

„Wirtschaftlichkeit von organischen LED-Leuchtmitteln für die Personenzüge der Zukunft“

Im DLR-Projekt „Next Generation Train“ (NGT) werden Personenzüge der Zukunft erforscht. Zur Erhöhung des Streckendurchsatzes und Verringerung ihres spezifischen Energiebedarfs sind die Wagen des Hochgeschwindigkeitszuges NGT HST¹ und des Zubringerzuges NGT LINK doppelstöckig ausgeführt^[1]. Aufgrund des daher begrenzten zur Verfügung stehenden Bauraums ergeben sich hohe Anforderungen speziell für die platzsparende Gestaltung der Innenraumbeleuchtung.

Die heutigen Personenzüge sind überwiegend mit Leuchtstoffröhren-Leuchten ausgestattet. Neben dem Leuchtmittel selbst beinhaltet die Leuchte ein Vorschaltgerät, einen Reflektor und oft zusätzlich einen Diffusor. Leuchtstoffröhren sind stabförmige Niederdruck-Gasentladungslampen. Wesentliche Vorteile dieser über Jahrzehnte bewährten Leuchtmitteltechnologie (Massenproduktion seit 1938) liegen in der relativ hohen Lichtausbeute (typisch 90 lm/W) bei einer moderaten Lebensdauer von bis zu 20.000 Betriebsstunden und den niedrigen Kosten. Nachteile sind dagegen eine hohe Umweltbelastung (Quecksilber), ein oft auftretendes Flimmern am Ende der Lebensdauer und vor allem der relativ große erforderliche Bauraum. Da dimmbare Vorschaltgeräte für Leuchtstoffröhren im Transportbereich nicht üblich sind, ist die Beleuchtung zudem bis zu 22 Stunden pro Tag mit voller Leistung eingeschaltet, was in einem hohen Energiebedarf mündet.

In neuen oder modernisierten Schienenfahrzeugen, wie z. B. im ICE 3 der Deutschen Bahn AG, werden zunehmend auch Leuchten mit LED-Leuchtmitteln (Light-Emitting Diode) installiert. Wesentliche Vorteile der LED-Leuchtmittel liegen in der höheren Lichtausbeute (von 120 lm/W bei Massenprodukten bis 300 lm/W bei Labormustern) und einer hohen Lebensdauer (von ca. 50.000 Betriebsstunden bei Massenprodukten, bis über 100.000 Betriebsstunden bei Labormustern). Die grundsätzliche Dimmbarkeit von LEDs ermöglicht darüber hinaus eine tageszeitabhängige Steuerung und würde den Energiebedarf weiter senken^[2]. Nachteilig wirkt sich dagegen vor allem die technologisch bedingte Form der LED aus, da diese lediglich eine Punktlichtquelle darstellt. Daher müssen LED-basierte Leuchten ausreichend viele Lichtpunkte und für eine gleichmäßige sowie blendfreie Beleuchtung zusätzliche Streuscheiben enthalten. In den Fahrgastbereichen und Gängen eines ICE 3 (8-Wagenzug) werden insgesamt 348 Leuchtstoffröhren und bis zu 29 LED-Spots verbaut. Zusätzlich befinden sich an den 1. Klasse-Sitzplätzen 111 LED-Leselampen.

Die aktuell noch überwiegend in Designer-Leuchten zu findenden organischen LEDs (OLED -Organic Light Emitting Diode) bestehen aus millimeterdünnen Glasscheiben, auf denen mehrere rund 400 Nanometer dünne Schichten organischer Halbleitermaterialien sowie stromführende Elektroden aufgebracht sind (vgl. Abbildung 1).

OLEDs stellen bauartbedingt eine Flächenlichtquelle dar und erzeugen ein sanftes, diffuses, homogenes und blendfreies Licht. Sie benötigen gegenüber etablierten Leuchtmitteln sehr wenig Bauraum (weniger als 3 mm Tiefe) und sind stufenlos dimmbar. Die Lichtausbeute dieser Leuchtmittel liegt im aktuellen Entwicklungsstadium zwischen 50 lm/W bei kommerziell verfügbaren OLEDs und 139 lm/W bei Labormustern. Die Lebensdauer befindet sich im Bereich von 15.000 Betriebsstunden bei kommerziell verfügbaren OLEDs und bis zu 55.000 Stunden bei Labormustern^[3]. Die Form der OLED-Module ist bereits heute frei wählbar. Die theoretisch unbegrenzte Flächengröße ist jedoch aktuell noch auf ca. 1.000 cm² limitiert^[4]. Aufgrund ihres großen Weiterentwicklungspotentials werden die OLED-Leuchtmittel aktuell in Branchenkreisen auch als „die Lichtquelle der Zukunft“ bezeichnet^[5].

konnte gezeigt werden, dass die OLED-Leuchtmittel bereits in ihrem derzeitigen Entwicklungsstadium genügend Licht für eine komfortable Beleuchtung von Fahrgasträumen bereitstellen und den Energiebedarf im Vergleich zum Stand der Technik um bis zu 50% senken können. Bei Pilotversuchen mit Probanden in einem 1:1-Wagenmodell konnte darüber hinaus die überdurchschnittliche Akzeptanz der OLED-Leuchtmittel belegt werden^[7]. Dementsprechend werden durch die OLEDs sowohl die beleuchtungstechnischen als auch konstruktiven Anforderungen, die sich durch die doppelstöckige Wagenkastenausführung der NGT-Züge ergeben, erfüllt. Im Gegensatz zum ICE 3, in dem unterschiedliche Leuchtmittelarten eingesetzt werden, erfolgte die Modellierung der Beleuchtungskonzepte der NGT-Triebzüge ausschließlich mit den derzeit kommerziell am Markt verfügbaren OLED-Modulen. Für eine

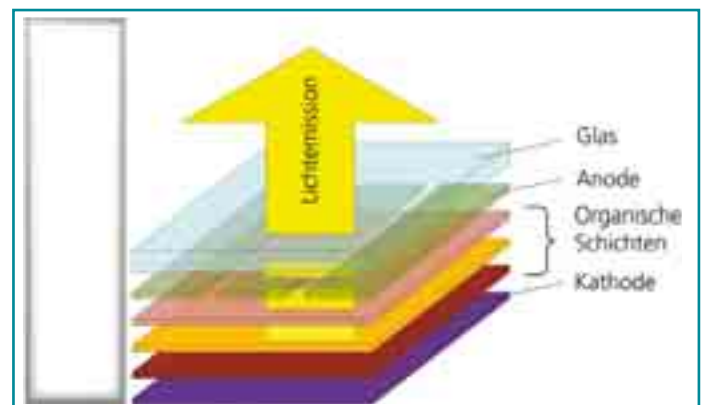


Abbildung 1: OLED-Modul Modell Lumiblade^[6] und sein prinzipieller Aufbau

Bei der Ausarbeitung des Beleuchtungskonzeptes für den NGT HST (vgl. Abbildung 2)

regelkonforme Beleuchtung in Bezug auf die sicherzustellende Beleuchtungsstärke nach

¹ NGT High Speed Train

DIN EN 13272 werden für einen NGT HST, bestehend aus 10 Triebwagen (2 End- und 8 Mittelwagen) insgesamt 5.208 OLED-Module benötigt. Nach der Modellierung des Beleuchtungskonzeptes für einen 7-teiligen NGT LINK sind dagegen 3.027 Module notwendig.

Für die Umsetzung von innovativen Technologien sind die Kosten eines Systems oder Produkts von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grund wurde neben den beleuchtungstechnischen und psychologischen Untersuchungen der OLED-Leuchtmittel für den Einsatz als Allgemeinbeleuchtung in Personentriebzügen das besondere Augenmerk auf die wirtschaftliche Bewertung gelegt. Dabei erfolgte eine Berechnung der mit den innovativen Beleuchtungskonzepten der NGT-Triebzüge verbundenen Kosten bezogen auf den gesamten Lebenszyklus eines Zuges (Lebenszykluskostenrechnung, life cycle costing – LCC). Wesentliche Bestandteile der LCC sind neben den Investitions- und Instandhaltungskosten auch die Energie- und Entsorgungskosten.

Gegenüber den im Schienenfahrzeugbereich etablierten Leuchtmitteln (Leuchtstoffröhre, LED) basieren die OLED-Module auf einer noch sehr jungen Technologie. Aufgrund dessen und infolge der noch geringen Produktionskapazitäten sind die derzeit verfügbaren OLED-Module verglichen mit einer Leuchtstoffröhre bis zu 38-mal teurer. Im Vergleich zum LED-Leuchtmittel kostet ein OLED-Modul ungefähr das 5-fache.² Durch die hohen Investitionskosten in Verbindung mit der geringen Lebensdauer derzeit verfügbarer OLEDs von nur 15.000 Stunden und der hohen benötigten Leuchtmittellanzahl

² Auf die Angabe von konkreten Werten muss aufgrund von zum Teil vertraulichen Daten an dieser Stelle verzichtet werden.



Abbildung 2: Beleuchtungskonzept NGT HST mit OLED-Modulen



EAO Baureihe 57. *Setzt den neuen Standard.*

EAO, der Leuchtdrucktasten-Pionier, präsentiert seine neue Baureihe 57 – die «all-in-one» Türöffnertaste mit vielen innovativen Eigenschaften:

- Erste Wahl, um die EN 14752 vollständig zu erfüllen
- Anwenderfreundliche, extra große Ø 74 mm Betätigungsfläche
- Zwei einzigartige, individuell ausleuchtbare Feedback-Ringe
- Erhabene, ausleuchtbare Symbole erfüllen TSI PRM & ADA
- Integrierter Auffindeton hilft sehbehinderten Personen
- Leuchtmelder mit sehr gut sichtbarer Beschriftung
- Smarte, werkzeuglose Endmontage spart Zeit und Geld

50 Jahre
EAO GmbH
1965 - 2015

e a o ■

Your Expert Partner for Human Machine Interfaces
www.eao.com

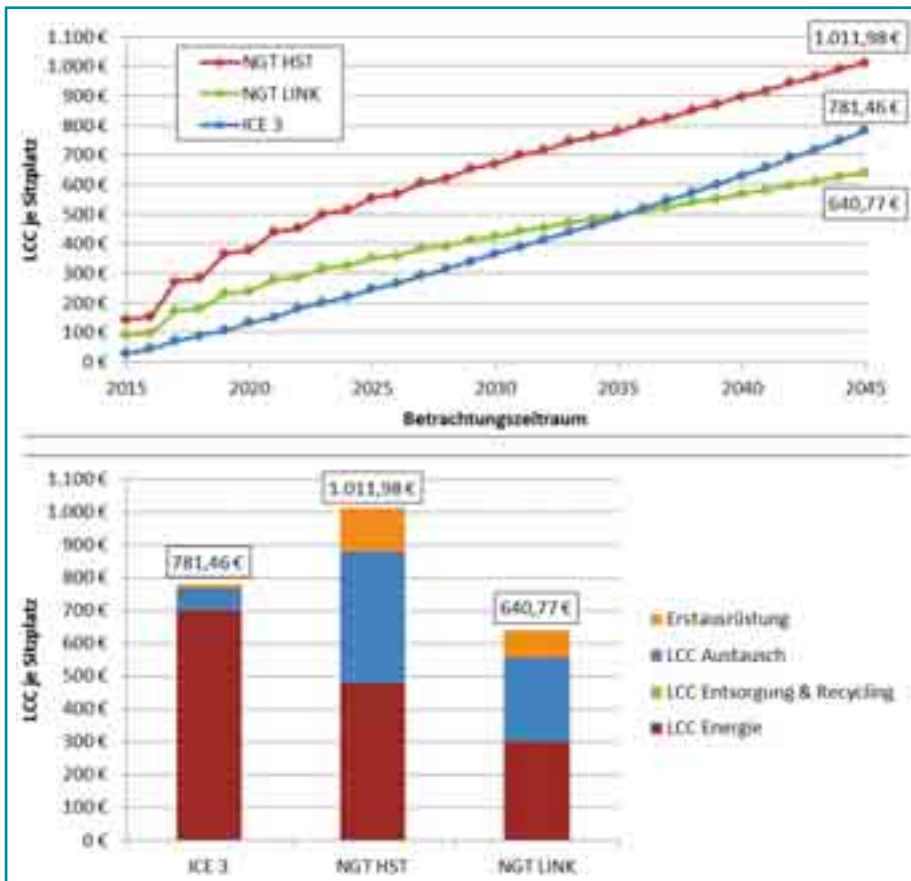


Abbildung 3: Lebenszykluskosten kumuliert (oben) und nach Kostenpositionen (unten) je Sitzplatz für die NGT-Triebzüge und den ICE 3 im Betrachtungszeitraum 2015-2045

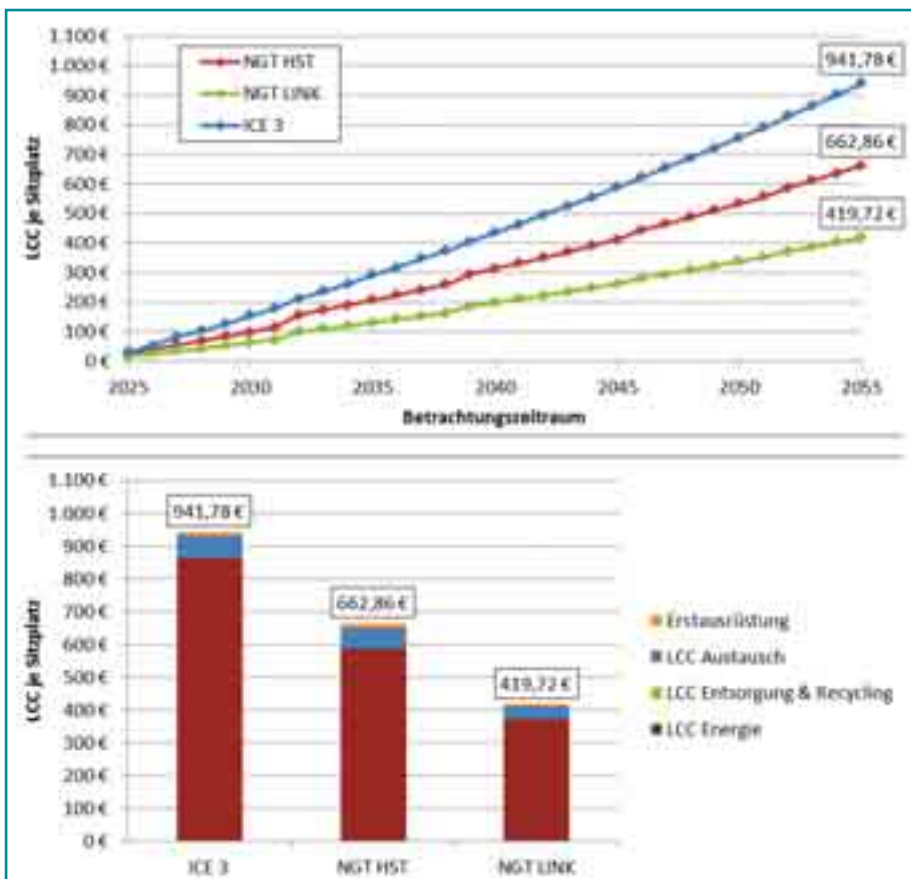


Abbildung 4: Lebenszykluskosten kumuliert (oben) und nach Kostenpositionen (unten) je Sitzplatz für die NGT-Triebzüge und den ICE 3 im Betrachtungszeitraum 2025-2055

ergeben sich über dem Lebenszyklus dementsprechend höhere Erstausstattungs- und Austauschkosten bei den NGT-Triebzügen im Vergleich zum ICE 3 (vgl. Abbildung 3). Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden die Lebenszykluskosten aufgrund der unterschiedlichen Zugkonzepte, ICE 3-Wagen – einstöckig und NGT-Wagen – doppelstöckig, jeweils auf den Sitzplatz bezogen. Durch die langen Betrachtungszeiträume wurden darüber hinaus sämtliche Kosten mit einem Realzinssatz von 6,38% auf das Bezugsjahr abgezinst.

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil der Lebenszykluskosten für die Beleuchtung sind deren Energiekosten. Während diese beim ICE 3 insgesamt 90% der Gesamtkosten ausmachen, beträgt der Energiekostenanteil bei den NGT-Zügen trotz der höheren Leuchtmittellanzahl aufgrund der effizienteren Beleuchtungskonzepte lediglich 47%. Mit Hilfe einer bedarfsorientierten Ansteuerung ist eine weitere Verringerung der Energiekosten möglich. Bei den Berechnungen wurde zudem berücksichtigt, dass der OLED-Preis mit der Zeit sinkt. Somit ergeben sich beim NGT LINK, sofern die Fahrzeuge bereits heute mit den OLED-Modulen ausgerüstet werden würden, geringere LCC-Gesamtkosten als beim ICE 3.

Da sich die OLED-Technologie derzeit noch am Anfang ihrer Entwicklung befindet, wurde auch untersucht, wie sich die Kosten verhalten, wenn die Fahrzeuge erst in 10 Jahren ausgerüstet werden würden (vgl. Abbildung 4). Bei diesen Berechnungen wurde angenommen, dass die OLED-Module in Bezug auf die Lebensdauer und Kosten eine ähnliche Entwicklung erfahren wie die LED-Leuchtmittel in der jüngeren Vergangenheit. Wie zu erkennen ist, ergeben sich geringere Ausrüstungs- und Austauschkosten im Vergleich zum vorherigen Betrachtungszeitraum. Insgesamt können die Kosten pro Sitzplatz für die Beleuchtung gegenüber dem ICE 3 im Falle des NGT HST um ca. 30% und beim NGT LINK um bis zu 55% reduziert werden.

Die Ergebnisse zeigen demnach, dass sich insbesondere die Lebensdauer und der Marktpreis der OLED-Module auf die Höhe der Lebenszykluskosten auswirken. Zur Ermittlung der Einflussstärke dieser und weiterer Parameter auf die Lebenszykluskosten wurde zusätzlich eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt (vgl. Abbildung 5).

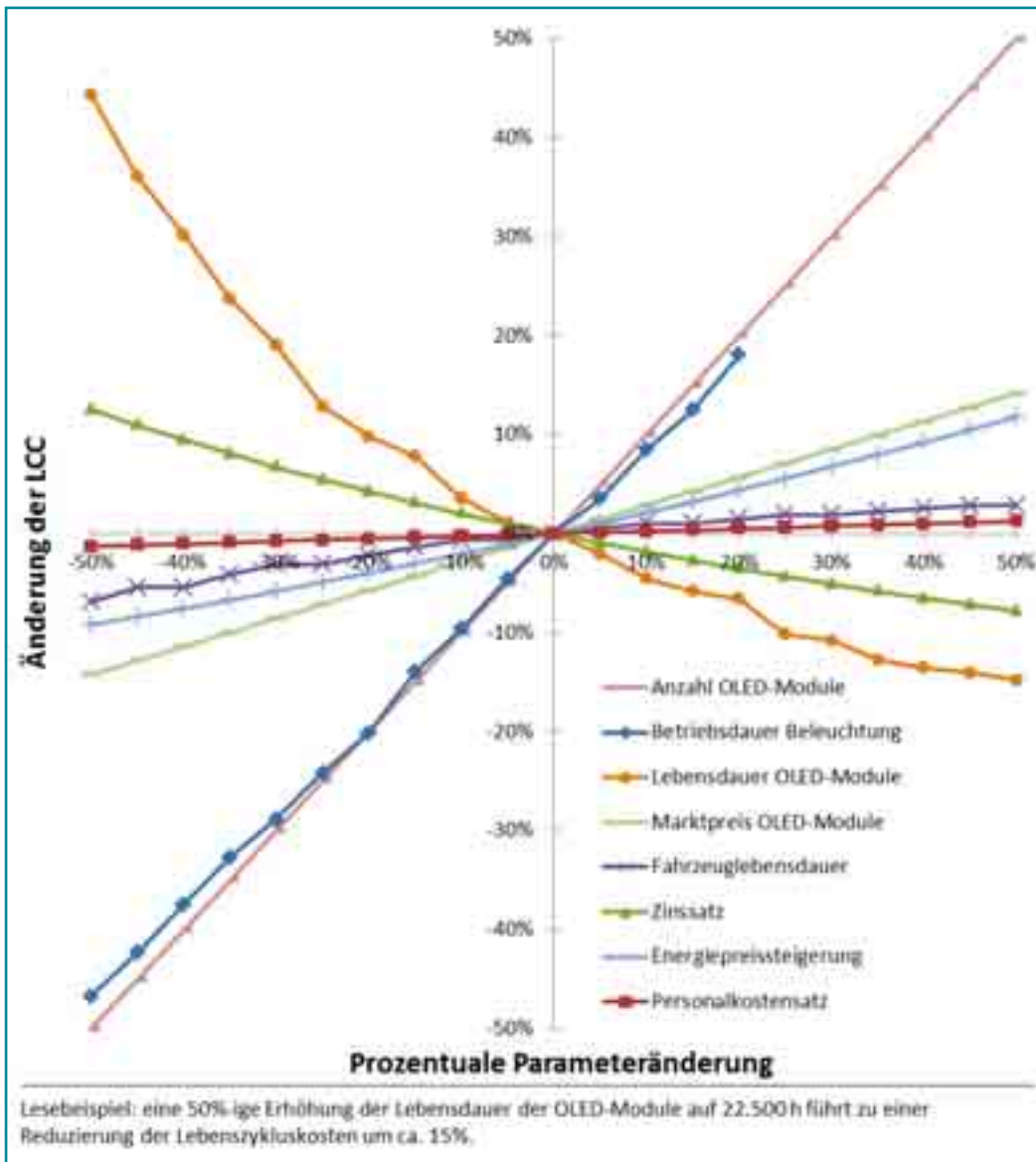


Abbildung 5: Sensitivität der Lebenszykluskosten bei Parametervariation für den NGT HST

Die Parameter mit dem höchsten Einfluss auf die Lebenszykluskosten sind demnach:

- die Anzahl der OLED-Module,
- die jährliche Betriebsdauer der Beleuchtung,
- die Lebensdauer der OLED-Module und
- der Marktpreis der OLED-Module.

In der Folge sollten diese Parameter in weiteren Forschungsarbeiten näher auf ihr Kostenreduzierungspotenzial untersucht werden. Darüber hinaus werden die Gesamtkosten maßgeblich durch die Energiekosten bestimmt. Somit ist es

sinnvoll, die Effizienz der OLED-Leuchtmittel weiter zu steigern.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe der innovativen OLED-Technologie eine effizientere, komfortablere und in naher Zukunft auch wirtschaftlichere Beleuchtung von Personenzügen ermöglicht werden kann. Neben den hier untersuchten Triebzügen des DLR-Projektes NGT ergeben sich durchaus noch weitere Anwendungsbereiche der innovativen Beleuchtung, beispielsweise in Regionaltriebzügen oder in Stadt- und Straßenbahnen. Nachdem nun die beleuchtungstechnischen und auch

unter den angenommenen Prognosen wirtschaftlichen Vorteile der OLED-Technologie aufgezeigt wurden, gilt es, in einem nächsten Schritt zulassungsfähige OLED-Module für den Einsatz im Schienenfahrzeugbereich zu entwickeln und diese anhand von Prototypen zu demonstrieren.

Christopher Kalatz
Ivan Windemut

Institut für Fahrzeugkonzepte
Deutsches Zentrum für
Luft- Raumfahrt e. V.
Berlin

www.dlr.de

Literatur

- [1] J. Winter, S. Ehrenberger, S. Kaimer, C. Kalatz, D. Krüger, J. Pagenkopf und S. Streit, „Ein ganzheitlicher Ansatz für den Hochgeschwindigkeitsverkehr,“ *Deine Bahn*, Nr. 9, pp. 6-12, 2014.
- [2] B. Heine, „Dynamische Zugbeleuchtung senkt Betriebskosten und vermittelt Fahrgästen ein angenehmes Gefühl,“ *ZEVrail*, Nr. 139, pp. 348-353, September 2015.
- [3] R. Mertens, 06 2014. [Online]. Available: <http://www.oled-info.com/konica-minolta-break-their-own-record-worlds-most-efficient-oled-panel-139-lmw>.
- [4] R. Mertens, 01 2015. [Online]. Available: <http://www.oled-info.com/lg-details-price-their-320x320-mm-and-truly-flexible-oled-lighting-panels>.
- [5] Richard Pflaum Verlag GmbH & Co. KG, 01 2016. [Online]. Available: <https://www.lichtnet.de/lichtquelle-der-zukunft/>.
- [6] OLEDWorks GmbH, Februar 2016. [Online]. Available: <http://www.oledworks.com/products/lumiblade.php>.
- [7] J. Maier, O. Zierke, H.-J. Hörmann und I. Windemut, „Lighting preferences and expectations influence lighting comfort – this influence is bigger than the influence of the objective lighting conditions,“ *Lighting Research and Technology*, in Vorbereitung 2016.