
Bieske, Karin; Schierz, Christoph; Rabstein, Sylvia; Harth, Volker

**Steuerung nichtvisueller Lichtwirkungen mit Einbindung arbeitsplatzbezogener
Beleuchtung**

DOI: [10.22032/dbt.57497](https://doi.org/10.22032/dbt.57497)

URN: [urn:nbn:de:gbv:ilm1-2023200148](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2023200148)

Original veröffentlicht in: LICHT 2023 : 25. Europäischer Lichttechnischer Kongress ; 26-29. März, 2023, Salzburg Congress. – Absdorf : Lichttechnische Gesellschaft Österreichs, 2023, S. 212-223.

Kongress: Europäischer Lichtkongress ; 25 (Salzburg) : 2023.03.26-29

Original veröffentlicht: 2023-04

Original URL: <https://licht2023.at/>

[Gesehen: 2023-06-05]

© by the Author(s)

Steuerung nichtvisueller Lichtwirkungen mit Einbindung arbeitsplatzbezogener Beleuchtung

Karin Bieske, Christoph Schierz*, Sylvia Rabstein**, Volker Harth****

**Technische Universität Ilmenau Fachgebiet Lichttechnik*

Deutschland | 98684 Ilmenau | PF 100565

***Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der DGUV, Institut der Ruhr-Universität Bochum (IPA)*

****Zentralinstitut für Arbeitsmedizin und Maritime Medizin (ZfAM), Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf*

Zusammenfassung

Durch Variation von Lichtstrom, Lichtfarbe und Abstrahlcharakteristik der Beleuchtung lassen sich die spektrale Verteilung und die Beleuchtungsstärke in der Augenebene verändern und nichtvisuelle Lichtwirkungen bewusst steuern. Der Dynamikbereich wird maßgeblich über den Variationsbereich der ähnlichsten Farbtemperatur bestimmt. Um unterschiedlichen Lichtbedürfnissen, Vorlieben und Sehanforderungen gerecht zu werden, sind Arbeitsbereiche zusätzlich zur Allgemeinbeleuchtung mit einer arbeitsplatzbezogenen Beleuchtung (APL) ausgestattet, die individuell bei Bedarf zugeschaltet werden kann. Anhand von Messungen an Industriearbeitsplätzen kann gezeigt werden, dass durch eine statische Lichtfarbe der Arbeitsplatzbeleuchtung der Dynamikbereich der Lichtfarbe einer dynamischen Allgemeinbeleuchtung auf 1/3 reduziert wird und mit deren Wirksamkeit der Unterstützung nichtvisueller Lichtwirkungen konfligiert. Nur wenn die arbeitsplatzbezogene Beleuchtung in die Steuerung der Beleuchtungsanlage integriert ist, ist eine gezielte Unterstützung nichtvisueller Lichtwirkungen sinnvoll möglich. Um die Wirksamkeit der Steuerung einer dynamischen Allgemeinbeleuchtung möglichst wenig zu stören, ist es notwendig, die Abstrahlung der arbeitsplatzbezogenen Beleuchtung in Richtung der vertikalen Augenebene zu kontrollieren.

1 Einleitung

Dynamische Beleuchtungssysteme sind zeitlich in Lichtstrom, Spektrum und örtlicher Lichtverteilung variabel. Neben der Anpassung der Beleuchtung an optimale Sehbedingungen bieten solche Systeme Möglichkeiten, auch nichtvisuellen Lichtbedürfnissen gerecht zu werden.

Nichtvisuelle Lichtwirkungen sind durch Licht über die Stimulation der intrinsisch lichtempfindlichen Ganglienzellen (ipRGC) in der Netzhaut des Auges vermittelte Wirkungen auf physiologische und psychologische Vorgänge im menschlichen Organismus [1]. Neben der Suppression von Melatonin in der Nacht werden auch Einflüsse auf den circadianen Rhythmus und die Wachheit des Menschen mit nichtvisuellen Lichtwirkungen in Verbindung gebracht.

Zur Beschreibung nichtvisueller Lichtwirkungen sind Spektrum und Beleuchtungsstärke in der Augenebene zeitlich aufgelöst zu bestimmen. Diese Wirkungen lassen sich mit der melanopischen tageslichtäquivalenten Beleuchtungsstärke $E_{v,mel,D65}$ (auch MEDI) beschreiben.

Sie ist eine Vergleichsgröße und gibt an, welche Beleuchtungsstärke bei Tageslicht mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 6500 K (D65), dieselbe melanopische Lichtwirkung hervorruft, wie bei der vorliegenden Beleuchtung [1].

Nach Gleichung 1 sind wichtige Einflussgrößen, die Beleuchtungsstärke in der Augenebene (E_v) und der melanopische Wirkungsfaktor ($a_{mel,v}$), der durch die spektrale Verteilung und damit die Lichtfarbe der Beleuchtung bestimmt wird.

$$E_{v,mel,D65} = E_v \cdot a_{mel,v} \cdot 1,10375 = E_{e,mel} \cdot K_{cd} \cdot 1,10375 \quad \text{Gleichung (1)}$$

$$= E_{e,mel} \cdot 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \cdot 1,10375 = E_{e,mel} \cdot 753,7 \frac{\text{lm}}{\text{W}} = \text{MEDI}$$

Dabei sind

E_v	die Beleuchtungsstärke nach DIN5031-3 [2] in lx
$a_{mel,v}$	der melanopische Wirkungsfaktor
K_{cd}	$K_{cd} = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ der Maximalwert des fotometrischen Strahlungsäquivalents für Tagessehen nach BIPM [3]
$E_{e,mel}$	die melanopisch bewertete Bestrahlungsstärke in W/m^2 [1]

Vergleichbare Messwerte für unterschiedliche Beleuchtungssituationen liefern vertikale Beleuchtungsstärken in Augenhöhe in horizontaler Blickrichtung gemessen jeweils in 1,2 m Höhe bei Sitzarbeitsplätzen bzw. in 1,6 m Höhe bei Steharbeitsplätzen.

Der Variation nichtvisueller Lichtwirkungen über die Veränderungen der Beleuchtungsstärke mit Anpassen des Lichtstroms sind in der Praxis Grenzen gesetzt. Einerseits setzt eine Erhöhung voraus, dass zusätzlich Leuchten installiert werden, was mit einem höheren Stromverbrauch und höheren Anschaffungskosten verbunden ist. Andererseits werden aus Sicht des Arbeitsschutzes Mindestwerte für die Beleuchtungsstärke je nach Arbeitsaufgabe gefordert, die eine ermüdungsfreie Beschäftigung über längere Zeit sichern sollen und nicht unterschritten werden dürfen. Damit kommt der Steuerung nichtvisueller Lichtwirkungen über die Variation der Lichtfarbe eine wesentliche Bedeutung zu.

Um eine Anpassung der Beleuchtungsstärke im Bereich der Arbeitsaufgabe an unterschiedliche Sehanforderungen und individuelle Lichtbedürfnisse zu ermöglichen, ist an vielen Arbeitsplätzen eine zusätzliche arbeitsplatzbezogene Beleuchtung (APL) vorhanden und individuell zur Allgemeinbeleuchtung zuschaltbar. Typisch sind in der Praxis Arbeitsplatzleuchten, deren Lichtfarbe nicht variabel ist.

Ziel der Untersuchung ist es, den Einfluss der arbeitsplatzbezogenen Beleuchtung (APL) auf die Steuerung von nichtvisuellen Lichtwirkungen zu bestimmen und Schlussfolgerungen zu ziehen, wie eine Steuerung mit einem dynamischen Beleuchtungssystem in der Praxis gelingen kann.

2 Untersuchung und Ergebnisse

2.1 Montagearbeitsplätze in Industriehalle

An Arbeitsplätzen in einer Montagehalle wurden Messungen durchgeführt. Abb. 1 zeigt die Montagehalle, die eine Länge von 80 m und eine Breite von 72 m besitzt.



Abb. 1: Foto der Montagehalle (Länge: 80 m, Breite: 72 m, Lichtpunkthöhe: 7,3 m)

Für die Allgemeinbeleuchtung (AllgB) sind in acht Linienanordnungen 400 LED-Leuchten in einer Lichtpunkthöhe von 7,3 m verbaut. Die LED-Leuchten vom Typ *E-Line Act 7650 TB LED10000 (Act DWW) ETDD* (Fa. Trilux/ Arnsberg) sind in Lichtfarbe und Lichtstrom steuer- und regelbar. Sie verfügen über zwei Typen von leuchtstoffkonvertierten weißen LEDs mit warmweißen (2700 K) und tageslichtweißen Lichtfarben (6500 K), die einzeln in ihrem Lichtstrom gesteuert werden können. Der Dynamikbereich für die Lichtfarbenänderung der Allgemeinbeleuchtung beträgt damit $\Delta T_{cp} = 3800$ K.

Um eine variable Beleuchtungsstärke im Bereich der Arbeitsaufgabe zu ermöglichen, ist an den Arbeitsplätzen zusätzlich eine arbeitsplatzbezogene Beleuchtung vorhanden und individuell zuschaltbar. In Abb. 2 ist ein typischer Montagearbeitsplatz mit einer arbeitsplatzbezogenen Beleuchtung (APL) gezeigt. Sie ist am Rahmen des Arbeitsplatzes montiert und mit der horizontalen Arbeitsfläche in der Höhe verfahrbar und befindet sich in einer Höhe von 1,25 m über der Arbeitsfläche. Die Arbeitsplatzleuchten sind Leuchten des Typs 7650

B LED 4000-840 ETDD (Fa. Trilux/ Arnsberg). Sie verfügen über eine neutralweiße Lichtfarbe (4000 K) und sind nicht in die Steuerung der Hallenbeleuchtung integriert.



Abb. 2: Typischer Montagearbeitsplatz mit arbeitsplatzbezogener Beleuchtung (APL)

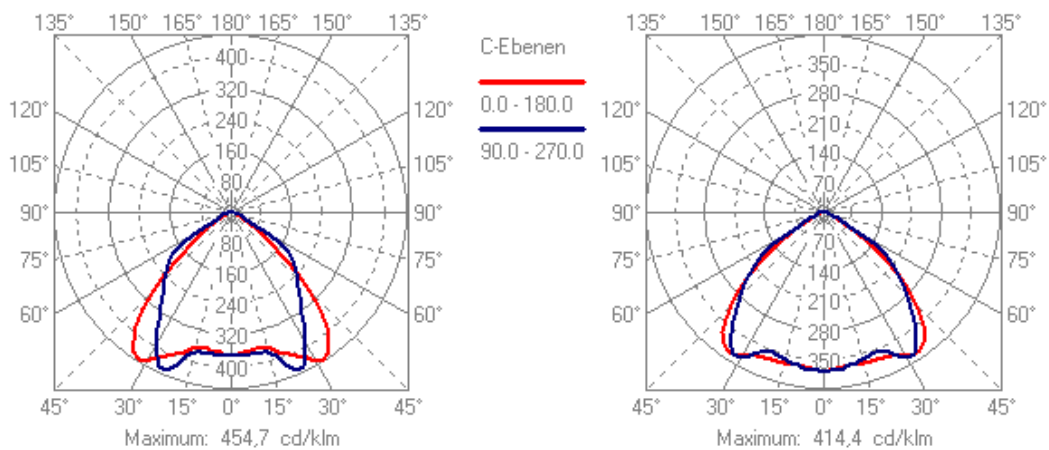


Abb. 3: Lichtstärkeverteilungskurven der Hallenbeleuchtung (AllgB) links und der arbeitsplatzbezogenen Beleuchtung (APB) rechts.

Abb. 3 zeigt die Lichtstärkeverteilungen für die Leuchten der Allgemeinbeleuchtung und der arbeitsplatzbezogenen Beleuchtung. Die spektralen Verteilungen der Leuchten sind in Abb. 4 dargestellt.

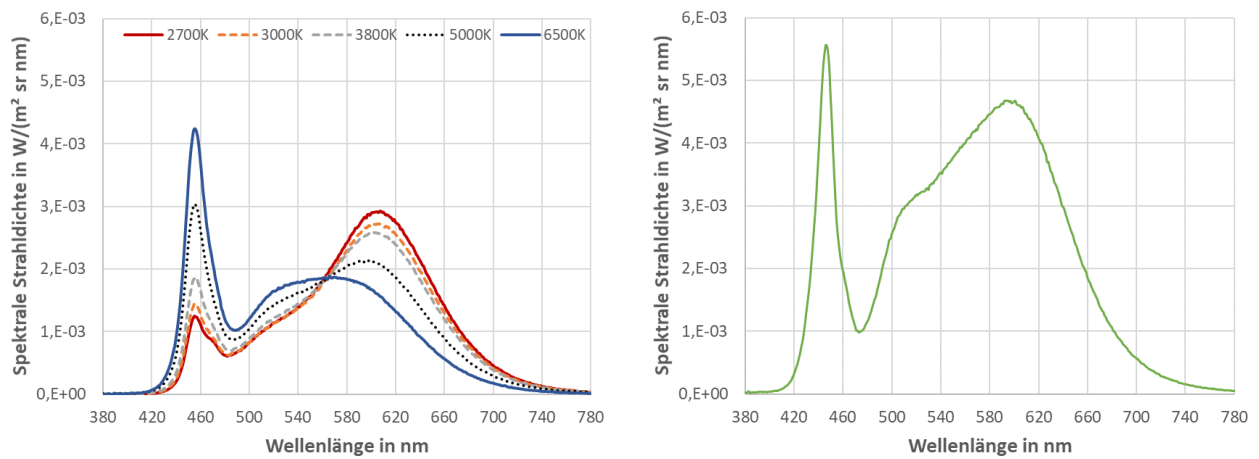


Abb. 4: Spektrale Verteilung der Hallenbeleuchtung (AllgB) für unterschiedliche ähnlichste Farbtemperaturen bei 70% Lichtstrom (links) und der arbeitsplatzbezogenen Beleuchtung (APL) mit einer ähnlichste Farbtemperatur $T_{cp} = 4000$ K (rechts)

2.2 Messungen an Industriearbeitsplätzen

An Arbeitsplätzen in der Montagehalle wurden Messungen der Beleuchtungsstärke E und der ähnlichsten Farbtemperatur T_{cp} in der Arbeitsfläche in Arbeitshöhe (0,95 m), auf der die eigentliche Arbeitsaufgabe verrichtet wird (typisch horizontale Fläche auf dem Arbeitstisch) und vertikal in Augenhöhe bei 1,6 m bestimmt. Gemessen wurden spektrale Strahlungsgrößen mit einem Spektralradiometer, aus denen sich photometrische und melanopischen Größen bestimmen lassen. Abb. 5 zeigt die Messgeometrie.

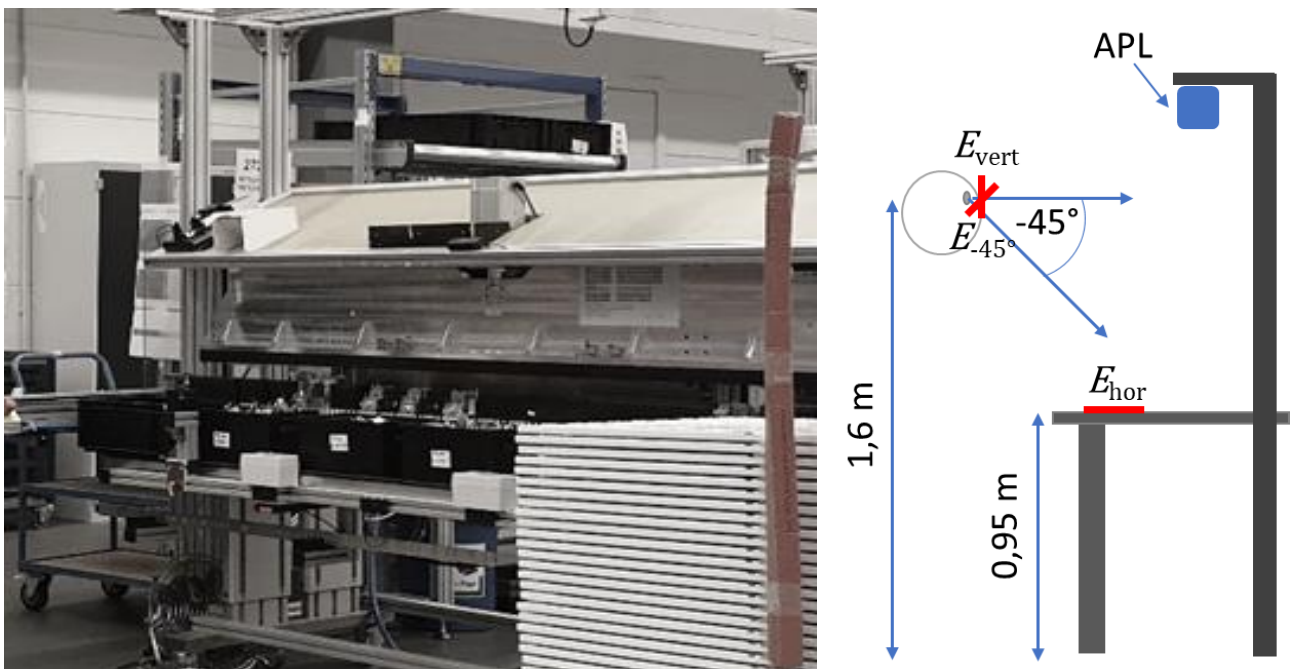


Abb. 5: Typischer Montagearbeitsplatz (links) und Skizze der Messgeometrie für Größen, die vertikal, horizontal und bei einem Neigungswinkel von -45° gemessen werden (rechts); APL: arbeitsplatzbezogene Beleuchtung

Da das Auge nur in einem eingeschränkten Bereich scharf sehen kann, sind ständige Augen- und Kopfbewegungen und oft auch Körperbewegungen bei der Tätigkeit notwendig, um relevante Sehdetails erkennen zu können. Bei manuellen Tätigkeiten ist der Blick typisch auf die Hände im Greifraum gerichtet. Während der Tätigkeit ist beim entspannten Stehen der Kopf mit 15° leicht nach vorne geneigt. Zusätzlich besitzen auch die Augenmuskeln eine Position geringster Anspannung, in der die Blicklinie um 15° nach unten gerichtet ist. Ermüdungsfreies Arbeiten ist im Stehen unter einer Blicklinie von circa 30° gegeben. Ausgehend von der Blicklinie bei entspannter Kopf- und Augenposition können alleine durch die Augenbewegungen in einem Raumkegel mit $\pm 15^\circ$ um die Blicklinie Details scharf gesehen werden [4]. Danach ist eine typische Blickrichtung zwischen 15° und 45° nach unten gerichtet. Zur Abschätzung des Einflusses der Blickrichtung wurden zusätzlich Messungen in Augenhöhe (1,6 m) mit einer Neigung von 45° nach unten durchgeführt.

Tab. 1: Mittelwerte von ähnlichster Farbtemperatur T_{cp} und Beleuchtungsstärke E gemessen an Industriearbeitsplätzen in unterschiedlichen Messgeometrien nach Abb. 5 für unterschiedliche Dimmstufen (%) und ähnlichste Farbtemperaturen der Hallenbeleuchtung (AllgB) mit und ohne arbeitsplatzbezogene Beleuchtung (APL)

AllgB	APL	$T_{cp \text{ hor}}$ in K	E_{hor} in lx	$T_{cp \text{ vert}}$ in K	E_{vert} in lx	$T_{cp -45^\circ}$ in K	E_{-45° in lx
0%/ -	mit	3989	867	4036	1078	3753	63,3
40%/2700K	ohne	2755	245	2711	134	2692	45,5
40%/2700K	mit	3649	1113	3843	1212	3240	109
70%/2700K	ohne	2756	429	2713	235	2693	79,6
70%/2700K	mit	3500	1295	3736	1311	3099	138
100%/2700K	ohne	2755	614	2711	335	2692	114
100%/2700K	mit	3385	1482	3638	1413	3008	177
40%/6500K	ohne	6433	222	6251	124	6056	39,6
40%/6500K	mit	4356	1090	4203	1202	4448	103
70%/6500K	ohne	6431	388	6233	216	6051	69,5
70%/6500K	mit	4576	1251	4322	1291	4770	131
100%/6500K	ohne	6432	556	6250	309	6055	99
100%/6500K	mit	4750	1416	4426	1388	4986	161

Die Ergebnisse der Messung sind in Tab. 1 und Tab. 2 zusammengefasst und in den Diagrammen in Abb. 6 dargestellt. Deutlich erkennbar ist der eingeschränkte Dynamikbereich für die Variation der Lichtfarbe am Arbeitsplatz bei Zuschaltung der arbeitsplatzbezogenen Beleuchtung. Bei horizontaler Messrichtung beträgt dieser nur noch zwischen 10% bis 21% je nach Lichtstrom der Allgemeinbeleuchtung.

Auf die Messungen unter einem Winkel von -45° ist der Einfluss der Arbeitsplatzbeleuchtung geringer. Hier modulieren die Reflexionseigenschaften der Oberflächen im Arbeitsbereich den Lichtanteil, der ins Auge gelangt. Die vertikale Beleuchtungsstärke E_{vert} erhöht sich um 1078 lx bei Zuschalten der arbeitsplatzbezogenen Beleuchtung, unter einem Winkel von -45° nur um 63 lx.

Tab. 2: Mittelwerte von melanopischem Wirkungsfaktor $a_{mel,v}$ und MEDI-Wert gemessen an Industriearbeitsplätzen in unterschiedlichen Messgeometrien nach Abbildung nach Abb. 5 für unterschiedliche Dimmstufen (%) und ähnlichste Farbtemperaturen der Hallenbeleuchtung (AllgB) mit und ohne arbeitsplatzbezogene Beleuchtung (APL)

AllgB	APL	$a_{mel,v}$ hor	$a_{mel,v}$ vert	MEDI _{vert} in lx	$a_{mel,v}$ -45°	MEDI _{-45°} in lx
0%/ -	mit	0,546	0,552	657	0,502	35,1
40%/2700K	ohne	0,397	0,388	57,4	0,382	19,2
40%/2700K	mit	0,514	0,534	714	0,452	54,3
70%/2700K	ohne	0,397	0,388	100	0,382	33,7
70%/2700K	mit	0,498	0,523	758	0,435	66,7
100%/2700K	ohne	0,397	0,388	144	0,382	47,9
100%/2700K	mit	0,485	0,513	800	0,425	83,0
40%/6500K	ohne	0,833	0,808	110	0,793	34,7
40%/6500K	mit	0,605	0,578	767	0,614	69,8
70%/6500K	ohne	0,834	0,808	193	0,793	60,9
70%/6500K	mit	0,637	0,595	849	0,654	94,8
100%/6500K	ohne	0,833	0,808	276	0,793	86,7
100%/6500K	mit	0,660	0,609	936	0,680	122

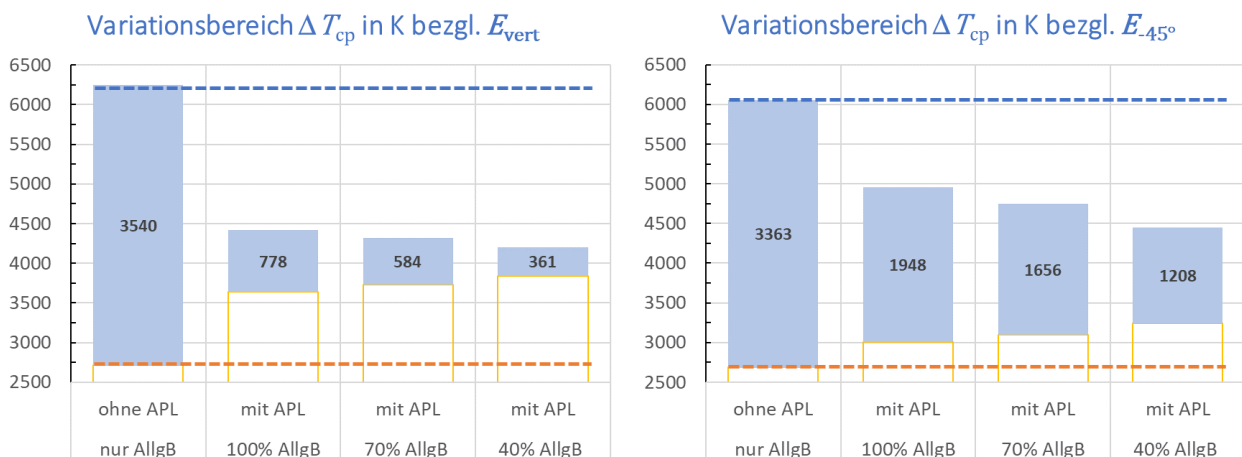


Abb. 6: Einfluss der Arbeitsplatzbeleuchtung (APL) auf den wirksamen Dynamikbereich der ähnlichsten Farbtemperatur ΔT_{cp} für die vertikale Augenebene einer Person in einer Höhe von 1,6 m bei einer Blickrichtung geradeaus (links) und für eine Blickrichtung von -45° auf die Arbeitsebene gerichtet (rechts)

Lässt sich durch Änderung der Lichtfarbe der Hallenbeleuchtung zwischen 2700 K und 6500 K der melanopische Wirkungsfaktor $a_{mel,v}$ verdoppeln bzw. halbieren, wird durch Zuschalten der statischen arbeitsplatzbezogenen Beleuchtung die Wirksamkeit der Änderung der Lichtfarbe auf 10% bis 23% für die vertikalen Werte reduziert. Die Unterstützung nichtvisuelle Wirkungen über die Variation der Lichtfarbe der Allgemeinbeleuchtung ist damit bei eingeschalteter Arbeitsplatzleuchte kaum mehr möglich.

Aus den Daten von Tab. 1 und Tab. 2 wird ersichtlich, dass bei der Betrachtung der vertikalen Größen, die Arbeitsplatzbeleuchtung die Wirkung dominiert. Die vertikale Beleuchtungsstärke E_{vert} erhöht sich beim Zuschalten der Arbeitsplatzleuchte um 1078 lx und der MEDI-Wert um 657 lx. Die Allgemeinbeleuchtung kann den MEDI-Wert je nach Lichtstrom um Werte von 53 lx bis 132 lx bei Variation der Lichtfarbe zwischen 2700 K und 6500 K ändern. Im Vergleich ist die Arbeitsplatzleuchte um den Faktor 5 bis 12 wirksamer.

Die arbeitsplatzbezogene Beleuchtung beeinflusst die Lichtwirkung durch Lichtfarbe, Lichtstrom und Lichtstärkeverteilung. Ohne Integration der arbeitsplatzbezogenen Beleuchtung in die Steuerung eines dynamischen Beleuchtungssystems und ohne die Kontrolle ihrer Lichtstärkeverteilung lassen sich nichtvisuelle Lichtwirkungen nicht gezielt beeinflussen.

2.2.1 Variation der Lichtfarbe

Für Arbeitsplatzleuchten mit unterschiedlichen Lichtfarben (2700 K, 4000 K und 6500 K) wurde der Einfluss auf den Dynamikumfang der Lichtfarbe in der Augenebene theoretisch betrachtet.

Die Grafiken in Abb. 6 links und Abb. 7 zeigen den Einfluss unterschiedlicher Lichtfarben der Arbeitsplatzleuchte auf vertikale Größen in der Augenebene. Die Zuschaltung der Arbeitsplatzleuchte reduziert bei allen Lichtfarben den Dynamikbereich stark.

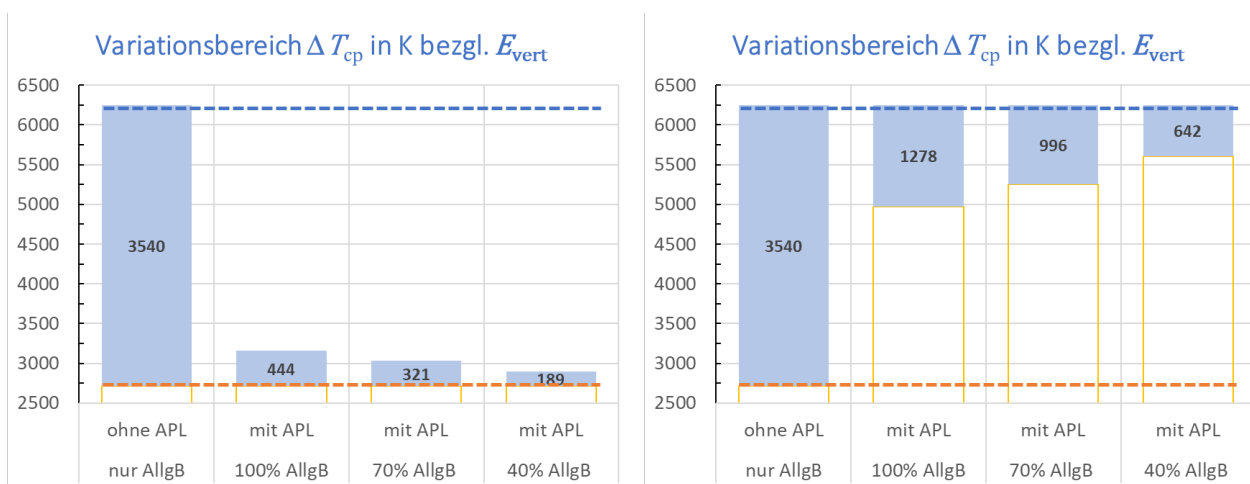


Abb. 7: Einfluss der Arbeitsplatzbeleuchtung (APL) auf den wirksamen Dynamikbereich der ähnlichsten Farbtemperatur ΔT_{cp} für die vertikale Augenebene einer Person in einer Höhe von 1,6 m bei einer Blickrichtung geradeaus bei $T_{cp,APL} = 2700$ K (links) und bei $T_{cp,APL} = 6500$ K (rechts)

Bezogen auf den Dynamikbereich des melanopischen Wirkungsfaktors $\Delta a_{mel,v}$ ist die Wirkung der arbeitsplatzbezogenen Beleuchtung unabhängig von der Lichtfarbe der Arbeitsplatzleuchte. Die entsprechenden Daten enthält Tab. 3. Bei eingeschalteter Arbeitsplatzleuchte reduziert sich die Einflussmöglichkeit für nichtvisuelle Lichtwirkungen auf 10% bis 24%.

Tab. 3: Dynamikbereiche für ähnlichste Farbtemperatur ΔT_{cp} und melanopischen Wirkungsfaktor $\Delta a_{mel,v}$ für unterschiedliche Lichtfarben der Arbeitsplatzbeleuchtung mit 100% Lichtstrom für vertikale Größen in der Augenebene

T_{cpAPL}	Vertikale Größen	ohne APL	100% AllgB+APL	70% AllgB+APL	40% AllgB+APL
2700 K	ΔT_{cp}	3540 K (100%)	444 K (13%)	321 K (9%)	189 K (5%)
	$\Delta a_{mel,v}$	0,420 (100%)	0,094 (22%)	0,070 (17%)	0,043 (10%)
4000 K	ΔT_{cp}	3540 K (100%)	778 K (22%)	584 K (16%)	361 K (10%)
	$\Delta a_{mel,v}$	0,420 (100%)	0,096 (23%)	0,072 (17%)	0,044 (11%)
6500 K	ΔT_{cp}	3540 K (100%)	1278 K (36%)	996 K (28%)	642 K (18%)
	$\Delta a_{mel,v}$	0,420 (100%)	0,100 (24%)	0,075 (18%)	0,046 (11%)

2.2.2 Variation des Lichtstroms

Die Arbeitsplatzbeleuchtung modelliert maßgeblich die nichtvisuelle Lichtwirkung in der vertikalen Ebene. Neben Spektralverteilung und Lichtstärkeverteilung bestimmt der Lichtstrom die Wirkung. Je nach Verhältnis der Lichtströme von Arbeitsplatzleuchte zu Hallenbeleuchtung skaliert sich der Einfluss. Nach Tab. 1 ist die vertikale Beleuchtungsstärke E_{vert} , der arbeitsplatzbezogenen Beleuchtung bei 100% Lichtstrom, im Verhältnis zu derjenigen, der Hallenbeleuchtung um den Faktor 3 bis 9 größer.

Abb. 8 zeigt den Dynamikbereich der Lichtfarbe ΔT_{cp} in Abhängigkeit vom Leuchtenlichtstrom für die vertikale Messebene. Eine Halbierung des Lichtstroms vergrößert den Variationsbereich um 60% bis 80%.

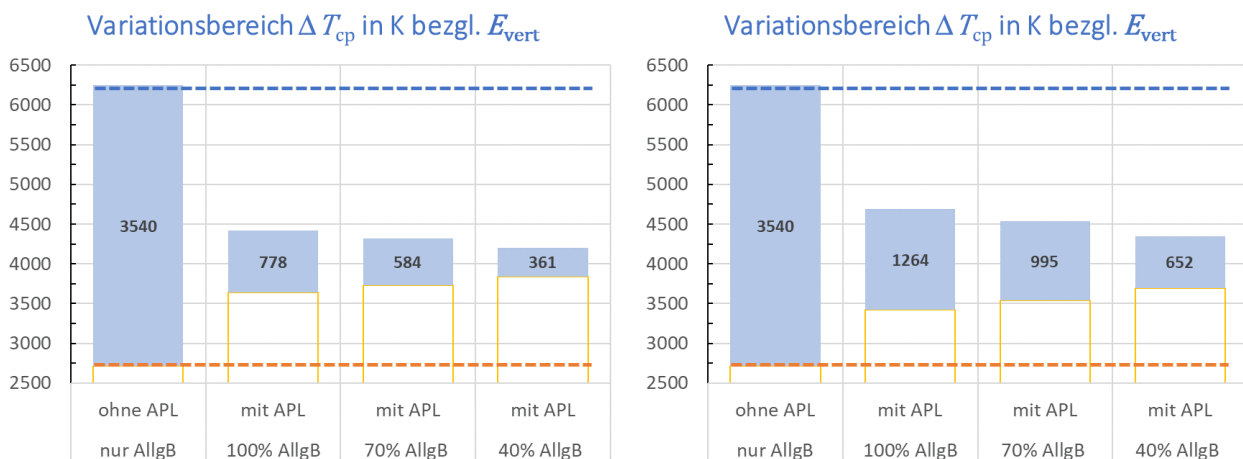


Abb. 8: Einfluss der Arbeitsplatzbeleuchtung (APL) auf den wirksamen Dynamikbereich der ähnlichsten Farbtemperatur ΔT_{cp} für die vertikale Augenebene einer Person in einer Höhe von 1,6 m bei einer Blickrichtung geradeaus bei 100% Lichtstrom der APL (links) und bei 50% Lichtstrom (rechts)

2.2.3 Variation der Lichtstärkeverteilung (LVK)

Um den starken Einfluss der Arbeitsplatzleuchte auf die vertikalen Größen zu reduzieren, wurden die Leuchten an den Arbeitsplätzen mit einer weißgespritzten Blende versehen, wie in Abb. 9 links gezeigt. Dadurch wird die Lichtstärke in Richtung Auge deutlich reduziert. Zusätzlich wurde der Leuchtenlichtstrom halbiert. Durch diese Modifikationen konzentriert sich der Lichtstrom im Wesentlichen auf die horizontale Ebene der Sehaufgabe.

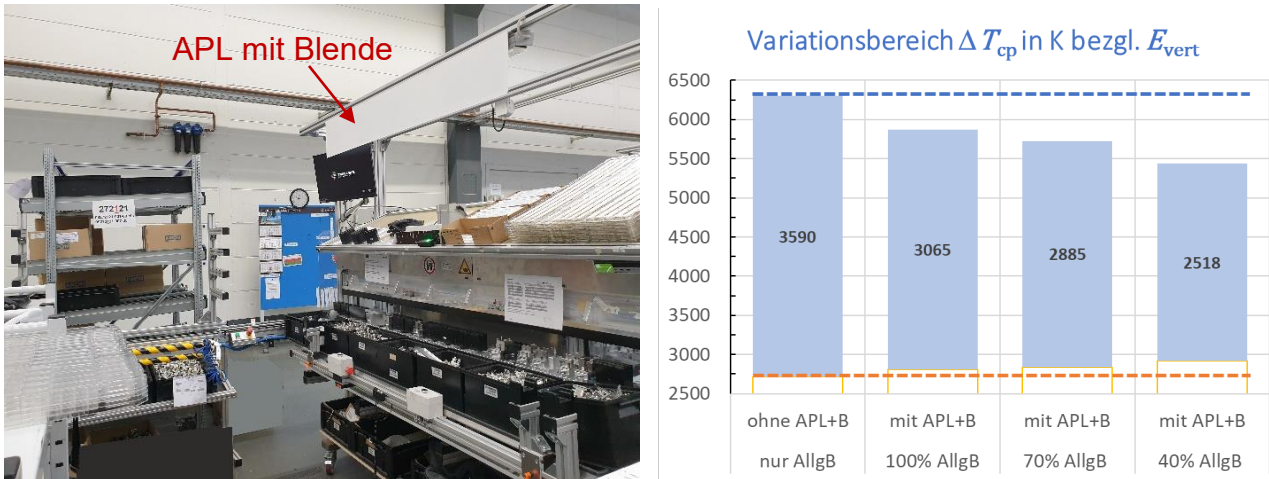


Abb. 9: Arbeitsplatzleuchte mit Blende (APL+B) (links), Einfluss der Arbeitsplatzbeleuchtung auf den wirksamen Dynamikbereich der ähnlichsten Farbtemperatur ΔT_{cp} für die vertikale Augenebene einer Person in einer Höhe von 1,6 m bei einer Blickrichtung geradeaus (rechts)

Tab. 4: Mittelwerte von ähnlichster Farbtemperatur T_{cp} und Beleuchtungsstärke E gemessen an Industriearbeitsplätzen in unterschiedlichen Messgeometrien nach Abb. 5 für unterschiedliche für Dimmstufen (%) und ähnlichste Farbtemperaturen der Hallenbeleuchtung (AllgB) mit und ohne modifizierter arbeitsplatzbezogene Beleuchtung (APL+B)

AllgB	APL+B	$T_{cp\ hor}$ in K	E_{hor} in lx	$T_{cp\ vert}$ in K	E_{vert} in lx	$T_{cp\ -45^\circ}$ in K	E_{-45° in lx
0%/ -	mit	4031	487	3730	39,4	3804	28,2
40%/2700K	ohne	2756	244	2715	124	2699	41,4
40%/2700K	mit	3517	731	2917	164	3076	69,6
70%/2700K	ohne	2756	426	2715	218	2699	72,5
70%/2700K	mit	3339	914	2840	257	2950	101
100%/2700K	ohne	2756	609	2715	311	2699	104
100%/2700K	mit	3227	1096	2806	350	2888	132
40%/6500K	ohne	6428	232	6305	115	6056	39,6
40%/6500K	mit	4632	720	5435	155	4925	67,8
70%/6500K	ohne	6428	406	6305	202	6056	69,3
70%/6500K	mit	4918	894	5725	241	5235	97,5
100%/6500K	ohne	6428	581	6305	288	6056	99,1
100%/6500K	mit	5126	1068	5871	328	5412	127

Die Maßnahmen zeigen, dass beim Zuschalten der Arbeitsplatzleuchte ein Dynamikbereich der Lichtfarbe ΔT_{cp} von 70% bis 85% erreicht werden kann. Die modifizierte Arbeitsplatzleuchte erhöht die vertikale Beleuchtungsstärke nur um 45 lx, im Vergleich zur Ausgangssituation, bei die Erhöhung 1078 lx betrug. Dies entspricht 13% bis 30% der Größe, die je nach Lichtstrom durch die Hallenbeleuchtung hervorgerufen wird. Unabhängig vom Betrieb der Arbeitsplatzleuchte, ist die Steuerung von nichtvisuellen Lichtwirkungen über die Änderung der Lichtfarbe der Hallenbeleuchtung nun möglich. Tab. 4 bis Tab. 6 fassen die Messdaten im Detail zusammen.

Tab. 5: Mittelwerte von melanopischem Wirkungsfaktor $a_{mel,v}$ und MEDI-Wert gemessen an Industriearbeitsplätzen in unterschiedlichen Messgeometrien nach Abbildung Abb. 5 für unterschiedliche für Dimmstufen (%) und ähnlichste Farbtemperaturen der Hallenbeleuchtung (AllgB) mit und ohne arbeitsplatzbezogener Beleuchtung (APL)

AllgB	APL+B	$a_{mel,v}$ hor	$a_{mel,v}$ vert	MEDI _{vert} in lx	$a_{mel,v}$ -45°	MEDI _{-45°} in lx
0%/ -	mit	0,567	0,508	22,1	0,525	16,3
40%/2700K	ohne	0,399	0,390	53,5	0,387	17,7
40%/2700K	mit	0,511	0,418	75,6	0,443	34,0
70%/2700K	ohne	0,399	0,390	93,6	0,387	31,0
70%/2700K	mit	0,488	0,408	116	0,425	47,3
100%/2700K	ohne	0,399	0,390	134	0,387	44,2
100%/2700K	mit	0,473	0,403	156	0,416	60,6
40%/6500K	ohne	0,832	0,814	104	0,793	34,7
40%/6500K	mit	0,653	0,736	126	0,682	51,0
70%/6500K	ohne	0,832	0,814	181	0,793	60,7
70%/6500K	mit	0,688	0,764	204	0,716	77,1
100%/6500K	ohne	0,832	0,814	259	0,793	86,7
100%/6500K	mit	0,711	0,777	281	0,734	103

Tab. 6: Dynamikbereiche für die ähnlichste Farbtemperatur ΔT_{cp} und den melanopischen Wirkungsfaktor $\Delta a_{mel,v}$ für vertikale Größen in der Augenebene vor und nach der Modifikation der Arbeitsplatzleuchte

Vertikale Größen	ohne APL	100% AllgB+APL	70% AllgB+APL	40 %AllgB+APL
ΔT_{cp}	3540 K (100%)	778 K (22%)	584 K (16%)	361 K (10%)
$\Delta a_{mel,v}$	0,420 (100%)	0,096 (23%)	0,072 (17%)	0,044 (11%)
Vertikale Größen	ohne APL	100% AllgB +APL+Blende	70% AllgB +APL+Blende	40 %AllgB +APL+Blende
ΔT_{cp}	3590 K (100%)	3065 (85%)	2885 (80%)	2518 (70%)
$\Delta a_{mel,v}$	0,424 (100%)	0,374 (88%)	0,356 (84%)	0,318 (75%)

3 Zusammenfassung

Dynamische Beleuchtungssysteme erlauben über die Veränderungen von Lichtfarbe, Lichtstrom und Lichtverteilung eine Variation von Spektrum und Beleuchtungsstärke in der Augenebene und ermöglichen damit die gezielte Unterstützung nichtvisueller Lichtwirkungen im Tagesverlauf. Dabei muss auch die arbeitsplatzbezogene Beleuchtung in die Steuerung integriert sein. Anderenfalls kann das Zuschalten der Arbeitsplatzbeleuchtung dazu führen, dass der Dynamikbereich des melanopischen Wirkungsfaktors $\Delta a_{mel,v}$ über die Variation der Lichtfarbe der Hallenbeleuchtung stark reduziert wird, wie die Messungen in der Praxis zeigen.

Um Störungen in der Steuerung zu reduzieren, sind eine Anpassung von Lichtstrom und Abstrahlcharakteristik der arbeitsplatzbezogenen Beleuchtung erforderlich, sodass möglichst wenig Licht direkt in die vertikale Augenebene gelangt. Dies ist besonders dann wichtig, wenn die nichtvisuelle Lichtwirkung minimal sein soll, wie am späten Abend oder während der Nacht, um eine Desynchronisation des circadianen Rhythmus zu vermeiden.

Referenzen

- [1] DIN 5031-100:2021-11: *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik Teil 100: Über das Auge vermittelte, melanopische Wirkung des Lichts auf den Menschen – Größen, Symbole und Wirkungsspektren*. Beuth Verlag, November 2021
- [2] DIN 5031-3:1982-03: *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik Teil 3: Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik*. Beuth Verlag, März 1982
- [3] BIPM: *The International System of Units (SI Brochure)*. 9th edition, 2022
- [4] KIRCHNER, J.-H.; BAUM, E.: *Mensch – Maschine - Umwelt: Ergonomie für Konstrukteure, Designer, Planer und Arbeitsgestalter*. Beuth Verlag, Berlin, Köln, 1986, S. 230.

Kontakt

Dr.-Ing. Karin Bieske
karin.bieske@tu-ilmenau.de

Danksagung

Die Untersuchungen erfolgten im Rahmen des Projektes „Licht und Schicht - Interventionsstudie zu kurz- und langzeitlichen Auswirkungen von dynamischer Beleuchtung am Arbeitsplatz und individualisierten, handybasierten Lichtempfehlungen bei Schichtarbeitern“ durchgeführt, das von der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) finanziert wird (FP 0444). Das Projekt erhielt ein positives Votum der Ethikkommission der Ruhr-Universität Bochum (Reg.-Nr.: 20-6859-andere Forschung).

Der Firma Trilux GmbH & Co. KG sei für ihre Unterstützung gedankt.