

WILHELM BAUER (HRSG.)
ACHIM PROSS | OLIVER STEFANI | SEBASTIAN BOSSENMAIER | DR. MATTHIAS BUES

LIGHTWORK

BENUTZERAKZEPTANZ UND ENERGIEEFFIZIENZ VON LED-BELEUCHTUNG
AM WISSENSARBEITSPLATZ



FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ARBEITSWIRTSCHAFT UND ORGANISATION IAO

Herausgeber: Wilhelm Bauer

Autoren: Achim Pross, Oliver Stefani, Sebastian Bossenmaier, Dr. Matthias Bues

LightWork

Benutzerakzeptanz und Energieeffizienz von LED-Beleuchtung am Wissensarbeitsplatz

Eine Studie des Fraunhofer IAO LightFusionLab

Inhalt

Glossar...	3
Zusammenfassung.....	4
1 Ausgangssituation und Zielsetzung	5
2 Wirkung von Licht	6
2.1 Biologisch wirksames Licht.....	6
2.2 Biologisch wirksame Bürobeleuchtung.....	6
3 Das Projekt LightWork	8
3.1 Rahmenbedingungen.....	8
3.2 Beleuchtungstechnik.....	8
3.2.1 Bartenbach Nautilus.....	8
3.2.2 Nimbus Q144	9
3.2.3 Philips DayWave.....	10
3.2.4 Philips Downlights.....	12
4 Erkenntnisse aus dem Projekt	13
4.1 Steuerung der Beleuchtung.....	13
4.2 Präferenz der Farbtemperatur am Arbeitsplatz	14
4.2.1 Nutzerverhalten in den Sommer- und Wintermonaten	14
4.2.2 Detaillierte Auswertung der Sommer- und Wintermonate.....	15
4.2.3 Leuchtdauer über den Tag verteilt.....	17
4.3 Präferenz der Farbtemperatur im Besprechungsraum	19
4.4 Präferenz der Helligkeit bei konstanter Farbtemperatur	20
4.4.1 Betrachtung von Sommer- und Wintermonaten.....	21
4.5 Farbtemperatur-Präferenz mit zwei unterschiedlichen Lichtmodulen	24
4.5.1 Betrachtung von Sommer- und Wintermonaten.....	24
4.6 Lichtsteuerung durch Präsenzmelder	25
4.6.1 LED-Beleuchtung im Flur	25
4.6.2 Steuerung konventioneller Beleuchtungssysteme	26
5 Kernaussagen der Studie	28
6 Ausblick	29
Literaturverzeichnis.....	30
Impressum.....	31

Glossar

LightFusion / LightFusionLab

Ein am Fraunhofer IAO geprägter Begriff für einen zweifach integrativen Ansatz in der Lichtforschung, der einerseits alle Wirkungen von Licht auf den Menschen einbezieht und andererseits die derzeit zu beobachtende technologische Konvergenz von Beleuchtungs- und Bildschirmtechnik berücksichtigt.

Circadianes System

Die »innere Uhr« des Menschen mit einer Periodenlänge von ungefähr 24 Stunden, für die Licht der wichtigste Taktgeber ist.

Chronobiologie

Die Chronobiologie ist die Lehre über zeitliche physiologische Prozesse im Organismus. Das circadiane System spielt dabei eine wichtige Rolle.

Melatonin

Hormon der Zirbeldrüse des menschlichen Zwischenhirns. Steuert den Tag-Nacht-Rhythmus des Menschen, wobei ein hoher Melatoninspiegel Müdigkeit verursacht und Schlaf induziert.

Warmweißes Licht (WW)

Licht mit einer Farbtemperatur zwischen 2700 – 3500 Kelvin.

Neutralweißes Licht (NW)

Licht mit einer Farbtemperatur zwischen 3500 – 5000 Kelvin.

Kaltweißes Licht (KW)

Licht mit einer Farbtemperatur größer 5000 Kelvin.

Gewichteter Dimmfaktor

Der gewichtete Dimmfaktor wird zur Bewertung der Brenndauer einer Leuchte, die gedimmt wird, verwendet. Der Faktor wird prozentual zwischen null für den dauerhaften Aus-Zustand und hundert für den dauerhaften maximalen Helligkeitswert angegeben.

Der Dimmfaktor wird mit der zeitlichen Komponente gewichtet, sodass lange Brenndauern einen stärkeren Einfluss haben als kurze.

Beispiel zur Veranschaulichung:

Eine Leuchte wird mit einer Dimmstufe von **100 Prozent** und einer Leuchtdauer von **vier** Stunden betrieben. Dann mit einer Dimmstufe von **50 Prozent** bei einer Leuchtdauer von **zwei** Stunden. Insgesamt war die Leuchte **sechs** Stunden eingeschaltet.

Für den gewichteten Dimmfaktor ergibt sich folgender Wert:

$$\rightarrow \frac{(100\% \cdot 4h) + (50\% \cdot 2h)}{6h} = 83,3 \%$$

$$\rightarrow \text{Gewichteter Dimmfaktor: } \mathbf{83,3}$$

Im Gegensatz dazu wäre bei der Berechnung des Durchschnitts von 100 Prozent und 50 Prozent das Ergebnis 75 Prozent.

Zusammenfassung

Die Studie »LightWork« des LightFusionLab am Fraunhofer IAO untersucht das Benutzerverhalten und die Benutzerakzeptanz von LED-beleuchteten Arbeitsplätzen mit unterschiedlicher Lichtfarbe. Einen weiteren Schwerpunkt bildet die Energieeffizienz einer präsenzbasierten Flurbeleuchtung.

Ziel des Projekts LightWork ist es, mit Pilotinstallationen LED-Beleuchtungstechnik zu realisieren, um Effizienzgewinne nachzuweisen und die Möglichkeiten der LED-Lichttechnologie zu demonstrieren.

Die im Rahmen des Projekts realisierte Installation dient auch als Grundlage dieser Studie. Insgesamt 16 Arbeitsplätze des LightFusionLab wurden mit verschiedenen, hinsichtlich Beleuchtungsstärke und Farbtemperatur individuell einstellbaren LED-Beleuchtungssystemen ausgerüstet. Dabei ermöglichte eine zentrale, netzwerkbasierte Steuerung aller Komponenten ein präzises Energiemonitoring. Während der Projektlaufzeit von zwei Jahren wurden relevante Lichtsteuerungsdaten gesammelt und im Rahmen dieser Studie ausgewertet. Im Fokus der Studie steht neben dem Nutzerverhalten zu den unterschiedlichen Tages- und Jahreszeiten auch der Aspekt, wie und ob die Anwender eine dynamische und individualisierbare Lichtumgebung selbstständig und ihren Bedürfnissen entsprechend nutzen.

Um die ausgewerteten Ergebnisse zu verifizieren und mit dem subjektiv wahrgenommenen Verhalten der Nutzer zu vergleichen, wurde im Rahmen dieser Studie ein Fragebogen erstellt, der gezielt auf die verschiedenen Beleuchtungssysteme eingeht.

Zur Reproduzierbarkeit der einzelnen Lichtsituation und um einen Nachweis über den Energieverbrauch der verwendeten Beleuchtungssysteme zu erhalten, wurden die Leuchten einigen Messungen unterzogen. Untersuchungsschwerpunkte waren sowohl die Helligkeit und Farbtemperatur als auch der Stromverbrauch bei verschiedenen Helligkeitsstufen. Mit diesen Werten ist es möglich, eine genaue Aussage der Lichtverhältnisse an jedem Arbeitsplatz zu bekommen.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass eine individuelle und bedarfsgerechte Beleuchtung von den Nutzern genutzt und positiv bewertet wird.

LightFusionLab

LightFusion ist der Arbeitstitel zur Erforschung innovativer Konzepte und Lösungen rund um die Technologien LED und OLED.

Ziel ist es, die Potentiale dieser Basistechnologien hinsichtlich der visuellen und ergonomischen Qualität sowie der Energieeffizienz praktisch nutzbar zu machen.

Forschungsschwerpunkte im LightFusionLab sind dynamische, multispektrale Beleuchtung für den Arbeitsplatz und andere Anwendungsgebiete, optimierte Lichtsysteme zur Gesundheits- und Leistungsförderung sowie die Evaluation von Lichtkonzepten und Systemen – sowohl technisch als auch hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Menschen.

Die Wirkung von Licht und Farbe wirkt sich weitreichend auf unser Befinden aus. Licht bietet daher ein vielfältiges Einsatzpotenzial in unterschiedlichen Bereichen. Lichttherapie ist ein bereits geläufiger therapeutischer Ansatz. Die Effekte einer gezielten, intelligenten Beleuchtung am Arbeitsplatz sind aber noch weitestgehend unbekannt. Weiterhin sind Flächigkeit und Richtung des Lichtes sehr wichtige Faktoren für die menschliche Biologie wie den Schlaf-Wach-Rhythmus und das Wohlbefinden. Licht ist also mehr als Beleuchtung und daher auch ein wichtiger Gegenstand aktueller Lichtforschung.

Weltweit werden etwa 19 Prozent des Elektrizitätsverbrauchs für künstliche Beleuchtung aufgewendet. Damit trägt die Allgemeinbeleuchtung zu einem beachtlichen Teil der CO₂-Emissionen bei. Geht dieser Trend weiter wie bisher, wird bis 2030 mit einem Anstieg von 80 Prozent des derzeitigen Stromverbrauchs für Beleuchtung gerechnet [1]. Durch den Einsatz von LED-Beleuchtungstechnologie in Kombination mit präsenzbasierter Lichtsteuerung kann diesem Trend entgegengewirkt und bis zu 70 Prozent des Stromverbrauchs eingespart werden.

Die geringe Anzahl an Pilotinstallationen LED-basierter Bürobeleuchtung durch den anfänglich hohen Investitionsaufwand war eines der Hauptkriterien für die langsame Verbreitung von LED-Beleuchtungstechnik. Angesichts dieser Entwicklung startete das Fraunhofer IAO im Jahr 2008 ein Pilotprojekt. Ziel dieses Projektes war es, die Effizienzgewinne von LED-Beleuchtungstechnik nachzuweisen und deren Möglichkeiten im Hinblick auf dynamisches Licht in der Bürolandschaft über einen langen Zeitraum zu demonstrieren.

2

Wirkung von Licht

2.1 Biologisch wirksames Licht

Im Laufe der Evolution hat der Mensch, bedingt durch den stetigen Wechsel von Tag und Nacht, das System einer »inneren Uhr« entwickelt – das circadiane System. Dieses besitzt eine Periodenlänge von etwa 24 Stunden und steuert Schlaf- und Wachphasen, Herzfrequenz, Blutdruck, Stimmung und viele weitere Körperfunktionen über den Tag verteilt [2].

Licht hat eine chronobiologische Wirkung auf den menschlichen Rhythmus. Gibt es eine Störung in diesem System, können die unterschiedlichsten Krankheitssymptome wie Depressionen oder Immunerkrankungen auftreten. Die Steuerung des circadianen Systems erfolgt über eine spezielle Art von Ganglienzellen in der Netzhaut des Auges. Diese reagieren auf sichtbares, blaues Licht und steuern unter anderem die Ausschüttung des Hormons Melatonin im menschlichen Körper [3][4][5].

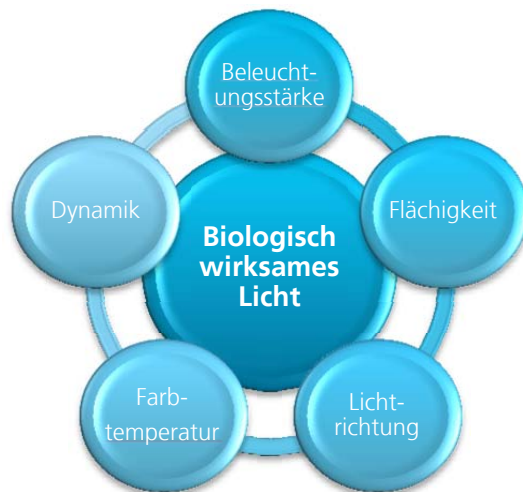
Der biologische Nachweis des Einflusses von Licht auf den Menschen ermöglicht heute die Erstellung von Beleuchtungskonzepten mit positiver Wirkung auf das circadiane System.

2.2 Biologisch wirksame Bürobeleuchtung

Durch das Wissen über die Chronobiologie kann Licht in Innenräumen so gesteuert werden, dass die Konzentration gesteigert und Wohlbefinden und Gesundheit gefördert werden. Durch die richtige Beleuchtung lassen sich also Lebensqualität und Leistungsfähigkeit des Menschen entscheidend verbessern.

Die Aufgabe biologisch wirksamen, künstlichen Lichts ist, die Wirkung des Tageslichts möglichst genau zu reproduzieren. Diese Aufgabe beinhaltet einen hohen Komplexitätsgrad, da im Tagesverlauf Änderungen des Einfallswinkels, der Anteile von direktem und indirektem Licht, der Lichtfarbe und der Helligkeit stattfinden. Moderne, intelligente Beleuchtungskonzepte stellen Licht mit unterschiedlicher Farbtemperatur und Beleuchtungsstärke dynamisch bereit. Der circadiane Rhythmus kann also durch künstliches Licht positiv beeinflusst werden.

Die Einflussfaktoren für biologisch wirksames Licht sind in **Abb. 1** zu sehen. Den größten Einfluss hat die Beleuchtungsstärke. Weiter spielen die Flächigkeit und die Lichtrichtung eine wichtige Rolle. Die Farbtemperatur hat insoweit einen Einfluss, dass kalte Lichtfarben mit einem hohen Blauanteil die Rezeptoren im Auge am stärksten reizen. Die Dynamik der Beleuchtung, also die Veränderung der Helligkeit und der Farbtemperatur haben den geringsten Einfluss.



**Abb. 01 Einflussfaktoren
für biologisch wirksames
Licht**

Wirkung von Licht

Für eine biologische Wirkung des Lichts sind bereits relativ geringe Beleuchtungsstärken ausreichend. Untersuchungen zeigen, dass 500 bis 1500 Lux ausreichen, wenn durch eine flächige Beleuchtung viele Rezeptoren auf der Netzhaut erreicht werden. Ähneln das Licht zusätzlich dem Farbspektrum des Tageslichts und variiert die Farbtemperatur entsprechend dynamisch über den Tag verteilt, so wird es vom Menschen als angenehm empfunden und erreicht seine positive biologische Zwecksetzung.

Weitere Studien zeigen, dass abends kurz vor dem Einschlafen bei einer kalten Lichtfarbe von 6500 Kelvin bereits Beleuchtungsstärken von 40 Lux am Auge ausreichen, um die Schlafqualität messbar zu beeinträchtigen [6].

3

Das Projekt LightWork

3.1 Rahmenbedingungen

Im Jahr 2009 startete das Projekt »LightWork« im Fraunhofer LightFusionLab. Insgesamt wurden bei diesem Projekt 16 Arbeitsplätze, ein Labor sowie die Flurbeleuchtung mit verschiedenen LED-Beleuchtungssystemen ausgestattet. Die Anwender konnten die eingesetzten Leuchten hinsichtlich Beleuchtungsstärke und Farbtemperatur individuell einstellen, wobei kalt- und warmweißes Licht als einzelne- und gemischte Lichtfarbe zur Auswahl stand. Die Aufnahme jeder einzelnen Lichtbewegung durch eine zentrale, netzwerkbasierende Steuerung aller Komponenten, ermöglichte ein präzises Monitoring.

Die Toiletten, der Abstellraum und die Teeküche waren mit herkömmlichen Leuchtstoffröhren ausgestattet, jedoch erfolgte die Lichtsteuerung mittels Präsenzmeldern. Sobald eine Person registriert wurde, schaltete sich das Licht im jeweiligen Raum für eine fest definierte Zeitspanne ein.

Das Projekt LightWork erstreckte sich über einen Zeitraum von zwei Jahren. Die aufgezeichneten Betriebsdaten wurden hinsichtlich des Energieverbrauchs und der Präferenz der Benutzer bei der täglichen Arbeit ausgewertet.

3.2 Beleuchtungstechnik

Die Auswahlmöglichkeit von LED-Leuchten, die speziell für die Büroarbeit konzipiert sind, war im Jahr 2008 sehr gering. Trotzdem sollte bei diesem Projekt ein breites Spektrum an Leuchten von unterschiedlichen Herstellern abgedeckt werden. Insgesamt wurden von drei Herstellern LED-Leuchten in den Büros installiert. Durch diese unterschiedlichen Beleuchtungsmodule konnten Untersuchungen und Demonstrationen verschiedenster Lichtsituationen gewährleistet werden.

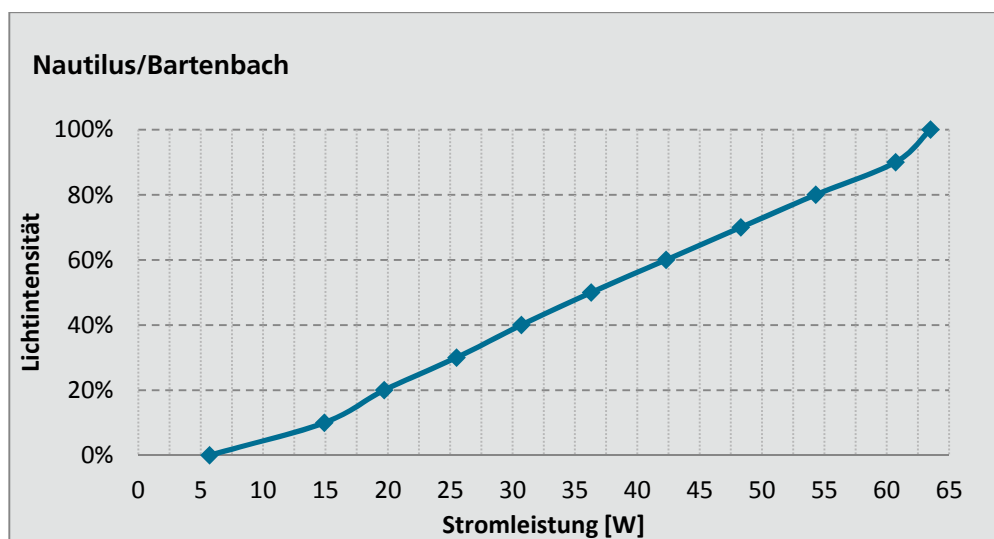
3.2.1 Bartenbach Nautilus

Dank einer Linsenoptik wird das Licht der Bartenbach Nautilus in einem Brennpunkt dicht unterhalb der Linse gebündelt und in einem blendungsfreien Strahlungskegel von etwa 60 Grad abgegeben. Durch diese optische Konstruktion sind sehr kleine Öffnungen an der Decke oder Wand nötig.



**Abb. 02 Lichtkegel-
Charakteristik der Nautilus
Linsenoptik**
[Bild: Bartenbach]

Die Farbtemperatur der Nautilus LEDs beträgt 4000 Kelvin und kann in zehn Helligkeitsstufen angepasst werden. Dabei wurden die Dimmstufen in zehn Prozent Lichtintensität geregelt. Die Leerlaufleistung des Moduls bei ausgeschaltetem Licht beträgt 5,7 Watt. Wie aus **Abb. 03** hervorgeht, steigt im weiteren Verlauf die Stromleistung pro Dimmstufe linear an.



**Abb. 03 Lichtintensität über
der Stromleistung der Barten-
bach Nautilus**

3.2.2 Nimbus Q144

Die Leuchten der Firma Nimbus wurden in zwei unterschiedlichen Lichtfarben installiert. Der gesamte Flurbereich war mit neutralweißen Leuchten mit 4000 Kelvin ausgestattet. In einem Besprechungsraum und einem Labor mit mehreren Arbeitsplätzen kamen Leuchten mit sowohl 4000 Kelvin als auch warmweißen 3000 Kelvin zum Einsatz. Kegelsenkungen in einem speziell bearbeiteten, lichtbrechenden Plexiglas sorgen bei der Q144 für eine blendfreie und effiziente Beleuchtung. Diese ermöglicht eine Verteilung des Lichts mit rund 95 Prozent Direktanteil und fünf Prozent Indirektanteil.

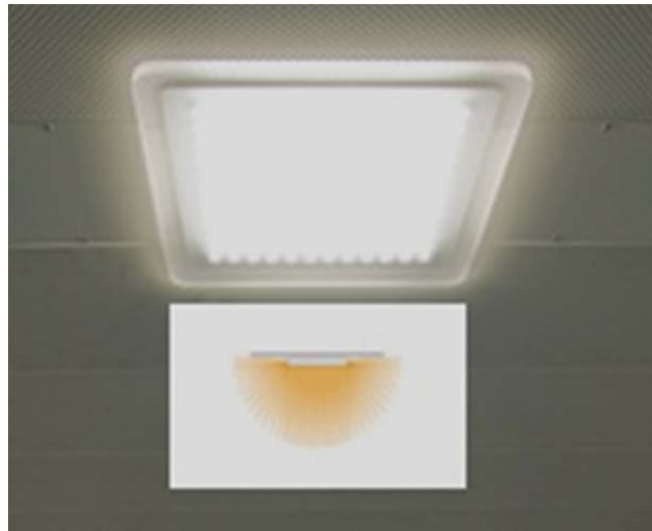
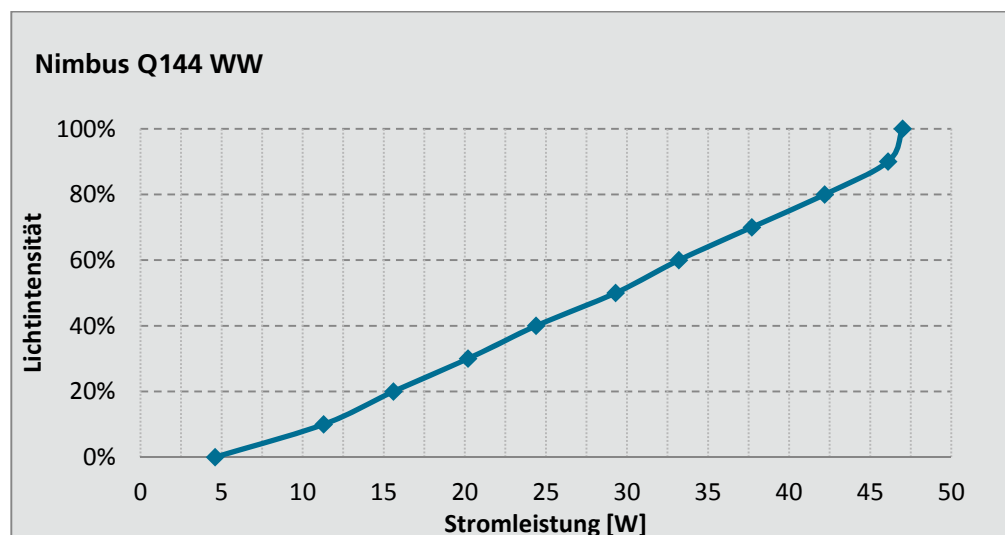


Abb. 04 Q144 Leuchte mit zugehöriger Lichtverteilung

Bei der Nimbus Q144 konnte der Anwender ebenfalls die Lichtintensität in zehn Dimmstufen verändern. Komplett ausgeschaltet benötigt diese Lampe eine Leerlaufleistung von 4,6 Watt. Der weitere Verlauf der Stromleistung steigt, ähnlich wie bei der Bartenbach Nautilus, linear an (**Abb. 05**).

Abb. 05 Lichtintensität über der Stromleistung der Nimbus Q144



3.2.3 Philips DayWave

Durch die unabhängige Kombination von warmweißen und kaltweißen LEDs in einem Gehäuse, sowie der dimmbaren Helligkeitseinstellung beider Lichtfarben, kann mit der Philips DayWave die Lichtsituation individuell angepasst werden.

Die DayWave strahlt Licht sowohl direkt als auch indirekt ab. Der direkte Lichtanteil wird durch ein konisches Design der Linsenoptik ausgekoppelt. Dadurch ist eine homogene, breitstrahlende Lichtverteilung mit einer hohen Blendungsbegrenzung über den gesamten Arbeitsbereich gewährleistet. Insgesamt wurden elf Arbeitsplätze mit dieser Leuchte ausgestattet.



Abb. 06 Unterschiedliche Farbtemperaturen der Philips DayWave

Messungen der unterschiedlichen Farbtemperaturen zeigen in **Abb. 07** die Vorteile der LED-Beleuchtung. Während es für konventionelle Beleuchtungssysteme mit einem glühenden Draht oder der Gasentladung als Lichtquelle fast unmöglich ist, einen konstanten Farbtemperaturverlauf beim Dimmen zu gewährleisten, ist dies bei LEDs sehr gut realisierbar. Sowohl bei den kaltweißen als auch bei den warmweißen LEDs der Philips DayWave steht über dem kompletten Helligkeitsverlauf eine nahezu einheitliche Farbtemperatur zur Verfügung.

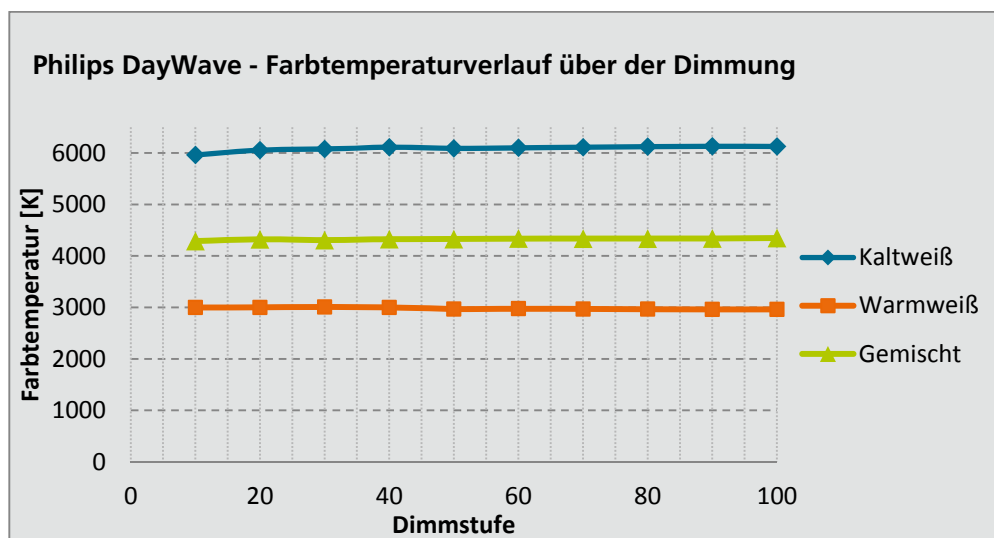
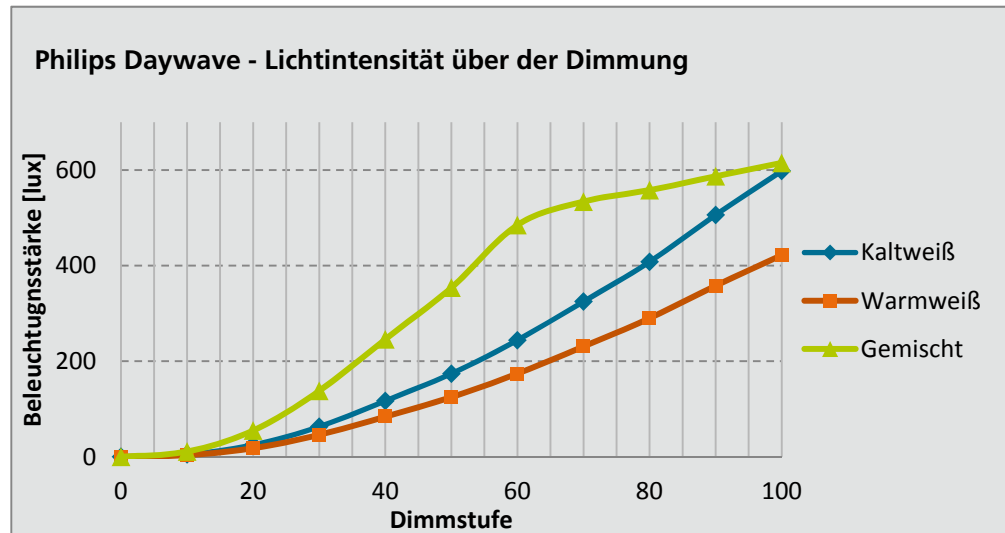


Abb. 07 Farbtemperaturverlauf der Philips DayWave über dem Helligkeitsverlauf

Mit Blick auf die Beleuchtungsstärke in **Abb. 08** wird deutlich, dass die kaltweißen LEDs der Philips DayWave, bedingt durch eine dünnere Phosphorschicht, eine höhere Effizienz besitzen als die warmweißen LEDs. Auffällig ist, dass die gemischte Kurve nicht der Addition des warmweißen- und kaltweißen Lichts entspricht. Dies ist auf Thermomanagement-Gründe zurückzuführen, die ein Überhitzen der wärmeempfindlichen LEDs verhindern, um eine lange Lebensdauer zu gewährleisten.

Abb. 08 Gemessene Beleuchtungsstärke über der Dimmstufe am Philips DayWave Arbeitsplatz



3.2.4 Philips Downlights

Die Philips DayWave Leuchte war jeweils über den Arbeitsplätzen angebracht. Die restliche Fläche in den Büroräumen konnte damit nicht vollständig gleichmäßig ausgeleuchtet werden. In diesen Büroräumen, die mit der arbeitsplatzfokussierten DayWave ausgestattet waren, wurden zusätzliche Downlights für eine gleichmäßige Raumausleuchtung angebracht. Diese waren, mit neun LEDs, einem Ausstrahlwinkel von 30 Grad und einer Farbtemperatur von 3500 Kelvin, eine Ergänzung als Allgemeinbeleuchtung.



Abb. 09 Philips Downlights

4.1 Steuerung der Beleuchtung

Die Beleuchtung der einzelnen Arbeitsplätze konnte über einen Lichtschalter und ein grafisches Webinterface gesteuert werden. Bei den Lichtschaltern gab es pro Arbeitsplatz jeweils einen Schalter für die Farbtemperatur zur Dimmung der Helligkeit. Das grafische Webinterface war so aufgebaut, dass in jedem Raum alle Leuchten auf einer Seite angezeigt und verändert werden konnte. Es gab bei jeder Leuchte einen separaten Schalter um das kaltweiße und warmweiße Licht zu dimmen. Die eingestellten Werte der Beleuchtung, konnten in einem Szenario abgespeichert und wieder aufgerufen werden.

Mit einem Fragebogen wurden alle projektbeteiligten Mitarbeiter unter anderem nach der präferierten Lichtsteuerung befragt. Die meisten der befragten Mitarbeiter favorisieren eine automatische Steuerung mit einer manuellen Eingriffsmöglichkeit. Etwas mehr als ein Drittel würde eine rein manuelle Steuerung bevorzugen.

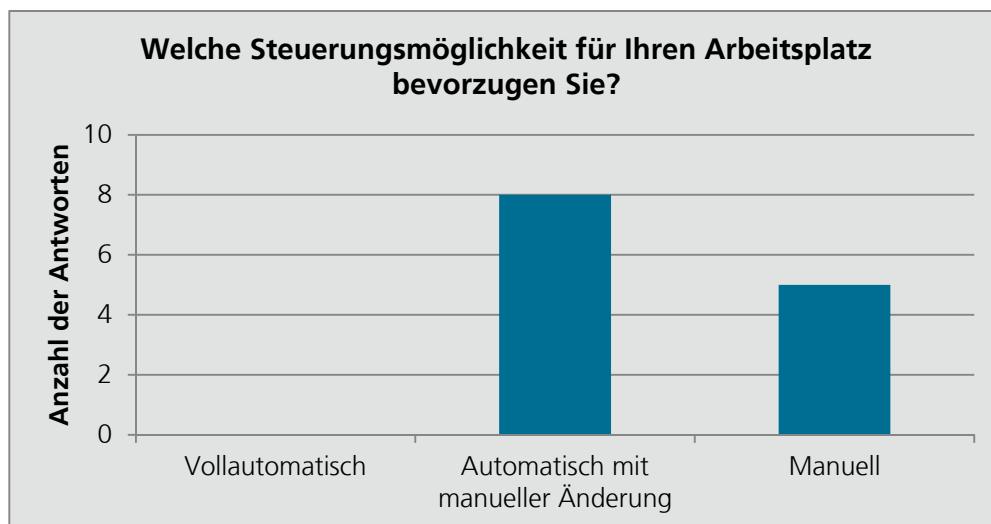


Abb. 10 Präferenz der Lichtsteuerung

[Aussage 1]

Die Steuerung der Beleuchtung sollte nur automatisch erfolgen, wenn es eine manuelle Eingriffsmöglichkeit gibt.

4.2 Präferenz der Farbtemperatur am Arbeitsplatz

Im Projekt LightWork wurden fünf Büroräume mit der Philips DayWave und den zugehörigen Philips Downlights ausgestattet. Insgesamt waren also elf Arbeitsplätze mit den Philips Leuchten ausgerüstet. Über jedem dieser Arbeitsplätze befand sich zentriert mindestens eine DayWave Leuchte. Für die Allgemeinbeleuchtung sorgten die Downlights, die optional eingeschaltet werden konnten, um den gesamten Raum gleichmäßig auszuleuchten.

4.2.1 Nutzerverhalten in den Sommer- und Wintermonaten

Bei der Unterscheidung zwischen Sommer- und Wintermonaten tritt, wie erwartet, ein großer Unterschied in der Beleuchtungszeit auf. Im Winter betrug die Leuchtdauer mehr als 80 Prozent des gesamten Jahres.

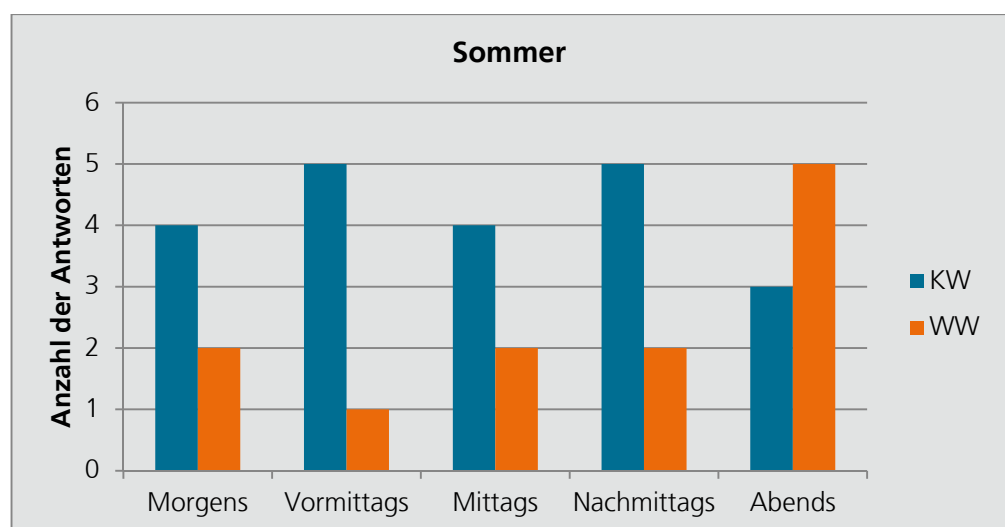
Das Verhältnis von kaltweißem zu warmweißem Licht zeigt, dass im Sommer und im Winter kaltweißes Licht eine längere Leuchtdauer und eine höhere Beleuchtungsstärke aufweist. Diese Präferenz der höheren Farbtemperatur ist im Sommer stärker ausgeprägt als im Winter. Ebenfalls wird deutlich, dass kaltweißes und warmweißes Licht im Sommer durchschnittlich heller eingestellt wurde.

Abb. 11 DayWave Arbeitsplätze – Vergleich Sommer/Winter

		Sommer	Winter
Tatsächliche Leuchtdauer [%]		19,23	80,77
Kaltweiß	Leuchtdauer/Woche [h]	1:20:09	5:03:49
	Gewichteter Dimmfaktor	93	78
Warmweiß	Leuchtdauer/Woche [h]	0:39:59	3:20:49
	Gewichteter Dimmfaktor	76	74
Verhältnis der Leuchtdauer von WW/KW		2,00	1,51

Im Fragebogen wurden die beteiligten Mitarbeiter nach ihrem Nutzungsverhalten zu den verschiedenen Tageszeiten befragt. In Bezug auf die Philips DayWave stand die Präferenz der Lichtfarbe zu den Sommer- und Wintermonaten im Fokus. **Abb.12** und **Abb. 13** zeigen die Präferenzen der Nutzer im Sommer und Winter.

Abb. 12 Präferenz der Farbtemperatur über den Tag verteilt im Sommer



Die Aussagen der befragten Probanden decken sich mit den Ergebnissen der Auswertung. Im Sommer ist über den Tag verteilt eine deutliche Präferenz von kaltweißem Licht sichtbar. Lediglich am Abend überwiegt die Vorliebe für warmweißes Licht.

Erkenntnisse aus dem Projekt

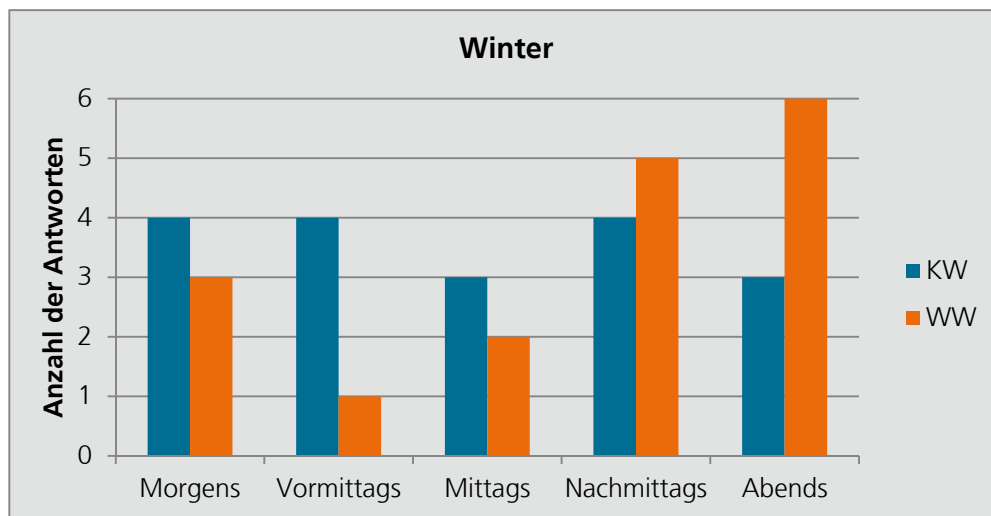


Abb. 13 Präferenz der Farbtemperatur über den Tag verteilt im Winter

Im Winter war die Präferenz für kaltweißes Licht deutlich niedriger. Sie überwiegt vor allem in den Morgen- und Mittagsstunden. Erst nachmittags und vor allem abends bevorzugen die befragten Mitarbeiter warmweißes Licht.

[Aussage 2]

Im Sommer wird tagsüber kaltweißes Licht und erst am Abend warmweißes Licht bevorzugt. Im Winter wird bereits am frühen Nachmittag warmweißes Licht bevorzugt verwendet.

4.2.2 Detaillierte Auswertung der Sommer- und Wintermonate

Hinsichtlich der Sommer-Winter-Auswertung der einzelnen DayWave Büros fällt auf, dass bei langer Leuchtdauer der Downlights die Leuchtdauer der Arbeitsplatzbeleuchtung kurz ausfällt und umgekehrt.

Befinden sich in einem Büro mehrere Arbeitsplätze, so zeigt sich sowohl im Sommer als auch im Winter eine bevorzugte Verwendung der Allgemeinbeleuchtung.

Bezeichnung	Kaltweiß		Warmweiß		Allgemein
	Leuchtdauer [h/Woche]	Gewichteter Dimmfaktor	Leuchtdauer [h/Woche]	Gewichteter Dimmfaktor	Leuchtdauer [h/Woche]
Büro1 L2	10:00:19	99	8:00:07	95	0:46:35
Büro2 L1	1:20:23	62	1:17:16	65	4:00:53
Büro2 L2	7:46:56	96	1:13:33	42	
Büro3 L1	6:29:53	96	5:08:41	92	0:26:06
Büro3 L2	6:24:13	99	5:48:50	100	
Büro4 L1	1:51:53	38	2:20:24	53	4:09:55
Büro4 L2	1:35:44	32	1:49:40	47	
Büro5 L1	9:08:47	83	2:38:24	86	24:10:53

Abb. 14 Philips DayWave Arbeitsplätze im Winter mit einem Leuchtdaueranteil von 78,1 Prozent

Büro5 L2	0:56:13	91	1:50:22	89	
Büro5 L3	3:45:19	88	3:49:09	94	
Leuchtdauer MW	4:56:28		3:21:37		6:42:53
Leuchtdauer [%]	59,5%		40,5%		
Dimmung MW		79		78	

**Abb. 15 Philips DayWave
Arbeitsplätze im Sommer
mit einem Leuchtdaueranteil
von 21,9 Prozent**

Bezeichnung	Kaltweiß		Warmweiß		Allgemein
	Leuchtdauer [h/Woche]	Gewichteter Dimmfaktor	Leuchtdauer [h/Woche]	Gewichteter Dimmfaktor	Leuchtdauer [h/Woche]
Büro1 L2	1:26:44	100	0:48:03	84	0:08:02
Büro2 L1	0:12:14	84	0:16:58	52	0:17:16
Büro2 L2	2:32:26	99	0:12:56	42	
Büro3 L1	0:55:59	100	0:21:41	100	0:03:24
Büro3 L2	2:54:55	97	1:51:12	97	
Büro4 L1	0:00:54	98	0:02:19	98	0:10:11
Büro4 L2	0:00:15	95	0:09:46	7	
Büro5 L1	3:47:52	91	1:33:53	100	6:57:08
Büro5 L2	0:10:01	76	0:43:02	100	
Büro5 L3	1:39:17	98	1:45:26	100	
Leuchtdauer MW	1:30:42		0:49:20		1:31:12
Leuchtdauer [%]	64,8%		35,2%		
Dimmung MW		95		78	

[Aussage 3]

Bei Büroräumen mit mehreren Arbeitsplätzen wird die Beleuchtung weniger individuell gesteuert als in Einzelbüros.

4.2.3

Leuchtdauer über den Tag verteilt

Erkenntnisse aus dem Projekt

Zusätzlich zur jahreszeitlichen Betrachtung wurden weitere Auswertungen durchgeführt. Hier liegt der Fokus auf dem tageszeitlichen Verlauf von sieben Uhr morgens bis 18 Uhr abends. Wie **Abb. 16** für Büro eins, Lampe zwei und **Abb. 17** für Büro drei, Lampe zwei repräsentativ zeigen, wird in dieser Betrachtung nochmals der große Unterschied der Beleuchtungsdauer zwischen Winter und Sommer deutlich. Ebenso ist eine längere Leuchtdauer in den Abendstunden zu erkennen.

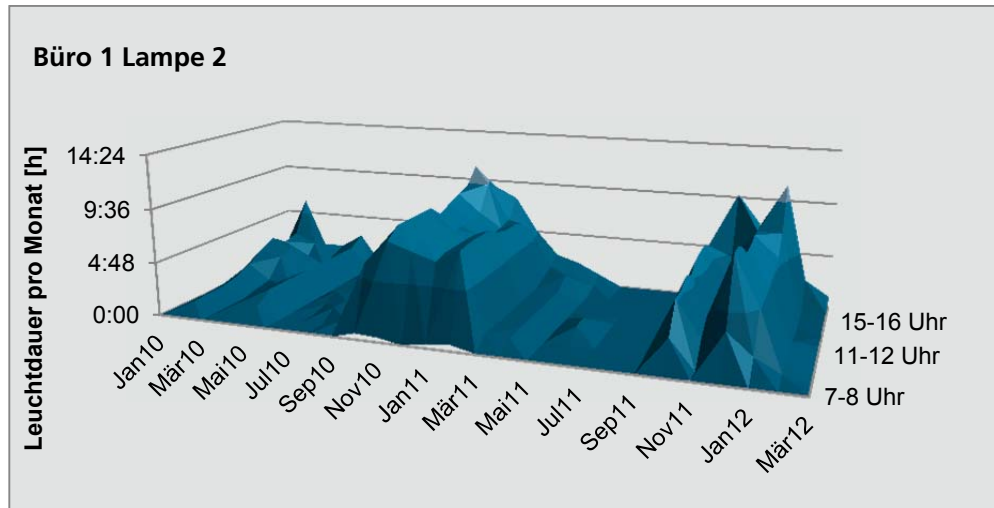


Abb. 16 Auswertung der Leuchtdauerwerte von Arbeitsplatz Büro1 L2

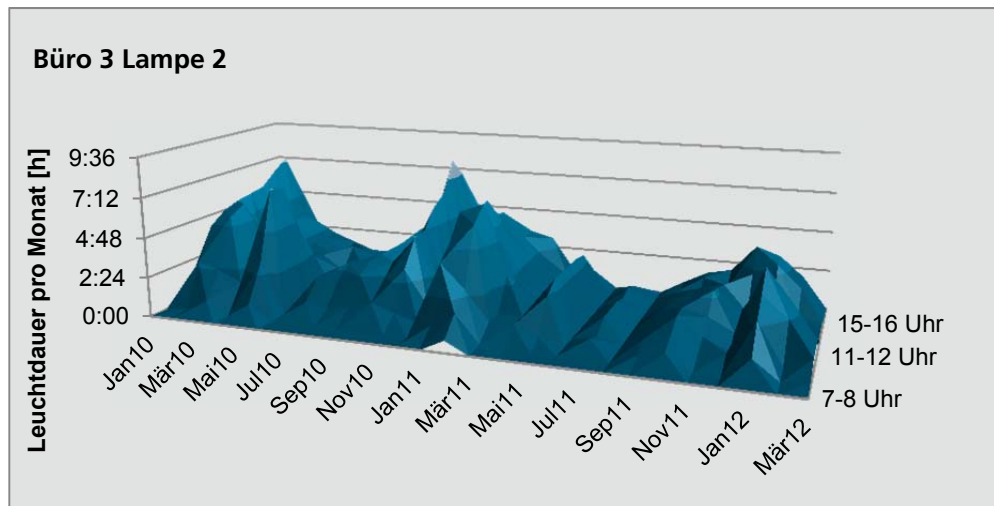
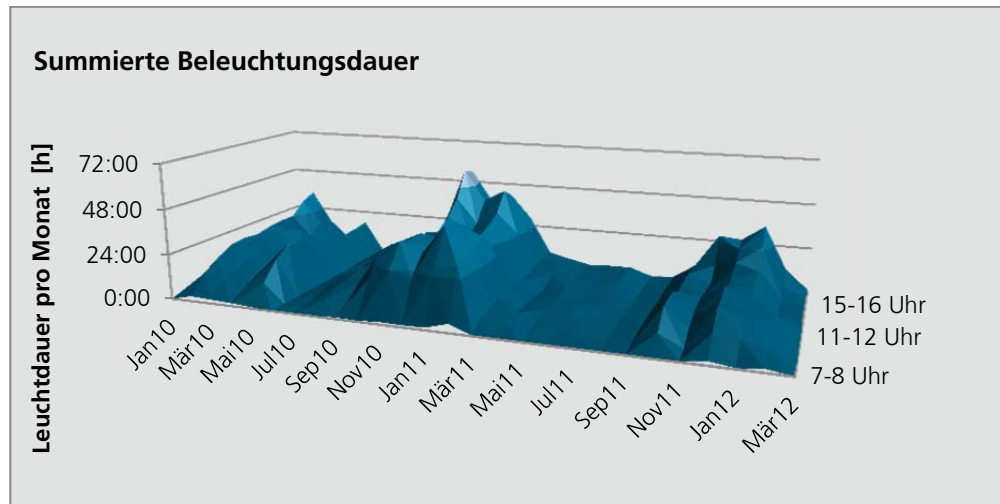


Abb. 17 Auswertung der Leuchtdauerwerte von Arbeitsplatz Büro3 L2

Zur Verifizierung der oben genannten Aspekte dient **Abb. 17**. In dieser wird die Beleuchtungszeit aller relevanten DayWave Leuchten aufsummiert dargestellt. Die jahreszeitliche Wellenbewegung der Leuchtdauer ist hier noch deutlicher zu erkennen.

Abb. 18 Über alle Arbeitsplätze summierte Leuchtdauer



[Aussage 4]

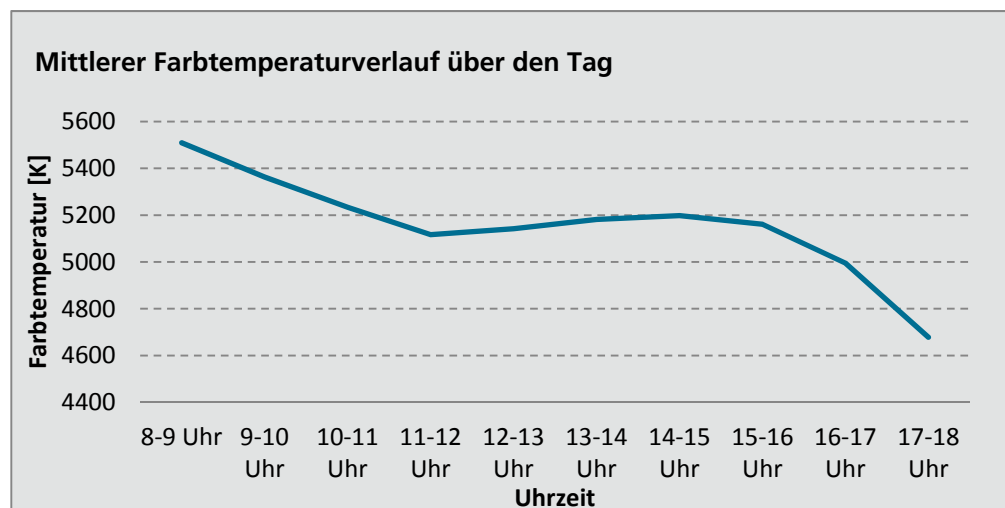
Die Leuchtdauer im Winter beträgt mehr als 80 Prozent der Gesamtleuchtdauer eines Jahres.

Interessant ist der in **Abb. 19** abgebildete Verlauf der Farbtemperatur aller relevanter DayWave Leuchten über den Tag.

In dieser Abbildung sind die Daten über die komplette Projektlaufzeit gemittelt und spiegeln einen repräsentativen Trend über alle Jahreszeiten wieder. Sehr deutlich ist zu erkennen, dass besonders in den Morgenstunden die Präferenz hin zu kaltem Licht mit hohen Farbtemperaturen tendiert. Im Laufe des Tages bewegt sie sich stark in Richtung neutral- und warmweiß.

Dieser Verlauf stellt annähernd das chronobiologische Bedürfnis des Menschen dar. Am Morgen wird Licht mit hohem Blauanteil benötigt, um Körper und Geist zu aktivieren. Dieses Bedürfnis nimmt zu den Mittagsstunden hin ab um am Nachmittag, zur Überbrückung des »Nachmittagstiefs«, nochmals leicht anzusteigen. Gegen Abend wird warmes Licht verwendet, um die Nachtruhe einzuleiten.

Abb. 19 Über alle Mitarbeiter gemittelter Farbtemperaturverlauf



[Aussage 5]

Morgens ist das Bedürfnis nach kaltweißem Licht sehr hoch und nimmt über den Tag verteilt ab. Abends ist eine starke Tendenz hin zu warmweißem Licht vorhanden.

Bei der quartalsweisen Betrachtung der Farbtemperatur ergeben sich ebenfalls Unterschiede im Verlauf. Im Frühling und Sommer werden insgesamt kältere Farben bevorzugt als im Herbst und Winter. Dabei sind die Farbtemperaturunterschiede, im Vergleich zum tageszeitlichen Farbtemperaturverlauf, geringer. **Abb. 20** zeigt den Verlauf der Farbtemperatur in den verschiedenen Jahreszeiten.

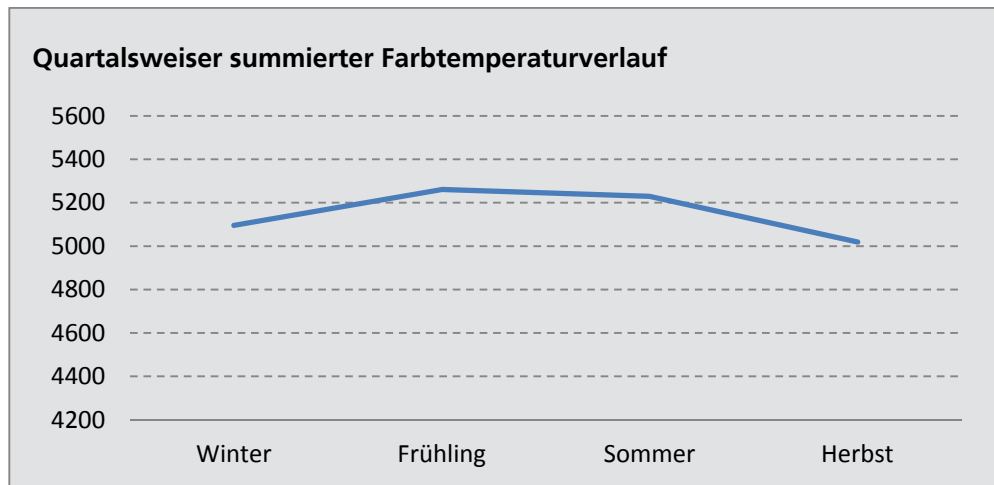


Abb. 20 Quartalsweise gemittelter Farbtemperaturverlauf

[Aussage 6]

Im Frühling und Sommer wird in Summe ein kälteres Lichtspektrum bevorzugt. Im Herbst und Winter geht die Tendenz hin zu wärmeren Lichtfarben.

4.3 Präferenz der Farbtemperatur im Besprechungsraum

Bei der Lichtsteuerung des Besprechungsraums hatten die Nutzer mehrere Möglichkeiten die Lichtfarbe individuell einzustellen. Dabei stand die Nimbus Q144 XL als warmweiße Leuchte mit 3000 Kelvin und als neutralweiße Leuchte mit 4000 Kelvin zur Verfügung. Aufgeteilt war der Raum in die Wand- und die Fensterseite, wobei die Leuchten beider Bereiche separat angesteuert werden konnten. Die zwei Lichtfarben wechselten sich jeweils ab. Wie **Abb. 21** zeigt, waren an der Wandseite jeweils fünf Lichtmodule beider Lichtfarben angeordnet. An der Fensterseite gab es ein Tageslichtfenster an der Decke. Dadurch konnte auf dieser Seite eine warmweiße Leuchte eingespart werden. Mit dieser Aufteilung war es möglich reines kaltweißes Licht, reines neutralweißes Licht oder eine Mischung beider Lichtfarben einzustellen.

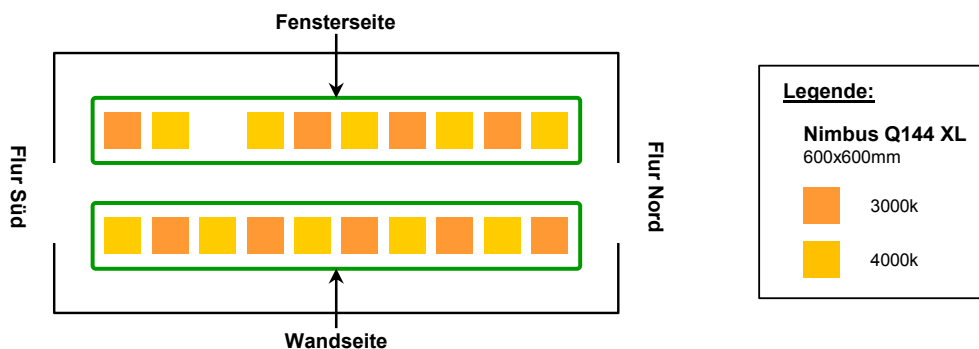
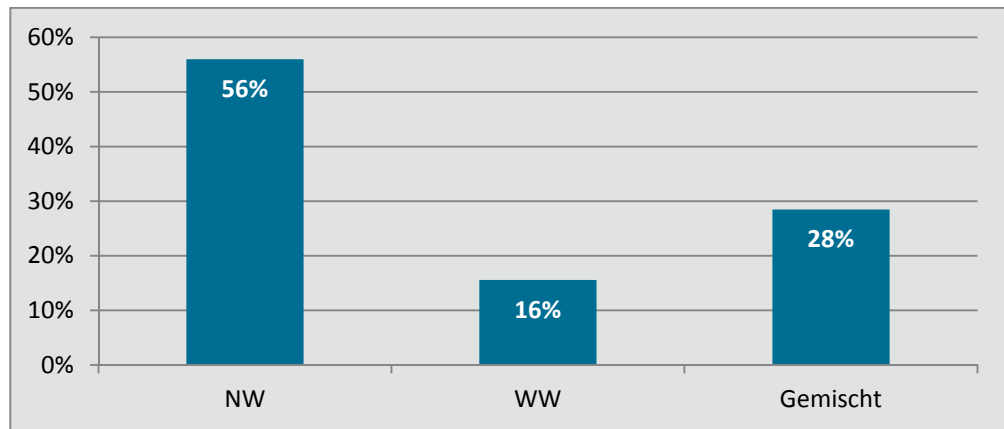


Abb. 21 Schematische Verteilung der Beleuchtungsmodule im Besprechungsraum

Die Auswertung der im Rahmen des Projekts LightWork aufgenommenen Daten zeigt, dass im Besprechungsraum die Beleuchtung für insgesamt knapp 550 Stunden bei

Abb. 22 Auswertung der LightWork-Daten des Besprechungsraums

voller Helligkeit brannte. Der Anteil des neutralweißen Lichts an der Gesamtleuchtdauer ist mit 56 Prozent mit Abstand am größten. Rein warmweißes Licht wurde mit einem Anteil von 16 Prozent am wenigsten verwendet. Zu gleichen Teilen gemischtes Licht liegt mit 28 Prozent zwischen den reinen Lichtfarben.



Um einen Eindruck der Beleuchtungssituation im Besprechungsraum zu bekommen, wurden für die drei ausgewerteten Lichtfarben jeweils die Helligkeit und die Farbtemperatur auf dem Besprechungstisch gemessen. Dabei ergaben sich die in **Abb. 23** aufgeführten Werte.

Abb. 23 Farbtemperatur und Helligkeit auf dem Besprechungstisch

	Farbtemperatur	Helligkeit
Neutralweiß	4000 K	450 Lux
Warmweiß	3000 K	340 Lux
Gemischt	3500 K	790 Lux

4.4 Präferenz der Helligkeit bei konstanter Farbtemperatur

Durch die Linsenoptik der Bartenbach Nautilus Beleuchtung wird das Licht in einem gebündelten Strahlungskegel von etwa 60 Grad abgegeben. Dadurch handelt es sich bei der Nautilus um ein direktstrahlendes Beleuchtungsmodul, das sowohl für die Allgemeinbeleuchtung, als auch für die arbeitsplatzfokussierte Beleuchtung verwendet werden kann.

Im Projekt LightWork waren zwei Büros mit dieser Beleuchtungstechnik ausgestattet. Ein Büro, wie in **Abb. 24** schematisch dargestellt, war mit zwei Arbeitsplätzen – AP1 und AP2 – ausgestattet. Bei dem zweiten Büro war lediglich der Arbeitsplatz AP1 besetzt.

Durch die Betrachtung von drei Arbeitsplätzen kann bei den folgenden Auswertungen nicht von einer allgemeinen Tendenz ausgegangen werden. Jedoch zeigen diese Daten, dass sich der individuelle Umgang mit Licht von Mensch zu Mensch stark unterscheidet. Insgesamt wurden in jedem Büro acht Leuchteinheiten (LE) installiert, die jeweils separat in ihrer Helligkeit reguliert werden konnten. Je zwei LE bildeten eine Lichtschiene (LS), die die gesamte Breite des Raumes abdeckte. So sorgten vier Lichtschienen für eine homogene Raumbeleuchtung.

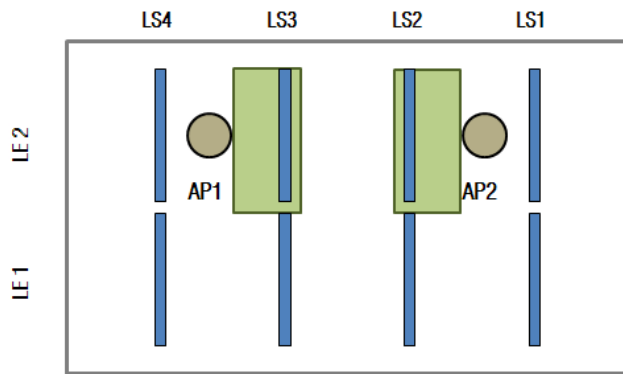


Abb. 24 Raumaufteilung der Bartenbach Nautilus Arbeitsplätze

Erkenntnisse aus dem Projekt

4.4.1 Betrachtung von Sommer- und Wintermonaten

Betrachtet man die nach Sommer- und Wintermonaten getrennten Daten, so ähnliche diese der Philips DayWave Auswertung. Beim jahreszeitlichen Vergleich zeigt sich auch bei diesem Beleuchtungssystem sowohl eine längere Beleuchtungsdauer im Winter als auch eine höhere Beleuchtungsstärke im Sommer.

		Sommer	Winter
Büro 6	Gesamtleuchtdauer [%]	4%	96%
	MW Leuchtdauer/Woche [h]	0:04:28	1:55:45
	MW gewichteter Dimmfaktor	96	81
Büro 7	Gesamtleuchtdauer [%]	12%	88%
	MW Leuchtdauer/Woche [h]	1:07:38	8:30:26
	MW gewichteter Dimmfaktor	32	27

Abb. 25 Nautilus Bartenbach im Sommer/Winter Vergleich

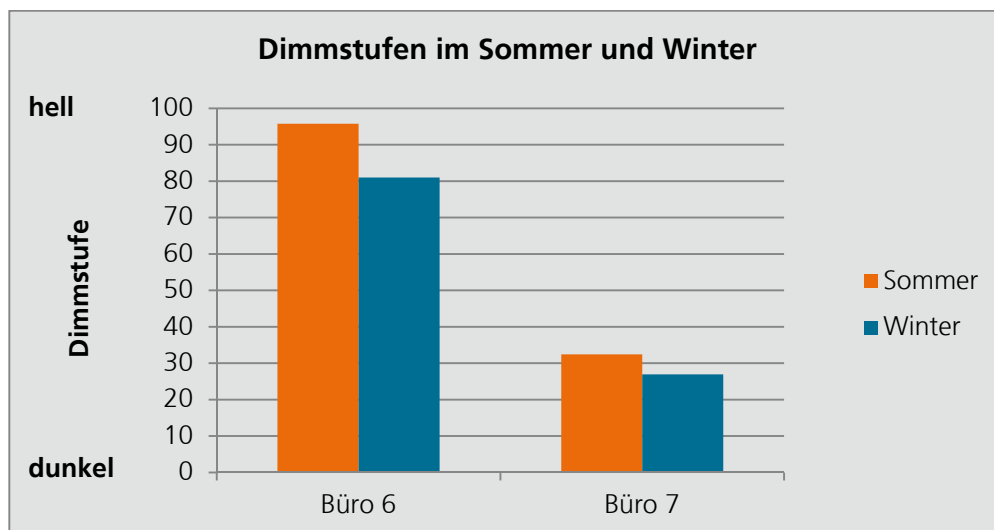


Abb. 26 Dimmstufen der Nautilus Bartenbach im Sommer und im Winter

[Aussage 7]

Im Sommer wird eine hellere Beleuchtung benutzt, im Winter eher einer dunklere.

Ein weiterer Aspekt im Fragebogen war die favorisierte Art der Dimmung zu den unterschiedlichen Jahres- und Tageszeiten. Danach haben die drei befragten Mitarbeiter im Sommer eine dunklere Beleuchtung bevorzugt, im Winter wurde dagegen mittags helles Licht und morgens, vormittags und nachmittags eine mittlere Dimmung vorgezogen. Diese Ergebnisse stehen im Widerspruch zu den ausgewerteten Daten, die zeigen, dass die Beleuchtung im Sommer durchschnittlich heller war als im Winter.

Abb. 27 Auswertung des Fragebogens zur Helligkeit über den Tag verteilt im Sommer

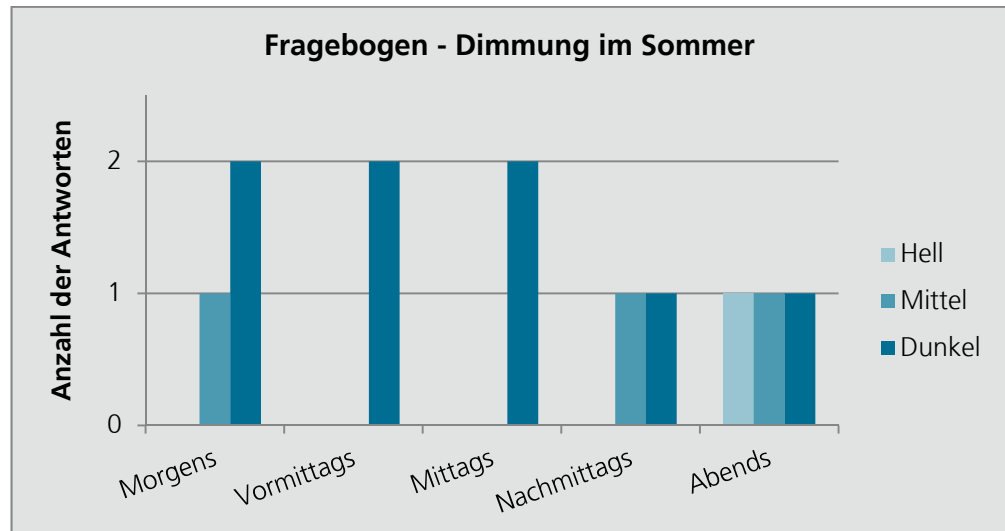
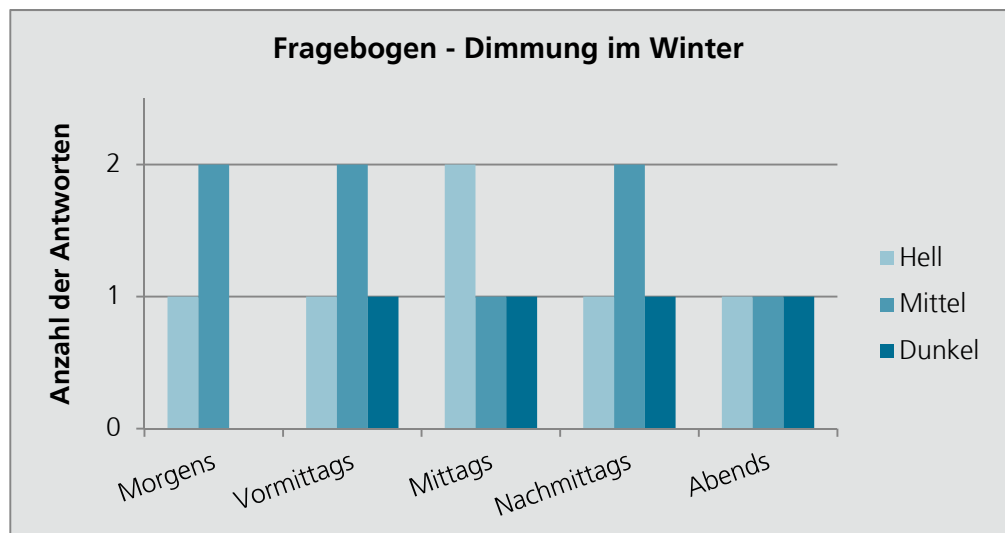


Abb. 28 Auswertung des Fragebogens zu Helligkeit über den Tag verteilt im Winter



[Aussage 8]
Die individuelle Lichtsteuerung erfolgt meist intuitiv.

In einem direkten Vergleich ergeben die Auswertungen für Büro sechs, in welchem nur ein Arbeitsplatz war, einen Anteil von 17 Prozent und für Büro sieben, welches mit zwei Arbeitsplätzen besetzt war, einen Anteil von 83 Prozent der Gesamtleuchtdauer.

Diese deutlich längere Leuchtdauer in Büros mit mehreren Personen wurde bereits bei der Philips DayWave beobachtet.

Erkenntnisse aus dem Projekt

		Büro 6	Büro 7
Sommer	Gesamtleuchtdauer [%]	6%	94%
	MW Leuchtdauer/Woche [h]	0:04:28	1:07:38
	MW gewichteter Dimmfaktor	96	32
Winter	Gesamtleuchtdauer [%]	18%	82%
	MW Leuchtdauer/Woche [h]	1:55:45	8:30:26
	MW gewichteter Dimmfaktor	81	27
Summe	Gesamtleuchtdauer [%]	17%	83%
	Σ Leuchtdauer/Woche [h]	2:00:13	9:38:04
	MW gewichteter Dimmfaktor	88	30

Abb. 29 Nautilus Bartenbach:
Vergleich zwischen Büro 6 und Büro 7

[Aussage 9]

In Büros mit mehreren Arbeitsplätzen wird von den Benutzern mehr Kunstlicht eingeschaltet als in Einzelbüros.

Wenn man die Werte für die einzelnen Leuchteinheiten getrennt betrachtet so zeigt sich, dass die Beleuchtung im Bereich des Arbeitsplatzes des Einzelbüros um ein vielfaches länger leuchtete als die restlichen Leuchteinheiten. Dies zeigt, dass im Einzelbüro ein arbeitsplatzfokussiertes Licht bevorzugt verwendet wurde.

Bezeichnung	Sommer		Winter	
	Leuchtdauer [h/Woche]	gewichteter Dimmfaktor	Leuchtdauer [h/Woche]	gewichteter Dimmfaktor
LS1 Leuchteinheit 1	0:00:34	100	0:32:53	83
LS1 Leuchteinheit 2	0:01:26	100	0:38:33	94
LS2 Leuchteinheit 1	0:00:20	100	0:33:43	84
LS2 Leuchteinheit 2	0:01:47	90	0:55:15	87
LS3 Leuchteinheit 1	0:00:00	100	1:04:48	68
LS3 Leuchteinheit 2	0:29:00	76	9:18:40	58
LS4 Leuchteinheit 1	0:00:20	100	0:41:12	83
LS4 Leuchteinheit 2	0:02:18	100	1:40:59	92
Leuchtdauer MW	0:04:28		1:55:45	
Leuchtdauer [%]	4%		96%	
Dimmung MW		96		81

Abb. 30 Bartenbach Nautilus
Leuchtdauer der Einzelmodule in Büro 6

[Aussage 10]

In Einzelbüros wird die arbeitsplatzzentrierte Beleuchtung bevorzugt verwendet.

Im Fragebogen zum Projekt LightWork wurden gezielt Fragen zum Dimmverhalten der Bartenbach Nautilus gestellt. Von den befragten drei Mitarbeitern, deren Arbeitsplätze

mit diesem Beleuchtungssystem ausgestattet waren, beantworteten alle die Frage, ob sie das Licht im Büro gleichmäßig gedimmt haben, mit »Nein«. Alle drei gaben an, dass sie den Arbeitsplatzbereich heller beleuchteten. Diese Aussagen stimmen mit den ausgewerteten Daten überein.

[Aussage 11]

Die Möglichkeit einzelne Lichtmodule individuell anzusteuern erfolgte primär über ein Interface am Arbeitsplatzcomputer.

4.5 Farbtemperatur-Präferenz mit zwei unterschiedlichen Lichtmodulen

In einem größeren Büroraum waren vier Arbeitsplätze mit der Nimbus Q144 Leuchte ausgestattet. Dabei standen den Benutzern, ähnlich wie bei der Philips DayWave, zwei unterschiedliche Farbtemperaturen zur Verfügung. Einziger Unterschied war, dass die Farbtemperaturen aus zwei verschiedenen Lichtmodulen stammten. Die Q144 warmweiß strahlte Licht mit einer Farbtemperatur von 3000 Kelvin, die Q144 neutralweiß Licht mit 4000 Kelvin aus. Jeder der vier Arbeitsplätze hatte zwei warmweiße und drei neutralweiße Lichtmodule über der Schreibtischfläche verteilt.

4.5.1 Betrachtung von Sommer- und Wintermonaten

Bei der Betrachtung der Sommer- und Wintermonate zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den vorangegangenen Auswertungen. In den Sommermonaten betrug der Anteil an der Gesamtleuchtdauer knapp 9 Prozent, dagegen sind im Winter etwas mehr als 91 Prozent Leuchtdauer zu verzeichnen.

Weiterhin fällt bei der Betrachtung des gewichteten Dimmfaktors auf, dass auch bei diesen Arbeitsplätzen im Sommer das Licht durchschnittlich heller leuchtete als im Winter. Diese Ergebnisse bestätigen die vorangegangenen Auswertungen, welche ein ähnliches Benutzerverhalten aufzeigen.

Einen Unterschied zu den bisherigen Auswertungen zeigt die Präferenz der Farbtemperaturen zu den unterschiedlichen Jahreszeiten. Hier ist das Verhältnis zwischen neutralweißem und warmweißem Licht im Sommer wesentlich geringer als im Winter. Im Sommer beträgt dieses 1,35 – das entspricht einer leichten Präferenz des kälteren Lichts. Im Winter hingegen wurde neutralweißes Licht mit einem Faktor von 2,57 um ein vielfaches mehr bevorzugt. Dies zeigt erneut, dass die individuelle Farbpräferenz stark benutzerabhängig ist und lediglich eine Tendenz im Nutzerverhalten zu erkennen ist.

Abb. 31 Vergleich der Nimbus Q144 Arbeitsplätze nach Sommer- und Wintermonaten

		Sommer	Winter
Gesamtleuchtdauer [%]		8,76%	91,24%
Neutralweiß	Ø Leuchtdauer/Woche [h]	0:18:11	3:57:26
	gewichteter Dimmfaktor	99	95
Warmweiß	Ø Leuchtdauer/Woche [h]	0:13:29	1:32:20
	gewichteter Dimmfaktor	98	87
Verhältnis der Leuchtdauer von KW/WW		1,35	2,57

4.6 Lichtsteuerung durch Präsenzmelder

Kombiniert man Strom sparende LED-Technologie mit einer automatisierten Lichtsteuerung, lässt sich bis zu 70 Prozent Energie einsparen. Dabei stellt die Steuerung nur dann Licht zur Verfügung, wenn eine Person anwesend ist. Realisiert wird dies durch Präsenzmelder, die bei einer Präsenzregistrierung das Licht ein- und nach einer bestimmten Nachlaufzeit wieder ausschalten. Der Einsatz einer solchen Steuerung wird erst durch die Eigenschaften der LED-Technologie sinnvoll ermöglicht, die ein schnelles und schaltresistentes Ein- und Ausschalten gewährleistet.

4.6.1 LED-Beleuchtung im Flur

Der in **Abb. 32** schematisch dargestellte Flur wurde mit insgesamt 21 neutralweißen 4000 Kelvin LED-Lichtmodulen der Firma Nimbus ausgestattet. Aufgeteilt war der Flur in sechs voneinander unabhängig angesteuerte Abschnitte. Die Lichtsteuerung in diesen Bereichen reagierte auf Bewegungen. Bei Präsenzregistrierung schaltete sich das Licht in dem jeweiligen Flurabschnitt ein. Nach zehn Minuten ohne erneute Bewegungsregistrierung wurde das Licht wieder vollständig ausgeschaltet. Einzig die beiden Einzelleuchten Lampe vier und Lampe 21 hatten einen Nachlauf von nur einer Minute. Aufgrund der abseits befindlichen Lage der Leuchten konnte eine kurze Nachlaufzeit ohne eine visuelle Beeinträchtigung der in der Nähe befindlichen Arbeitsplätze durch einen häufigen Ein-/Aus-Wechsel ermöglicht werden.

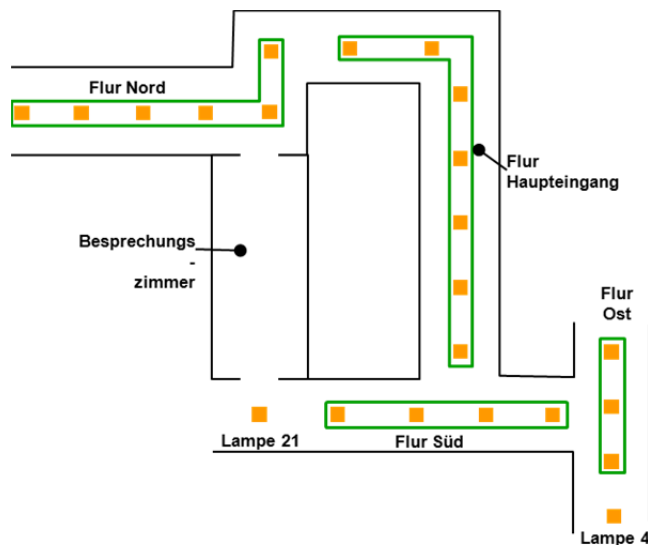


Abb. 32 Schematische Einteilung der Flurbereiche

Für die Auswertung der Flurbeleuchtung wird angenommen, dass das Flurlicht in einer normalen Arbeitswoche ohne präsenzregistrierende Steuerung für 66:19 Stunden ge- leuchtet hätte. Dieser Wert ist aus fünf über das Jahr verteilten Wochen gemittelt worden. Der Vorteil der Präsenzmeldung als Bezugsgröße ist, dass in diesem Wert die Anwesenheit des Sicherheitspersonals frühmorgens und die der Reinigungskräfte spät- abends berücksichtigt werden.

Über den gesamten Betrachtungszeitraum von zwei Jahren wird die Beleuchtungszeit summiert, durch die Anzahl der Wochen geteilt und mithilfe der angenommenen Wo- chenstunden, deren Einsparung berechnet. Für die verschiedenen Flurbereiche ergeben sich somit folgende Werte:

Abb. 33 Leuchtdauer der einzelnen Abschnitte im Flurbereiche

Bezeichnung	Brenndauer [h/Woche]	Ersparnis	Anzahl Lampen	
Flur Büro Süd	51:56	21,68%	4	10 min
Flur Haupteingang	56:27	14,85%	7	
Flur Nord	47:02	29,07%	5	
Flur Ost	53:11	19,80%	3	
Lampe 4	3:45	94,32%	1	1 min
Lampe 21	7:16	89,02%	1	
Ø Einsparung pro Lampe		27,56%		

Für die hochfrequent belauften Flurbereiche ergibt sich eine Einsparung der Beleuchtungszeit von etwa 15 Prozent. Hingegen zeigen die abseits gelegenen Einzeleuchten, bedingt durch die Lage und den kurzen Beleuchtungsnachlauf, eine Beleuchtungszeitreduzierung von 94 Prozent auf. Diese hohen Ausnahmewerte sind unter bestimmten Voraussetzungen möglich und entsprechen nicht der Regel. Dies belegt die durchschnittliche Beleuchtungseinsparung pro LED-Modul von 27,5 Prozent.

Weiterhin ist eine Tendenz zu erkennen, die eine Abhängigkeit zwischen der Anzahl der zusammen angesteuerten Lampen und der Brenndauereinsparung aufzeigt. Je mehr Beleuchtungsmodule gemeinsam angesteuert werden, desto geringer wird das Einsparpotenzial der Brenndauer. Die Einzeleuchten Lampe vier und Lampe 21 zeigen, dass durch die Verkürzung des Beleuchtungsnachlaufs dieser Effekt verstärkt werden kann.

[Aussage 12]

Die Kombination von LED-Beleuchtung mit einer Präsenzmelder-basierten Lichtsteuerung kann in stark frequentierten Flurbereichen Einsparungen bis zu 20 Prozent ergeben. In abseits befindlichen Flurbereichen in Einzelfällen 90 Prozent und mehr.

4.6.2 Steuerung konventioneller Beleuchtungssysteme

Weitere durch Bewegungsmelder gesteuerte Bereiche waren der Kopierraum, das Lager, die Toiletten und die Teeküche. All diese Räume hatten kein Tageslicht durch Fenster. Die Räume waren alle mit T5 Leuchtstoffröhren mit elektrischem Vorschaltgerät (EVG) ausgestattet. Durch die teilweise häufige Benutzung der beleuchteten Bereiche und der hohen Schalteempfindlichkeit der Leuchtstofflampen kam es zu einem erhöhten Wartungsaufwand durch kaputte Leuchtröhren.

Wie bei der Flurbeleuchtung ist auch hier eine theoretische Leuchtdauer ohne Bewegungssteuerung über fünf auf das Jahr verteilte Wochen gemittelt worden. Für eine möglichst exakte Aussage wurden diese Werte für jeden Bereich separat ermittelt. Dabei erreichte die Teeküche Höchstwerte von bis zu 66:46 Stunden durchschnittlicher wöchentlicher Leuchtdauer. Diese wurde häufig frühmorgens erstmals betreten und erst spät abends durch das Reinigungspersonal wieder verlassen.

Werden die durchschnittlich möglichen Einsparungen der Beleuchtungsdauer verglichen, stellt sich eine deutliche Tendenz heraus. Bereiche wie das Lager, die sehr selten benutzt wurden, besitzen ein wesentlich höheres Einsparpotenzial als Bereiche, die häufig benutzt wurden. In diesen wenig benutzten Räumlichkeiten wäre eine bewegungsgesteuerte Beleuchtung nur zu empfehlen, wenn es wahrscheinlich ist, dass ein Ausschalten der Beleuchtung vergessen wird.

Interessanter sind die von vielen Mitarbeitern häufig genutzten Bereiche. Die Teeküche hat, trotz der hohen Nutzungshäufigkeit, das zweitgrößte Einsparpotenzial. Alleine

durch die Bewegungsteuerung lassen sich hier im Durchschnitt 58 Prozent Beleuchtungszeit und somit 58 Prozent des Stromverbrauchs einsparen. Kombiniert mit schaltresistenten und energieeffizienten LED-Leuchten können, ohne Einbußen der Lebensdauer, energiesparende Beleuchtungskonzepte mit hohen Wirkungsgraden realisiert werden.

Ebenso verhält es sich in den Sanitärbereichen. Auch hier könnte man alleine durch eine Bewegungssteuerung die Beleuchtungszeit bis zu 87 Prozent reduzieren. Durch schaltresistente LED-Beleuchtungssysteme ließe sich die Effizienz weiter erhöhen.

Erkenntnisse aus dem Projekt

Bezeichnung	Brenndauer OHNE [h/Woche]	Brenndauer MIT [h/Woche]	Ersparnis
Kopierraum	58:41:54	12:25:54	78,82%
Lager	50:20:22	3:32:33	92,96%
Teeküche	66:46:32	28:02:09	58,01%
WC Damen - Vorraum	44:11:25	5:44:38	87,00%
WC Damen - WC	43:59:27	11:42:24	73,39%
WC Herren - Vorraum	56:20:28	18:17:04	67,55%
WC Herren - WC	56:43:19	35:41:49	37,07%

Abb. 34 Mittels Präsenzmelder gesteuerte Bereiche

[Aussage 13]

Die Kombination einer präsenzregistrierten Lichtsteuerung ohne LED-Technologie erfordert einen erhöhten Wartungsaufwand.

5

Kernaussagen der Studie

[Aussage 1]

Die Steuerung der Beleuchtung sollte nur automatisch erfolgen, wenn es eine manuelle Eingriffsmöglichkeit gibt.

[Aussage 2]

Im Sommer wird tagsüber kaltweißes Licht und erst am Abend warmweißes Licht bevorzugt. Im Winter wird bereits am frühen Nachmittag warmweißes Licht bevorzugt verwendet.

[Aussage 3]

Bei Büroräumen mit mehreren Arbeitsplätzen wird die Beleuchtung weniger individuell gesteuert als in Einzelbüros.

[Aussage 4]

Die Leuchtdauer im Winter beträgt mehr als 80 Prozent der Gesamtleuchtdauer eines Jahres.

[Aussage 5]

Morgens ist das Bedürfnis nach kaltweißem Licht sehr hoch und nimmt über den Tag verteilt ab. Abends ist eine starke Tendenz zu warmweißem Licht vorhanden.

[Aussage 6]

Im Frühling und Sommer wird in Summe ein kälteres Lichtspektrum bevorzugt. Im Herbst und Winter geht die Tendenz zu wärmeren Lichtfarben.

[Aussage 7]

Im Sommer wird eine hellere Beleuchtung benutzt, im Winter eher eine dunklere.

[Aussage 8]

Die individuelle Lichtsteuerung erfolgt meist intuitiv.

[Aussage 9]

In Büros mit mehreren Arbeitsplätzen wird von den Benutzern mehr Kunstlicht eingeschaltet als in Einzelbüros.

[Aussage 10]

In Einzelbüros wird die arbeitsplatzzentrierte Beleuchtung bevorzugt.

[Aussage 11]

Die Möglichkeit, einzelne Lichtmodule individuell anzusteuern, erfolgte primär über ein Interface am Arbeitsplatzcomputer.

[Aussage 12]

Die Kombination von LED-Beleuchtung mit einer Präsenzmelder-basierten Lichtsteuerung kann in stark frequentierten Flurbereichen Einsparungen bis zu 20 Prozent ergeben. In abseits befindlichen Flurbereichen sind es in Einzelfällen 90 Prozent und mehr, die eingespart werden können.

[Aussage 13]

Die Kombination einer präsenzregistrierten Lichtsteuerung ohne LED-Technologie erfordert einen erhöhten Wartungsaufwand.

6

Ausblick

Das Projekt LightWork des Fraunhofer IAO und den gesammelten Daten machen es möglich, viele Aspekte der modernen Beleuchtung aufzuzeigen. Sei es die Energieeinsparung der Flurbeleuchtung – hier können alleine durch präsenzbasiertes Lichtmanagement mehr als ein Viertel der Beleuchtungszeit eingespart werden. Oder farbdynamische Arbeitsplatzbeleuchtungen, bei denen der Anwender je nach Jahres- und Tageszeiten zwischen individuelle Farbtemperaturen wählen kann. Zukünftig werden Beleuchtungssysteme, wie sie im Projekt LightWork installiert wurden, zum Stand der Technik gehören.

Aufgrund der Erkenntnisse derartiger Lichtstudien wird in Zukunft der Beleuchtung von Arbeitsplätzen und Innenräumen eine größere Bedeutung zukommen. Das Zusammenspiel von dynamischer, künstlicher Beleuchtung und die Wirkung auf das Wohlbefinden und die Effizienz des arbeitenden Menschen gewinnt an Bedeutung, die Zusammenhänge werden immer mehr erkannt.

Durch die Ergebnisse dieser Studie können sich zukünftige Forschungsprojekte zum Thema »Licht am Arbeitsplatz« der automatischen, dynamischen Beleuchtung widmen. Die Innenraumbeleuchtung wird den Farbtemperatur- und Helligkeitsbedingungen des Tages- und Jahresverlaufes automatisch angepasst. Die Präferenz von kaltweißer Beleuchtung im Sommer und zu gewissen Tageszeiten auch im Winter kann ein entscheidender Erfolgsfaktor für die Durchführung zukünftiger, farbdynamischer Lichtprojekte sein. Denn diese Erkenntnisse haben sich unter Realbedingungen über einen langen Zeitraum herauskristallisiert.

Um für künftige Beleuchtungssysteme auf die Wünsche der Anwender einzugehen, sollte eine automatische Steuerung mit der Möglichkeit einer manuellen Änderung vorgesehen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] International Energy Agency IEA (Hrsg.): Light's Labour's Lost –Policies for Energy-Efficient Lighting [<http://www.iea.org/textbase/npsum/III.pdf>, Stand 12.03.2015].
- [2] Klein, D. C., Moore, R. Y., Reppert, S. M.: Suprachiasmatic Nucleus: The Mind's Clock. New York 1991.
- [3] Brainard, G. C. et.al.: Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor. In: The Journal of Neuroscience. Stanford 2001, S. 21(16): 6405-6412.
- [4] Chellappa, S. L. et.al.: Non-Visual Effects of Light on Melatonin, Alertness and Cognitive Performance: Can Blue-Enriched Light Keep Us Alert? In: PLOS One, San Francisco 2011.
- [5] Berson, D. M., Dunn, F. A., Takao, M.: Phototransduction by Retinal Ganglion Cells That Set the Circadian Clock.In: Science Magazine 8, S. 1070-1073, Washington 2002.

Impressum

Kontaktadresse:
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
www.iao.fraunhofer.de

Achim Pross

Telefon: +49 711 970 – 2149
achim.pross@iao.fraunhofer.de

Oliver Stefani

Telefon: +49 711 970 – 2177
oliver.stefani@iao.fraunhofer.de

Dr. Matthias Bues

Telefon: +49 711 970 – 2232
matthias.bues@iao.fraunhofer.de

Competence Team Visual Technologies

LightFusionLab

www.vt.iao.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich all seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.