

Einsatz von LED-Retrofitlampen in Drucksälen

*Dr.-Ing. Karin Bieske; Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz;
Dr.-Ing. Andreas Kraushaar (Fogra)
Technische Universität Ilmenau
FG Lichttechnik | PF 100 565 | 98684 Ilmenau | Germany*

Zusammenfassung

Für die Bewertung der Farbqualität im Druckprozess ist die Beleuchtung entscheidend. In Druckereien und Mediovorstufen sind Leuchtstofflampen in Langfeldleuchten und Lichtbändern in der Allgemeinbeleuchtung typisch. Mit weißen LEDs sind aktuelle Retrofitlampen auf dem Markt verfügbar, die bei ähnlichem Lichtstrom weniger elektrische Leistung verbrauchen. Der Lampentausch stellt die kostengünstigste Variante dar und wird daher in Unternehmen favorisiert. Moderne, energieeffiziente LED-Lampen wurden auf ihre Eignung zum Einsatz in der grafischen Industrie untersucht. Betrachtet wurden die Auswirkungen wesentlicher Unterschiede der Lampentypen in Abstrahlcharakteristik und Spektralverteilung auf lichttechnische Gütemerkmale.

1 Einleitung

In der graphischen Industrie, aber auch in anderen farbgebenden Bereichen, ist eine farbgenaue Reproduktion auf der Basis eines Farbnormals oder von Originalvorlagen üblich. Neben einer messtechnischen Qualitätskontrolle ist das visuelle Urteil über die erreichte farbliche Übereinstimmung für die farbgenaue Reproduktion wesentlich. Die Beleuchtung hat bei der visuellen Abmusterung einen entscheidenden Einfluss, da das beleuchtende Spektrum in Wechselwirkung mit den spektralen Reflexionseigenschaften der Oberfläche die Farbwahrnehmung maßgeblich bestimmt. Eine abweichende Beleuchtung kann zu Fehlurteilen und damit zu Reklamationen bzw. zu höheren Kosten im Produktionsprozess führen.

Für den Bereich der visuellen Abmusterung in der Druckindustrie, typischerweise in einer Abmusterkabine, erfüllen die lichttechnischen Spezifikationen der ISO 3664: 2009 [1] die gegenwärtigen Anforderungen an eine hochgenaue Farbkommunikation gut [2], [3]. Die farbkritische Betrachtung und Bewertung von Drucken geschieht aber oft auch außerhalb der Normlichtkabinen. Hierzu zählen der Drucksaal, die Räumlichkeiten der Druckvorstufe oder ein Show-Room. In Werbeagenturen wird aus Kostengründen oft vollständig auf Normlicht gemäß ISO 3664 verzichtet. Diese Bereiche der Allgemeinbeleuchtung unterliegen lediglich den Vorgaben der Technischen Regel für Arbeitsstätten ASR A3.4 [4] bzw. der DIN EN 12464-1 [5]. Sie beschreiben allgemeine Kriterien der Beleuchtung, gehen aber nicht speziell auf die besonderen Anforderungen der Abmusterung in der Druckerei ein.

Bislang wurden vorwiegend Leuchtstofflampen typischerweise in Langfeldleuchten und Lichtbändern in Druckereien und Mediovorstufen eingesetzt. Ein typisches Beleuchtungskonzept zeigt Abbildung 1. Mit weißen LEDs sind aktuelle Lichtquellen auf dem Markt verfügbar, die konkurrenzfähig zu traditionellen Lampen sind. Als LED-Retrofit werden u.a. Lampen in LED-Technologie angeboten, um stabförmige Leuchtstofflampen zu ersetzen. Beispiele sind in Abbildung 2 gezeigt.



Abb. 1: Links: Beispiel für eine Beleuchtungssituation im Drucksaal (Bildquelle: BG ETEM), Rechts: typische Langfeldleuchten mit zwei Lampen bzw. einer Lampe und Reflektor (Bildquelle: fluolite.de)



Abb. 2: Beispiele für LED-Lampen mit opalem und klarem Lampenkolben (links und Mitte) und mit breiterer Abstrahlung (rechts)

Wesentliche Vorteile der LED-Technologie werden in einer langen Lebensdauer und einem geringen Wartungsbedarf für die Beleuchtungsanlage und im niedrigen Energieverbrauch durch eine hohe Lichtausbeute gesehen.

Der Umstieg von Beleuchtungssystemen mit Leuchtstofflampen auf die energieeffiziente LED-Technologie ist möglich durch:

- Austausch von Lampen in bestehenden Leuchten
- Austausch von Leuchten
- Neuplanung der gesamten Beleuchtungsanlage

Der Lampentausch stellt gegenwärtig die kostengünstigste Variante dar und wird daher in Unternehmen favorisiert. Auch wenn es Retrofit-Lampen gibt, die ohne weitere Änderung an der Leuchte die Leuchtstofflampe ersetzen können, ist doch meistens je nach Typ eine Überbrückung des Vorschaltgeräts mit Entfernung des Starters oder ein Austausch des Starters notwendig. Dabei stellen sich Fragen der Sicherheit und der Gewährleistung.

Mit dem Wechsel der Lampentechnologie sind zudem Unterschiede in spektraler Verteilung und Lichtabstrahlcharakteristik (LVK) zu erwarten. Unterschiede im Spektrum können Auswirkungen auf die Farbwiedergabeeigenschaften und die Unterscheidbarkeit von Farbnuancen haben. Leuchten modellieren die Lichtverteilung von Lampen und haben in Abhängigkeit vom Montageort Einfluss auf Beleuchtungsniveau und Gleichmäßigkeit der Lichtverteilung im Arbeitsbereich.

Um bei LED-Retrofitlampen einen ausreichend hohen Lichtstrom zu erzeugen, werden mehrere LEDs in einer Lampe verbaut. Aufgrund der kompakten Bauform und der relativ hohen Leuchtdichte von LEDs ergibt sich eine sehr ungleichmäßig leuchtende Fläche mit hohen

Leuchtdichtekontrasten zwischen den hellen und dunklen Flächen auf der Lampen- bzw. Leuchtenoberfläche, es sei denn, streuende Materialien, wie ein diffuses (opales) Lampenrohr oder eine Streuscheibe, werden eingesetzt. Hohe Leuchtdichten können vor allem beim direkten Blick in die Lampe oder Leuchte als sehr störend empfunden werden und auf glänzenden Oberflächen zur Reflexblendung führen [6].

Eine Änderung des Lampentyps in einer Leuchte kann damit Einfluss auf die Lichtverteilung der Leuchte haben und Beleuchtungsniveau, Gleichmäßigkeit sowie Blendung derart beeinflussen, dass die Anforderungen der Arbeitsstättenregel ASR A3.4 [4] und die Empfehlungen der DIN EN 12464-1 [5] für die Beleuchtung in der Druckindustrie möglicherweise nicht mehr erfüllt werden.

2 Untersuchung der Lichtverteilung

Zur Bewertung der lichttechnischen Eignung von LED-Retrofit-Lampen in bestehenden Beleuchtungsanlagen in der Druckindustrie erfolgten umfangreiche Messungen im Goniophotometer bei kontrollierten elektrischen Parametern [7]. Es wurden die Lichtstärkeverteilungen (LVK) erfasst und Strahldaten für jede Lampe erzeugt. Aus diesen Messungen wurden Lichtstrom, Lichtausbeute, maximale Lichtstärke und Abstrahlwinkel bestimmt und mit den Daten der Referenzlampe (T8 Leuchtstofflampe #0 LL 950) verglichen. Anschließend wurden die Lampen in Leuchten verbaut, wie sie in der Druckindustrie zum Einsatz kommen. Typisch sind direkt abstrahlende Leuchten mit weißen oder glänzenden Reflektoren. Es wurde untersucht, wie sich Unterschiede der Lampentypen auf die lichttechnischen Eigenschaften von Leuchten auswirken. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden Simulationen mit der Lichtplanungssoftware DIALux für einen Standarddruckraum durchgeführt und der Einfluss der Lampentypen auf die Güteermale betrachtet. Zur Bewertung der Blendung wurden Leuchtdichteverteilungen mit einer Leuchtdichtemesskamera gemessen und das UGR-Verfahren nach [8] herangezogen.

2.1 Messung an Lampen

2.1.1 Lichtstärkeverteilung

Vermessen wurden 15 T8 LED-Retrofit-Lampen (LED) mit unterschiedlichen Lichtströmen, Spektralverteilungen und Abstrahlcharakteristiken sowie als Referenz eine Leuchtstofflampe (#0 LL 950¹). Explizit wurden auch Lampen mit ähnlichsten Farbtemperaturen von 4000 K bis 6500 K aufgenommen, da diese durchaus in Drucksälen zu finden sind. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 3 und 4 dargestellt und in Tabelle 1 zusammengefasst.

Die Lichtströme der LED-Lampen sind im Mittel gleich zum Lichtstrom der Leuchtstofflampe und betragen zwischen 75 % und 125 %. Die elektrische Leistungsaufnahme der LED-Lampen entspricht etwa der halben elektrischen Leistung bei Leuchtstofflampen. LED-Lampen zeigen die erwartete deutlich höhere Effizienz in der Lichterzeugung und erreichen etwa die doppelte Lichtausbeute der Leuchtstofflampe. Die maximale Lichtstärke von LED-Lampen entspricht im Mittel dem 2,3-fachen bis maximal dem 3,7-fachen Wert von Leuchtstofflam-

¹ Die Zahlenwerte am Ende der Lampencodierung stehen jeweils für den Farbwiedergabeindex R_a und ähnlichste Farbtemperatur T_{cp} . So steht etwa bei 950 die 9 für einen Farbwiedergabeindex $R_a > 90$ und die 50 für eine ähnlichste Farbtemperatur $T_{cp} = 5000$ K.

pen. Während Leuchtstofflampen in alle Richtungen um die Lampenachse abstrahlen, konzentriert sich die Lichtabstrahlung bei LED-Lampen typisch in einem Drittel des Abstrahlwinkels. Ausnahmen sind die LED-Retrofitlampen mit breiter Abstrahlung (#14 und #15). Hier ist der Abstrahlwinkel etwa doppelt so groß wie bei typischen LED-Lampen.

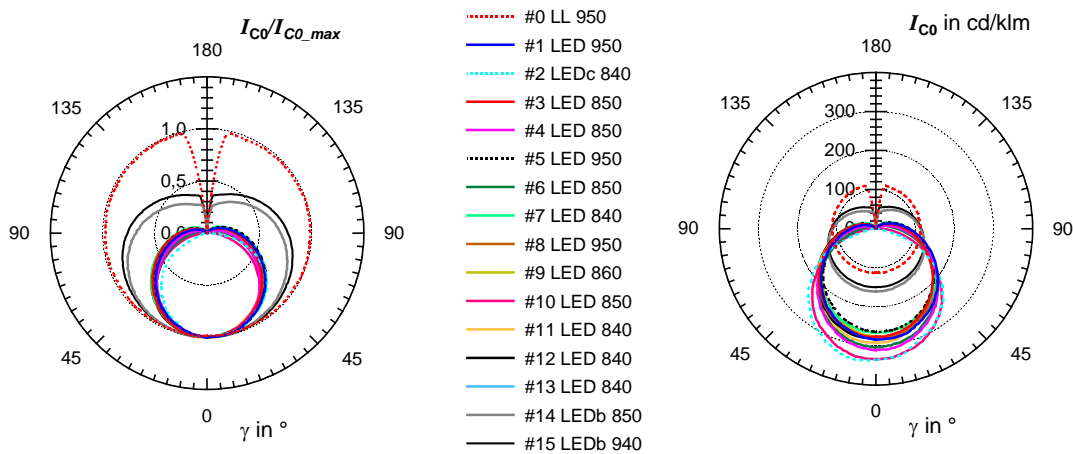


Abb. 3 Relative LVKs in der C₀-C₁₈₀-Ebene der vermessenen Lampen (links) und LVKs bezogen auf den Lichtstrom in der C₀-C₁₈₀-Ebene der gemessenen Lampen (rechts)

Tab. 1: Kennzahlen aus der LVK-Messung ($\propto I_{max}/2$: Halbstreuwinkel)

Lampe	Φ in lm	P in W	η in lm/W	I_{max} in cd	I_{max}/Φ in cd/klm	$\propto I_{max}/2$ in °
#0 LL 950	3175*	54,8	57,9	366,0	115,5	174* (180)
#1 LED 950	3046	28,4	107,3	868,3	285,1	65
#2 LEDc 840	3980	28,6	139,2	1354,4	340,4	59
#3 LED 850	2530	29,2	86,6	703,4	278,0	66
#4 LED 850	2801	28,1	99,7	872,1	311,4	61
#5 LED 950	2429	28,3	85,8	645,0	265,5	68
#6 LED 850	2849	23,2	122,8	867,9	304,6	64
#7 LED 840	3133	27,4	114,3	837,7	267,4	70
#8 LED 950	2791	29,0	96,2	786,8	281,9	73
#9 LED 860	3429	29,0	118,2	968,8	282,5	65
#10 LED 850	2790	22,4	124,6	940,7	337,2	58
#11 LED 840	3611	28,4	127,1	1058,7	293,2	64
#12 LED 840	2686	22,0	122,1	758,2	281,6	68
#13 LED 840	2620	21,4	122,4	742,2	283,3	64
#14 LEDb 850	3217	21,5	149,6	519,4	161,4	119
#15 LEDb 940	2359	21,9	107,7	354,4	150,2	134

* Verschattung durch Lampenhalterung

2.1.2 Leuchtdichte

Die Messung der Leuchtdichteverteilungen auf den Lampen ergab, dass LED-Lampen mit diffusem Lampenkolben (#11) etwa die 4-fache, LED-Lampen mit optisch klarem Lampenkolben (#2) etwa die 6-fache mittlere Leuchtdichte im Vergleich zur Leuchtstofflampe aufweisen. Werden die maximalen Leuchtdichten betrachtet, ergeben sich Verhältnisse von 1:5:60 zwischen Leuchtstofflampe und LED-Lampen mit diffusem und optisch klarem Lampenkolben. Dies hat Auswirkungen

auf die Blendungsbewertung. Wird der *UGR*-Wert nach [8] betrachtet und davon ausgegangen, dass die Lampe bei gleicher Lampengröße und vergleichbaren Beobachtungsbedingungen gesehen wird, dann gehen höhere mittlere Lampenleuchtdichten quadratisch in die Betrachtung ein. Eine Verdopplung der mittleren Lampenleuchtdichte führt zu einem Anstieg des *UGR*-Werts von 4,8 Bewertungsstufen. Die Halbierung der effektiv leuchtenden Fläche und damit des Raumwinkels führt zu einer Reduzierung des *UGR*-Werts um 2,4.

Für LED-Lampen mit opalem Lampenkolben kann davon ausgegangen werden, dass sie im Vergleich zu Leuchtstofflampen stärker blenden. LED-Lampen mit einem klaren Lampenkolben zeigen hohe Leuchtdichtekontraste zwischen hellen und dunklen Flächen innerhalb der Lampe bei sehr hohen punktuellen Leuchtdichten. Solche Ungleichmäßigkeiten führen zu Fehlern bei der Anwendung des *UGR*-Verfahrens, das gleichmäßig leuchtende Flächen voraussetzt [9]. Im Vergleich zu Lampen mit opalem Lampenkolben beträgt die effektiv leuchtende Fläche solcher Lampen geschätzt 1/6. Damit reduziert sich der Raumwinkel der Blendquelle entsprechend. Bei gleichem Lampenlichtstrom resultiert daraus eine mittlere Leuchtdichte der effektiv leuchtenden Fläche dieser Lampe, die um den Faktor 6 größer ist. Der *UGR*-Wert erhöht sich damit im Vergleich zur Leuchtstofflampe um 6,2 Bewertungsstufen. Daraus ergibt sich für solche LED-Lampen beim Blick in die Lampe eine wesentlich stärkere Blendung, die von Beobachtern deutlich störend oder sogar als unerträglich beurteilt wird. Ist der direkte Blick in solche Lampen möglich, sind Maßnahmen zur Blendungsbegrenzung notwendig. Aufgrund der höheren Leuchtdichten der LED-Lampen sind größere Mindestabschirmwinkel im Gesichtsfeld gemäß DIN EN 12464-1 einzuhalten [5]. Zusätzlich kann verstärkt Reflexblendung auf glänzenden Oberflächen auftreten.

2.2 Messung an Leuchten mit verschiedenen Reflektoren

Wegen der Ähnlichkeit der LVKs wurden weitere Untersuchungen nur für typische LED-Lampen mit opalem Lampenkolben und schmaler und breiter Abstrahlung sowie die LED-Lampe mit klarem Lampenkolben vorgenommen. Untersucht wurden Langfeldleuchten mit unterschiedlichen Reflektortypen, beispielhaft Leuchten mit einem matten, weißen Reflektor (WR) und mit einem glänzenden Aluminiumreflektor (AR).

Die an Leuchten gemessenen relativen LVKs sind in Abbildung 4 dargestellt. Für die Leuchtstofflampe zeigt sich eine deutliche Modulation der Lichtstärkeverteilung durch die unterschiedlichen Reflektortypen. Leuchten mit dem weißen Reflektor (WR) weisen eine breite Abstrahlung ohne große Gradienten auf. Der Aluminiumreflektor (AR) verändert die Abstrahlcharakteristik der Lampe schmetterlingsförmig mit einer stärkeren seitlichen Abstrahlung. Da sich mit steigendem Winkel γ auch der Abstand zwischen der Leuchte und einem Punkt in einer Ebene parallel zur Lichtaustrittsfläche vergrößert, können mit solchen LVKs einerseits eine größere Gleichmäßigkeit in der Ebene erreicht werden und andererseits lassen sich vertikale Flächen aufhellen.

Die Lichtströme der Leuchten mit LED-Lampen betragen zwischen 85 % und 146 % im Vergleich zu Leuchten mit Leuchtstofflampe. Die Unterschiede in der maximalen Lichtstärke zwischen LED- und Leuchtstofflampen reduzieren sich im verbauten Zustand bezogen auf die Messungen an Lampen auf die Hälfte. Die maximale Lichtstärke ist bis maximal 1,8-fach größer als bei Leuchtstofflampen. Für LED-Lampen, die nur in einen Halbraum abstrahlen, wirken die Reflektoren in den Leuchten kaum. Lichtverteilungen der Leuchten für LED-Lampen mit breiter Abstrahlcharakteristik (#14) sind denen von Leuchten mit Leuchtstofflampen am ähnlichsten. Bei vergleichbaren Leuchtenlichtströmen sind damit ähnliche Beleuchtungsniveaus und Gleichmäßigkeiten zu erwarten.

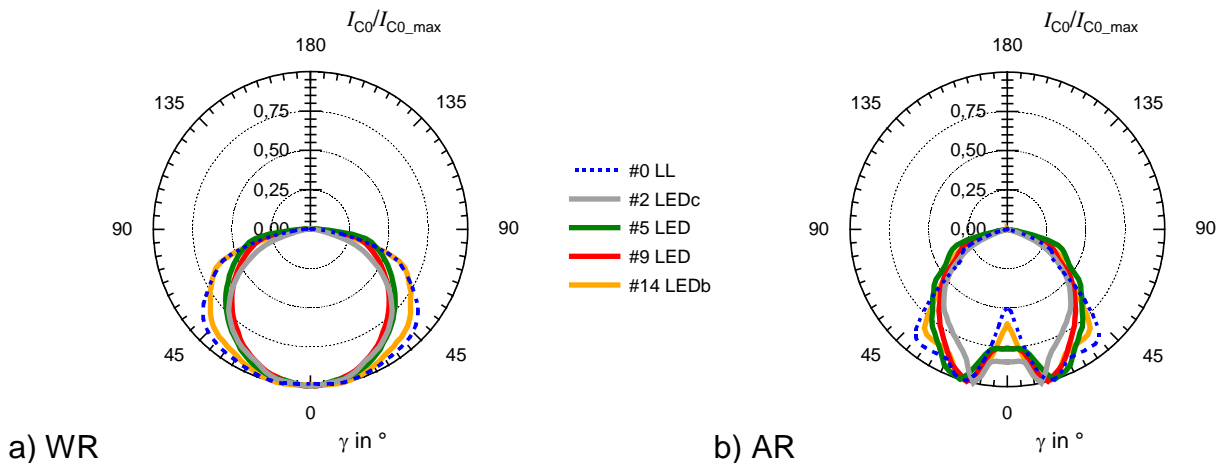


Abb. 4 Relative LVKs in der C_{0-180} -Ebene für Leuchten mit verschiedenen Lampentypen und mit einem weißen Reflektor WR (links) und mit einem Aluminiumreflektor AR (rechts)

Dies kann für eine Abschätzung auf einer horizontalen Ebene (2 m x 2 m, Raster: 16 x 16), zentriert 2,5 m unter einer Leuchte (typisch für die Beleuchtungssituation von Druckwerken) bestätigt werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt. Aus der Spannweite kann die Gleichmäßigkeit U_0 für die betrachteten Situationen abgeschätzt werden.

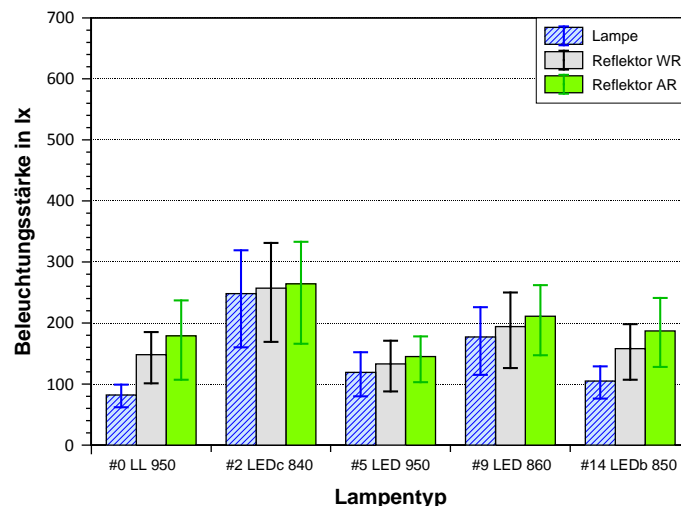


Abb. 5: Beleuchtungsstärke auf der Bewertungsfläche (2 m x 2 m, Höhe: 2,5 m) in Abhängigkeit von Reflektor und Lampentyp, Mittelwert (Balken), Minimum und Maximum (Spannweite)

Deutlich zeigt sich der Einfluss der Reflektoren auf die Abstrahlcharakteristik von Leuchtstofflampen. Je stärker der Reflektor die Lichtverteilung bündelt, umso höher ist das mittlere

Beleuchtungsniveau auf den betrachteten Bewertungsflächen. Ein ähnliches Verhalten haben Leuchten mit einer breitabstrahlenden LED-Lampe (#14). Leuchten mit LED-Lampen, die nur in den unteren Halbraum abstrahlen, zeigen nur geringe Unterschiede im Beleuchtungsniveau auf den betrachteten Bewertungsflächen in Abhängigkeit vom Reflektortyp. Die Reflektoren sind kaum wirksam. Aus den Ergebnissen folgt, dass beim Einsatz von LED-Lampen in bestehenden Beleuchtungsanlagen ähnliche Beleuchtungsniveaus und eine vergleichbare Gleichmäßigkeit erreicht werden können. Leuchten mit der LED-Lampe #5 erzielten nicht das gleiche mittlere Beleuchtungsniveau wie eine Leuchte mit Leuchtstofflampen, da der Lampenlichtstrom geringer ist. Es ist darauf zu achten, dass der Lichtstrom der Austausch-LED-Lampe vergleichbar zu dem Lampenlichtstrom der zu ersetzenden Leuchtstofflampe ist. Wegen der höheren Leuchtdichten ist bei Leuchten mit LED-Lampen mit diffusen Lampenkolben, deren Abstrahlung auf den unteren Halbraum begrenzt ist, mit höherer Blendung zu rechnen.

2.3 Simulation im Standarddrucksaal

Für einen realen Drucksaal mit typischer Maschinen- und Leuchtenanordnung wurde ein Modellraum mit der Simulationssoftware DIALux erstellt (Abb. 6). Abbildung 7 zeigt beispielhaft eine Druckanlage. Für typische Tätigkeiten wurden Bewertungsflächen festgelegt (Tabelle 2). Die Positionierung der Leuchten erfolgte so, dass für Leuchten mit Leuchtstofflampen die normativen Vorgaben erfüllt werden.

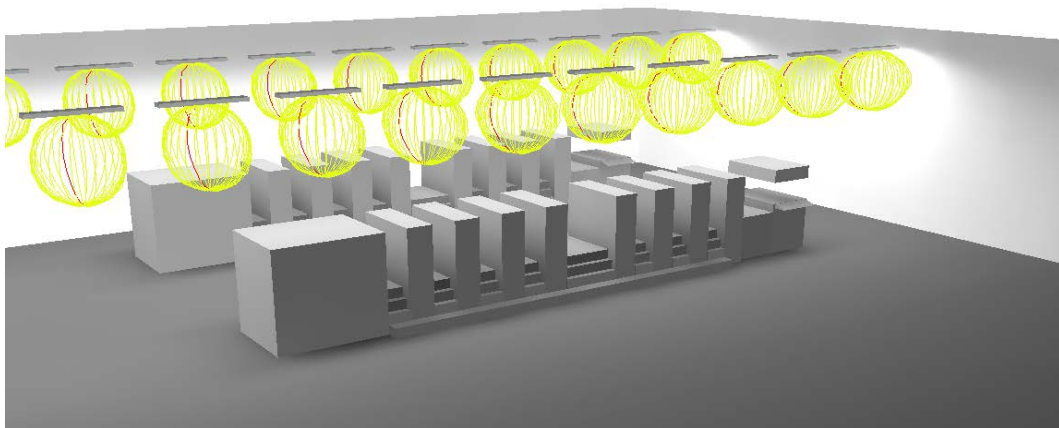


Abb. 6: Teilansicht des Drucksaalmodells (30 m x 32 m) mit Druckmaschinen und Leuchten als Basis für die Simulation

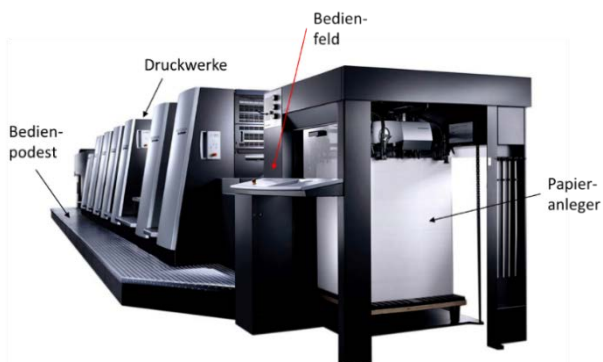


Abb. 7: Links: Druckmaschine Speedmaster XL75 der Firma Heidelberger Druckmaschinen AG (Bildquelle: www.heidelberg.com), Rechts: Einspachteln der Druckfarbe in das Druckwerk (Farbkasten) (Bildquelle: BG ETEM)

Tab. 2: Übersicht der Bewertungsflächen (BF) im Modell-Drucksaal

BF	Größe	Anlagenort	Tätigkeit
BF1	0,6 x 0,3 m, Höhe: 1,0 m	Bedienfeld	Bedienung der Druckmaschine
BF2	1,0 x 1,0 m, Höhe: 1,3 m	Papieranleger	Einstellung der Ansaugbelüftung
BF3	1,0 x 0,5 m, Höhe: 2 m	Druckwerk, horizontal	Einspachteln der Druckfarbe, Reinigungsarbeiten
BF4	1,0 x 1,0 m, Höhe: 1,4 m	Druckwerk, vertikal	Walzenreinigung, Bedienfeld
BF5	1,4 x 0,5 m, Höhe: 0,8 m	zwischen Druckwerken	Begehung der Anlage
BF6	1,6 x 0,8 m, Höhe: 0,8 m	Bedienpodest	Begehung der Anlage
BF7	2,0 x 2,0 m, Höhe: 0,1 m	Verkehrsweg im Drucksaal	Begehung des Drucksaals

Die Bewertung der untersuchten Beleuchtungssituationen erfolgt beispielhaft für Sehaufgaben bei Arbeiten am Druckwerk im Bereich der Bewertungsfläche BF3 (Abb. 7, rechts). Herangezogen werden Mindestanforderungen nach ASR A3.4 [4] und DIN EN 12464-1 [5]: ein Mindestwert der Beleuchtungsstärke für Arbeitsbereiche von $E_m \geq 500$ lx und eine Gleichmäßigkeit von $U_0 \geq 0,6$. Die Bewertung der Blendung erfolgt für UGR-Werte nach [8]. Die Ergebnisse sind beispielhaft in Tabelle 3 zusammengefasst. Weitere Details sind in [10] ausgeführt.

Tab. 3: Zusammenfassung: Gütemerkmale für Leuchten mit einer Retrofit-Lampe für die Bewertungsfläche auf dem Druckwerk (BF3). Grüne Felder kennzeichnen normkonforme Werte, gelbe und orangefarbene Felder zeigen Werte, die zunehmend von den Anforderungen abweichen, und rote Felder weisen auf eine deutliche Verletzung der Mindestanforderungen hin.

Leuchte/ Reflektortyp	Lampentyp / Gütemerkmal	Grenzwert	#0 LL 950	#2 LEDc 840	#5 LED 950	#9 LED 860	#14 LEDb 850
WR	E_m	≥ 500	536	902	482	700	577
	U_0	$\geq 0,6$	0,98	0,98	0,98	0,99	0,98
	UGR	≤ 19	21	> 30	28	29	22
AR	E_m	≥ 500	570	739	441	629	579
	U_0	$\geq 0,6$	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99
	UGR	≤ 19	22	> 30	28	30	22

Die erwarteten Ergebnisse bezüglich Beleuchtungsniveau und Gleichmäßigkeit wurden bestätigt. Wegen starker Blendung sind LED-Lampen mit klarem Lampenkolben (#2) abzulehnen, wenn der Blick auf die Lampe möglich ist. LED-Lampen, die nur nach unten abstrahlen, sind bedingt für den Lampentausch geeignet, da Reflektoren hier z.T. wirkungslos sind. Besonders kritisch wirken sich Unterschiede in der Lichtstärkeverteilung der Lampen bei Leuchten mit Reflektortypen aus, die die Lichtverteilung aus dem oberen Halbraum modellieren. Die Blendung, mit der Arbeiter an der Druckmaschine an den Druckwerken konfrontiert werden, übersteigt für alle untersuchten Lampentypen - LED-Lampen und Leuchtstofflampen gleichermaßen - für die betrachteten Beleuchtungsszenarien einen UGR-Wert von 19 (Blendung ist erkennbar, aber gerade nicht störend). Gegebenenfalls müssen Maßnahmen zur Entblendung erfolgen. Wegen der höheren Leuchtdichten von LED-Lampen im Vergleich zu Leuchtstofflampen selbst bei opalem Lampenkolben ist die Blendwirkung sol-

cher Lampen erhöht und kann kritische Werte annehmen. Eine Prüfung ist vor dem Lampenwechsel erforderlich. LED-Lampen mit breiter Abstrahlung ähneln in ihren lichttechnischen Eigenschaften denen von Leuchtstofflampen und werden daher empfohlen. Je ähnlicher die Lichtstärkeverteilung (LVK) der von Leuchtstofflampen ist, um so ähnlicher ist die Lichtverteilung der Leuchte und umso geringer sind negative Auswirkungen auf Beleuchtungsniveau und Gleichmäßigkeit beim Lampentausch. Die Simulation im Drucksaal für die Beleuchtung einer Druckmaschine zeigt für die untersuchten Lampentypen und Reflektorarten ähnliche Verhältnisse in Bezug auf die Gleichmäßigkeit.

3 Untersuchung der Spektralverteilung

Die LED-Lampen wurden hinsichtlich ihrer Farbwiedergabeeigenschaften untersucht. Dafür wurden Spektralmessungen mit dem im Goniophotometer integrierten Spektralmessgerät durchgeführt. Die gemessenen Spektralverteilungen wurden bezüglich der Änderung der spektralen Verteilung, des allgemeinen Farbwiedergabe-Index R_a und der speziellen Farbwiedergabe-Indizes R_i sowie der Stabilität der ähnlichsten Farbtemperatur T_{cp} analysiert.

Die Abbildung 8 zeigt die gemessenen Spektralverteilungen senkrecht unter der Lampe in einer Messentfernung von 1,6 m von der Lampenachse, normiert auf eine Beleuchtungsstärke von $E = 100 \text{ lx}$. Deutlich erkennbar sind die Unterschiede in der Spektralverteilung zwischen der Leuchtstofflampe (#0) und den LED-Lampen. LED-Lampen besitzen im kurzwelligen Spektralbereich unter 400 nm keine Strahlungsleistung. Die untersuchten LED-Lampen mit einem Farbwiedergabeindex $R_a < 90$ haben im Vergleich zur Leuchtstofflampe eine niedrigere spektrale Strahlungsleistung im langwelligen Spektralbereich. Diese Unterschiede im Spektrum bedingen Unterschiede in der spektralen Reflexion an Körperoberflächen und beeinflussen die Farbwiedergabeeigenschaften der Lampen. Damit können bläuliche und rötliche Farben bei der Beleuchtung mit Leuchtstofflampen oder LED-Lampen unterschiedlich erscheinen.

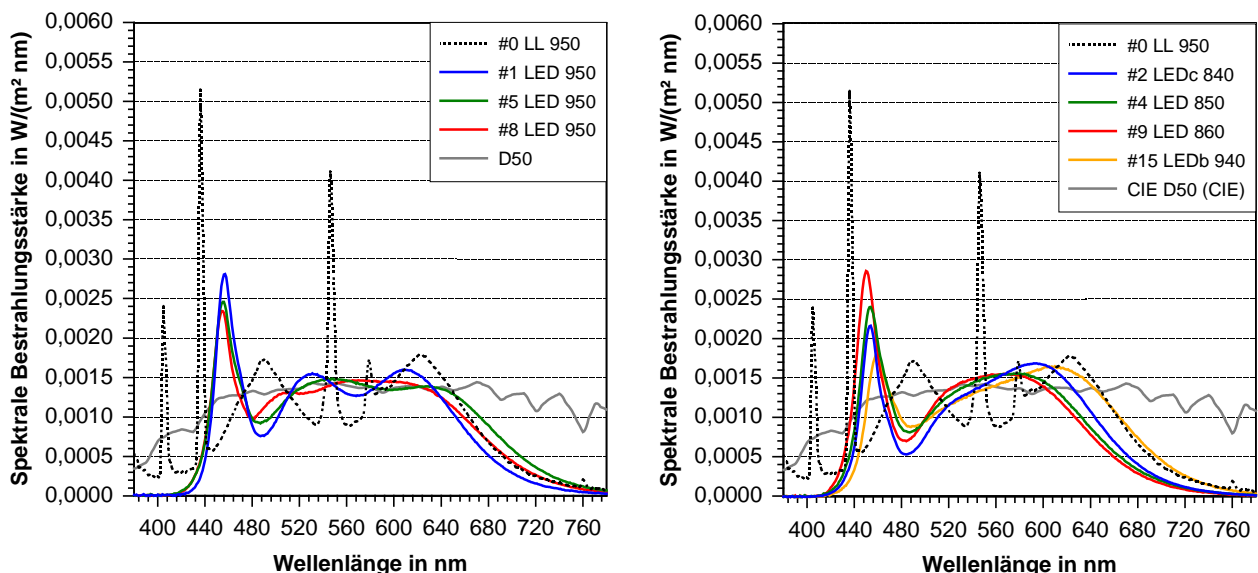


Abb. 8: Spektralverteilungen der LED-Retrofitlampen mit $R_a \geq 90$ und $T_{cp} = 5000 \text{ K}$ (links), und beispielhaft von LED-Lampen mit anderen R_a -Werten und Lichtfarben (rechts). Zum Vergleich sind jeweils die Spektren der Leuchtstofflampe (#0 LL 950) und der Normlichtart D50 gezeigt.

Die Auswertung der Daten bezüglich der speziellen Farbwiedergabeindizes R_i und des allgemeinen Farbwiedergabeindex R_a beziehen sich auf das international verwendete Verfahren nach CIE 13.3 (1995). Sie sind für ausgewählte Lampen in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tab. 4: Ergebnisse der Spektralmessung für ausgewählte Lampen

Lampe	T_{cp} in K	R_a	R_{i_min}	R_{i_max}	R_9	R_{12}
#0 LL 950	4681	94	92	98	86	85
#1 LED 950	4922	95	89	99	77	62
#2 LEDc 840	4164	83	66	94	13	57
#4 LED 850	5242	83	66	95	5	60
#5 LED 950	5058	95	93	98	85	87
#9 LED 860	5839	82	67	91	2	58
#15 LEDb 940	3985	92	82	99	63	71

Die Auswertung der Daten zeigt, dass die LED-Lampen eine größere Varianz der speziellen Farbwiedergabeindizes R_1 bis R_8 aufweisen. Dies bedeutet, dass die Testfarben sich bei Beleuchtung mit LED-Lampen stärker von der Referenzlichtart unterscheiden als dies bei Beleuchtung mit der Leuchtstofflampe der Fall ist. Wie bereits aus den Spektraldaten vermutet, ergeben sich Auswirkungen auf Farbwiedergabe und Farbunterscheidung. Die LED-Lampen mit einem Farbwiedergabeindex $R_a < 90$ haben deutlich niedrigere R_9 -Werte. Dies deutet auf Schwächen bei der Wiedergabe roter Bunttöne hin. Diese LED-Lampen haben auch niedrigere R_{12} -Werte für gesättigte Blautöne. Für alle untersuchten Lampen gilt, dass sich das relative Spektrum über dem Abstrahlwinkel in der C_{0-180} -Ebene nicht ändert. Räumliche Auswirkungen sind damit nicht zu erwarten.

Aus Untersuchungen mit LED-Lichtquellen ist bekannt, dass die Farbwiedergabeeigenschaften von LED-Lichtquellen bei Anwendung des Verfahrens nach CIE 13.3 (1995) zum Teil zu Widersprüchen zwischen dem R_a -Wert und der subjektiven Bewertung führen [12]. Zur Bewertung der Auswirkungen der spektralen Unterschiede wurde daher der neue Vorschlag zur Bewertung der Farbwiedergabeeigenschaften von Lichtquellen TM-30-15 [13] (Farbtreueindex/ Fidelity Index R_f) in die Betrachtungen einbezogen. Ausgewertet wurden die Farbörter der 99 Testfarben des TM-30-15 für Beleuchtung mit den untersuchten Lampen und für die in der Druckindustrie übliche Normlichtart D50. Abbildung 9 zeigt beispielhaft Farbörter und Farbabstände ausgewählter Lampen im entsprechenden CIECAM02-Farbenraum. Es zeigen sich für die LED-Lampen 950 bereits Unterschiede im Bereich der blauen Muster, die bei LED-Lampen 850 auch rote Proben betreffen. Die Abweichungen für LED-Lampen mit einem Farbwiedergabeindex $R_a < 90$ sind unabhängig von der Lichtfarbe ähnlich groß.

Zusätzlich wurde für die 99 Testfarben des TM-30-15 der Farbabstand $\Delta E_{CIECAM02}$ zwischen der Beleuchtung mit Normlichtart D50 und dem jeweiligen Lampenspektrum berechnet. Für die Leuchtstofflampe #0 LL 950 ergibt sich ein mittlerer Farbabstand von 0,7 mit einer Standardabweichung von 0,4 im Intervall zwischen 0,03 bis 1,7. Für LED-Lampen 950 ist der mittlere Farbabstand etwa doppelt so groß und verdreifachen sich Standardabweichung und maximaler Farbabstand. Als Beispiel sei die LED-Lampe #1 LED 950 aufgeführt. Der mittlere Farbabstand dieser Lampe liegt bei $1,6 \pm 1,1$ im Bereich zwischen 0,1 und 5,1. Für

Lampen mit anderen Lichtfarben und ähnlichsten Farbtemperaturen vergrößert sich der mittlere Farbabstand auf Werte größer als 2,5 bei Zunahme der Streuung. Solche Farbunterschiede sind nach KRAUSHAAR selbst von einem ungeschulten Auge erkennbar und stellen z.T. eine deutliche Abweichung dar [14].

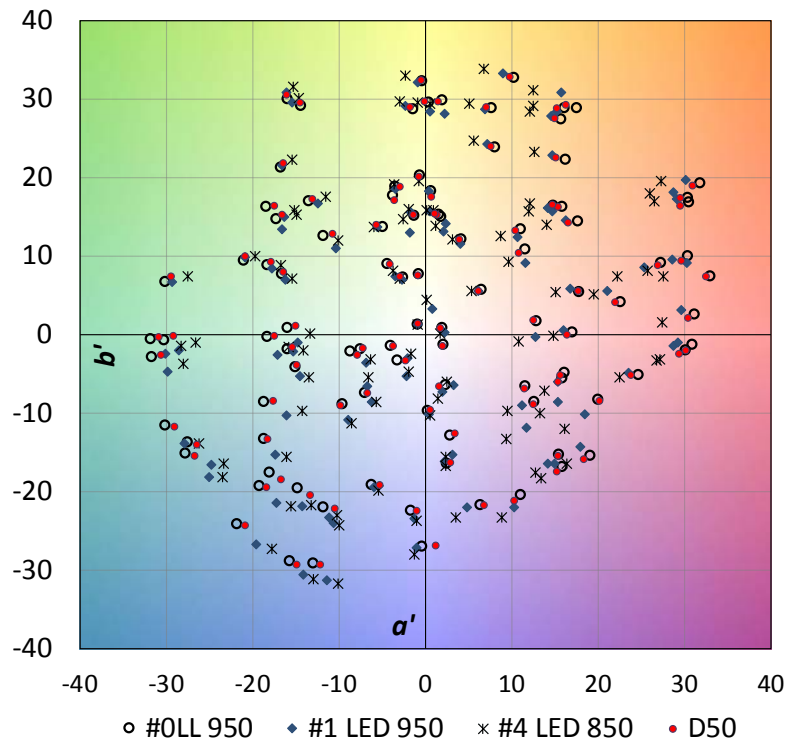


Abb. 9: Farbörter im CIECAM02-Farbenraum für die 99 Testfarben des TM-30-15 für LEDs 950 und 850 im Vergleich zur Leuchtstofflampe #0 LL 950 und zur Normlichtart D50

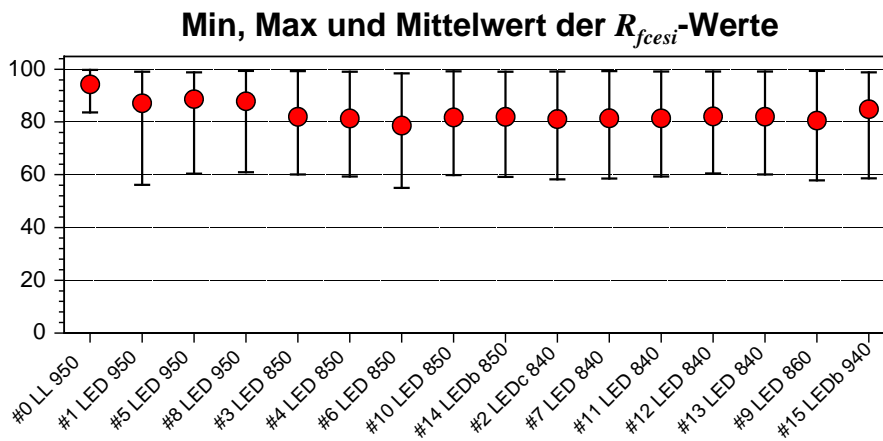


Abb. 10: Varianz der speziellen Farbtreue-Indizes $R_{f,cesi}$, dargestellt Minimum, Maximum und Mittelwert für 99 Testfarben des TM-30-15

Ein allgemeiner Farbwiedergabeindex von $R_a \geq 85$ ist für die abmusterungsergänzende Allgemeinbeleuchtung nötig. Empfohlen wird ein $R_a > 90$. Die speziellen Farbwiedergabeindizes, insbesondere R_9 (Rot) und R_{12} (blau), sollten zusätzlich berücksichtigt werden. Diese sollten größer als 80, mindestens jedoch größer 50 sein.

4 Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass bezüglich Beleuchtungsniveau und Gleichmäßigkeit LED-Retrofitlampen Leuchtstofflampen ersetzen können. Die untersuchten LED-Retrofit-Lampen zeigen für druckereitypische Leuchten mit Reflektoren ähnliche Werte wie bei Leuchtstofflampen. Vorteilhaft sind Lampen mit breiter Abstrahlcharakteristik. Wegen höherer Lampenleuchtdichten ist jedoch mit größerer Blendung zu rechnen. Lampen mit klarem Lampenkolben sind nicht zu empfehlen. Es ist ein allgemeiner Farbwiedergabeindex von $R_a \geq 85$ für die abmusterungsergänzende Allgemeinbeleuchtung bei gleichzeitig hohen R_9 und R_{12} -Werten nötig.

Literatur

- [1] ISO 3664: 2009 Graphic technology and photography - Viewing conditions
- [2] KARP, P: Untersuchung von Normlichtkabinen im Hinblick auf die hochqualitative Remote-Softproof-Abmusterung. München, Fogra, Forschungsbericht 10.055, 2011
- [3] KRAUSHAAR, A: Kriterien für die farbverbindliche Softproof-Bewertung in der Tagesproduktion. München, Fogra, Forschungsbericht 10.056, 2013
- [4] ASR 3.4: 2011 Technische Regel für Arbeitsstätten ASR A3.4 Beleuchtung
- [5] DIN EN12464-1: 2011 Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen
- [6] SCHMITS, PW; MOSKVINA, L: Einfluss der Blickrichtung bei der Blendbewertung von LED-Leuchten, Tagungsband Licht 2014, S. 528-534, 2014
- [7] GROß, M: Untersuchung zur Eignung von Retrofit-LED-Lampen für den Einsatz in der Allgemeinbeleuchtung in der Druckindustrie. Bachelorarbeit TU Ilmenau, 2018
- [8] Das UGR-Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen, LiTG-Publikation Nr. 20: 2003, LiTG: Berlin, 2003
- [9] FUNKE, C: Blendungsbewertung von LED-Leuchten in Innenräumen. Dissertation, Schriften der Ilmenauer Lichttechnik Nr. 21, Universitätsverlag Ilmenau 2017, ISBN 978-3-86360-163-8
- [10] OBERHOLLENZER, B; KRAUSHAAR, A; WITTMANN, J; BYSHKO, R; BETZLER, F; BIESKE, K; SCHIERZ, Ch: Kriterien für LED-basierte Allgemeinbeleuchtung in Druckereien. Fogra-Forschungsbericht 11.003, 2018
- [11] BAER, R; BARFUß, M; SEIFERT, D (Hrg.): Beleuchtungstechnik Grundlagen. Huss-Medien GmbH, Tabelle 1.17 Blendungsurteile und Blendungsgrößen S. 89
- [12] KHANH, TQ; BODROGI, P; VINH, QT; BRÜCKNER, S: Farbwiedergabe von konventionellen und Halbleiter-Lichtquellen: Theorie – Bewertung Praxis. Pflaum Verlag, München, 2013, ISBN 978-3-7905-1032-4
- [13] IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition, IES TM-30-15. New York, Illuminating Engineering Society of North America, 2015, ISBN 978-0-87995-312-6
- [14] KRAUSHAA, A: Untersuchung moderner Farbabstandsformeln. München, Fogra-Forschungsbericht 60.054, 2008, Tab. 16