll-Grenzfläche herangezogen.

2.2 Die Sichtkontrolle

Die einfachste Qualitätskontrolle an industriellen Waren ist die Sichtkontrolle. Dabei wird das gängigste optische System, nämlich das menschliche Auge, eingesetzt. Der Qualitätsprüfer oder die Qualitätsprüferin schaut sich die Oberfläche der Ware an. Er oder sie weiß genau wie die Ware auszusehen hat und erkennt sofort spezifische Fehler in der Beschaffenheit der Oberflächen. Dieses Wissen setzt umfangreiche Schulungen und viel Erfahrung voraus und bedeutet, dass eine menschliche Sichtkontrolle sehr zeitaufwändig und kostenintensiv für den Unternehmer ist. Vor allem bleibt sie aber subjektiv und hängt unmittelbar von der Tagesform der prüfenden Person ab.

2.3 Computergestützte Auswertung und Automatisierung

Zur Automatisierung des Prüfvorgangs beleuchtet ein Lichtstrahl das Prüfobjekt. Der reflektierte Strahl wird von Sensoren oder Kameras erfasst, digitalisiert und anschließend rechnergestützt ausgewertet. Die Aus-

wertung erfolgt beispielsweise mit Bilderkennungs- und Bildbearbeitungsprogrammen. Wichtig ist dabei, dass zeitnah ein zuverlässiges Prüfergebnis erzielt wird. Dieses Ergebnis kann anschließend mit weiteren Prüfergebnissen verglichen, dokumentiert und gespeichert werden. Des Weiteren können aufgrund des Prüfergebnisses weitere automatische Schritte wie das Aussortieren zur Nachbearbeitung oder das Verwerfen der Ware angestoßen werden.

3 In-Line Qualitätskontrollen

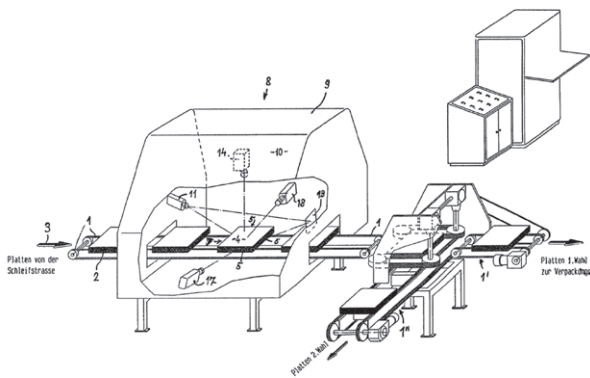
Mit der Qualitätsprüfung der Ware wird sichergestellt, dass die Ware die Kriterien des Pflichtenhefts erfüllt. Die enormen Kosten, die durch fehlerhafte Fertigungsteile entstehen, können dadurch minimiert werden, dass die Qualitätsprüfung in die gesamte Fertigungskette integriert wird. Je früher ein Fertigungsfehler im Verlauf des Fertigungsprozesses erkannt wird, umso eher kann reagiert und dadurch wertvolle Fertigungszeit gespart werden. Weiterhin können die früh erkannten Abweichungen genauer beobachtet werden. Aus deren Veränderungen können im Verlauf der Fertigung fundierte Kenntnisse über den Produktionsprozess gewonnen werden.

Die Kontrollgrenzen, die greifen, wenn die Fertigungsfehler nicht mehr akzeptabel sind, können so bewusster und genauer angepasst werden.

Demzufolge werden Qualitätsprüfungen an vielen verschiedenen Stellen mit mehreren optischen Systemen entlang der Fertigungskette durchgeführt. So kann eine berührungslose und störungsfreie Prüfung der Produkte realisiert werden. Die Produkte werden an diesen Stellen beleuchtet und das reflektierte Licht anschließend ausgewertet.

Allerdings soll durch die Prüfungsschritte die mittlere für die Herstellung der Produkte benötigte Zeit nicht unverhältnismäßig stark zunehmen. Um das zu vermeiden, kann beispielsweise eine ausgewählte repräsentative Anzahl an Produkten regelmäßig von der Fertigungslinie entfernt und durch eine Prüfstation umgelenkt werden. Durch geeignete Automatisierung kann der Prüfvorgang jedoch auch in die Fertigungs-

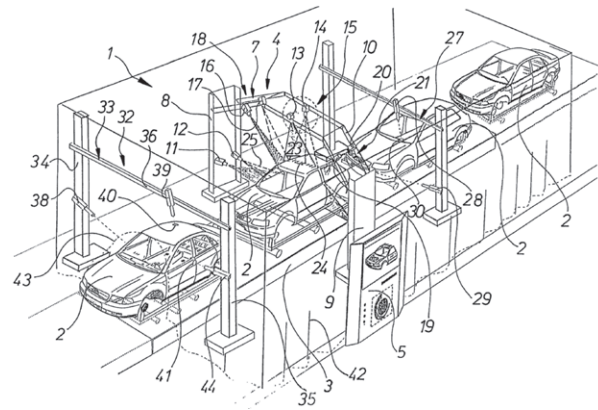
linie ohne zeitlichen Mehraufwand integriert werden. Dies ermöglicht eine Prüfung aller Fertigungsteile, die den Herstellungsprozess durchlaufen. Die Druckschrift DE 197 08 582 A1 zeigt eine vollautomatisierte Qualitätskontrolle von Bauelementen in Form von Kunststeinplatten.



Figur 2: Automatisierte Qualitätskontrolle am laufenden Förderband durch Integrieren eines Gehäuses mit einem optischen System (aus DE 197 08 582 A1).

Die Qualitätskontrolle wird an einem laufenden Förderband durchgeführt. Die Kanten der Bauelemente werden von Kameras (11, 14, 17 und 18) aufgenommen. Ein Gehäuse mit einem integrierten optischen System wird an das Förderband angebracht, sodass die Bauelemente durch das Gehäuse laufen. Das Gehäuse schützt die Kameras vor Staub sowie die optische Kontrolle selbst vor störendem Umgebungslicht. Das Förderband bewegt sich kontinuierlich während der Kontrolle. Die Geschwindigkeit des Förderbands sowie der Abstand zwischen den Bauelementen werden derart angepasst, dass die Qualitätskontrolle störungsfrei ablaufen kann. Bauelemente, die die geforderte Qualität nicht aufweisen, werden automatisch von einer angesteuerten Aussonderungseinrichtung aus der Fertigungsstrecke entfernt und gelangen nicht zur Endverpackung. Am laufenden Band können aber nicht nur einfach geformte Bauelemente kontrolliert werden, sondern beispielsweise auch Rohkarosserien.

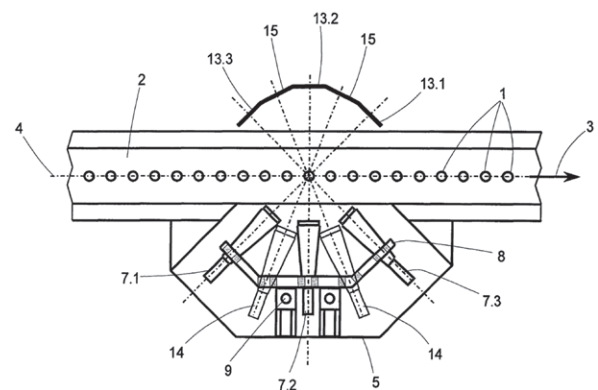
Die Druckschrift DE 197 30 885 A1 zeigt in Figur 3 die Erkennung von Oberflächenfehlern an beliebig geformten Rohkarosserien 2. Diese werden durch einen Lichttunnel transportiert, der von einer Tragestruktur gebildet ist, die das Förderband umfasst.



Figur 3: Lichttunnel mit einem optischen System zur Qualitätskontrolle am laufenden Förderband (aus DE 197 30 885 A1).

Messstreifen, die an der Rohkarosserie angebracht sind, werden bestrahlt. Das an den Messstreifen reflektierte Licht wird unter einem definierten Winkel erfasst. Dieses Messsignal wird einem Rechner zugeführt. Durch einen Vergleich mit den im Rechner abgelegten relevanten Fehlermustern können Abweichungen an der Oberfläche direkt erkannt werden.

Die Figur 4 der Druckschrift DE 299 01 727 A1 zeigt eine weitere Aufbauvariante zum Einbringen einer Qualitätskontrolle direkt in den Fertigungsablauf.



Figur 4: Variante nach DE 299 01 727 A1 zur Integration eines optischen Systems am laufenden Fertigungsband.

Es werden Formabweichungen und Materialfehler wie Blasen, Risse oder Schlieren an Glas oder transparenten Materialoberflächen erkannt. Dafür wird ein modularer Baukasten mit dem optischen System an das Förderband angebracht. Dabei befinden sich alle energieverbrauchenden Baugruppen des optischen Systems, wie beispielsweise die Beleuchtungsquellen

oder die Kameras (7.1, 7.2, 7.3 und 14), alle auf einer Seite des Förderbands. Die weiteren Baugruppen, wie zum Beispiel Reflektoren (siehe Figur 4, Bezugszeichen 13.1, 13.2, 13.3 und 15), befinden sich hingegen auf der anderen Seite des Förderbands. Somit werden Probleme wie die räumliche Einschränkung des zur Kontrolle zur Verfügung stehenden Platzes oder die Zugänglichkeit der kontrollierten Produkte gelöst. Nicht nur das Integrieren des optischen Systems in den Fertigungsablauf bildet eine Herausforderung, sondern auch das Erfassen des von der Oberfläche zurückgeworfenen Lichts selbst.

Während diffus reflektierende Oberflächen üblicherweise durch die Analyse der Helligkeitsverteilung des reflektierten Lichts untersucht werden, kommt bei hochreflektiven Oberflächen die Deflektometrie zum Einsatz. Dabei werden auf die zu kontrollierenden Oberflächen Streifen- oder Schachbrettmuster projiziert und deren Spiegelbilder erfasst. Die Auswertung dieser Bilder im Hinblick einer 3D-Rekonstruktion der Oberfläche ist oft rechen- und zeitintensiv. Ausgewählte Strategien zur Inspektion wie der Vergleich von den Bildern, gewonnen an einer fehlerfreien Oberfläche mit den Bildern, erfasst an der bekannten zu prüfenden Oberfläche, machen eine Kontrolle noch effektiver. Sie erfordern allerdings eine exakte Ausrichtung der zu prüfenden Oberfläche zu den Referenzdaten.

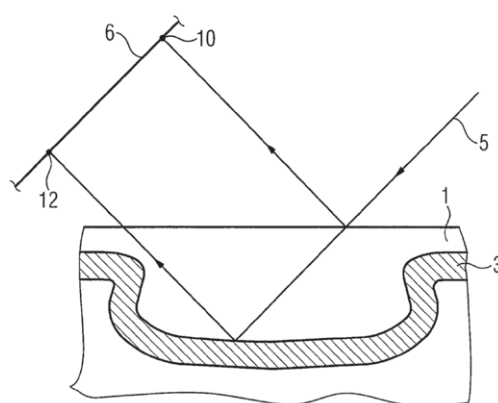
Die Druckschrift DE 10 2009 021 733 A1 zeigt beispielsweise den Einsatz der Deflektometrie in einem Fertigungsbetrieb. Definierte Hell-Dunkel-Muster werden auf frei geformte Oberflächen projiziert und deren Spiegelbilder von einer Kamera erfasst. Nach jeder Aufnahme eines Spiegelbilds wird das Hell-Dunkel-Muster bewegt. Es werden so Kratzer, Lunker und weitere Oberflächendefekte an der zu kontrollierenden Oberfläche erkannt. Die Reflektivität der Oberfläche und die lokale Oberflächenneigung an den verschiedenen Oberflächenpunkten werden aus Bilderserien von drei zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfassten Spiegelbildern ermittelt. Dabei weist zu jedem Zeitpunkt jeder betrachtete Oberflächenpunkt eine andere relative Position zum Hell-Dunkel-Muster auf. Auch in der Druckschrift DE 103 17 078 A1 werden defektfreie Bereiche von defektbehafteten Bereichen an spiegelnden

Oberflächen durch eine mathematische Verknüpfung der zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommenen Bilder eines Streifenmusters unterschieden.

Die Automatisierung der Qualitätskontrolle ermöglicht es Oberflächenfehler zu erfassen, die mit dem menschlichen Auge nur sehr schwer oder unter Umständen gar nicht zu sehen sind.

Die Druckschrift DE 10 2011 118 611 A1 zeigt eine automatische Identifizierung von Objekten aufgrund einer optischen Erkennung von feinen, für das Auge unsichtbaren Details. Die mit einem optischen System erfassten Daten oder Merkmale des Objekts werden computergestützt ausgewertet und gespeichert. Auf diese Art werden Eigenschaften des Objekts, unter anderem Abmessung, Form oder Farbe ermittelt und inspiziert. Es werden sowohl absolute Werte als auch relative Größen wie zum Beispiel das Verhältnis von Länge zu Breite ermittelt. Die ausgewerteten Informationen werden mit gespeicherten Vergleichswerten inklusive einer bestimmten Toleranzbreite verglichen. In Abhängigkeit vom Ergebnis werden die Objekte markiert und hervorgehoben.

Die Druckschrift DE 10 2009 009 272 A1 zeigt die Anwendung einer Qualitätskontrolle zur Prüfung der Lage sowie der Form einer von außen unsichtbaren Fasermatte aus Kunststoff.



Figur 5: Optische Inspektion einer Fasermatte unterhalb der Oberfläche eines Rotorblatts einer Windenergieanlage (aus DE 10 2009 009 272 A1).

Diese Fasermatte befindet sich direkt unter der Oberfläche eines Rotorblatts einer Windenergieanlage. Im Idealfall liegt die Fasermatte flach unter der Oberfläche

und verläuft über die gesamte Fläche des Rotorblatts parallel zu der Oberfläche. Es können jedoch Verwerfungen, Aufwölbungen oder Faltungen wie sie auch von einem Teppich bekannt sind, auftreten. Solche Fehler haben einen direkten Einfluss auf den Ertrag der Windenergieanlage. Bei der Qualitätskontrolle wird die Oberfläche mit Licht bestrahlt. Aus der Position des an der Oberfläche des Rotorblatts reflektierten Strahles in einem Lichtempfänger wird auf Fehler der Lage und der Form der Fasermatte geschlossen.

Während der Qualitätskontrolle wird das Rotorblatt ortsfest gelassen und das prüfende optische System wird über die Oberfläche geführt.

Das gleiche physikalische Prinzip liegt der Druckschrift DE 10 2004 037 555 A1 zugrunde. In dieser Druckschrift wird die Dicke der photokatalytischen Beschichtung von Dachziegeln inspiziert. Die Dachziegel durchlaufen eine Kammer. In der Kammer werden sie mit einem optischen System unter Verwendung von UV-Licht bestrahlt. Je nach Dicke der photokatalytischen Beschichtung variiert das Reflektionsvermögen der Oberfläche. Die Intensität der Reflexion wird mit einem Referenzwert, der vorab an einem Referenzobjekt gemessen wurde, verglichen.

4 Qualitätsprüfungen im laufenden Betrieb

Die Qualitätsanforderungen an Produkte, die die Fertigung verlassen oder schon bereits in ihrem Betriebsumfeld eingesetzt werden, nehmen ständig zu und sind äußerst anspruchsvoll. Eine bestimmte Lebensdauer und weitere spezifizierte Betriebswerte werden von den Produkten im Einsatz erwartet. Aus diesem Grund werden sie überwacht und in regelmäßigen Abständen auf Defekte oder Ablagerung von Schmutz, die nicht nur Aussehen, sondern auch ihre Funktion beeinträchtigen, überprüft oder kontrolliert. Je nach Ergebnis der Qualitätsprüfung kann gegebenenfalls über einen Eingriff, beispielsweise in Form einer Reparatur oder einer Reinigung, entschieden werden. Bei umfangreichen Produkten oder Geräten oder auch bei Bauwerken können sich die Qualitätskontrollen als enorme Herausforderungen erweisen und nicht nur

einen enormen Zeitaufwand bedeuten, sondern auch eine Lebensgefahr für die Person, die die Qualitätskontrolle durchführt, mit sich bringen.

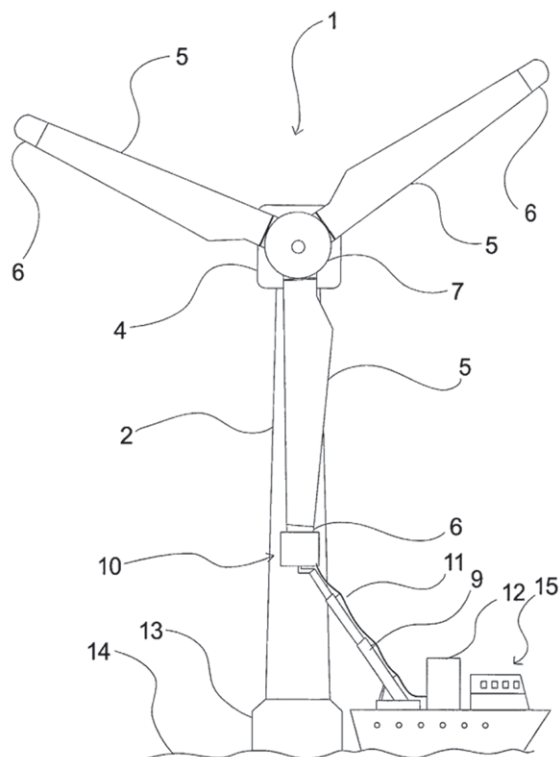
Zu Zwecken der Qualitätskontrolle von Brücken, Schornsteinen, Telefonmasten oder weiteren größeren Bauwerken musste vor einigen Jahren die Qualitätsprüfung ähnlich zum Bergsteigen, mithilfe von Seilen erfolgen und war mit einem Klettern verbunden. Erste Verbesserungsmaßnahmen haben sich auf die Entwicklung von Arbeitsbühnen fokussiert, die sich entlang des zu prüfenden Bauwerks befahren lassen und für die Prüfung eine gesicherte Arbeitsplattform zur Durchführung der Qualitätskontrollen bieten. Die Druckschrift DE 43 39 638 A1 zeigt eine Möglichkeit zur Fixierung einer an das Bauwerk gepressten Arbeitsbühne zur sicheren Inspektion von Rotorblättern an Windkraftanlagen. Die Arbeitsbühne wird ohne jegliche Spannseile ausschließlich durch zangenartige Seitenarme an der Bauwerkfläche festgehalten. Die vertikale Bewegung der Arbeitsbühne an der Bauwerkfläche gewährleisten Laufräder. Die Prüfungs-, Mess-, Reinigungs- und Reparaturgeräte werden an der Arbeitsbühne montiert und sicher da hingefahren, wo sie zur Inspektion gebraucht werden.

Auch wenn die Bewegung der Prüfeinrichtung in diesem Beispiel automatisiert wurde, bleibt die Prüfung selbst eine manuelle Tätigkeit mit ihren bereits erwähnten Nachteilen.

Aktuelle Entwicklungen fokussieren sich auf komplett autonome optische Prüfeinrichtungen, die eine schnelle und berührungslose optische Erfassung der Oberfläche durchführen und eine anschließende Auswertung meistens in Form einer Bildverarbeitung umfassen. Dadurch wird der prüfenden Person erspart bei schlechter Witterung in einer lebensgefährlichen Umgebung die Qualitätskontrolle durchführen zu müssen. Zudem wird es möglich die Qualitätsprüfung so durchzuführen, dass eine Beeinträchtigung des Betriebs vermieden werden kann.

Das Bestreben nach einer voll automatisierten Inspektion der Rotorblätter einer Windkraftanlage ist beispielsweise in Figur 6 der Druckschrift WO 03/048 569 A2

zu erkennen. Die Oberfläche des Rotorblatts wird mit einem optischen System inspiziert, sodass der Verschleiß und die Schädigung einer Schutzschicht an der Oberfläche erkannt und anschließend instand gesetzt werden kann. Die Gerätschaften zur optischen Prüfung der Oberfläche werden von einer Zelle getragen, die sich an der Oberfläche entlang bewegen lässt.

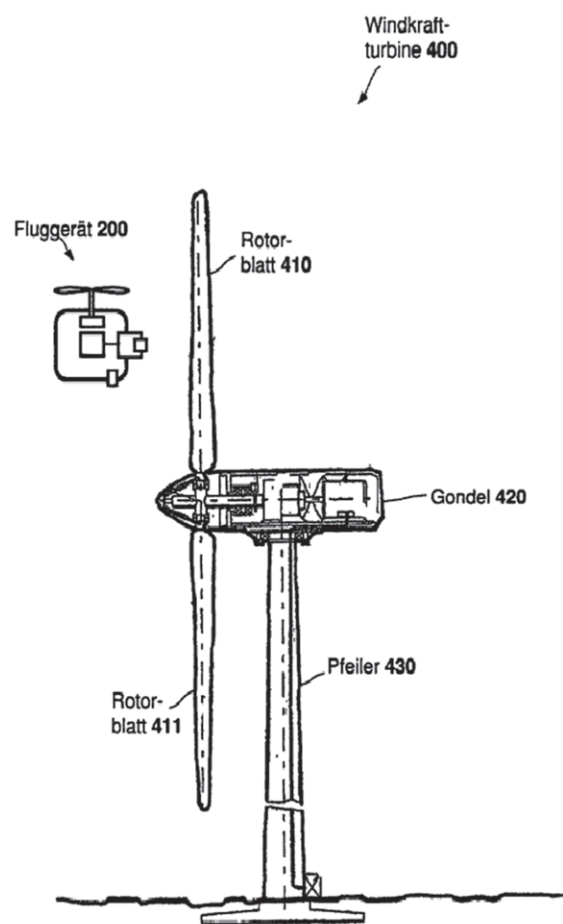


Figur 6: Automatisierte Inspektion von Rotorblättern einer Windenergieanlage nach WO 03/048 569 A2.

Die Prüfung kann damit vollautomatisch durchgeführt werden.

Aus der Druckschrift DE 10 2011 051 205 A1 ist eine weitere Möglichkeit zur Qualitätsprüfung der Rotorblätter von Windkraftanlagen bekannt. Das eingesetzte Prüfsystem wird direkt an dem Turm der Windkraftanlage entlang gefahren. Es besteht aus einer Klettervorrichtung mit einer Zugapparatur und einer Prüfvorrichtung mit Messgeräten und Bildanalyseapparaturen. Diese werden entweder manuell oder über einen Prozessor gesteuert. Weiterhin wird die Prüfvorrichtung mit Beleuchtungsmitteln bestückt, die dafür sorgen, dass die Prüfung regelmäßig und somit auch in der Nacht oder bei schlechtem dunklem Wetter möglich ist.

Eine weitere Inspektion an den Rotorblättern einer Windkraftanlage wird in Figur 7 aus der Druckschrift DE 10 2011 017 564 A1 gezeigt. Oberflächen mit Rissen, aber auch mit verschiedenen Ablagerungen wie toten Insekten, Exkrementen von Vögeln oder Salze beeinflussen deutlich die Betriebseffizienz der Rotorblätter. Zu Zwecken der regelmäßigen Qualitätsprüfungen wird eine ferngesteuerte Drohne 200 eingesetzt, die sich autonom an der zu inspizierenden Oberfläche des Rotorblatts entlang bewegt. Die Drohne trägt eine Kameraeinrichtung mit einer oder mehreren Kameras mit sich. Diese Kameras bilden während des Flugs der Drohne die Oberfläche der Rotorblätter ab.



Figur 7: Automatisierte optische Kontrolle der Oberfläche des Rotorblatts einer Windenergieanlage mit einer fliegenden Drohne nach DE 10 2011 017 564 A1.

Damit verwertbare Bildersequenzen erzielt werden können, muss ein sicherer Flug in der Nähe der Oberfläche gewährleistet sein – auch wenn die aerodynamischen Bedingungen in der Nähe der großflächigen

Rotorblätter herausfordernd sind. Die Auswertung der Bildersequenzen kann entweder während des Flugs oder anschließend erfolgen. So wird der Status der Rotorblätter regelmäßig mit Bildern dargestellt und dokumentiert und es kann rechtzeitig eingegriffen werden, sobald ein Ereignis an der Oberfläche festgestellt wird.

Im Gegensatz zu diesen beiden Ansätzen mit Prüfgeräten, die an der Oberfläche entlang beweglich sind, zeigt die Druckschrift WO 2009/071 056 A1 eine weitere interessante Prüfvariante mit einer Prüfkamera, die am Turm der Windkraftanlage befestigt ist. Bei Windkraftanlagen im offenen Meer, die besonders schwierig zugänglich sind, ist eine derartige Prüfvariante essenziell.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die automatisierte Qualitätskontrolle mit Licht hat bereits eine wesentliche Bedeutung für die Qualitätssicherung von industriell hergestellten Waren. Sie basiert auf klassischen Gesetzen der geometrischen Optik und erzielt schnelle und reproduzierbare Aussagen über die Oberfläche der Waren und Produkte. Sowohl die Ästhetik als auch die Funktionsfähigkeit der Ware werden auf diese Art geprüft. Auf diesem Prüfgebiet herrscht eine rege Entwicklungsaktivität. Anhand von Beispielen wurde gezeigt, dass optische Systeme am laufenden Band integriert werden, sodass möglichst störungsfrei unterschiedliche Formen und Oberflächeneigenschaften berührungslos inspiziert, anschließend sortiert und gegebenenfalls nachgearbeitet werden können. Auch Oberflächenabweichungen oder Fehler, die bislang dem Auge unsichtbar blieben, werden detektiert.

Die Qualitätskontrolle der Ware ist nicht nur bei der Herstellung von Bedeutung, sondern auch im laufenden Betrieb. Es wurde gezeigt, dass gerade im laufenden Betrieb die automatisierte Qualitätskontrolle mit Licht von besonderem Vorteil ist. Sie ermöglicht regelmäßige Qualitätsprüfungen auch in extremen Umgebungen und verringert das Gefährdungspotenzial bei den Prüfungen. Einige Beispiele dazu wurden näher betrachtet.

Die Datenmengen, die durch eine optische Messungen und Prüfungen erzeugt werden, sind sehr umfangreich. Mit den Entwicklungsaktivitäten auf dem Gebiet der computergestützten Auswertung und Bearbeitung von großen Datenmengen wird das Potenzial der Qualitätskontrolle mit Licht noch weiter an Bedeutung gewinnen.

Nicht-Patentliteratur

- [1] BRUAT, G.: Optique. Les cours de référence. 6. Aufl. Sixième édition révisée par Alfred Kastler: Dunod Verlag, 2006. Seite 2–3. – ISBN 2-10-048856-2
- [2] HECHT, E.: Optique. 4. Aufl. Traduction française dirigée par MATTE LA FAVEUR S.; MEYZONETTE J.-L. : Person Education Verlag, 2005. Seite 102–107. – ISBN 2-7440-7063-7



Impressum

Herausgeber

Deutsches Patent- und Markenamt
Zweibrückenstraße 12
80331 München

Telefon +49 89 2195-0
www.dpma.de

Stand

August 2014

Bildnachweis

Titelseite: Fotolia.com/ludodesign
Umschlagseite 3: Fotolia.com/chones

