

Nach Glüh- und Energiesparlampe:

Neues Licht für eine bessere Lebensqualität

Fritz Riehle

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, Braunschweig

Einleitung

Der Siegeszug des künstlichen Lichtes, der ursprünglich mit Öl und Gas befeuert wurde, hat mit dem elektrischen Licht im letzten Jahrhundert einen Durchbruch erreicht, der weltweit die Lebens- und Arbeitsweise der Menschen einschneidend verändert hat. Seither sind Zeiten der Aktivität des Menschen und Arbeitszeit nicht mehr an das Vorhandensein von Tageslicht gekoppelt. Nachdem in letzter Zeit die energieeffizientere Erzeugung von künstlichem Licht im Vordergrund stand, kommt heute - im Jahr des Lichts und der lichtbasierten Technologien 2015 – der Qualität des Lichtes eine stetig wachsende Bedeutung zu. Dieser Beitrag beleuchtet die Eigenschaften der neuartigen Lichtquellen und die dafür erforderlichen Methoden und Maßnahmen zu ihrer Charakterisierung und zu ihrem optimalen Einsatz. Er zeigt darüber hinaus, wie mit den neuen Lichtquellen in unterschiedlichsten Lebensbereichen die Sicherheit, Umweltfreundlichkeit und Lebensqualität wesentlich erhöht werden kann.

Historischer Abriss der Erzeugung und Charakterisierung von Licht

Schon seit etwa 50.000 Jahren nutzt der Mensch offene Feuerstellen zur Beleuchtung. Seit etwa 10.000 Jahren sind Schalenlampen bekannt, die in ihrer einfachsten Ausführung aus einem Talkhäufchen und einem Docht aus Pflanzenfasern in einer Mulde in einem Stein bestehen. Seit etwa 700 vor Christus werden Lampen aus Ton benutzt, in denen die Verwendung von pflanzlichen Ölen ein verbessertes Brennverhalten erlaubte. Diese Tonlampen wurden in der Römerzeit zur Massenware. Etwa im ersten Jahrhundert nach Christus kamen im römischen Reich die Kerzen auf, die für den Alltag aber noch zu teuer waren. Zu Beginn der Neuzeit kurz vor 1800 wurde eine heller brennende Öllampe von Aimé Argand [Arg1800] entwickelt, die dann in der Petroleumlampe weite Verbreitung erfuhr.

Ab etwa 1800 wurde in großem Stil in den Städten Stadtgas aus Steinkohle gewonnen, das durch ein Rohrleitungsnetz zu den Verbrauchern geführt wurde und zur Beleuchtung der Straßen und Wohnungen diente. Als mit der Erfindung des dynamoelektrischen Prinzips durch Werner von Siemens 1867 die Erzeugung elektrischer Energie aus Dampfmaschinen und Wasserkraft großtechnisch möglich wurde, konnte diese auch zur Beleuchtung eingesetzt werden. Schon 1878 wurde beispielsweise die Venusgrotte in König Ludwigs des II. im Schloss Linderhof durch Kohlebogenlampen elektrisch beleuchtet [Ven1878]. Mit Thomas A. Edisons Patent auf eine Glühlampe (1880) begann der Durchbruch der elektrischen Beleuchtung. Auf heutige Einkommen umgerechnet kostete eine Glühlampe um 1900 etwa 320 € (heute 0,5 €) und eine Kilowattstunde elektrische Energie 6,30 € (heute 0,25 €). Dennoch wurde die elektrische Beleuchtung eine Erfolgsgeschichte, sodass sich bald die etablierte Gasbeleuchtung und die neu aufkommende elektrische Beleuchtung einen

heißem Kampf um den lukrativen Markt lieferten. Daher kam frühzeitig der Wunsch nach einer objektiven Bewertung des Lichtes auf, was als eine der ersten Aufgaben von der 1887 gegründeten Physikalisch-Technische Reichsanstalt (PTR), der Vorgängerin der heutigen Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) aufgegriffen wurde. Als Normale wurden die Amylacetat-Lampe nach Hefner-Alteneck (Abb. 1) untersucht und beglaubigt, die von 1886 bis 1941 als Gebrauchsnormale für die Lichtstärke (0,903 cd) mit einer relativen Unsicherheit von 1,5% diente. Otto Lummer und Eugen Brodhun übernahmen an der PTR die Entwicklung leistungsfähiger visueller Photometer für die Bestimmung der Lichtstärke von Lampen. In der PTR wurde ebenfalls das Spektrum des sogenannten Schwarzen Strahlers und seine Abhängigkeit von der Temperatur untersucht; diese Untersuchungen dienten Max Planck für seine Strahlungsformel, die dann die Quantenmechanik begründete. Auf Grund ihrer Kompetenz war die PTR bei der Lichttechnik als Schiedsrichter und Vermittler gesucht.



Abb. 1: Amylacetat-Lampe nach Hefner-Alteneck

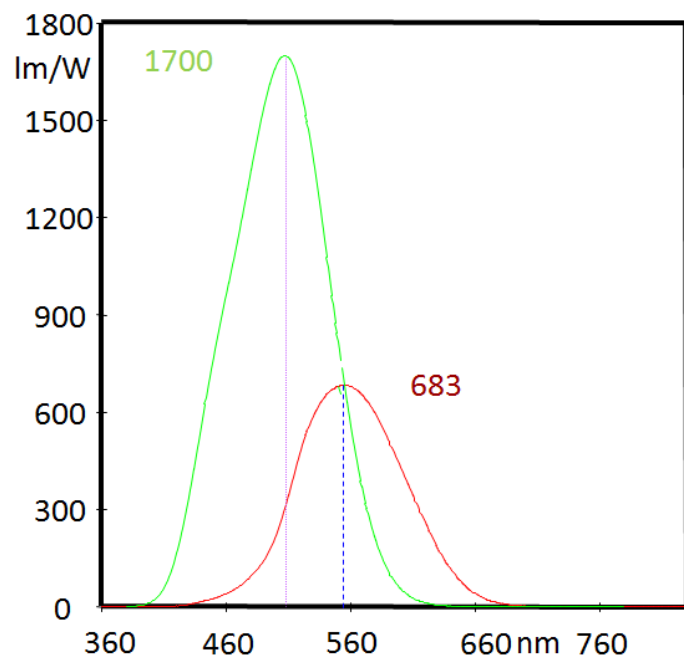


Abb. 2: Bewertung des Lichtes durch das Auge eines Standardbeobachters. Grün: Tagessehen; rot: Nachtsehen

1913 wurde dann die internationale Beleuchtungskommission (CIE: Commission Internationale de l'Éclairage) gegründet, die 1924 die Bewertungsfunktion eines standardisierten Beobachters für das Tagessehen und 1951 für das Nachtsehen veröffentlichte (Abb. 2). Mit der Entwicklung einer Normfarbtafel 1931 durch die CIE und die kontinuierliche Entwicklung der entsprechenden Messmethoden z.B. in Instituten wie der PTB standen dann die Hilfsmittel zur Charakterisierung moderner Lampen zur Verfügung.

Entwicklung und Eigenschaften moderner Leuchtmittel

In der Glühlampe wird das Licht durch eine durch den elektrischen Strom erhitzte Glühwendel erzeugt, die eine Temperatur von typisch 2700 K (2427 °C) besitzt. Gegenüber dem Tageslicht der Sonne mit einer Oberflächentemperatur von etwa 6000 K liegt die abgestrahlte elektromagnetische Strahlung hauptsächlich im infraroten Spektralbereich (Abb.

3) und der Wirkungsgrad (definiert als nutzbare Lichtenergie / aufgenommene elektrische Energie) beträgt nur etwa 2 - 3 %. Daher wurde in vielen Staaten (darunter Australien, China, die Europäische Union, die Schweiz) zur Energieeinsparung bereits ein Herstellungs- und Vertriebsverbot für die Glühlampe verfügt. Durch Beigabe von Halogenen kann die Glühwendel bei höherer Temperatur betrieben werden, ohne dass sie zu schnell verdampft. Dadurch wird das Spektrum sonnenähnlicher und das Verhältnis von sichtbarem Licht zu Wärmestrahlung wird in der sogenannten Halogenlampe verbessert.

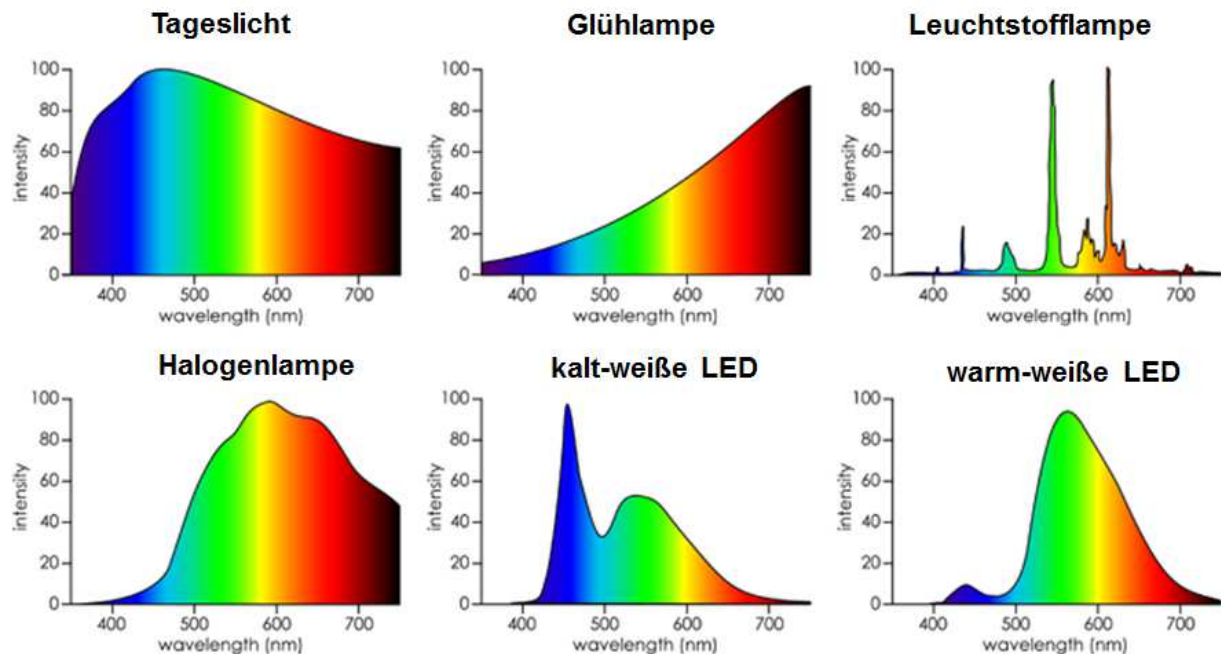


Abb. 3: Spektrale Verteilung des Sonnenlichts, einer Glühlampe, einer Leuchtstofflampe, einer Halogenlampe, einer kaltweißen Leuchtdiode, einer warmweißen Leuchtdiode

Energetisch noch bessere Alternativen bestehen in der ab 1938 von der Fa. General Electric produzierten Leuchtstofflampe, der ab 1980 von Philips produzierten kompakten Leuchtstofflampe (im Volksmund als „Energiesparlampe“ bezeichnet), in den Leuchtdioden (LED: Light Emitting Diode; ab 1962 in roter Farbe; ab 1993 in blauer Farbe) oder in den organischen Leuchtdioden. Leuchtstofflampe und Energiesparlampe nutzen die Anregung von Quecksilberatomen durch Elektronenstoß in einer Gasentladung. Diese emittieren hauptsächlich eine Spektrallinie im Ultravioletten, deren Energie dann im Phosphor des Leuchtstoffs in sichtbares Licht umgewandelt wird (s. Abb. 3). Die Leuchtdiode ist eine Halbleiterdiode, die bei einer Polung in Durchlassrichtung elektromagnetische Strahlung emittiert, deren zentrale Wellenlänge abhängig vom Halbleitermaterial und der Dotierung mit Fremdatomen im infraroten, sichtbaren oder ultravioletten Spektralbereich liegt. Um weißes Licht zu erhalten, können verschiedene Leuchtdioden zum Beispiel rot, grün und blau additiv gemischt werden. Wegen der relativ schmalen spektralen Breite der einzelnen Linien enthält das resultierende Spektrum nicht alle Spektralanteile und verfälscht das Aussehen farblicher Gegenstände. Mit der Kombination von fünf bis sieben geeigneten LEDs kann ein „gutes“ weißes Spektrum auf Kosten eines höheren Preises erzeugt werden. Die heute typisch verwendeten weißen LEDs basieren auf einer anderen technischen Realisierung: Eine blau emittierende LED sorgt für den blauen Anteil im Spektrum, wobei ein Teil dieser Strahlung in einem geeigneten gelben Phosphor umgewandelt wird um grüne, gelbe und rote Farbanteile zu erzeugen. Je nach Art und Dicke des Phosphors wird kalt-weißes oder warmweißes Licht

<http://bwg-nds.de/veranstaltungen/archivierte-veranstaltungen/vorwort/>

erzeugt (s. Abb. 3). Die erzeugten Spektren sind nur Annäherungen an das Tageslichtspektrum.

Typ	Wirkungsgrad (%)	Energieeffizienzklasse	Lebensdauer (Stunden)	Ra	Lichtfarbe (K)
Glühlampe	2 - 3	D, E	1 000	100	2 700
Halogenlampe	5	C, D	2 000 – 4 000	100	3 000
Energiesparlampe	14	A	10 000	80 - 90	2 700 – 4 000
Leuchtstofflampe	18	A ⁺ , A ⁺⁺	18 000	80 - 90	2 700 – 6 000
LED	20 – 40	B, A, A ⁺ , A ⁺⁺	20 000 - 50 000	80 - 95	2 700 – 6 000

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Leuchtmittel

Ein Vergleich der verschiedenen Leuchtmittel (Tabelle 1) zeigt die Unterschiede hinsichtlich verschiedener Qualitäten. Die LED punktet auf der ganzen Linie bezüglich Energieeffizienz und Lebensdauer; allerdings kann der Wirkungsgrad von billigen und hochwertigen LEDs um bis zu einem Faktor 2 streuen. In Labormustern wurden auch schon 70% gemessen, was zu weiteren Einsparmöglichkeiten hinsichtlich der genutzten elektrischen Energie führen kann.

Eine andere Qualität des Lichtes ist die Lichtfarbe, d.h. der Farbeindruck der Lichtquelle, die auf deren spektralen Zusammensetzung beruht. Glühlampen emittieren „warmes“ rötliches Licht; die Sonne grelles weißes Licht. Bei Gasentladungslampen und LEDs ist die Lichtfarbe über die Phosphore einstellbar. Ein weiteres Kriterium ist die schon angesprochene Farbwiedergabe. Die von der Lichtquelle angestrahlten Gegenstände und Menschen sollen möglichst natürlich erscheinen. Zur Bewertung der Lichtquelle wurde der Farbwiedergabe-Index Ra entwickelt, mit der die Qualität der Farbwiedergabe von Lichtquellen gleicher korrelierter Farbtemperatur in verschiedenen Spektralbereichen durch eine einzige Zahl beschrieben wird. Als Referenz gilt der Schwarze Strahler, so dass das Licht einer Glühlampe als annähernd schwarzer Strahler auch fast Ra = 100 % erreicht. Das gegenwärtig beste kommerzielle Produkt im LED-Bereich mit hervorragender Farbwiedergabe nutzt eine violette LED und drei unterschiedliche Phosphore und hat einen Ra von über 95 %. Lichtquellen mit Ra < 80 % sollten im Wohnbereich nicht genutzt werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Technologie der Leuchtdioden heute die Möglichkeit bietet hocheffizientes Licht bester Qualität zu erzeugen. Im Folgenden soll auf einige Beispiele eingegangen werden, wofür und wie die sich daraus ergebenden Chancen genutzt werden können und welche neue Metrologie und Messtechnik dafür erforderlich wird.

Erhöhte Sicherheit durch richtige Beleuchtung

Für die Sicherheit bei der Arbeit und im Verkehr ist Sehen und Gesehen werden essentiell. Das gilt in gleicher Weise für das rechtzeitige Erkennen von neuen Situationen, die eine Reaktion des Teilnehmers erforderlich machen, wie für die Erkennung von Signalen, die das Verhalten der verschiedenen Teilnehmer regeln. Wie aus Abb. 2 ersichtlich ist, ist die gut

<http://bwg-nds.de/veranstaltungen/archivierte-veranstaltungen/vorwort/>

standardisierte Farbwahrnehmung des menschlichen Auges bei starker Beleuchtung (photopisch) und schwacher Beleuchtung (skotopisch) sehr unterschiedlich. Bei Situationen wie der Fahrt vom vollen Sonnenlicht in einen künstlich beleuchteten Tunnel benötigt aber das menschliche Auge eine gewisse Zeit sich auf die geänderten Sichtverhältnisse einzustellen. Im Übergang zwischen photopischen und skotopischem Bereich liegt das bisher im Wesentlichen unverstandene mesopische Sehen (Dämmerungssehen), das auch im nächtlichen Straßenverkehr vorliegt. In diesem Übergangsbereich werden gegenwärtig von den Metrologen und der CIE erstmalig standardisierte Bewertungsfunktionen für die Lichtwahrnehmung erarbeitet, die das Dämmerungssehen quantitativ beschreiben. Mit diesem Wissen können dann die Lichtverhältnisse in allen Situationen optimiert werden.

Die Erfolge in Medizin, ausreichende Ernährung, erhöhte Sicherheitsvorgaben am Arbeitsplatz und im Verkehr, sowie andere soziale Errungenschaften haben in Deutschland zu einer deutlichen Erhöhung der Lebenserwartung geführt. Mit der alternden Gesellschaft ergeben sich neue Herausforderungen. Bezieht man die Helligkeitswahrnehmung eines Erwachsenen auf die eines zehnjährigen Kindes so stehen einem 45 Jährigen nur noch knapp über 60%, einem 60 Jährigen weniger als 50% und einem 85-Jährigen weniger als 30% der Sehleistung zu Gebote. Auch die Farbwahrnehmung lässt im Alter ähnlich drastisch nach. Diese Zusammenhänge werden gerade erforscht und die Ergebnisse werden dann auch ihren Niederschlag in sozialen und rechtlichen Regulierungen für eine altersgerechte Beleuchtung zu Hause und im öffentlichen Raum finden. Die neuen Lichtquellen erlauben prinzipiell die Einrichtung einer personenabhängigen, individualisierten Beleuchtung.

Licht steuert Körperfunktionen

Es ist schon länger bekannt, dass Licht den Biorhythmus des menschlichen Körpers steuert und einen großen Einfluss auf die Körperfunktionen hat [Spo2004]. Es gibt z.B. eine direkte Nervenverbindung zwischen der Netzhaut und dem Hypothalamus, dessen Hirnanhangdrüse (Hypophyse) eine zentrale Rolle bei der Regulation des Hormonsystems im menschlichen Körper zukommt. Das Hormon Melatonin beispielsweise steuert den Tag-Nacht-Rhythmus des Menschen. Bei gesunden Menschen steigt der Melatoninspiegel ab ca. 19:00 Uhr an und erreicht gegen 3:00 Uhr sein Maximum. Die Melatoninbildung wird durch Licht gehemmt. Im Winter kann der Melatoninspiegel auch tagsüber erhöht sein mit der Folge von Müdigkeit, Schlafstörungen und einer Winter-Depression. Eine Lichttherapie mit steuerbaren Lichtquellen kann hier Abhilfe bringen. Besonders wirksam zum Melatoninabbau ist blaues Licht mit 450 nm Wellenlänge. Das macht sich beispielsweise die zivile Luftfahrt im Langstreckenbereich zu Nutze. Im Airbus besitzt die Abend- und Nachtbeleuchtung einen hohen Rotanteil, während bei der Tagbeleuchtung der Blauanteil im Licht erhöht wird.

Licht für Kunst und Kultur

Wer kennt es nicht? Im Museum ist das Fotografieren mit Blitzlicht verboten mit Hinweis darauf, dass die kostbaren Gemälde lichtempfindlich sind. Dasselbe Argument wird dann auch benutzt um die schummrige Beleuchtung zu rechtfertigen, die ein gutes Betrachten oder Fotografieren der Ausstellungstücke nicht erlaubt. Dabei ist unbestritten, dass Ölgemälde, alte Papiere und Leinwände empfindlich sind und durch künstliches Licht oder mit der Lichtquelle verbundenen Wärmeeintrag nicht geschädigt werden dürfen. Geeignet ausgewählte LEDs strahlen weder ultraviolette Strahlung, die die Farben zersetzen können, noch infrarote Wärmestrahlung ab. In einem Forschungsprojekt der Europäischen Union

wurden beispielsweise im Jahr 2013 in der Sixtinischen Kapelle 7000 LED-Leuchten installiert. Jetzt wirken die Fresken wieder dreidimensional auf den Beobachter und der Alterungsprozess wird verlangsamt bei gleichzeitig um 60 % reduzierten Energiekosten [Six2013].



Abb. 4: Lichtinstallation „Farbring 450 d“ von Susanne Rottenbacher beim Braunschweiger Lichtparcours 2010

Kompaktheit, Flexibilität, und reduzierter Energieverbrauch führen auch dazu, dass LED- und OLED-Beleuchtungselemente in immer stärkerem Maße für Kunst und für Lichtinstallationen genutzt werden [Abb. 4].

Mögliche weitergehende Anwendungen

Am Ende dieses Artikels mag es erlaubt sein noch etwas über visionäre Anwendungen zu spekulieren, die mit dem Aufkommen der neuen Lichtquellen möglich werden. Organische Leuchtdioden (OLEDs) bestehen prinzipiell aus einer hauchdünnen Schicht, die auch großflächige Lichtquellen erlauben. Sie werden heute sehr häufig als Displays in Smartphones oder neuerdings auch in Fernsehern mit bis zu 165 cm Bildschirmdiagonale eingesetzt. Ein Vorteil der OLEDs liegt in der Biegsamkeit der Schichten und ihren großen Flächen. Es gibt Visionäre, die sich vorstellen, dass solche Schichten in naher Zukunft in großflächigen Fensterfronten eingebracht werden, die dann auf

Knopfdruck durchsichtig, undurchsichtig oder weißleuchtend werden. Die Biegsamkeit und die damit verbundene Bruchsicherheit des Displays ist heute schon ein Verkaufsargument bei Smartphones. Sie wird neue Anwendungen wie dreidimensionale Beleuchtungskörper oder Displays auf gekrümmten Autoscheiben oder Head-up Displays erlauben.

Um diesen und anderen Chancen und Herausforderungen, die mit den neuen Lichtquellen jetzt möglich werden, optimal zu begegnen, sind neue Messverfahren, Normen und Standards zu entwickeln (Abb. 5 und 6) und vor allem diese neuen Kenntnisse auch zu kommunizieren. Über neuere Entwicklungen in der Photometrie s. [PTB-Mitt. 2015].

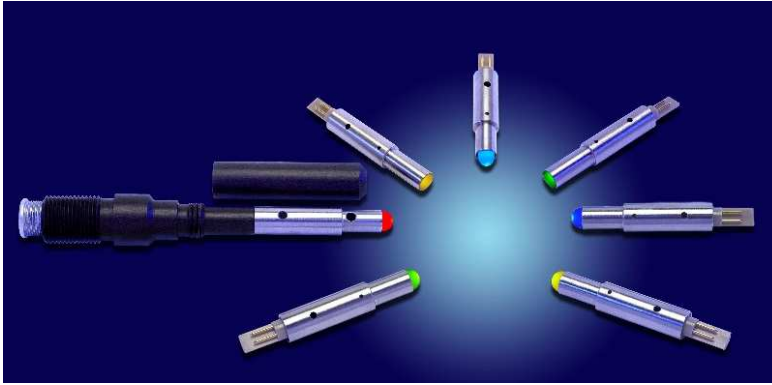


Abb. 5: In der PTB entwickelte LED-Normale für verschiedene Farben

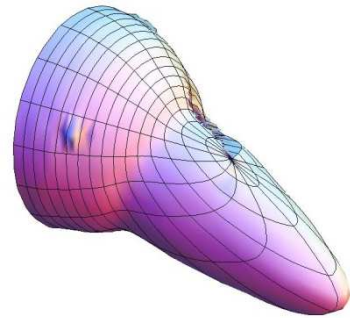


Abb. 6: Abstrahlcharakteristik einer LED- Verkehrsampel

Zusammenfassung:

In der Beleuchtung stehen wir heute einem Umbruch gegenüber, der dem Wechsel von Gas- zu elektrischem Licht an der Schwelle zum zwanzigsten Jahrhundert vergleichbar ist. Mit der vorhandenen Technik der Leuchtdioden ist es heute bereits möglich jede beliebige Lichtqualität mit hoher Effizienz herzustellen. Allerdings hat diese Qualität ihren Preis und noch werden aus Preisgründen in Standardprodukten oft Kompromisse eingegangen, die die Möglichkeiten der neuen Lichtquellen nicht ausnützen. Neue Messverfahren und Aufklärung der Kunden, Nutzer und regelsetzenden Institutionen über die beleuchtungstechnischen Grundlagen und die physiologische Wirkung von Licht können dazu führen, dass nach Glüh- und Energiesparlampen die neuen LED-Lichtquellen zu einer verbesserten Lebensqualität führen.

Literaturnachweise:

[Arg1800] https://de.wikipedia.org/wiki/Aim%C3%A9_Argand

[PTB-Mitt. 4-2015] PTB Mitteilungen 4-2015 Das Jahr des Lichts

[Six2013] http://www.osram.de/osram_de/news-und-wissen/led-beleuchtung-in-der-sixtinischen-kapelle/index.jsp

[Spo2004] Peter Spork: Das Uhrwerk der Natur-Chronobiologie – Leben mit der Zeit; rororo Science; Rowohlt-Verlag 2004 ISBN3 499 61665 3

[Ven1787] <https://de.wikipedia.org/wiki/Venusgrotte>