

Energieeffiziente Beleuchtung unter Berücksichtigung von Tageslicht und verschiedenen Nutzeranforderungen

vorgelegt von
Dipl.-Ing.
Stefan Gramm
geb. in Berlin

von der Fakultät IV – Elektrotechnik und Informatik
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzende: Prof. Dr. Sibylle Dieckerhoff
Gutachter: Prof. Dr. Stephan Völker
Prof. Dr. Alexander Rosemann
Prof. Dr. Heinrich Kaase

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 18. September 2015

Berlin 2015
D 83

Vorbemerkung

Ich danke Prof. Heinrich Kaase und Prof. Stephan Völker für die Überlassung des Themas und die professionelle Betreuung während der Erstellung meiner Dissertation. Ebenfalls danke ich Prof. Alexander Rosemann für die konstruktiv kritische Begutachtung der Arbeit. Weiterhin bedanke ich mich bei den studentischen Mitarbeitern Arne Bauer, Ulla Maria Hartwig und Christin Petzold für ihre hervorragende Mitarbeit in den Forschungsprojekten und die Erstellung herausragender Studienabschlussarbeiten. Mein herzlicher Dank gilt den ehemaligen und aktiven Mitarbeitern des Fachgebiets Lichttechnik, stellvertretend für alle und in ganz besonderem Maße Dr. Sırrı Aydınlı.

Die vorliegende Arbeit entstand von 2008 bis 2014 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Berlin. Die Inhalte der Arbeit wurden in den folgenden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung geförderten Forschungsprojekten entwickelt. Die Dissertation ist nach Genehmigung in Teilen in den jeweiligen Projektberichten im Voraus veröffentlicht worden. Die wissenschaftliche Planung und verwaltungstechnische Organisation der Forschungsprojekte übernahm Prof. Heinrich Kaase. Für die Projektdurchführung unerlässliche Drittmittel stellten die Firmen OSRAM AG, ERCO GmbH sowie SCHÜCO International KG zur Verfügung.

„Energieoptimierte Beleuchtung bei gleichzeitiger Verbesserung der Lebensqualität durch Nutzung von Tageslicht und neuer Lampen- und Vorschalttechnik“ (BMW, 2007 – 2011)

„Energieeffiziente Beleuchtung in Museen unter besonderer Berücksichtigung der Tageslichtnutzung und unter Einbeziehung konservatorischer Aspekte“ (BMW, 2013 – 2014)

„Evaluierung der LED-Beleuchtung im Bundesrechnungshof (BRH), Bonn, aus Sicht des Energieumsatzes“ (BBSR, 2012 – 2013)

„Tageslichtnutzung in Wohn- und Arbeitsräumen zur Verbesserung der visuellen Behaglichkeit und der Aufenthaltsqualität“ (BBSR, 2012 – 2013)

Kurzfassung

Die Notwendigkeit und die Möglichkeiten der Sanierung von Beleuchtungsanlagen werden in drei Nichtwohngebäuden unterschiedlicher Nutzungsart untersucht. Die berechneten und vor Ort gemessenen Energieumsätze der Altanlagen und der Neuplanungen für ein Schulgebäude, mehrere Ausstellungssäle in Museen und 40 Büroräume eines Verwaltungsgebäudes ergaben erhebliche Einsparpotenziale von bis zu 70 %. Mit Einführung der LED-Technik ist erstmal eine hohe Energieeffizienz mit gleichzeitig deutlich verbesserter Lichtqualität möglich. So ist beispielsweise für den Einsatz in Museen keine UV-Filterung nötig und das relative Schädigungspotenzial wird deutlich abgesenkt.

Zur weiteren Erhöhung der Energieeinsparung bei Tageslichtnutzung gibt DIN 5034-1 einen Faktor von 0,6 an, um den bei seitlichem Tageslichteinfall der Wertungswert der Beleuchtungsstärke für horizontale Sehaufgaben reduziert werden darf. Da diese Angabe bisher nur auf Berechnungen beruhte, wurden in einem Probandentest unter kontrollierten Laborbedingungen die Auswirkungen des seitlichen Tageslichteinfalls gegenüber einer konventionellen künstlichen Beleuchtungsanlage bei unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten der Sehaufgabe weitergehend untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass für die Bewältigung der Sehaufgabe sogar noch kleinere Faktoren zu begründen wären. Jedoch fielen die Bewertungen der Annehmlichkeit durch die Probanden bei Faktoren $<0,6$ erheblich schlechter aus. Der in der Norm vorgeschlagene Faktor von 0,6 ist damit als Kompromiss für eine bestmögliche Energieeinsparung bei gleichzeitig guter Voraussetzung zur Bewältigung der Sehaufgaben und einer angenehmen Beleuchtungssituation bestätigt.

Abstract

The need for and the possibilities for retrofitting of lighting systems are investigated in three non-residential buildings types. The energy consumption of the existing lighting systems as well as new state-of-the-art lighting systems are calculated and measured for a school building, several exhibition halls in musea and 40 office spaces of an administrative building. The comparison of the measured energy consumption revealed significant energy savings potentials of up to 70 %. The combination of high energy efficiency with significantly improved light quality has become possible through the introduction of LED technology. For example there is no need for UV-filtering in musea anymore while the relative damage potential is significantly lowered.

To further increase energy savings when using daylight the German industry standard DIN 5034-1 indicates a factor of 0.6 to which the maintained illuminance may be reduced with lateral daylight incidence on a horizontal task area. Since this factor was only based on calculations until now, the effects of lateral light incidence compared to a conventional artificial lighting system with different surface textures of the visual task were further investigated in a subject test under controlled lab conditions. The test showed that for dealing with the visual task even smaller factors can be justified. However, the evaluation of convenience brought significantly worse ratings when using factors lower than 0.6. The proposed factor of 0.6 is thus confirmed as a compromise for the best possible energy savings with good precondition to deal with the visual tasks and also well rated lighting situations.

Inhalt

1	Einführung	1
2	Fragestellungen	3
2.1	Energieeffiziente Beleuchtung	3
2.1.1	Schulgebäude	3
2.1.2	Ausstellungsräume in Museen	3
2.1.3	Büroräume in Verwaltungsgebäuden	4
2.2	Ausreichende Beleuchtungsstärke bei seitlichem Tageslichteinfall	4
3	Energieeffiziente Beleuchtung	7
3.1	Schulgebäude	7
3.1.1	Beschreibung der Schule und der untersuchten Räume	7
3.1.2	Anforderungen an die Beleuchtung in Schulen	9
3.1.3	Beleuchtung in der Königin-Luise-Schule	10
3.1.4	Energetische Bewertung der Beleuchtungsanlage	16
3.1.5	Monitoring der Schulbeleuchtung	22
3.1.6	Zusammenfassende Betrachtung zur Schulbeleuchtung	30
3.2	Ausstellungsräume in Museen	31
3.2.1	Anforderungen an die Beleuchtung in Museen	31
3.2.2	Einfache Dosimeter für die Praxisanwendung	34
3.2.3	Sanierung der künstlichen Beleuchtung im Bode-Museum Berlin	42
3.2.4	Beleuchtung mit Oberlicht in der Kunsthalle Mannheim	57
3.2.5	Monitoring der Museumsbeleuchtung	62
3.2.6	Zusammenfassende Betrachtung zur Museumsbeleuchtung	70
3.3	Büroräume in Verwaltungsgebäuden	71
3.3.1	Anforderungen an die Beleuchtung in Büroräumen	71
3.3.2	Tageslichtbeleuchtung	72
3.3.3	Künstliche Beleuchtungsanlage	73
3.3.4	Energetische Bewertung der Beleuchtungsanlage	75
3.3.5	Monitoring der Bürobeleuchtung	77
3.3.6	Zusammenfassende Betrachtung zur Bürobeleuchtung	82

4	Ausreichende Beleuchtungsstärke bei seitlichem Tageslichteinfall	83
4.1	Reflexblendung und Kontrastwiedergabefaktor	83
4.2	Versuchsdesign	85
4.2.1	Parameter	85
4.2.2	Methodik	86
4.2.3	Operationalisierung	90
4.3	Aufbau des Versuchsraums mit künstlichem Himmel	90
4.4	Messtechnische Erfassung	95
4.4.1	Reflexionsgrade	95
4.4.2	Tageslichtquotient	95
4.4.3	Gleichmäßigkeit	96
4.4.4	Leuchtdichteverteilung	97
4.4.5	Glanzeigenschaften des Papiers	99
4.4.6	Messung des Kontrastwiedergabefaktors	100
4.5	Versuchsablauf	107
4.6	Auswertung	108
4.6.1	Beschreibung der Probanden	108
4.6.2	d2-R Test	110
4.6.3	Fragebogen	114
4.6.4	Subjektive untere Annehmlichkeitsgrenze	121
4.7	Zusammenfassende Betrachtung des Probandenversuchs	123
5	Zusammenfassende Bewertung	125
6	Literatur	127

1 Einführung

Zur Sicherung der Versorgung kommender Generationen muss neben dem Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien auch die Einsparung von Energie weiter optimiert werden. Dies kann bei gleichbleibendem Standard nur durch eine höhere Energieeffizienz in allen Bereichen erzielt werden. Gerade im Bereich von Gewerbe, Handel und Dienstleistungen ist der Umsatz an elektrischer Energie für die Beleuchtung besonders hoch. Nach [AGEB, 2013] liegt der relative Anteil bei 41,5 %. In den anderen betrachteten Bereichen wie Industrie, Haushalte und Verkehr werden lediglich 6,4 % der elektrischen Energie für die Beleuchtung aufgewendet. Dies bedeutet, dass Optimierungen bezüglich der Energieeffizienz von Beleuchtungsanlagen besonders in Büros und öffentlichen Gebäuden wichtig sind. Unter Berücksichtigung des für die elektrische Energie nach [ENEV 2014] anzusetzenden und gegenüber anderen Energieträgern hohen Primärenergiefaktors von 2,8 wird deutlich, dass vermeintlich kleine Verbesserungen im Bereich der Beleuchtung relativ große Auswirkungen auf den CO₂-Ausstoß haben.

Im Jahr 2002 erließ das Europäische Parlament und der Rat erstmals die „Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden“. Diese wurde zuletzt 2010 in einer Neufassung mit höheren Anforderungen verschärft [2010/31/EU]. Die Umsetzung in deutsches Recht geschieht seit 2007 durch die Änderung der Energieeinsparverordnung [ENEV 2007]. Diese gibt Planern und Betreibern von Gebäuden verbindliche Vorgaben u. a. bezüglich des Wärmeschutzes, der Heizungs- und Warmwasserbereitungsanlagen sowie raumluftechnischer Anlagen. Seit dieser Änderung wird für die Bilanzierung des Endenergiebedarfs eines Gebäudes erstmal auch die Beleuchtung berücksichtigt. Die letzte Änderung dieser Verordnung im Jahr 2013 [ENEV 2014] setzt nun auch die verschärften Anforderungen der Neufassung der EU-Richtlinie um. Die einheitliche Berechnung und Bilanzierung des Endenergiebedarfs eines Gebäudes wird seit 2007 in der Vornorm [DIN V 18599] festgelegt. Teil 4 dieser Vornorm beschreibt das für die Bewertung der Beleuchtung durchzuführende Rechenverfahren, die dafür erforderlichen Nutzungsrandbedingungen finden sich in Teil 10 [de Boer u.a., 2006].

Laut [ZVEI, 2013] sind nach aktuellem Stand in Nichtwohngebäuden 75 % aller Beleuchtungsanlagen älter als 25 Jahre und gelten damit als veraltet. Für 80 % der Neubauten findet keine ausreichende Lichtplanung statt, weshalb Effizienzpotentiale nicht genutzt werden. Dabei ermöglicht die in den letzten 25 Jahren fortgeschrittene Entwicklung im Bereich der Leuchtstofflampen von T12 über T8 nach T5 sowie der zum Betrieb nötigen Vorschaltgeräte von konventionellen (KVG) über verbesserte (VVG) zu elektronischen (EVG) Vorschaltgeräten Energieeinsparpotenziale von über 50 % gegenüber der veralteten Technik. Wird dies mit darauf angepassten modernen Leuchten kombiniert, ist mit einer weiteren Verringerung des Energiebedarfs zu rechnen. Aufgrund der jüngsten Entwicklungen im Bereich der Halbleitertechnik ist die Leuchtdiodentechnik mittlerweile auch in der Allgemeinbeleuchtung als energieeffiziente Lichtquelle Stand der Technik. Besonders bei Kombination mit zusätzlichen Funktionen wie Dimmung spielt sie ihre Vorteile aus. Auch sind nach [ZVEI, 2013] 85 % der veralteten Bestandsanlagen nicht mit Präsenzüberwachung oder tageslichtabhängiger Regelung ausgestattet, die nach [Szerman, 1994] aufgrund des Ein- und Ausschaltverhaltens der Nutzer einen erheblichen Einfluss auf den Energieumsatz der Beleuchtung in Büroräumen haben.

All dies zeigt, dass die Sanierung von Beleuchtungsanlagen besonders im Bereich öffentlicher Gebäude und in Bürogebäuden nötig ist, um die Energieeinsparpotenziale moderner Beleuchtungssysteme optimal zu nutzen. In dieser Arbeit wird das Einsparpotenzial neu geplanter Beleuchtungsanlagen gegenüber den Bestandssystemen und der Standardlösung des Referenzgebäudes aufgezeigt. Dies wird an drei typischen Beispielen mit unterschiedlichen Anforderungen durchgeführt. Weiterhin wird auf das Einsparpotenzial durch Tageslichtnutzung eingegangen.

Diese Felduntersuchungen werden in einem Laborversuch fortgeführt, in dem die Vorteile des seitlichen Lichteinfalls durch Tageslicht bei typischen Büroaufgaben im Detail untersucht werden. Denn auch wenn die Sanierung der Beleuchtungstechnik einen erheblichen Anteil an der Einsparung hat, sind weitere Potenziale durch eine optimierte Regelung zu erschließen. Das Problem bestehender Regelungssysteme liegt darin, dass in der Regel über einen an der Decke verbauten Sensor über die Messung einer mittleren Strahldichte auf eine konstante Beleuchtungsstärke geregelt wird. Mögliche Unterschiede aufgrund unterschiedlicher Lichteinfallsrichtungen werden dabei nicht berücksichtigt. Die günstigen Effekte des Tageslichts bleiben dabei ungenutzt. Bisherige verbindliche Regeln und Anforderungen in [DIN 5034-1] beziehen sich auf über 30 Jahre alte Untersuchungen, die auf theoretischen Berechnungen und Simulationen beruhen. Durch den Laborversuch werden diese Vorgaben unter kontrollierten Bedingungen mit einem Probandentest überprüft.

2 Fragestellungen

Aus den in der Einführung geschilderten Hintergründen ergeben sich unterschiedliche Fragestellungen, die in dieser Arbeit in zwei Bereiche gegliedert untersucht werden. Im Teil „Energieeffiziente Beleuchtung“ werden schwerpunktmäßig besonders energieeffiziente künstliche Beleuchtungsanlagen in drei verschiedenen Typen von Nichtwohngebäuden untersucht. Eine detaillierte Betrachtung des Einflusses der Lichteinfallrichtung bei Tageslichtbeleuchtung in Büroräumen wird im Abschnitt „Ausreichende Beleuchtungsstärke bei seitlichem Tageslichteinfall“ dargestellt.

2.1 Energieeffiziente Beleuchtung

2.1.1 Schulgebäude

Schulgebäude sind ein typisches Beispiel für Nichtwohngebäude, die meist von öffentlicher Hand betrieben werden. Aufgrund zu geringer finanzieller Mittel werden diese Gebäude oft „auf Verschleiß gefahren“ und nur die zum Erhalt des Betriebs notwendigen Reparaturen vorgenommen. Flächendeckende nachhaltige Investitionen finden in der Regel nicht statt. Dabei ist nominell durch den Austausch veralteter Anlagen durch moderne Beleuchtungslösungen eine erheblicher Energieeinsparung zu erwarten. Hier stellt sich die Frage, welche Einsparung bei der Beleuchtung in einem realen Schulgebäude tatsächlich möglich ist. Dazu wird der Energieumsatz der Bestandsanlage, des EnEV-Referenzgebäudes und einer neuen detaillierten Fachplanung nach [DIN V 18599-4] berechnet. Ergänzend wird durch Langzeitmessungen die innerhalb eines Jahres tatsächlich aufgenommene Energie bestimmt. Weiterhin kann aus den Messungen verschiedener Räume der Einfluss unterschiedlicher Tageslichtversorgungen auf den Energieumsatz bestimmt werden.

Es werden Antworten auf folgende Fragen erarbeitet:

- Wie groß ist das Einsparpotential der Energie für die Beleuchtung von der Bestandsanlage zum Referenzgebäude und zur Neuplanung in einem Schulgebäude mit veralteter Beleuchtungstechnik?
- Welchen Einfluss hat die Tageslichtversorgung auf den Energieumsatz?
- Welche Einflüsse ergeben sich durch tageslichtabhängige Regelung und Präsenzdetektoren?

2.1.2 Ausstellungsräume in Museen

Bei der Beleuchtung der Ausstellungsgüter in Museen haben der Objektschutz und eine sehr gute Lichtqualität noch vor der Energieeffizienz die höchste Priorität. Durch die neuen Möglichkeiten der LED-Technik, wie z. B. einstellbare ähnlichste Farbtemperatur, Dimmbarkeit oder aufgrund unterschiedlicher verwendeter LED-Module verschiedene Lichtausbeuten ist seit Einführung dieser Technik erstmals auch in der Museumsbeleuchtung eine optimale Erfüllung aller drei Aspekte möglich.

Weiter bleibt auch die Problematik zu hoher Beleuchtungsstärken und objektschädigend wirksamer Bestrahlungsstärken in Tageslichtmuseen bestehen. Dies kann entweder über aufwändige, dynamisch geregelte Tageslichtsysteme beherrscht werden oder bei feststehenden Systemen durch eine

entsprechend niedrig ausgelegte Tageslichtversorgung mit nahezu dauerhaft arbeitender geregelter künstlicher Ergänzungsbeleuchtung.

Außerdem stellt sich als grundsätzliches Problem in der Praxis oft die Überprüfung der Objektschädigung heraus. Es existieren verschiedene einfache Dosimeter, deren Eignung für den Einsatz im Museum überprüft werden soll.

Daraus ergeben sich die folgenden Fragestellungen:

- Welche einfachen Dosimeter sind für den Einsatz im Museum geeignet?
- Welche Energieeinsparpotentiale ergeben sich durch Sanierung der künstlichen Beleuchtung in Ausstellungsräumen?
- Worauf muss bei der Auswahl von LED-Leuchten im Museum besonders geachtet werden?
- Welche Folgen ergeben sich für den Objektschutz durch den Austausch von HGL-Strahlern durch LED-Strahler?
- Welchen Einfluss auf den Energieumsatz hat die tageslichtabhängige Regelung der künstlichen Beleuchtung in einem Oberlichtsaal?

2.1.3 Büroräume in Verwaltungsgebäuden

Stehleuchten haben sich als eine besondere Form der Bürobeleuchtung etabliert, die durch eine flexible Aufstellung an sich verändernde Nutzungen angepasst werden kann. Auch hier ermöglicht die LED-Technik besonders energieeffiziente Lösungen mit Zusatzfunktionen wie Präsenzüberwachung oder Dimmung. Gerade bei letzterem spielt die LED aufgrund der besseren Dimmkennlinie ihre Vorteile gegenüber herkömmlichen Leuchtstofflampen-Lösungen aus. Dies ist gerade auch bei tageslichtabhängiger Regelung von Vorteil. Bei der Untersuchung von 40 Büros in einem Verwaltungsgebäude ist daher zusätzlich zum Einsparpotenzial durch Sanierung auch der Einfluss der Tageslichtversorgung auf den Energieumsatz von Interesse.

Dazu werden folgende Fragen beantwortet:

- Wie hoch fällt die Reduzierung des Jahresendenergiebedarfs bei Ersatz der Bestandsanlage durch LED-Stehleuchten aus?
- Welchen Einfluss hat die Tageslichtversorgung auf den Energieumsatz?

2.2 Ausreichende Beleuchtungsstärke bei seitlichem Tageslichteinfall

Wenn der Beschluss gefasst wird, die Beleuchtungsanlagen eines Gebäudes zu sanieren, werden im gleichen Zuge zunehmend häufiger auch tageslichtabhängige Beleuchtungssteuerungen und -regelungen integriert, um ein Maximum an Energie bei der Beleuchtung einzusparen.

[Petry, 1984] zeigt eine in herkömmlichen Regelungssystemen nicht berücksichtigte Möglichkeit zur Energieeinsparung. Anhand des Kontrastwiedergabefaktors (CRF) überprüft er rechnerisch die Mindestbeleuchtungsstärken am Büroarbeitsplatz für künstliche Beleuchtungsanlagen und seitlichen Tageslichteinfall bei bedecktem Himmelszustand. Daraus resultierend schlägt er eine Mindestbeleuchtungsstärke für die Beleuchtung mit seitlich einfallendem Tageslicht vor. Nach seinem Urteil wird bei gleicher Beleuchtungsstärke von künstlicher Beleuchtung und seitlichem Tageslicht, bei letzterem eine höhere Sehleistung erzielt. Er empfiehlt daher, 50 % bis 60 % der Nennbeleuchtungsstärke bei

seitlich einfallendem Tageslicht anzusetzen. Seine Ergebnisse wurden in die DIN 5034-1 aufgenommen: „Die durch das Tageslicht allein gegebene Beleuchtung in Arbeitsräumen mit Fenstern, in denen die Sehaufgaben auf horizontalen Flächen ausgeübt wird [sic], gilt – bedingt durch den seitlichen Lichteinfall – solange als ausreichend, wie die Beleuchtungsstärke mindestens das 0,6-fache des in [DIN EN 12464-1] angegebenen Wertes der Beleuchtungsstärke \bar{E}_m beträgt.“

Die Festlegung der Mindestbeleuchtungsstärke erfolgt dabei nach Tabelle 5.26 aus DIN EN 12464-1. Für die Arbeitsplatzbeleuchtung in Büros ist ein Wert der Beleuchtungsstärke von 500 lx angegeben. Bei einer die künstliche Beleuchtung automatisch einschaltenden tageslichtabhängigen Regelung wird somit aber immer auf 500 lx geregelt, obwohl die Beleuchtungsstärke durch das seitliche Tageslicht noch ausreichend wäre. Damit bleiben hierbei erhebliche Energieeinsparpotenziale ungenutzt. Dabei ist zu beachten, dass diese Verringerung von \bar{E}_m nur für horizontale Sehaufgaben und seitlich einfallendes Tageslicht gilt. Daher können nur Aussagen über Büroarbeitsplätze getroffen werden, die senkrecht zum Fenster angeordnet sind. Wenn auch Bildschirmarbeitsplätze die Regel sind, fallen nach [Markytán, 2008] noch 20 % der Tätigkeiten im Büro als Schreib- und Lesearbeiten aus.

Petrys Berechnungsergebnisse wurden bisher nicht durch Probandenversuche gesichert. Daher muss nicht zwingend gelten, dass die von Petry gefundenen höheren CRF-Werte bei seitlichem Lichteinfall auch einen Einfluss auf die Sehleistung haben. Deshalb wird ein Probandenversuch durchgeführt, der die folgenden Forschungshypothesen untersucht:

- Wenn das Tageslicht von der Seite einfällt, verringert sich die für die gleiche Sehleistung notwendige Beleuchtungsstärke im Vergleich mit einer künstlichen Allgemeinbeleuchtung. Die Verringerung der Beleuchtungsstärke ist mit dem Faktor 0,6 zu quantifizieren.
- Die Oberflächeneigenschaften des Papiers und die damit zusammenhängenden kontrastmindernden Effekte sind Ursache der geringeren Sehleistung bei direkter Beleuchtung, wobei gilt: Je glänzender die Papieroberfläche ist, desto niedriger fällt die Sehleistung bei direkter Beleuchtung im Vergleich zum seitlichen Tageslichteinfall aus.
- Die Unterschiede der Sehleistungen lassen sich durch den CRF beschreiben.
- Die Vorteile des seitlichen Tageslichteinfalls führen bei gleicher Beleuchtungsstärke auf der Sehaufgabe zu einer höheren Annehmlichkeit als bei direkter künstlicher Allgemeinbeleuchtung.

3 Energieeffiziente Beleuchtung

Ein wesentliches Merkmal für eine gute Beleuchtung ist neben der Einhaltung lichttechnischer Anforderungen eine energieeffiziente Ausführung der Beleuchtungsanlage. Im Folgenden wird die Sanierung von Beleuchtungsanlagen an drei realen Beispielen mit unterschiedlichen Nutzungsprofilen (Schulgebäude, Museen, Verwaltungsgebäude) dargestellt. Dabei werden die Energieeinsparpotenziale durch Vergleich von Berechnungen und Messungen der Bestands- und Neuanlagen aufgezeigt. Mittels eines Langzeitmonitorings werden zusätzlich die Energieumsätze durch die reale Nutzung bestimmt.

3.1 Schulgebäude

Beispielhaft für eine Vielzahl von bestehenden Schulgebäuden wurde im Jahr 2010 für die Königin-Luise-Schule in Berlin-Dahlem das Energieeinsparpotential durch eine Sanierungsplanung der Beleuchtungsanlage ermittelt. Für die gesamte Schule wurde die bestehende Beleuchtungstechnik aufgenommen und mit dem nach dem Verfahren der DIN V 18599-4 ermittelten Endenergiebedarf für das Referenzgebäude verglichen [Petzold, 2011]. Zusätzlich wurde eine besonders energieeffiziente Neuplanung der Beleuchtungsanlage durchgeführt und in vier ausgewählten Klassenräumen realisiert.

Für das Monitoring des tatsächlichen Energieumsatzes wurde in diesen vier Klassenräumen mit Hilfe einer dezentralen Messtechnik über den Zeitraum eines Jahres die elektrische Leistungsaufnahme durch die Beleuchtung ermittelt und gespeichert. Zur Klassifizierung der Beleuchtungssituation, die für die Bewertung nach der [ENEV 2009] wesentlich ist, wurden die Klassenräume bezüglich der Tageslichtversorgung und der künstlichen Beleuchtung umfangreich untersucht und vermessen.

3.1.1 Beschreibung der Schule und der untersuchten Räume

Die Privatschule der Königin-Luise-Stiftung in Berlin-Dahlem beherbergt eine Grundschule, eine Real- bzw. Sekundarschule, ein Gymnasium sowie ein Internat. Auf dem Schulgelände befinden sich vier Gebäude. In dem etwa 100 Jahre alten Altbau sind neben einer Vielzahl kleiner Unterrichtsräume auch die Wohnbereiche des Internats untergebracht. Ein neuerer Turnhallenanbau beinhaltet neben zwei Sporthallen weitere Fachräume. Im zweiten Anbau sind ausschließlich Unterrichtsräume zu finden. Das vierte Gebäude ist ein Neubau, in dem sich die Grundschule befindet. Dieser ist bereits mit einer modernen Beleuchtungsanlage ausgestattet, sodass er in der Bewertung außer Acht gelassen wurde. In den drei übrigen Gebäuden wurden nur die Unterrichtsbereiche einschließlich der Turnhallen und dazu gehörige Nebenflächen betrachtet. Sämtliche Internatsflächen sowie die Bereiche der Schulküche, die für die Versorgung der Schüler dient, wurden nicht näher untersucht. Die so definierte relevante Bestandsanlage erstreckt sich daher im Altbau über eine Fläche von ca. 1660 m², im Turnhallenanbau über ca. 1330 m² und im zweiten Anbau („Würfel“) über ca. 1280 m². Alle drei Gebäude wurden meist zusammengefasst betrachtet, es handelt sich also um eine Gesamtfläche von 4270 m².

In Abbildung 1 und Abbildung 2 sind die Grundrisse des Altbaus mit den darin ausgewählten Räumen dargestellt. Die für das Monitoring einer energieeffizienten Beleuchtung dienenden Räume wurden so ausgewählt, dass sie bezüglich der Orientierung, des Stockwerks und der Tageslichtversorgung unterschiedliche Charakteristika aufweisen.

Zu bemerken ist, dass die Klassenräume im Altbau mit ca. 32 m² im Vergleich zu Räumen anderer Schulen relativ klein sind. Deshalb sind jedoch auch die Schülerzahlen mit ca. 20 Schülern pro Klasse sehr gering, was Teil des Schulkonzeptes ist.

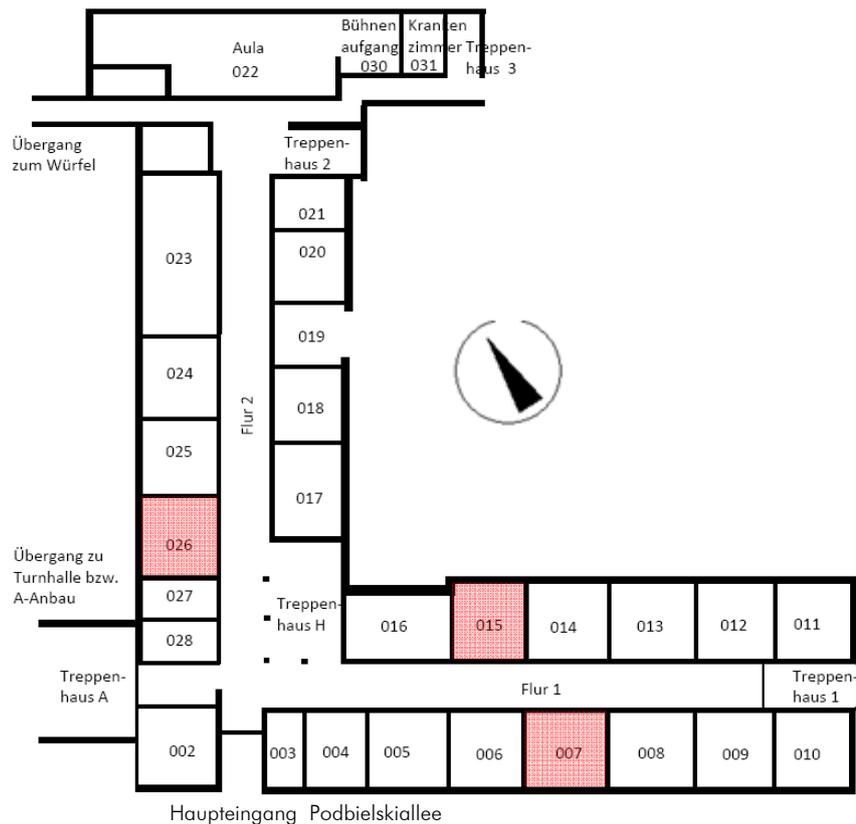


Abbildung 1: Grundriss EG Altbau Königin-Luise-Stiftung und untersuchte Räume

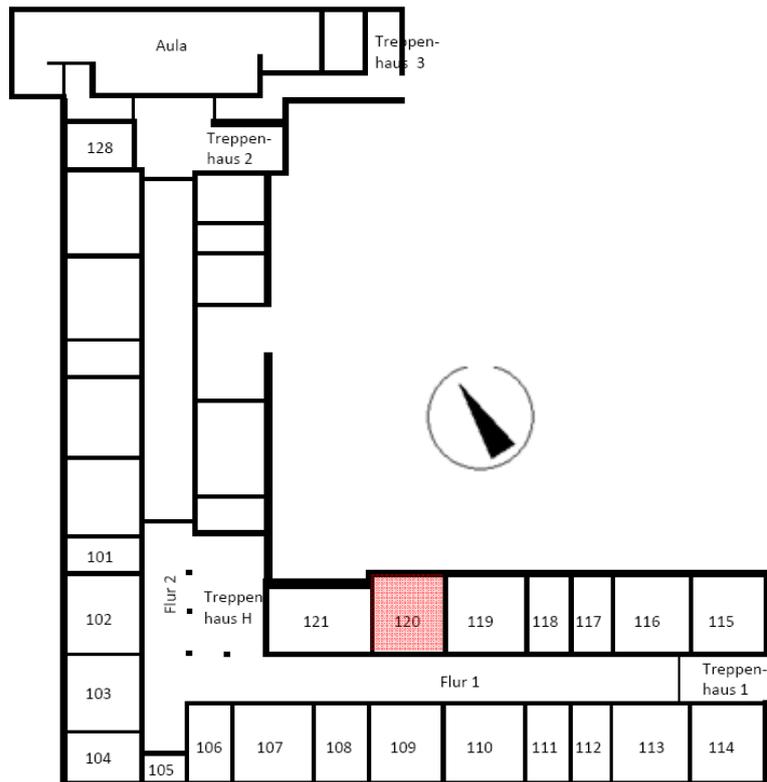


Abbildung 2: Grundriss 1.OG Altbau Königin-Luise-Stiftung und untersuchte Räume

3.1.2 Anforderungen an die Beleuchtung in Schulen

Bei der Beleuchtung von Schulklassenräumen darf nach DIN EN 12464-1 der Wertungswert der Beleuchtungsstärke \bar{E}_m im Bereich der Sehaufgabe von 300 lx nicht unterschritten werden. Zusätzlich wird für den Bereich der Wandtafeln ein \bar{E}_m von 500 lx gefordert. Diese Zusatzanforderung wird jedoch von den Bestandsanlagen in vielen Fällen nicht erfüllt, weshalb bei der Neuplanung oft zusätzliche Leuchten integriert werden müssen. Dies kann zu höheren installierten Leistungen führen als im Bestand. Ähnliche Probleme können in weiteren Bereichen des Schulgebäudes wie Verkehrsflächen oder Fachräumen auftreten, wenn diese vorher nicht normgerecht beleuchtet wurden.

3.1.3 Beleuchtung in der Königin-Luise-Schule

Tageslichtversorgung

Zur Beurteilung der Versorgung eines Raumes mit Tageslicht ist in DIN 5034-1 der Tageslichtquotient D wie folgt definiert:

$$D = \frac{E_p}{E_a} \cdot 100\%$$

E_p Beleuchtungsstärke in einem Punkt im Raum

E_a Horizontalbeleuchtungsstärke bei vollkommen bedecktem Himmel im Freien ohne Verbauung

Der Tageslichtquotient hat im Falle des vollkommen bedeckten Himmels nach DIN 5034-1 für einen Punkt im Innenraum einen konstanten Wert. Bei der Ermittlung des Tageslichtquotienten ist darauf zu achten, dass bei der Messung im Innenraum keine weitere künstliche Lichtquelle vorhanden ist. Die Beleuchtungsstärke im Freien sollte bei völlig unverbautem Himmel gemessen werden. Der Himmelszustand bezüglich des vollkommen bedeckten Himmels sollte nach [DIN 5034-5] überprüft werden. Beide Messungen der Beleuchtungsstärke müssen auf Grund der Dynamik des Tageslichts zeitgleich erfolgen.

Zur Bewertung der Ergebnisse sind in der DIN V 18599-4 die in Tabelle 1 gegebenen Klassen für den Tageslichtquotienten für den Rohbau festgelegt. Unter Berücksichtigung der Einflüsse der Verglasung, Versprossung, der Verschmutzung sowie des nicht senkrechten Lichteinfalls vermindern sich die Werte für die reale Nutzung um ca. 50 %.

Tabelle 1: Klassifizierung für die Tageslichtversorgung über den Tageslichtquotient D

Klassifizierung	Tageslichtquotient D in % für Rohbauöffnung nach DIN V 18599-4	Tageslichtquotient D in % bei installierten Fenstern
gut	≥ 6	≥ 3
mittel	4 – 6	2 – 3
gering	2 – 4	1 – 2
keine	< 2	< 1

Abbildung 3 zeigt beispielhaft die Verteilung des Tageslichtquotienten im Raum 007. Gemessen wurde mit 1,5 m Rastermaß in einem 3x3 Raster auf den Schultischen, damit entspricht die Nutzebene etwa 0,72 m Höhe. Es ist eine deutliche Erhöhung des Tageslichtquotienten zu den Fenstern hin zu erkennen. Jedoch zeigt das Diagramm auch, dass im größten Teil des Raumes nach DIN V 18599-4 keine bzw. nur eine geringe Tageslichtversorgung stattfindet.

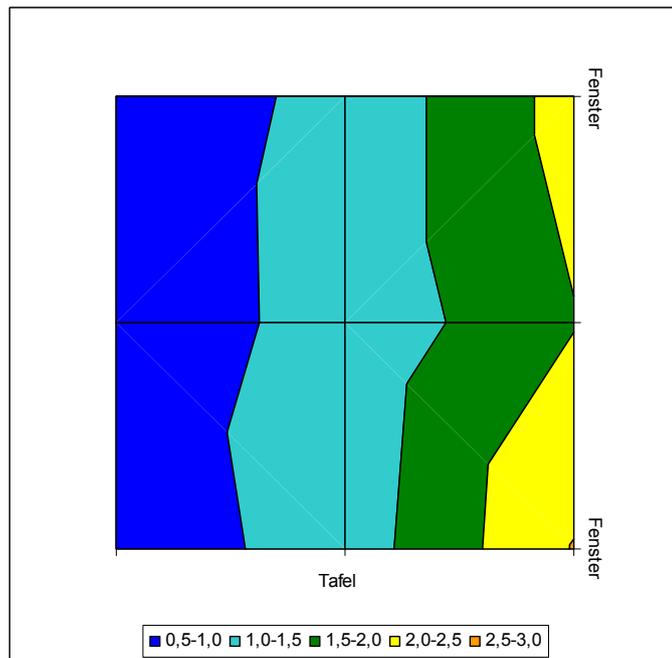


Abbildung 3: Verteilung des Tageslichtquotienten in Raum 007

In Tabelle 2 sind die jeweils in der Raummitte ermittelten Werte des Tageslichtquotienten für alle vier Klassenräume eingetragen.

Tabelle 2: Ermittelte Werte des Tageslichtquotienten in der Raummitte (Klassifizierung nach Tabelle 1)

Raum	Tageslichtquotient D in %	Tageslichtversorgung
007	1,1	gering
015	1,5	gering
026	3,1	gut
120	2,0	mittel

Die schon bei der Auswahl der Räume erwarteten Unterschiede sind deutlich zu sehen. Der nach Nord-West ausgerichtete Raum 026 hat als einziger eine gute Tageslichtversorgung in der Mitte des Raumes. Der Grund hierfür liegt im Wesentlichen an der relativ großen freien Fläche des Schulhofes vor den Fenstern und somit einer geringeren Verbauung. Im Vergleich dazu sind die anderen Räume durch Vegetation und teilweise durch seitliche Verbauung verschattet. In Richtung Nord-Ost (Räume 015 und 120) stehen einzelne große Bäume, die auch im 1. Obergeschoss noch für Verschattung sorgen. Der nach Süd-West orientierte Raum 007 ist wesentlich von großen alten Straßenbäumen verschattet. Diese Tatsachen haben zur Folge, dass in den meisten Räumen mit einem hohen Energiebedarf für die künstliche Beleuchtung zu rechnen ist. Bei der Berechnung nach DIN V 18599-4 ist die Tageslichtversorgung entsprechend zu berücksichtigen und führt auch dort zu unterschiedlichem Energieaufwand für die Beleuchtung.

Bestandsanlage

In der bestehenden Beleuchtungsanlage finden sich in den Klassenräumen aller Gebäude vor allem Rasterleuchten, in denen Leuchtstofflampen mit verlustarmen Vorschaltgeräten VVG installiert sind (Abbildung 4). Abbildung 5 zeigt die Verteilung der Horizontalbeleuchtungsstärke auf der 0,75 m Nutzebene in einem Klassenraum im Altbau mit Bestandsanlage. Es zeigt sich, dass der in DIN EN 12464-1 geforderte Wert von 300 lx eingehalten wird. Der für die Vertikalbeleuchtungsstärke auf der Tafel geforderte Wert von 500 lx wird mit dieser Anlage nicht erreicht. Eine zusätzliche Tafelbeleuchtung ist nur in Unterrichtsräumen des Turnhallenanbaus zu finden. Hier wurden Parabolscheinwerfer mit 60 W-Glühlampen installiert.



Abbildung 4: Rasterleuchte in Klassenräumen im Altbau

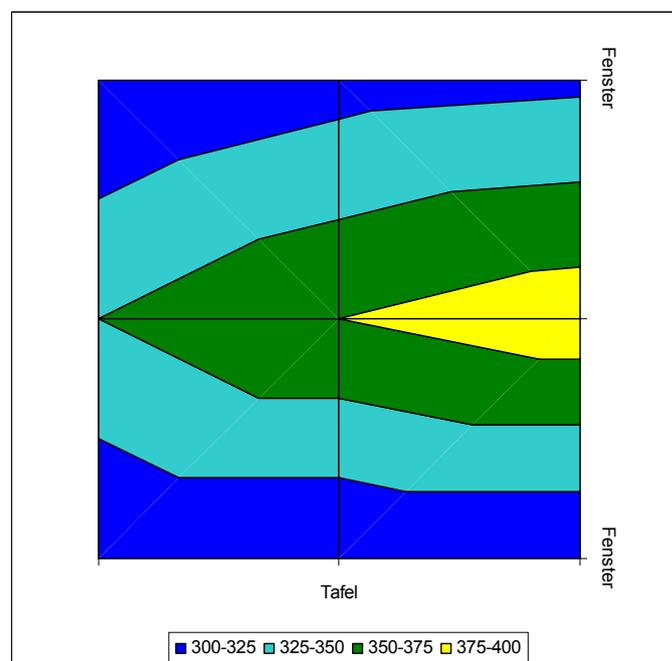


Abbildung 5: Verteilung der Horizontalbeleuchtungsstärke im Klassenraum mit Bestandsanlage

In den Fluren des Altbaus werden diffus strahlende Hängeleuchten mit Glühlampen eingesetzt, die bei Ausfall durch Energiesparlampen ersetzt werden (Abbildung 6). Die nötigen Wartungswerte der Beleuchtungsstärke werden jedoch mit der bestehenden Anlage zum Teil nicht erreicht. So wurde

auf dem Boden direkt unter einer Leuchte eine Beleuchtungsstärke von 30 lx, zwischen zwei Leuchten sogar nur 7 lx gemessen. Gefordert sind für diese Verkehrswege nach DIN EN 12464-1 Wartungswerte der Beleuchtungsstärke von mindestens 100 lx. In den Fluren der beiden neueren Anbauten erreichen die dort verbauten T8-Leuchtstofflampen in Rasterleuchten im Betrieb Beleuchtungsstärken von über 200 lx. Hierbei handelt es sich um eine erhebliche Überdimensionierung.



Abbildung 6: Flurbeleuchtung im Altbau

Die beiden Turnhallen werden größtenteils mit T8-Leuchtstofflampen beleuchtet (Abbildung 7). In der großen Turnhalle sind Leuchten mit stark streuender Abdeckung zu finden. Auch hier ist die Beleuchtungsstärke zu gering. Gemessen wurden 120 lx bis 130 lx, erforderlich sind mindestens 200 lx, für Sportarten mit kleinen Bällen wie Tischtennis oder Badminton sogar 300 lx. In den anderen Zonen der Gebäude gibt es eine Mischung aus Leuchtstofflampen mit VVG, Glühlampen und Energiesparlampen. Die Umkleieräume, WCs sowie die Flure des Turnhallenanbaus sind bereits mit Präsenzmeldern ausgestattet.

Die Mindestanforderungen nach DIN EN 12464-1 werden mit der Bestandsanlage in vielen Bereichen nicht erfüllt, was auch eine verminderte Beleuchtungsqualität bedeutet.



Abbildung 7: Beleuchtung in der Gymnastikhalle, Lampen mit unterschiedlichen Lichtfarben

Neuplanung der Beleuchtung

In den vier für das Monitoring ausgewählten Unterrichtsräumen wurde eine besonders energieeffiziente Beleuchtung installiert (Abbildung 8). In den Grundrissplänen in Abbildung 1 und Abbildung 2 sind diese Räume rot gekennzeichnet. Diese energieeffiziente Beleuchtung wurde mit vier direktstrahlenden Leuchten vom Typ 5041-RPX der Firma Trilux realisiert. Pro Leuchte wurde eine 35 W T5-Lampe 840 mit dimmbarem EVG eingesetzt. Mit diesen Leuchten ist eine gleichmäßige und energieeffiziente direkte Beleuchtung der Arbeitsebene möglich. Labormessungen ergaben einen Leuchtenbetriebswirkungsgrad von $\eta_{LB} \approx 94 \%$. Die Regelung ist auf einen Sollwert von 300 lx in der Raummitte programmiert. Zusätzlich kann bei Bedarf eine Tafelbeleuchtung manuell dazugeschaltet werden. Diese ist mit zwei Wallwasher-Leuchten mit je einer 80 W T5-Lampe 840 ausgeführt.

Die installierten Präsenzdetectoren sorgen für ein Ausschalten der Beleuchtung bei Abwesenheit nach 10 Minuten. Die Tafelbeleuchtungen sind jedoch immer unabhängig vom Regelsystem versorgt und müssen manuell ein- und auch ausgeschaltet werden. Eine automatische Abschaltung findet hierbei nicht statt.



Abbildung 8: Neue energieeffiziente Beleuchtung im Klassenraum (Altbau), Simulation und Realraum

Elektronische Regelsysteme

Die Beleuchtungsanlage im Raum 120 ist mit einer vollautomatischen Regelung ausgestattet. Das bedeutet, dass die Regelung bei zu geringen Beleuchtungsstärken und detektierter Anwesenheit die Beleuchtungsanlage automatisch einschaltet und auf den Sollwert regelt. Bei ausreichendem Tageslicht oder bei Abwesenheit der Benutzer schaltet das System aus. Die Leuchten an der Fensterseite und an der Wandseite werden jeweils unabhängig voneinander tageslichtabhängig geregelt.

In den Räumen 015 und 026 ist eine Halbautomatik realisiert, auch dort regelt das System die künstliche Beleuchtung in Abhängigkeit vom Tageslicht auf die programmierte Beleuchtungsstärke. Bei detektierter Abwesenheit der Nutzer oder längerfristiger Überschreitung der Sollwerte durch das Tageslicht schaltet die Regelung die Beleuchtung ab. Ein automatisches Wiedereinschalten geschieht hierbei nicht, dies muss vom Nutzer angefordert werden.

Zum Vergleich ist im Raum 007 die Regelung völlig außer Betrieb gesetzt worden, um einen rein manuell geschalteten Betrieb zu realisieren. Es findet dabei keine Präsenzüberwachung oder Anpassung an das Tageslicht statt. Dies entspricht also dem Betrieb einer herkömmlichen Beleuchtungsanlage.

3.1.4 Energetische Bewertung der Beleuchtungsanlage

Bestandsaufnahme – Zonierung des Schulgebäudes

Vor der energetischen Bilanzierung der Beleuchtung in der Königin-Luise-Schule nach DIN V 18599-4 wurde das zu berechnende Gebäude zunächst in verschiedene Gebäudezonen geteilt. Bei Bedarf wurden diese noch in weitere Berechnungsbereiche unterteilt. Für jeden Bereich bzw. jede Zone wurde der für die Bilanzierung nötige Endenergiebedarf einzeln ermittelt. Daraufhin erfolgte die Ermittlung von Nutzungszonen nach [DIN V 18599-10]. Hier sind verschiedene Nutzungsprofile angegeben, in denen unter anderem der zeitliche Tageslichtbedarf sowie der Wertungswert der Beleuchtungsstärke berücksichtigt wird. Für die Königin-Luise-Schule wurden neun Nutzungszonen ermittelt. Die flächenmäßige Aufteilung ist Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Flächenmäßige Verteilung der Nutzungszonen

Nutzungszone	Fläche in m²
Klassenräume	2.171
Gruppenbüros	114
Einzelbüros	101
Turnhallen	527
Nebenflächen ohne Aufenthaltsraum	537
Verkehrsflächen	1.303
Bibliotheken	65
Lehrküche	90
WC- und Sanitärräume	174
Gesamt	3.613

Diese Nutzungszonen wurden nochmals anhand folgender, Abschnitt 5.5 der DIN V 18599-4 entnommenen Kriterien unterteilt:

- Versorgung mit Tageslicht (Tageslicht oder kein Tageslicht)
- Ausrichtung der Räume
- Klassifizierung der Tageslichtversorgung

Die Tageslichtversorgung der einzelnen Räume, wurde bei der Bestandsaufnahme festgehalten. Die Ausrichtung ist den Grundrissen der Schulgebäude zu entnehmen. Zur Ermittlung der Klassifizierung der Tageslichtversorgung wurden in den Räumen 007, 015, 026 und 120 die Verteilung des Tageslichtquotienten D auf Höhe der Nutzebene $h_{Ne} = 0,72$ m gemessen und eine Klassifizierung dieser Räume vorgenommen (siehe auch Tabelle 2). Unter Berücksichtigung der Ausrichtung, Verschattung, Verbauung und der Raumtiefe wurde anhand der gemessenen Werte die Klassifizierung der Tageslichtversorgung in den anderen Räumen der Schule vereinfachend vorgenommen.

Da die drei Schulgebäude im Zusammenhang betrachtet wurden, war es vereinzelt nötig, den Berechnungsbereich einer Nutzungszone nochmals zu unterteilen. Dies war aufgrund der unterschiedlichen Höhe des Fenstersturzes über dem Fußboden sowie der unterschiedlichen Verglasung zwi-

schen Altbau und den neueren Anbauten, aber auch aufgrund der unterschiedlichen Ausstattung mit Präsenzmeldern nötig.

Nach Unterteilung der Nutzungszonen nach allen oben genannten Kriterien ergaben sich insgesamt 37 Berechnungsbereiche (siehe Tabelle 4). Der DIN V 18599-10 war für jede Nutzungszone ein entsprechendes Nutzungsprofil zu entnehmen.

Tabelle 4: Berechnungsbereiche der Schulgebäude nach DIN V 18599-10

Lfd-Nr.	Nutzungszone	Nutzungsprofil	Ausrichtung der Räume	Klassifizierung der Tageslichtversorgung
1	Klassenräume	8	SW	Gering
2			Mittel	
3			Gut	
4			SO	Gering
5			Gut	
6			NW	Gering
7			Gut	
8			NO	Gering
9			Mittel	
10			Gut	
11	Gruppenbüros	2	SW	Gut
12			NW	Gut
13	Einzelbüros	1	SW	Gering
14			Gut	
15			SO	Gut
16	Turnhallen	31	NW	Mittel
17			NO	Mittel
18	Nebenflächen ohne Aufenthaltsraum	18	-	keine
19			SW	Gering
20			Gut	
21			SO	Gering
22			Gut	
23			NW	Gering
24			Gut	
25			NO	Gut
26			Verkehrsflächen	19
27	SW	Gut		
28	SO	Gering		
29	NO	Gut		
30	Bibliotheken	28	SW	Gut
31			SO	Gut
32	Lehrküche	14 ¹⁾	NW	Gut
33	WC- und Sanitärräume	16	-	keine
34			SW	Gering
35			SO	Gering
36			NW	Gering
37			NO	Gering

¹⁾ Zum Teil wurden Angaben aus dem Nutzungsprofil 8 (Klassenräume) verwendet, wenn diese eher der tatsächlichen Nutzung entsprachen.

Bilanzierungsergebnisse der Bestandsanlage

Die Bilanzierung der bestehenden Beleuchtungsanlage der Königin-Luise-Schule ergibt nach dem Verfahren der DIN V 18599-4 folgende Ergebnisse:

Tabelle 5: Endenergiebedarf der Bestandsanlage

Nutzungszone	Endenergiebedarf in MWh/a
Klassenzimmer (inkl. Tafelbeleuchtung)	25,1
Klassenzimmer (ohne Tafelbeleuchtung)	23,1
Gruppenbüros	1,47
Einzelbüros	1,00
Turnhallen	28,4
Nebenflächen ohne Aufenthaltsräume	4,14
Verkehrsflächen	13,1
Bibliotheken	1,22
Lehrküche	0,53
WC- und Sanitärräume	1,70
Endenergiebedarf der gesamten Schule (inkl. Tafelbeleuchtung)	76,6
Endenergiebedarf der gesamten Schule (ohne Tafelbeleuchtung)	74,5

Der Endenergiebedarf der gesamten Schule beträgt nach Tabelle 5 demzufolge 76,6 MWh pro Jahr, wenn die Tafelbeleuchtung in den Klassenzimmern berücksichtigt wird. Ohne Tafelbeleuchtung beträgt der Jahresendenergiebedarf der Schule 74,5 MWh/a.

Die Bilanzierung ohne Tafelbeleuchtung ist für den Vergleich mit dem EnEV-Referenzgebäude wichtig, da dort keine Tafelbeleuchtung berücksichtigt wird, solange diese nicht zur Allgemeinbeleuchtung des Raumes benötigt wird. Für den Vergleich mit der Neuplanung der Beleuchtung soll die Tafelbeleuchtung jedoch berücksichtigt werden.

Endenergiebedarf des Referenzgebäudes

Bei der Berechnung des Endenergiebedarfes des Referenzgebäudes wurde wie in der EnEV 2009 Anlage 2 Tabelle 1 gefordert mit direkt/indirekter Beleuchtungsart, für alle Bereiche mit stabförmigen Leuchtstofflampen mit EVG sowie ohne Blend- oder Sonnenschutzsysteme gerechnet. Die Regelungstechniken wurden entsprechend der Nutzungszone angenommen. So ist z. B. für Schulklassenzimmer eine manuelle Präsenzkontrolle mit Konstantlichtregelung ohne tageslichtabhängige Regelung vorgesehen. Die berechneten Ergebnisse sind Tabelle 6 zu entnehmen. Der Endenergiebedarf des Referenzgebäudes beträgt demnach 35,2 MWh pro Jahr.

Tabelle 6: Endenergiebedarf des Referenzgebäudes

Nutzungszone	Endenergiebedarf in MWh/a
Klassenräume (ohne Tafelbeleuchtung)	13,4
Gruppenbüros	1,78
Einzelbüros	1,88
Turnhallen	11,5
Nebenflächen ohne Aufenthaltsräume	0,56
Verkehrsflächen	3,68
Bibliotheken	0,70
Lehrküche	0,62
WC- und Sanitärräume	1,03
Endenergiebedarf der gesamten Schule (ohne Tafelbeleuchtung)	35,2

Endenergiebedarf der Neuplanung

Für die Neuplanung der Beleuchtung ist die Installation von T5-Leuchtstofflampen mit elektronischem Vorschaltgerät (EVGs) in allen Räumen geplant. Diese verursachen geringere elektrische Verluste als Leuchten mit herkömmlichen T8-Leuchtstofflampen und VGs. Um sicherzustellen, dass die erforderlichen Wartungswerte der Beleuchtungsstärke erreicht, aber auch nicht unnötig viele Leuchten installiert werden, wurden in Abhängigkeit der Anforderungen exemplarische Räume mit einer Lichtplanungssoftware berechnet. Die für die bereits umgesetzte neue Beleuchtungsanlage in den vier Beispielen ausgesuchten Lampen und Leuchten wurden für die weitere Planung der Klassenräume übernommen. Für die Bereiche außerhalb der Klassenräume wurden andere, entsprechend geeignete Leuchten ausgewählt. Die Anordnung der Leuchten sowie die Leistung der Leuchtmittel wurde variiert, bis die nach DIN EN 12464-1 erforderlichen Werte für die Beleuchtungsstärke und Gleichmäßigkeit erreicht wurden.

In allen Klassenräumen ist eine Tafelbeleuchtung vorgesehen. Es wurde bei der Berechnung angenommen, dass diese immer dann eingeschaltet ist, wenn auch die Allgemeinbeleuchtung in Betrieb ist. Dies entspricht wahrscheinlich nicht dem tatsächlichen Nutzungsprofil der Tafelbeleuchtung. Da dieses jedoch unbekannt war, konnte nur mit einer Näherung gerechnet werden.

Alle Räume werden in der Planung mit Präsenzmeldern ausgestattet. Bei WC- und Sanitärräumen in Nichtwohngebäuden werden diese nach Tabelle 22 der DIN V 18599-4 allerdings nicht berücksichtigt. Alle Klassenräume, tageslichtversorgte Verkehrsflächen, Büros, Bibliotheken, Nebenflächen ohne Aufenthaltsraum, die Lehrküche sowie die beiden Turnhallen werden zudem mit einer tageslichtabhängigen Regelung ausgestattet, die automatisch ausschaltet. WC- und Sanitärflächen werden hingegen nicht mit einer tageslichtabhängigen Regelung ausgestattet. Es wird kein Sonnen- oder Blendschutz berücksichtigt.

Die Bilanzierung nach dem Verfahren der DIN V 18599-4 für die neu geplante Beleuchtungsanlage der Königin-Luise-Schule ergibt die in Tabelle 7 zusammengestellten Ergebnisse.

Tabelle 7: Endenergiebedarf der Neuplanung

Nutzungszone	Endenergiebedarf in MWh/a
Klassenzimmer (inkl. Tafelbeleuchtung)	11,1
Klassenzimmer (ohne Tafelbeleuchtung)	6,30
Gruppenbüros	1,16
Einzelbüros	1,18
Turnhallen	10,1
Nebenflächen ohne Aufenthaltsräume	0,55
Verkehrsflächen	4,57
Bibliotheken	0,07
Lehrküche	0,10
WC- und Sanitärräume	0,81
Endenergiebedarf der gesamten Schule (inkl. Tafelbeleuchtung)	29,6
Endenergiebedarf der gesamten Schule (ohne Tafelbeleuchtung)	24,8

Der Endenergiebedarf der gesamten Schule beträgt mit der neu geplanten Beleuchtungsanlage demzufolge 29,7 MWh pro Jahr, wenn die Tafelbeleuchtung in den Klassenzimmern berücksichtigt wird. Ohne Tafelbeleuchtung beträgt der Jahresendenergiebedarf der Schule 24,8 MWh/a. Daraus ergibt sich ein relativer Jahresenergiebedarf ohne Tafelbeleuchtung von 6,9 kWh/(m²a) und mit Tafelbeleuchtung 8,2 kWh/(m²a).

Vergleich von Bestandsanlage, Referenzgebäude und Neuplanung

Mit einer Sanierung der Beleuchtungsanlage im gesamten Schulgebäude geht eine deutliche Absenkung der installierten Leistungen einher wie Abbildung 9 zeigt. Dabei treten die Unterschiede zwischen Neuplanung und Referenzgebäude zu Tage. Die installierten Leistungen sind ohne Berücksichtigung der Tafelbeleuchtung annähernd gleich. Die Installation einer normgerechten Tafelbeleuchtung bedeutet eine erhebliche um 20 % höhere installierte Leistung.

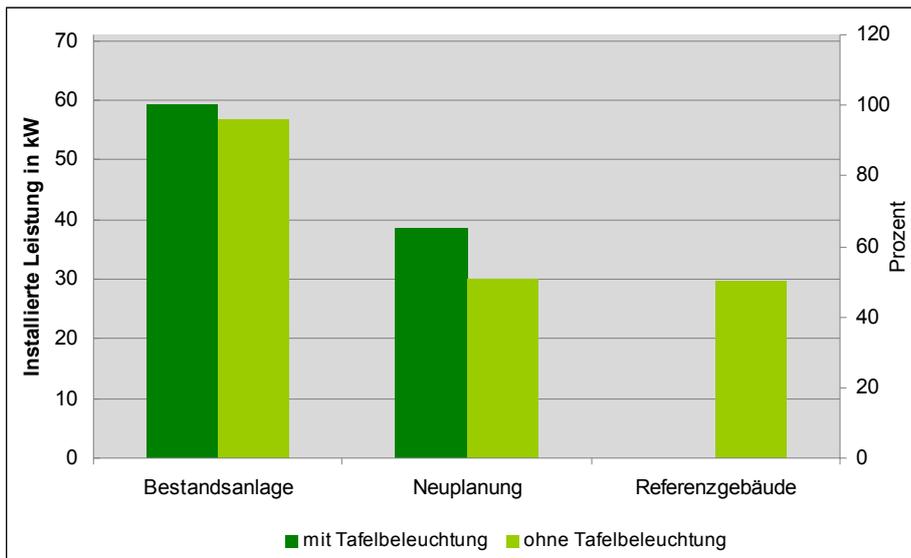


Abbildung 9: Installierte Leistung der Bestandsanlage, der Neuplanung und des Referenzgebäudes

Abbildung 10 zeigt den jährlichen Endenergiebedarf der Bestandsanlage, der Neuplanung sowie des Referenzgebäudes in MWh/a – einmal mit und einmal ohne Berücksichtigung der Tafelbeleuchtung in den Klassenräumen. Dabei wird deutlich, dass die Bestandsanlage den für das Referenzgebäude nach EnEV 2009 zulässigen Wert von 35,2 MWh/a weit überschreitet. Der Endenergiebedarf der Bestandsanlage nach DIN V 18599-4 beträgt mit Berücksichtigung der Tafelbeleuchtung 76,6 MWh/a (100%) und 74,5 MWh/a ohne Tafelbeleuchtung und ist damit mehr als doppelt so hoch wie der Endenergiebedarf des Referenzgebäudes.

Die Neuplanung hingegen unterschreitet diese Werte mit einem Jahresendenergiebedarf von 24,8 MWh/a (ohne Berücksichtigung der Tafelbeleuchtung) deutlich und liegt damit 29 % unter dem jährlichen Endenergiebedarf des Referenzgebäudes. Dies ist möglich, da gegenüber dem Referenzgebäude besonders effiziente Leuchten mit direkter Beleuchtungsart und tageslichtabhängiger Regelung eingeplant wurden.

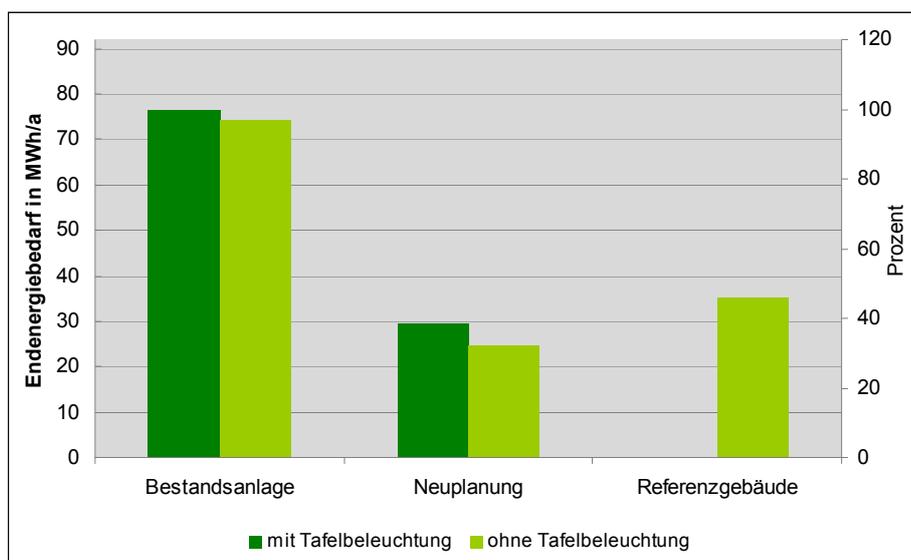


Abbildung 10: Endenergiebedarf der Bestandsanlage, der Neuplanung und des Referenzgebäudes

Der Endenergiebedarf der neu geplanten Beleuchtung beträgt ohne die Berücksichtigung der Tafelbeleuchtung der Klassenräume nur 33 % des Endenergiebedarfes der Bestandsanlage. Mit der Tafelbeleuchtung sind es 39 %. Es besteht also ein erhebliches Energieeinsparpotenzial von 61 %, das durch eine Sanierung der gesamten Beleuchtungsanlage nach der Neuplanung genutzt werden könnte. Gleichzeitig würde in vielen Bereichen die Beleuchtungsqualität gesteigert (z. B. Tafelbeleuchtung). Die Über- und Unterinstallationen bei der Flurbeleuchtung wären damit behoben, wodurch die Werte der DIN EN 12464-1 wieder eingehalten würden.

Abbildung 11 demonstriert den Anteil der einzelnen Maßnahmen an der Energieeinsparung zwischen der Bestandsanlage und der derzeitigen Neuplanung. Den größten Anteil weisen die effizienten Lampen und Leuchten auf. Sie machen weit über die Hälfte der Einsparungen aus. Beinahe ein Drittel der Einsparungen wird allein durch die Installation der Präsenzmelder erzielt. Diese sind damit für die Energieeffizienz im Bereich der Beleuchtung von großer Bedeutung. Die tageslichtabhängige Regelung kann lediglich 10 % zur Reduzierung des Endenergiebedarfes beitragen.

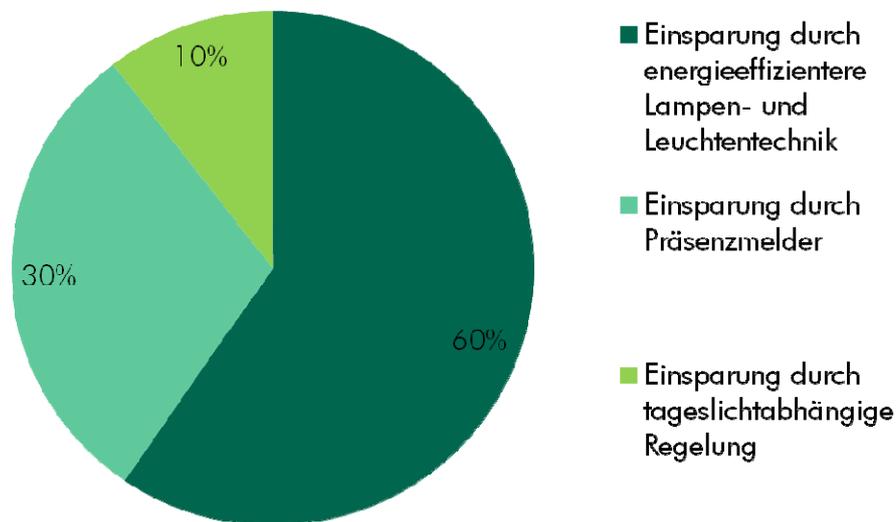


Abbildung 11: Anteil der Maßnahmen zur Effizienzsteigerung an dem Gesamteinsparpotenzial der Neuplanung gegenüber der Bestandsanlage, bei Berücksichtigung der Tafelbeleuchtung

3.1.5 Monitoring der Schulbeleuchtung

Dezentrale Messtechnik

Die Messung des Energieumsatzes der Beleuchtungsanlagen musste ohne Eingriff in die elektrische Installation erfolgen. Dabei sollten die Messgeräte über einen längeren Zeitraum unabhängig von der Netzversorgung regelmäßig Messwerte speichern. Dies erforderte ein kleines, flexibel einzusetzendes Messsystem, das kabellos und somit ohne Eingriff in die örtlichen Gegebenheiten installiert werden konnte. Dazu wurde das SPOT System (small programmable object technology) der Firma Sun gewählt, welches neben einer Grundausstattung an Hardware, wie z. B. Funkkommunikation, Akkutechnik, A/D-Umsetzer eine individuelle Java-Programmierbarkeit bietet.

Auf Basis dieser Sun SPOTs wurde hardwareseitig eine universelle Platine zur Aufnahme verschiedener Sensoren entwickelt. Über einen 30-Pin Stecker sind alle analogen und digitalen Ein- und Ausgänge des Mikroprozessors mit der Sensorplatine verbunden. Mit dieser Platine können durch unterschiedliche Sensor- und Bauteilbestückung verschiedene Typen von Messknoten aufgebaut werden: Arbeitsplatzsensoren für die Messung mehrerer Beleuchtungsstärken und melatoninwirksamen Bestrahlungsstärken (Abbildung 12), Dreibereichsfarbsensoren oder Dimmstufensensoren.

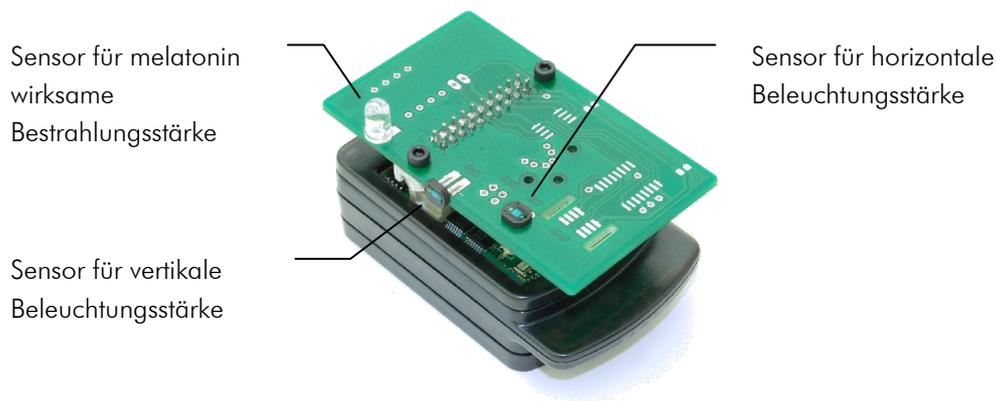


Abbildung 12: Sun SPOT mit Sensorplatine für Arbeitsplätze

Die Photoströme der einzelnen Sensoren eines Messknotens werden durch eine OPV-Schaltung mit einstellbarer Verstärkung in Spannungen gewandelt. Als Messwerte werden diese Spannungen über einen 10bit AD-Umsetzer aufgenommen und im internen Speicher der Messknoten festgehalten. Das Auslesen und Übertragen der Daten in eine Datenbank geschieht über eine Funkverbindung mit einem PC.

Im Labor ermittelte Kalibrierungsfaktoren ermöglichten die Bestimmung der Messwerte aus den Rohwerten des AD-Umsetzers. Nach einer einmaligen Vermessung der Beleuchtungsstärkeverteilung durch die künstliche Beleuchtungsanlage können durch Kombination der Messungen der elektrischen Leistung und der Beleuchtungsstärken im Raum die Anteile des Tageslichtes und der künstlichen Beleuchtung an der Gesamtbeleuchtung getrennt bestimmt werden.

Mit diesem System war es nun möglich, über einen Zeitraum von ca. einem Monat, in einem 5-Minuten-Intervall die Messwerte der einzelnen Sensoren aufzunehmen und zu speichern. Danach waren die Werte auszulesen und die Akkus zu wechseln.

Für den Dimmstufensensor wurde eine Hamamatsu S1087 Photodiode gewählt, die über eine grobe $V(\lambda)$ -Voranpassung verfügt. Dies ist in diesem Fall ausreichend, da nur relativ gemessen wird. Eine Kalibrierung erfolgt über die Ermittlung des höchsten Messwerts bei einer Dimmstufe von 100 %. Für Leuchtstofflampen wurden spezielle Clips verwendet, mit denen der Sensor fixiert und auf die Lampenoberfläche ausgerichtet wurde. Aus den relativ gemessenen Dimmstufen lässt sich über die in Abbildung 13 gezeigte im Labor messtechnisch ermittelte Dimmkennlinie von Leuchtstofflampen die relative Leistungsaufnahme berechnen. Über die bekannte maximale Leistungsaufnahme der zugehörigen Leuchtengruppe lässt sich die zum jeweiligen Zeitpunkt aufgenommene absolute elektrische Leistung ohne Eingriff in die elektrische Installation ermitteln.

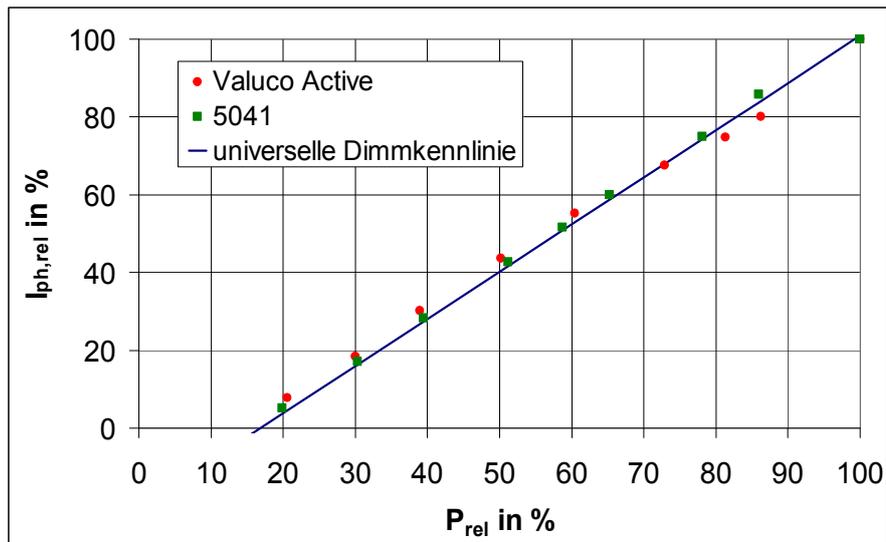


Abbildung 13: Kennlinie zur Ermittlung des Leitungsumsatzes von Leuchtstofflampen über die Messung der relativen Dimmstufe

In jedem der vier untersuchten Räume wurde ein Dimmstufensensor in der abgehängten Decke installiert, der über drei Messleitungen mit den Sensoren am jeweiligen Lampenkreis verbunden wurde. Nun konnten die Dimmstufen der Wand- und Fensterseite sowie der geschalteten Tafelbeleuchtung getrennt gemessen werden.

Auswertung

Mittels der dezentralen Messtechnik wurden in den vier untersuchten Räumen die Dimmzustände der einzelnen Lampenkreise im 5-Minutentakt von November 2009 bis Oktober 2010 ermittelt. Aus den gewonnenen Messwerten lässt sich der Energieumsatz sowohl für die Raumbelichtung als auch für die Tafelbeleuchtung für einzelne Monate getrennt ermitteln. Abbildung 14 bis Abbildung 17 zeigen die monatlichen Energieumsätze für die vier Räume im gesamten Messzeitraum. Dabei werden die Energieumsätze der Leuchtenreihen auf der Fenster- und Wandseite sowie der Tafelbeleuchtung getrennt dargestellt.

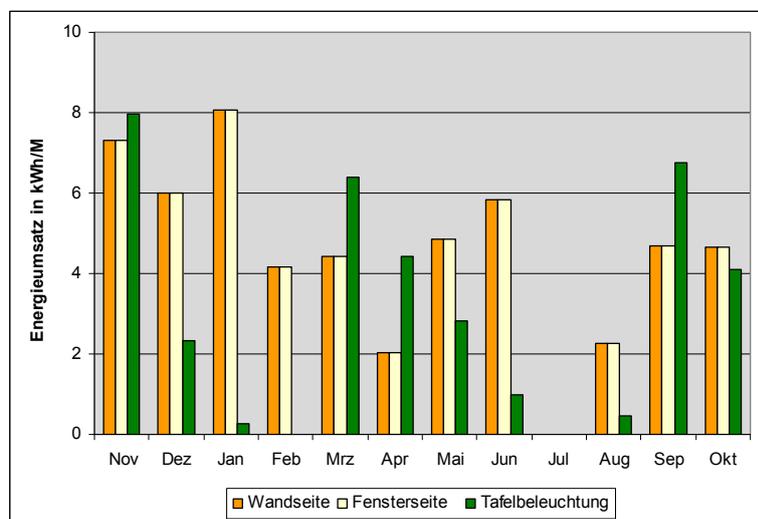


Abbildung 14: Energieumsatz im Raum 007; Nov 2009-Okt 2010

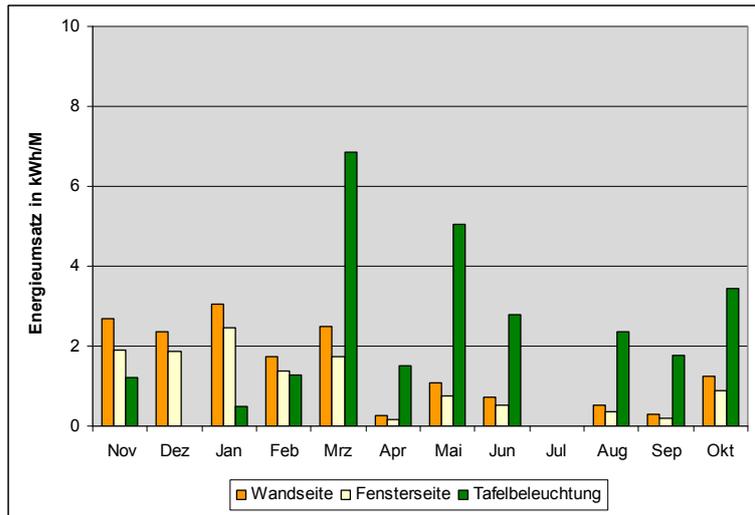


Abbildung 15: Energieumsatz im Raum 015; Nov 2009-Okt 2010

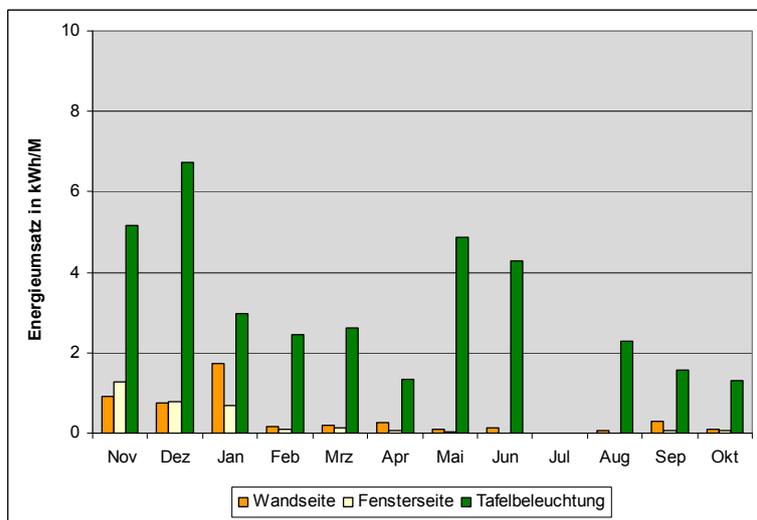


Abbildung 16: Energieumsatz im Raum 026; Nov 2009-Okt 2010

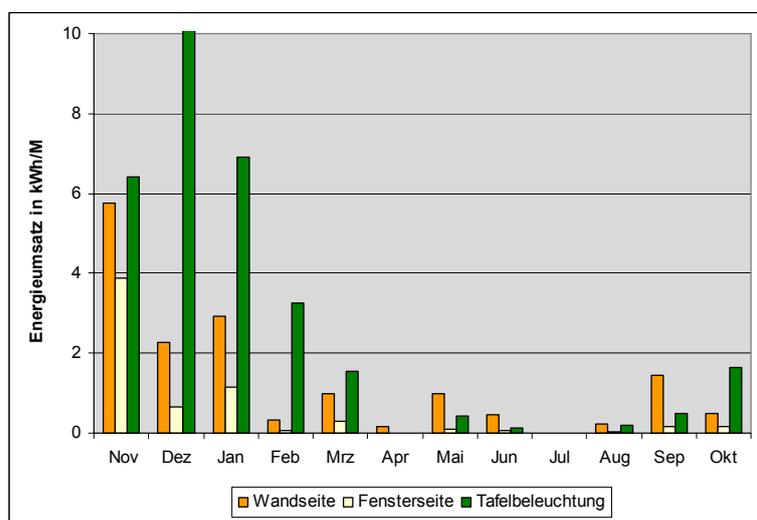


Abbildung 17: Energieumsatz im Raum 120; Nov 2009-Okt 2010

Beim Vergleich der beiden gering mit Tageslicht versorgten Räume 007 und 015 zeigt sich das Einsparpotenzial durch eine tageslichtabhängige Regelung und den Einsatz der Präsenzmelder, die bei Abwesenheit automatisch ausschalten. Dazu sind beispielhaft in Abbildung 18 die Messwerte im Raum 007 vom Dezember 2010 gezeigt. Aus den Schaltzuständen ist die Nutzungszeit an den Wochentagen gut zu erkennen. Weiterhin ist zu sehen, dass über das Wochenende 4./5. 12. 2010 vergessen wurde, das Licht auszuschalten, was sich erheblich auf den Energieumsatz auswirkt. Da in diesem Raum keine Präsenzüberwachung statt fand, schaltete die Anlage auch nicht automatisch aus.

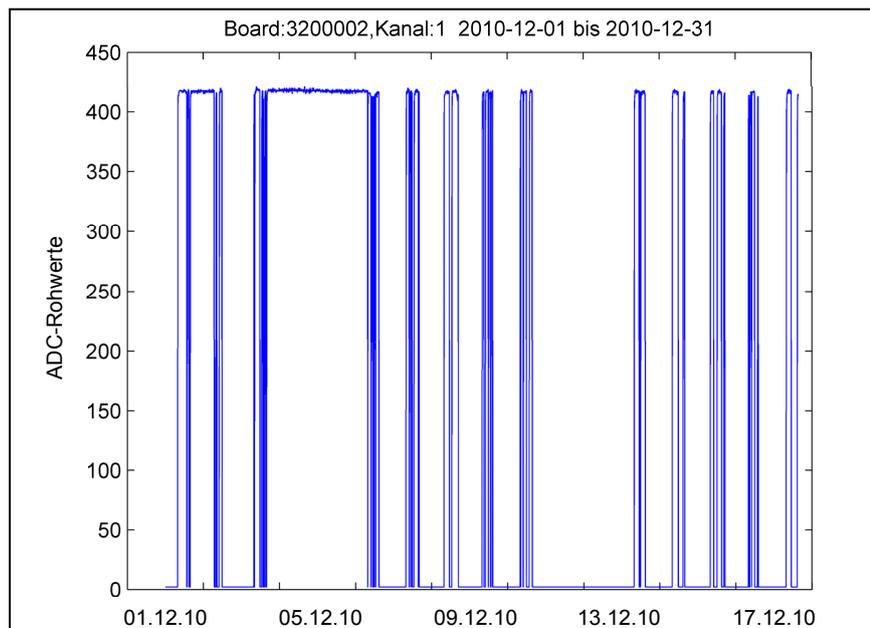


Abbildung 18: Schaltzustände der Beleuchtungsanlage im Raum 007 im Dezember 2010; durchgehend eingeschaltete Beleuchtung am Wochenende

Vergleicht man die beiden mit Halbautomatik (automatisch aus, manuell ein) ausgestatteten Räume 015 und 026, dann wird der geringere Energiebedarf für die Raumbelichtung im Raum 026 erkennbar. Dies ist auf die deutlich bessere Tageslichtversorgung zurückzuführen. Die Nutzer schalteten dort bei Bedarf meist lediglich die Tafelbeleuchtung ein, die Raumbelichtung wurde im Wesentlichen nur in den tageslichtarmen Monaten November bis Januar eingeschaltet.

Weiterhin ist auffällig, dass die Beleuchtung im Raum 120 im Vergleich zum Raum 015 einen ähnlich hohen Energieumsatz aufweist. Der Raum 120 ist mit einer Vollautomatik ausgestattet, die das Licht bei zu geringen Beleuchtungsstärken wieder einschaltet, und weist nur eine wenig bessere Tageslichtversorgung auf als Raum 015.

Bei der Auswertung der monatlichen Energieumsätze ist zu beachten, dass durch Ferienzeiten und gesetzliche Feiertage die Nutzungstage der Klassenräume stark schwanken. In Abbildung 19 sind die Schultage pro Monat für den Beobachtungszeitraum aufgetragen. Besonders deutlich sind die Sommerferien im Juli und August, was auch den geringen bzw. gar nicht vorhandenen Energieumsatz in diesen Monaten erklärt.

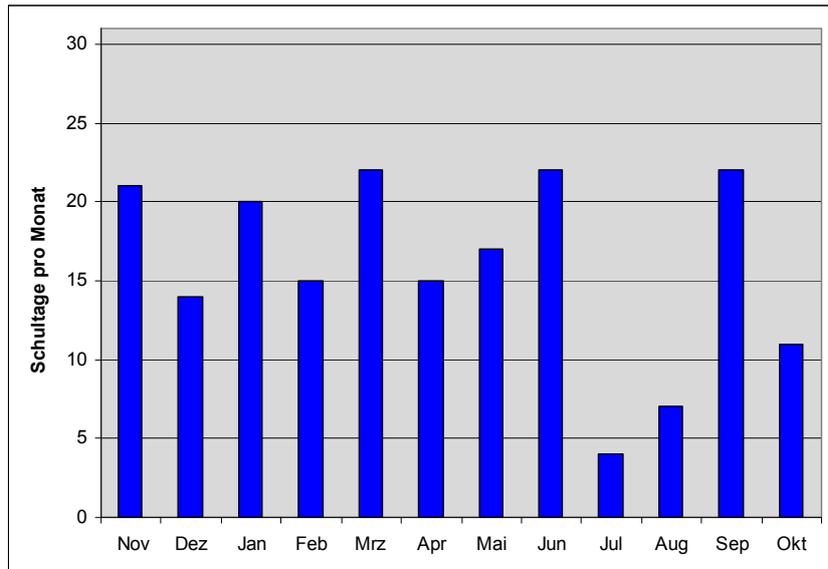


Abbildung 19: Anzahl der Schultage pro Monat; Nov 2009-Okt 2010

Tabelle 8 und Tabelle 9 geben zusammengefasst den Energieumsatz pro Jahr und die Nutzungszeiten der elektrischen Beleuchtungsanlage in den vier untersuchten Klassenräumen wieder.

Tabelle 8: Energieumsatz pro Jahr in kWh/a im Zeitraum November 2009-Oktober 2010

Raum	Regelung	Raumbelichtung Gesamt (Wand- + Fensterseite)	Tafelbeleuchtung
007	manuell	108 (54 + 54)	37
015	halbautomatisch	29 (17 + 12)	27
026	halbautomatisch	8 (5 + 3)	36
120	vollautomatisch	23 (16 + 7)	32

Tabelle 9: Nutzungszeit der Beleuchtungsanlage in h im Zeitraum November 2009-Oktober 2010

Raum	Wandseite	Fensterseite	Tafelbeleuchtung
007	704	704	210
015	184	171	153
026	81	78	205
120	267	128	182

In Tabelle 10 sind zum Vergleich für einen Klassenraum mit geringer Tageslichtversorgung (z. B. Raum 007 und 015) die verschiedenen berechneten und messtechnisch ermittelten Werte für den Energieumsatz der Raumbeleuchtung eingetragen. Der Wert für die Neuplanung entspricht dem in Raum 015 messtechnisch ermittelten Wert. Für die Bestandsanlage wurden die aus dem manuell geschalteten Raum 007 ($P_{\text{inst.}} = 154 \text{ W}$) messtechnisch gewonnenen Nutzungszeiten zugrunde gelegt und mit der höheren installierten Leistung der Bestandsanlage ($P_{\text{inst.}} = 360 \text{ W}$) verrechnet.

Tabelle 10: Vergleich des Energieaufwands für die Raumbeleuchtung in einem Klassenraum mit geringer Tageslichtversorgung

	nach DIN V 18599-4 berechneter Energieumsatz in kWh/a	ermittelter Energieumsatz in kWh/a
Bestandsanlage	339	253
Referenzgebäude	189	-
Neuplanung	89	29

Es zeigt sich, dass die berechneten Ergebnisse sowohl der Bestandsanlage als auch der optimierten Beleuchtungsanlage höher liegen als die im Untersuchungszeitraum gemessenen Werte für den Energieumsatz. Die in den Profilen der DIN V 18599-10 hinterlegten Werte sind Näherungen bzw. gemittelte Werte, die nicht zwingend für einen speziellen Klassenraum in einem speziellen Zeitraum gelten müssen.

Um die Ergebnisse des ersten Jahres zu validieren, wurden die Messungen in den Räumen 007, 015, und 026 bis zum Juni 2011 fortgesetzt. In Abbildung 20 bis Abbildung 22 zeigt sich, dass die Werte von einem Jahr zum anderen erheblich schwanken können, die sich aus den Vergleichen ergebenden Verhältnisse zueinander bleiben aber im Grundsatz bestehen. Insgesamt wurde in allen Räumen im Winter 2010/11 mehr Energie für die Beleuchtung benötigt.

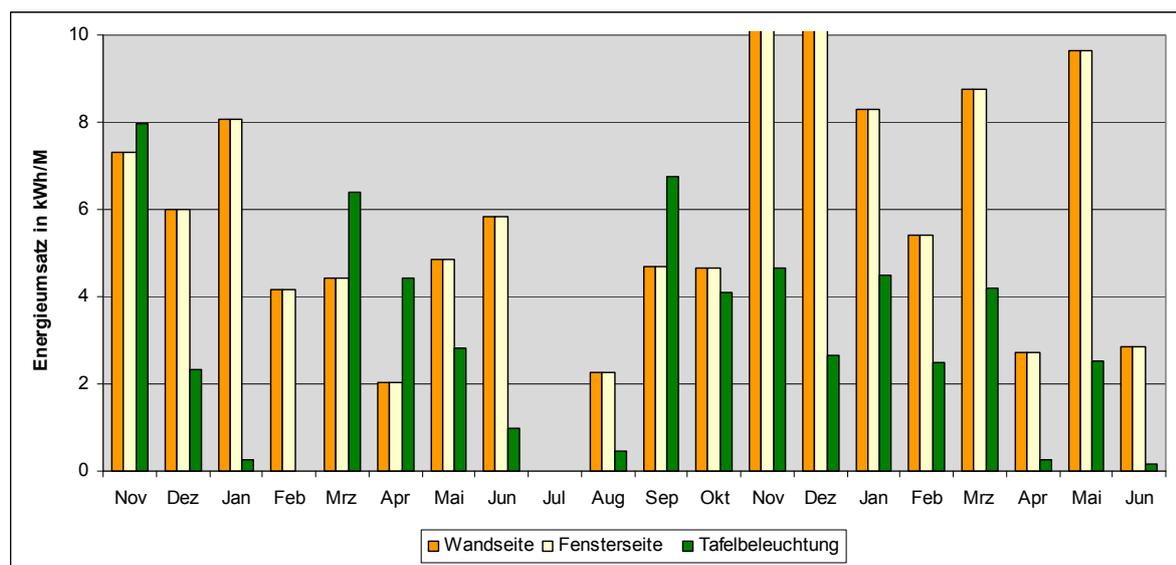


Abbildung 20: Energieumsatz im Raum 007; Nov 2009-Jun 2011

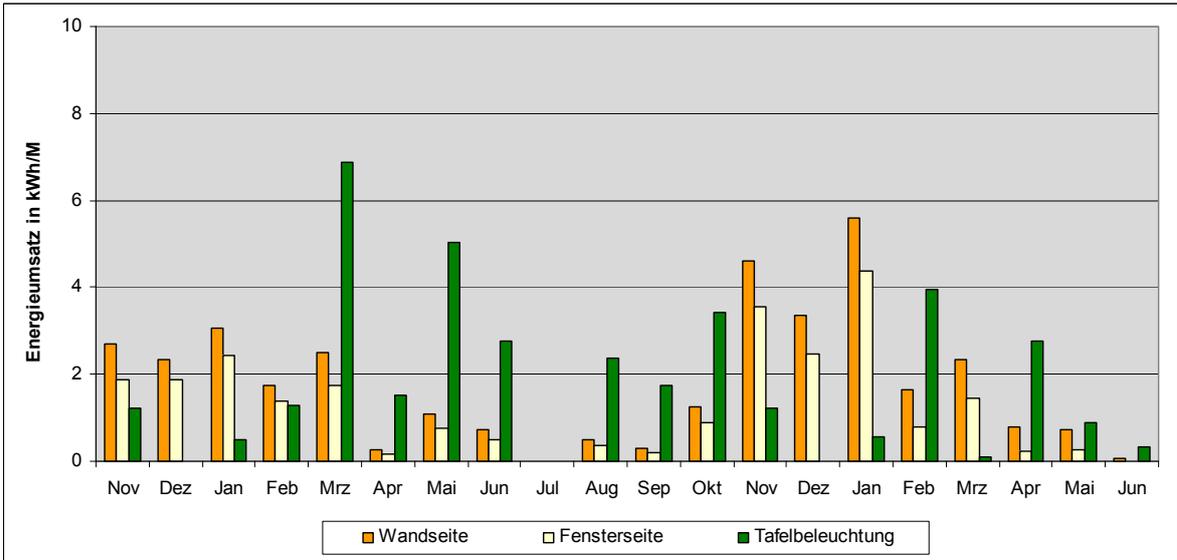


Abbildung 21: Energieumsatz im Raum 015; Nov 2009-Jun 2011

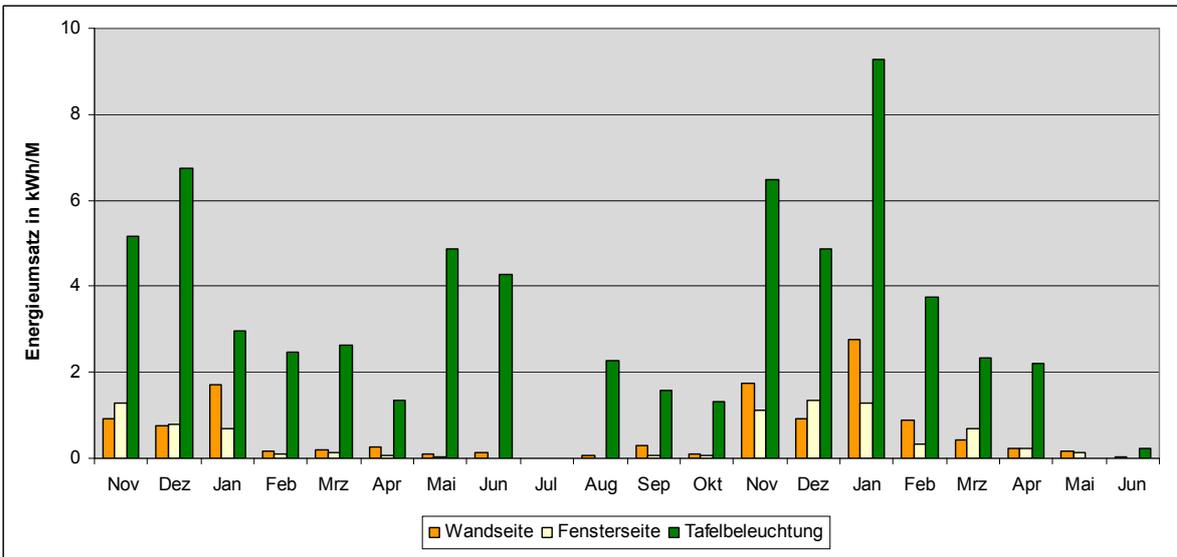


Abbildung 22: Energieumsatz im Raum 026; Nov 2009-Jun 2011

3.1.6 Zusammenfassende Betrachtung zur Schulbeleuchtung

Durch die Berechnung des Endenergiebedarfs der Bestandsanlage, des Referenzgebäudes und einer Neuplanung konnte das erhebliche Einsparpotenzial aufgezeigt werden, das durch eine Sanierung der Beleuchtungsanlage freigelegt werden kann. Die Neuplanung benötigt im Mittel etwa zwei Drittel weniger Energie als die Bestandsanlage. Die Langzeitmessungen ergaben sogar noch niedrigere Werte. Dabei unterschreiten die Werte der Neuplanung die des Referenzgebäudes um etwa 30 %. Dies kann durch die direkte Beleuchtungsart, die Nutzung von T5-Lampen und besonders effizienter Leuchten sowie den Einsatz einer tageslichtabhängigen Regelung erklärt werden.

Das Monitoring ermöglichte, die unterschiedlichen Einflüsse auf den Energieumsatz zu bewerten. Durch die Kombination von tageslichtabhängiger Regelung mit Präsenzmeldern konnte der Energieumsatz im Vergleich zu einem manuell geschalteten Betrieb auf etwa ein Viertel reduziert werden. Beim Vergleich der Räume mit unterschiedlicher Tageslichtversorgung stellte sich ein ähnlich großes Verhältnis heraus. Das heißt, im gut mit Tageslicht versorgten Raum wurde nur etwa ein Viertel der Energie für die Raumbelichtung benötigt wie im gering bis gar nicht tageslichtversorgten Raum. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Tafelbeleuchtung teilweise zur Raumbelichtung beiträgt, sodass im gut mit Tageslicht versorgten Raum bis auf die Wintermonate fast ausschließlich die Tafelbeleuchtung genutzt wurde. Dies erklärt auch, dass die Unterschiede im Energieumsatz der Tafelbeleuchtung zwischen den vier Räumen weniger gravierend ausfallen. Die Art der Regelung, also ob die Beleuchtungsanlage automatisch ein- und ausschaltet oder nur ausschaltet, ergab in dieser Untersuchung keinen großen Unterschied.

Ergänzend muss hinzugefügt werden, dass die Aussagen, die aus der Messung des Energiebedarfs der Beleuchtung von vier Räumen über ein oder zwei Jahre hervorgehen, für die Allgemeinheit nur mit Einschränkungen gelten können. Mit erheblich größerem Aufwand könnten derartige Untersuchungen in einer Vielzahl von Räumen in mehreren Schulen über mehrere Jahre belastbarere Zahlenwerte ergeben. Die hier getroffenen Aussagen spiegeln jedoch die korrekten Größenordnungen wider und zeigen exemplarisch, wie hoch die Energieeinsparungen vor allem durch eine gute Tageslichtversorgung und eine gute geregelte Beleuchtungsanlage liegen können.

Grundsätzlich ist das Auslassen der Tafelbeleuchtung bei der Berechnung des Referenzgebäudes zu hinterfragen. In DIN EN 12464-1 wird eine entsprechende Beleuchtung der vertikalen Flächen gefordert, sie muss also für eine normgerechte Beleuchtung berücksichtigt werden. In dieser Untersuchung ergab sich unter Annahme derselben Betriebszeiten wie die Allgemeinbeleuchtung ein Mehraufwand des jährlichen Endenergiebedarfs von 16 %, der so nicht vernachlässigt werden kann. In zukünftigen Überarbeitungen der DIN V 18599-4 sollte dies berücksichtigt werden.

Weiterhin wäre es sinnvoll, basierend auf der DIN V 18599-4 Mindestanforderungen für den Betrieb von bestehenden Beleuchtungsanlagen zu formulieren, wonach Anlagen, deren Endenergiebedarf die Werte des Referenzgebäudes um einen festzulegenden Faktor überschreiten, außer Betrieb genommen bzw. saniert werden müssten. Gleichzeitig sind Festlegungen nötig, die Einhaltung der DIN EN 12464-1 bei Inbetriebnahme zu überprüfen, um Unter- und Überinstallationen festzustellen und zu beheben.

3.2 Ausstellungsräume in Museen

Ein weiteres Beispiel zur Demonstrierung der Möglichkeiten zur Energieeinsparung durch moderne Beleuchtungsanlagen mit kombinierter Tageslichtnutzung ist die Museumsbeleuchtung. Hier ist ein eindeutiger Trend zur energieeffizienten künstlichen Beleuchtung mit LEDs und vermehrten Beleuchtung mit Tageslicht zu erkennen. Neben den besonders hohen Anforderungen an die Beleuchtungsqualität ist dabei aber auch vorrangig der Schutz der Ausstellungsobjekte vor optischer Strahlung vor allem im UV- und kurzwelligen sichtbaren Wellenlängenbereich zu beachten. Aus diesem Grund trat in der Vergangenheit die Energieeffizienz bei der Museumsbeleuchtung oft in den Hintergrund. Durch den Einsatz moderner LED-Lösungen ist nun erstmals eine hohe Beleuchtungsqualität und Energieeffizienz bei gleichzeitiger Verbesserung des Objektschutzes möglich.

3.2.1 Anforderungen an die Beleuchtung in Museen

Die für die Innenraumbeleuchtung in vielen Bereichen maßgebliche DIN EN 12464-1 gibt für die Beleuchtung von Ausstellungsräumen in Museen keinerlei Werte vor. Es wird lediglich darauf hingewiesen, dass die Beleuchtung sich an den Ausstellungsanforderungen orientieren muss und bei lichtempfindlichen Objekten der Schutz vor optischer Strahlung als höchste Priorität zu beachten sei.

Beleuchtungsstärke

In Teil 10 der zur Berechnung des Jahresendenergiebedarfs dienenden DIN V 18599 wird für Ausstellungsräume in Museen eine mittlere Beleuchtungsstärke von 200 lx auf einer Nutzebene von 0,8 m angesetzt. Dieser Wert ist in der Regel für die Beleuchtungsplanung nicht geeignet, da in den meisten Ausstellungsräumen vor allem vertikale Beleuchtungsstärken auf den Objekten relevant sind, die auf unterschiedlichen Höhen angebracht sein können.

[CIE 157] gibt die in Tabelle 11 eingetragenen Werte für die maximale Beleuchtungsstärke und die maximale Belichtung (Beleuchtungsstärke über die Beleuchtungsdauer integriert) für verschiedene Klassen von Ausstellungsobjekten vor. Dabei ist jedoch nicht definiert, mit welcher spektralen Strahlungsverteilung diese Beleuchtungsstärken realisiert werden. Somit ist bei Einhaltung dieser Werte nicht zwingend sicher gestellt, dass dem Objektschutz genüge getan ist. Vielmehr sollten diese Zahlen als Empfehlungen betrachtet werden, der eine weitere Untersuchung der Beleuchtung bezüglich ihres Objektschädigungspotenzials folgen muss.

Tabelle 11: maximale Beleuchtungsstärke und maximale jährliche Belichtung für verschiedene Materialklassen nach CIE 157

Materialklasse	maximale Beleuchtungsstärke [lx]	maximale Belichtung [lx h/a]
Unempfindlich	keine Begrenzung	keine Begrenzung
Niedrige Empfindlichkeit	200	600.000
Mittlere Empfindlichkeit	50	150.000
Hohe Empfindlichkeit	50	15.000

Objektschutz

Nach [Aydinli u.a., 1983] können vereinfachend zwei unterschiedliche Verteilungen der relativen spektralen Objektempfindlichkeit $s(\lambda)_{dm,rel}$ für zeitungspapierähnliche und andere Objekte, wie z. B. Ölfarben oder Textilien, angenommen werden. In Abbildung 23 sind diese zusammen mit der relativen spektralen Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges für Tagessehen $V(\lambda)$ aufgetragen. Die Normierung auf 300 nm erfolgt auf der Tatsache, dass kleinere Wellenlängen weder durch Tageslicht noch durch künstliche Beleuchtung im Museum auftreten können.

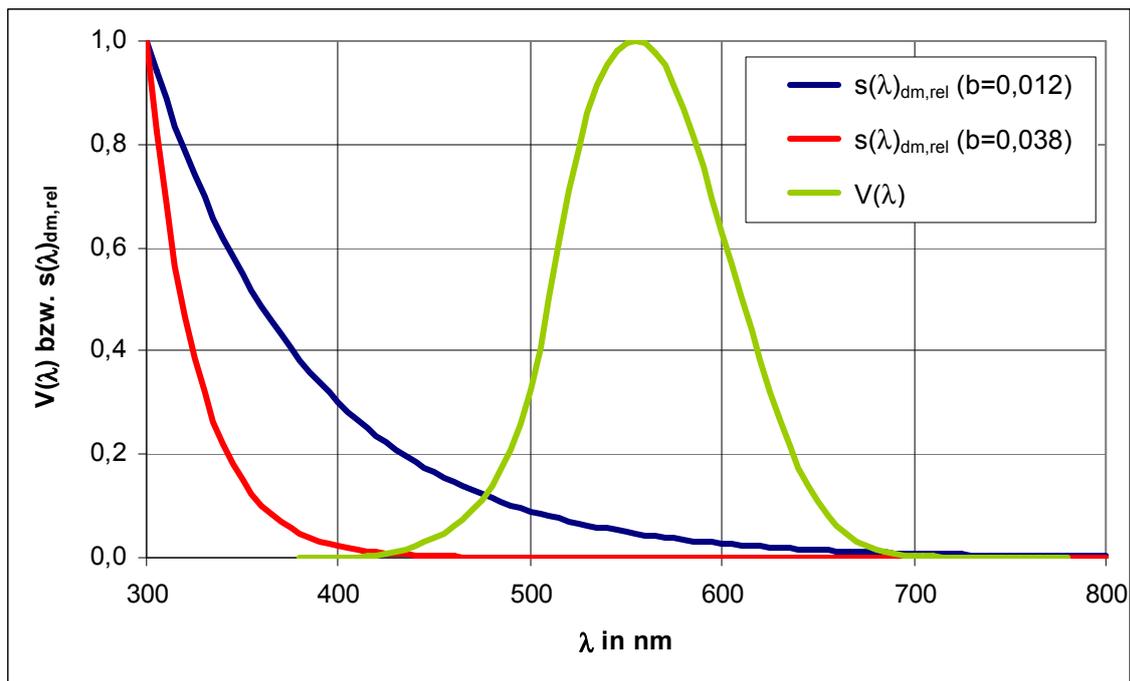


Abbildung 23: Relative spektrale Objektempfindlichkeit $s(\lambda)_{dm,rel}$ mit $b = 0,038$ für zeitungspapierähnliche Objekte und $b = 0,012$ für andere Objekte sowie relative spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges für Tagessehen $V(\lambda)$

Es wird deutlich, dass bei Lichtquellen weißer Lichtfarbe mit höherem Blauanteil bei gleicher, mit $V(\lambda)$ gewichteten, Beleuchtungsstärke mit einer höheren Schädigung zu rechnen ist. Dies sollte bei der Auswahl der ähnlichsten Farbtemperatur T_{cp} beachtet werden. Dabei gilt, dass mit steigender

ähnlichster Farbtemperatur zwingend auch der Blauanteil relativ zum Rot- und Gelbanteil steigen muss.

Zum Vergleich der Schädigungspotentiale verschiedener Lichtquellen kann der auf die Beleuchtungsstärke bezogene Faktor p (in mW / lm) zugrunde gelegt werden [Aydinli u.a., 1983].

$$p = \frac{1000 \frac{mW}{W} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \cdot s(\lambda)_{dm,rel} \cdot d\lambda}{K_m \cdot \int_{380} S(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}$$

mit

$S(\lambda)$: relative spektrale Zusammensetzung der Strahlung (Strahlungsfunktion) der Lichtquelle

und $K_m = 683 \text{ lm/W}$

In der Praxis ist es vorteilhaft ein relatives Schädigungspotential p_{rel} zu bestimmen, indem das ermittelte Schädigungspotential einer Lichtquelle auf das Schädigungspotential eines in vielen Museen noch verbauten typischen Halogenglühlampenstrahlers (HGL-Strahler) ohne UV-Schutz mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von $T_{cp} = 2800 \text{ K}$ bezogen wird (Abbildung 24).

$$p_{rel} = \frac{p}{p(\text{Halogenglühlampe})}$$

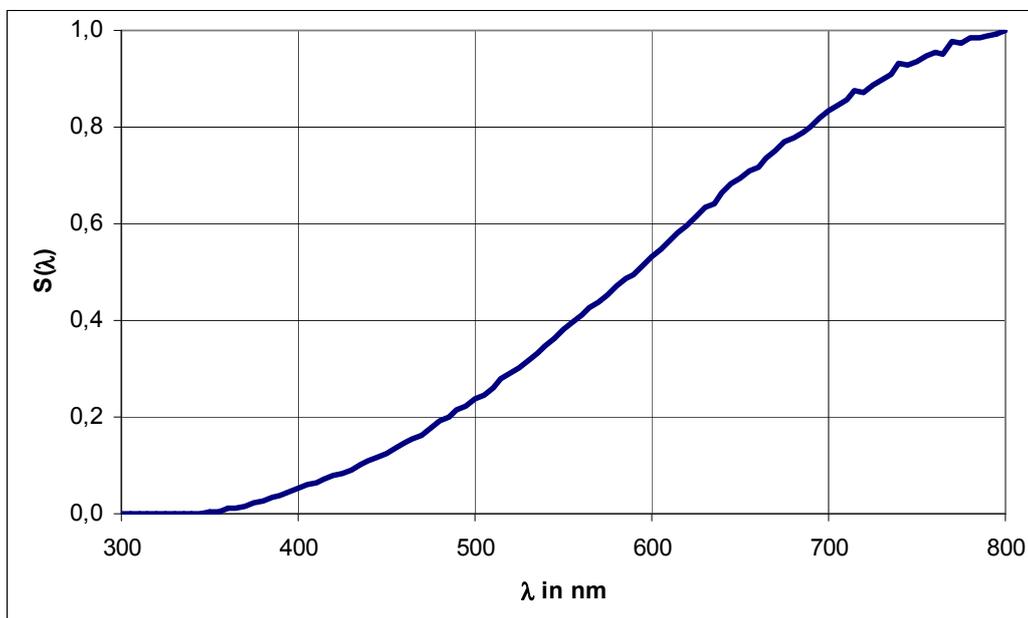


Abbildung 24: Relative spektrale Strahlungsfunktion $S(\lambda)$ des Bezugs-HGL-Strahlers mit ähnlichster Farbtemperatur $T_{cp} = 2800 \text{ K}$

Die in Tabelle 11 eingetragenen Werte nach CIE 157 berücksichtigen bisher nicht den Typ der Lichtquelle. Es ist anzunehmen, dass diese Werte für herkömmliche HGL-Strahler ($T_{cp} = 2800 \text{ K}$) gelten. Ist nun der relative Schädigungsfaktor einer anderen Lichtquelle bekannt, können damit die für diese Lichtquelle geltenden Grenzwerte umgerechnet werden.

Farbwiedergabe

Eine sehr gute Farbwiedergabe der Beleuchtung ist in Ausstellungsräumen besonders wichtig, vor allem, wenn dort farbige Objekte wie Öl-Gemälde, Aquarelle oder ähnliches zu sehen sind. Zum Vergleich verschiedener Lichtquellen dient derzeit das in [DIN 6169-2] definierte Bewertungssystem mit 14 Testfarben zur Bestimmung der speziellen Farbwiedergabeindizes R_i und des Mittelwertes der ersten acht Testfarben für den allgemeinen Farbwiedergabeindex R_o . Neben dem allgemeinen Farbwiedergabeindex, bei dem die gesättigten Farben außen vor bleiben, ist vor allem der spezielle Farbwiedergabeindex R_9 für gesättigtes Rot relevant, da viele weit verbreitete Leuchtmittel in diesem Bereich Defizite aufweisen und somit besonders gute Lösungen an dieser Zahl erkennbar werden. Derzeit sind überarbeitete Bewertungssysteme in der Entwicklung, die derartige Defizite des allgemeinen Farbwiedergabeindex' beheben. Da diese jedoch noch nicht vollständig ausgearbeitet und validiert sind, wird im Weiteren mit dem bestehenden Bewertungssystem gearbeitet.

3.2.2 Einfache Dosimeter für die Praxisanwendung

In CIE 157 wird für die Überwachung der Objektschädigung in Museen die Verwendung von acht Blaumaßstäben als Dosimeter empfohlen. Diese Blaumaßstäbe (Blue Wool Standards) wurden jedoch ursprünglich zur Prüfung der Lichtechtheit von Textilien entwickelt. Das Verfahren zur Ermittlung des Grades der Lichtechtheit mit Hilfe von sieben Blaumaßstäben ist in [DIN EN ISO 105-B08] beschrieben. In älteren Versionen, auf die sich auch CIE 157 bezieht, wird noch ein weiterer, achter Blaumaßstab verwendet. Die Bestimmung des Farbunterschiedes geschieht in diesem genormten Verfahren visuell.

Das kommerzielle Produkt LightCheck[®] Sensitive wird als Dosimeter zur Abschätzung der objektschädigend wirksamen Bestrahlung (Dosis) für Ausstellungsobjekte eingesetzt. LightCheck[®] Sensitive besteht aus einer strahlungsempfindlichen blauen Schicht auf einem Träger. Die Farbe verändert sich unter dem Einfluss der optischen Strahlung über die Zeit. Anhand einer Skala zum visuellen Vergleich lässt sich die Belichtung (Beleuchtungsdosis in lx·h) ablesen.

Um die Aussagekraft dieser im Feld verbreiteten Typen einfacher Dosimeter zu überprüfen, wurden acht Blaumaßstäbe sowie der LightCheck[®] Sensitive mit einer in [Kaase u.a., 2013] beschriebenen Anlage bestrahlt. Als Quelle dient eine 1600 W XBO Xenon-Höchstdrucklampe, deren Strahlung, durch unterschiedliche Kantenfilter beeinflusst, auf zehn Feldern der Proben auftrifft. Die Proben wurden in 17 Bestrahlungsperioden mit exponentiell steigender Dauer insgesamt 1450 Stunden bestrahlt. Dies entspricht unter Berücksichtigung der in der Bestrahlungsanlage auf den Proben vorhandenen Beleuchtungsstärken und einer Ausstellungsbeleuchtungsstärke von 300 lx circa 25 Ausstellungsjahren.

Die Analyse der Farbänderung der untersuchten Proben basiert auf den Änderungen des spektralen Reflexionsgrades $\rho(\lambda)$ der bestrahlten Felder der einzelnen Proben. Dazu wurde $\rho(\lambda)$ vor Beginn der Untersuchung und nach jeder Bestrahlungsperiode gemessen. In Abbildung 25 sind die bestrahlten Proben dargestellt. Die entsprechenden Änderungen des spektralen Reflexionsgrades sind beispielhaft in Abbildung 26 und Abbildung 27 gezeigt.



Abbildung 25: Blaumaßstäbe 1-8 nach der 10., 14. und 17. Bestrahlungsperiode (175, 764 und 1450 Stunden) und LightCheck® Sensitive nach der 17. Bestrahlungsperiode (1450 Stunden)

In Abbildung 25 ist zu sehen, dass die Blaumaßstäbe Nr. 6 bis Nr. 8 sehr lichtbeständig sind. Die Wirkungen in den ersten drei Feldern werden vielmehr durch die UV-Strahlung unterhalb 300 nm der technischen Xe-Höchstdrucklampe verursacht, die aber weder bei Tageslicht noch bei künstlicher Beleuchtung auftritt. In den Feldern 4 bis 10 ist auch nach 1450 Stunden Bestrahlungszeit die visuell ermittelte Schädigungswirkung minimal. Aus diesem Grund werden die Blaumaßstäbe Nr. 6 bis Nr. 8 nicht weiter berücksichtigt.

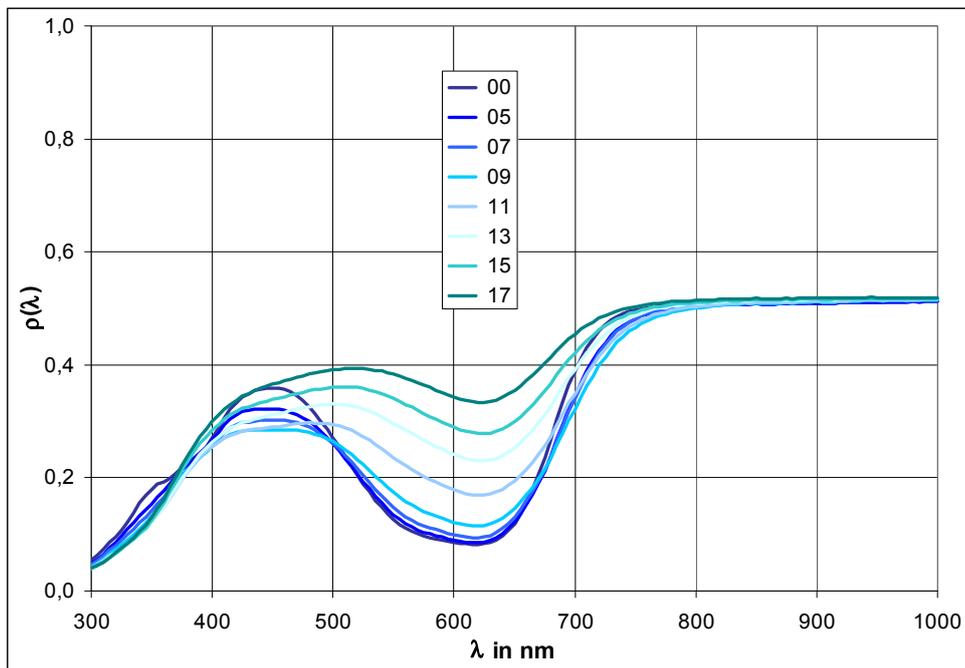


Abbildung 26: Änderung des spektralen Reflexionsgrades des Blaumaßstabes Nr. 1 im Feld 5
Parameter: Bestrahlungsperiode

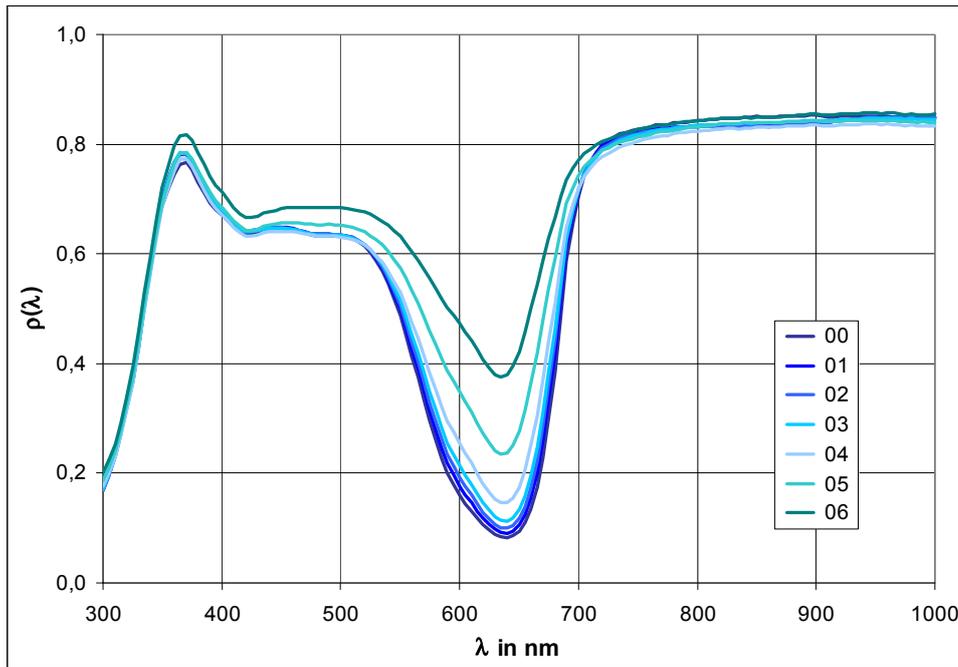


Abbildung 27: Änderung des spektralen Reflexionsgrades des LightCheck® Sensitive im Feld 5
Parameter: Bestrahlungsperiode

Aus den gemessenen spektralen Reflexionsgraden der einzelnen Felder jeder Probe wurden die Farbabstände dieser Felder im Vergleich zum unbestrahlten Feld bei Beleuchtung mit Normlichtart D_{65} berechnet. Der Farbabstand ist dabei die Änderung einer wahrgenommenen Farbe nach Bestrahlung eines Objektes gegenüber der Körperfarbe des unbestrahlten Objektes. Dazu wird als angenähert empfindungsgemäß gleichabständiger Farbenraum der $L^*a^*b^*$ -Farbenraum CIE 1976 aus [DIN EN ISO 11664-4] verwendet. Die Farbänderung wird dann durch den Farbabstand ΔE^*_{ab} beschrieben.

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Der Zusammenhang mit dem Normvalenzsystem mit den Normfarbwerten ist dabei gegeben durch:

$$L^* = 116 \sqrt[3]{(Y/Y_n)} - 16$$

$$a^* = 500 \left(\sqrt[3]{(X/X_n)} - \sqrt[3]{(Y/Y_n)} \right)$$

$$b^* = 200 \left(\sqrt[3]{(Y/Y_n)} - \sqrt[3]{(Z/Z_n)} \right)$$

X, Y, Z Normfarbwerte der bestrahlten Probe

X_n, Y_n, Z_n Normfarbwerte des vollkommen mattenweißen Körpers unter der beleuchtenden Lichtart

In Abbildung 28 sind die Farbabstände ΔE^*_{ab} für den Blaumaßstab Nr. 1 in zehn Feldern als Funktion der Bestrahlung (physikalische Dosis) H_e dargestellt.

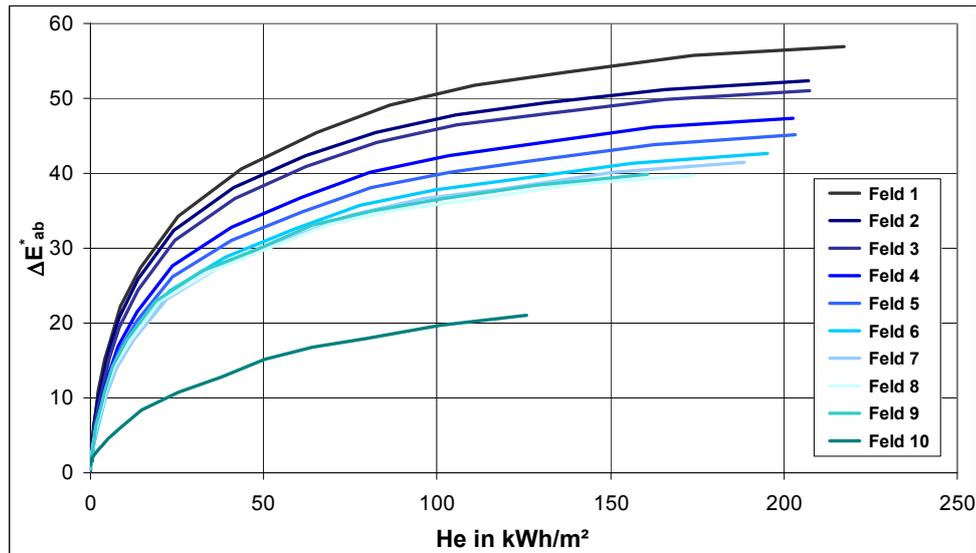


Abbildung 28: Farbabstand ΔE_{ab}^* als Funktion der Bestrahlung H_e für Blaumaßstab Nr. 1

Zur Bestimmung der relativen spektralen Objekttempfindlichkeit wurde die Gleichung

$$s(\lambda)_{dm,rel} = e^{-b(\lambda-300nm)} \cdot \frac{\alpha(\lambda)}{\alpha(300nm)}$$

zugrunde gelegt, da der spektrale Absorptionsgrad $\alpha(\lambda) = 1 - \rho(\lambda)$ der unbestrahlten Proben ermittelt wurde. Der Faktor b und der Zusammenhang zwischen Wirkung (Farbabstand ΔE_{ab}^*) und Ursache (wirksame Bestrahlung $H_{s,dm}$) wurden so bestimmt, dass die Streuung der einzelnen Werte des Farbabstandes bis $\Delta E_{ab}^* = 3$ um ein Polynom zweiten Grades minimal ist.

In Tabelle 12 sind die Werte des Faktors b und die wirksame Schwellenbestrahlung $H_{s,dm}$ für $\Delta E_{ab}^* = 1$ für die Blaumaßstäbe Nr. 1 bis Nr. 3 angegeben. In Abbildung 29 sind die relativen spektralen Objekttempfindlichkeiten $s(\lambda)_{dm,rel}$ der drei Blaumaßstäbe dargestellt. Abbildung 30 bis Abbildung 32 geben entsprechend die ermittelten Funktionen der Wirkung und Ursache wieder.

Tabelle 12: Materialtypische Konstante b und wirksame Schwellenbestrahlung (Dosis) für Blaumaßstäbe Nr. 1 bis Nr. 3

Blaumaßstab Nr.	b-Wert	$H_{s,dm}$ in Wh/m ² für $\Delta E_{ab}^* = 1$
1	0,0060	20
2	0,0095	29
3	0,0165	47

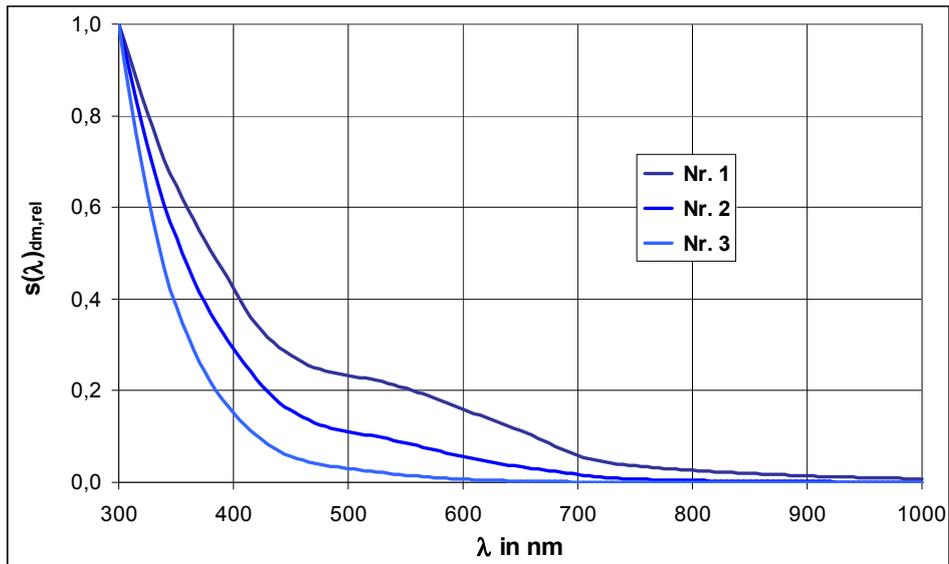


Abbildung 29: Relative spektrale Objektsempfindlichkeit der Blaumaßstäbe Nr. 1 bis Nr. 3

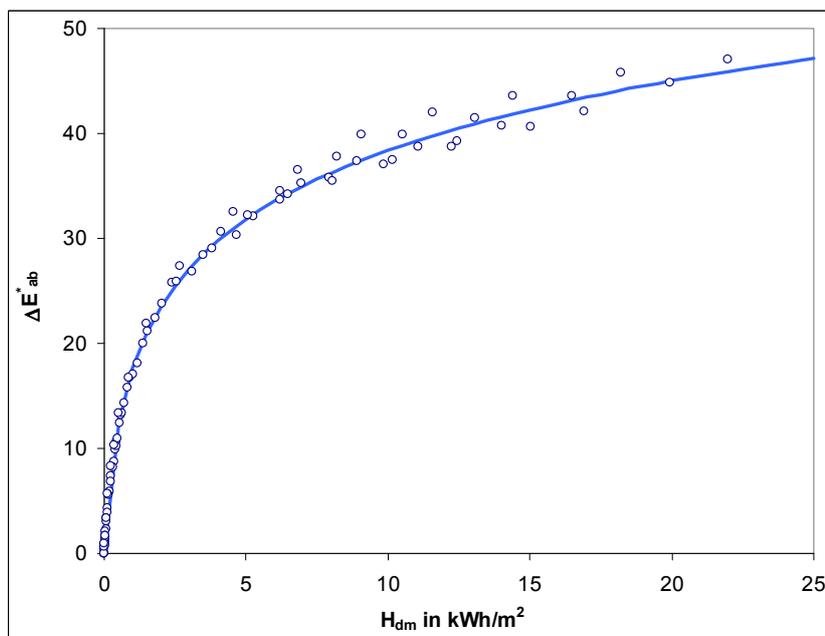


Abbildung 30: Farbabweichung ΔE^*_{ab} als Funktion der wirksamen Bestrahlung H_{dm} (Dosis) für Blaumaßstab Nr. 1

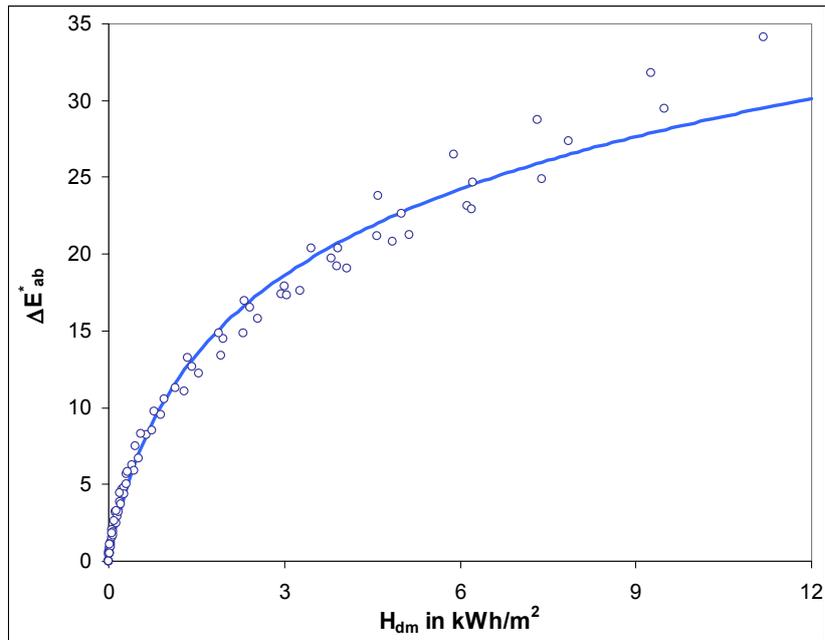


Abbildung 31: Farbabstand ΔE^*_{ab} als Funktion der wirksamen Bestrahlung H_{dm} (Dosis) für Blaumaßstab Nr. 2

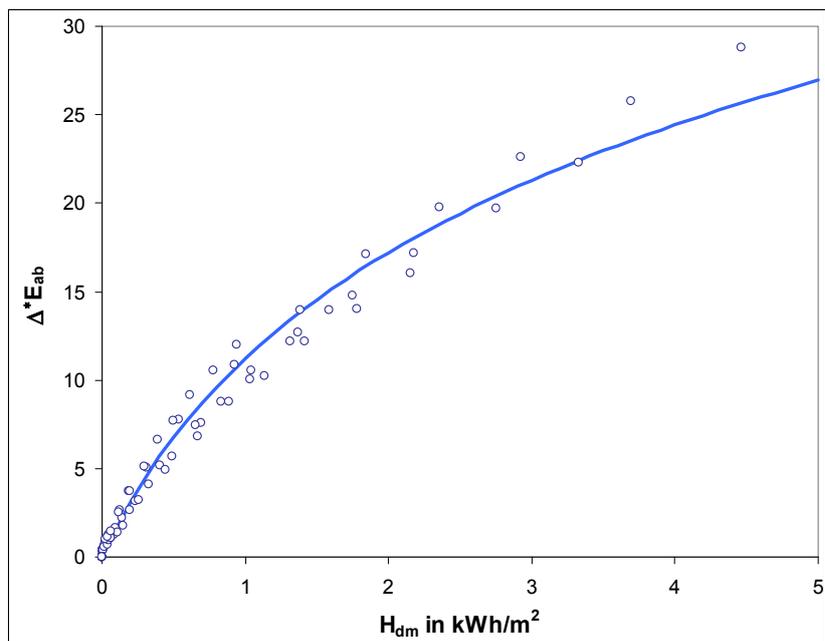


Abbildung 32: Farbabstand ΔE^*_{ab} als Funktion der wirksamen Bestrahlung H_{dm} (Dosis) für Blaumaßstab Nr. 3

Für die Blaumaßstäbe Nr. 4 und Nr. 5 sind in Abbildung 33 die relativen spektralen Objektempfindlichkeiten $s(\lambda)_{dm,rel}$ mit einem ermittelten b-Faktor von 0,0195 dargestellt. In Abbildung 34 ist die ermittelte Funktion der Wirkung und Ursache für Blaumaßstab Nr. 5 mit einer wirksamen Schwellenbestrahlung von $H_{s,dm} = 199 \text{ Wh/m}^2$ aufgetragen.

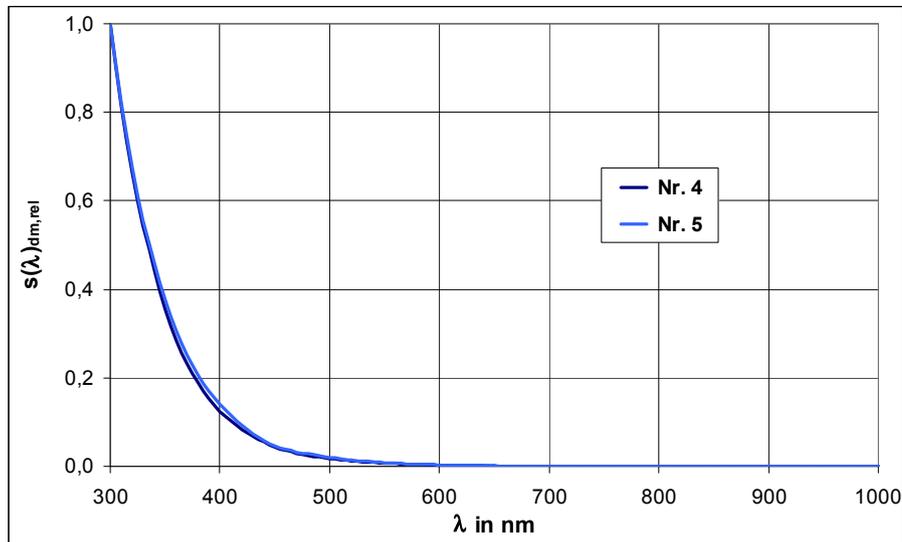


Abbildung 33: Relative spektrale Objektempfindlichkeit der Blaumaßstäbe Nr. 4 und Nr. 5

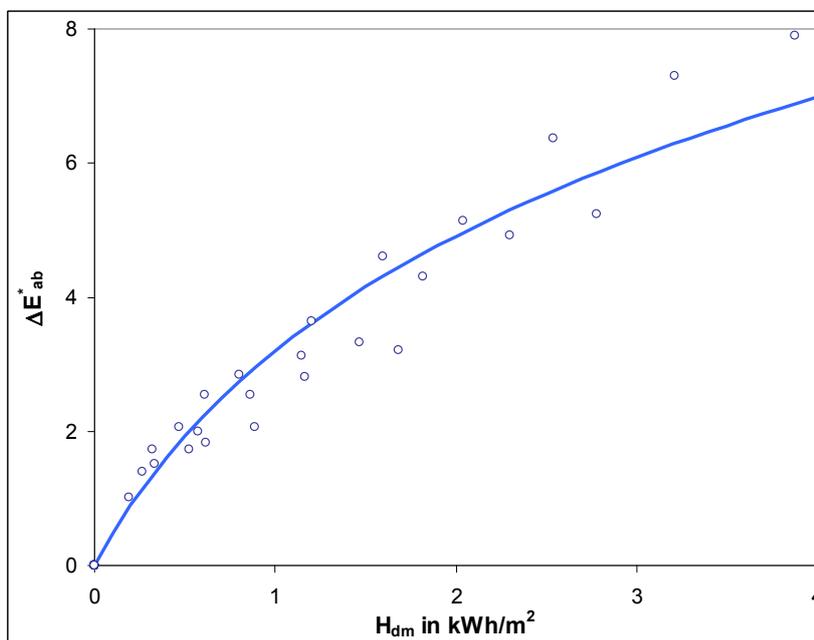


Abbildung 34: Farbabstand ΔE^*_{ab} als Funktion der wirksamen Bestrahlung H_{dm} (Dosis) für Blaumaßstab Nr. 5

Zum Vergleich der Blaumaßstäbe Nr. 4 und Nr. 5 gibt Abbildung 35 die Verhältnisse der Farbabstände wieder. Es zeigt sich, dass Blaumaßstab Nr. 5 geringfügig empfindlicher ist als Blaumaßstab Nr. 4, grundsätzlich aber beide Blaumaßstäbe ein annähernd gleiches Verhalten aufweisen.

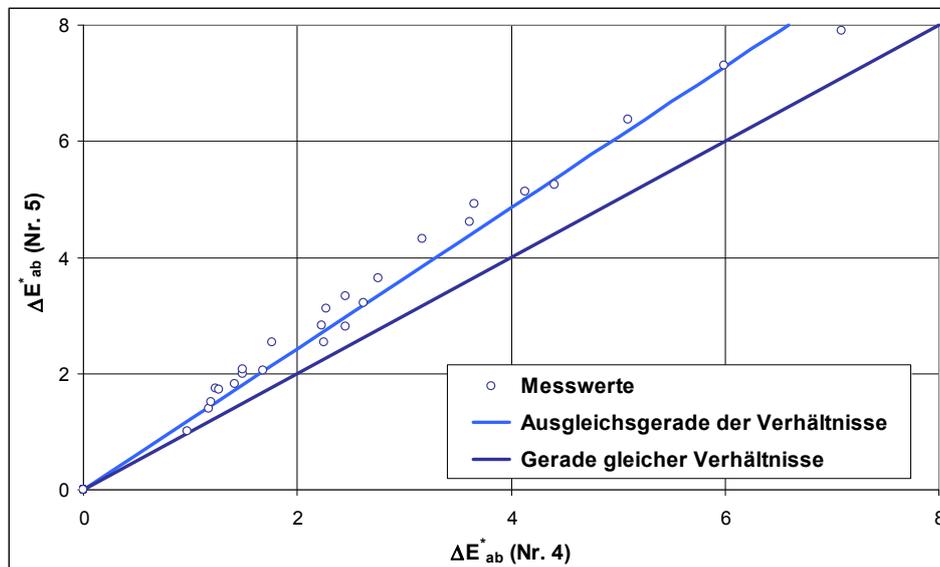


Abbildung 35: Verhältnisse der Farbabstände der Blaumaßstäbe Nr. 4 und Nr. 5

In Abbildung 25 ist bereits visuell zu erkennen, dass der LightCheck[®] Sensitive über den gesamten Wellenlängenbereich und insbesondere auch im UV-Bereich sehr empfindlich ist. In Abbildung 36 ist die relative spektrale Objekttempfindlichkeit $s(\lambda)_{dm,rel}$ mit einem ermittelten b-Faktor von 0,0020 dargestellt. Abbildung 37 zeigt die ermittelte Funktion der Wirkung und Ursache mit einer wirksamen Schwellenbestrahlung von $H_{s,dm} = 12 \text{ Wh/m}^2$.

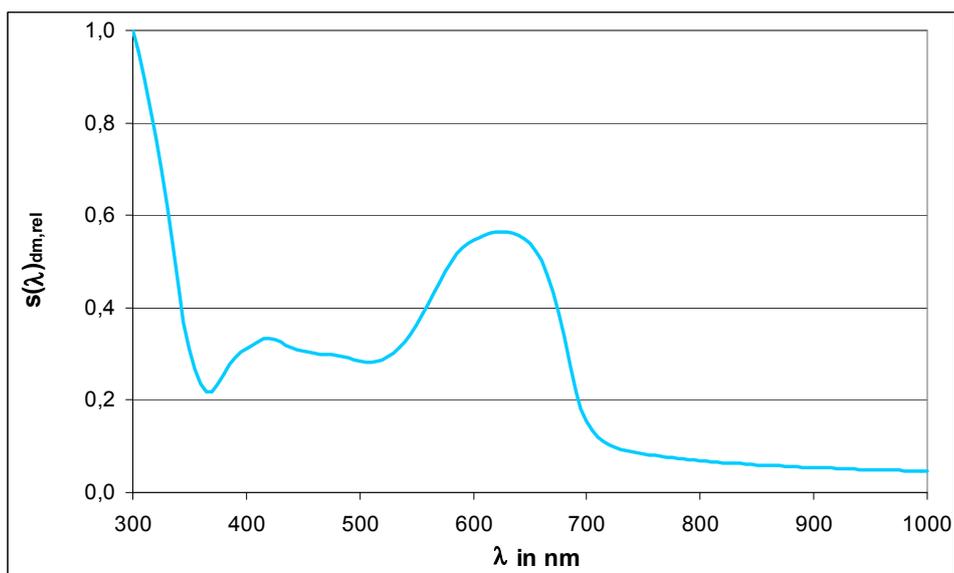


Abbildung 36: Relative spektrale Objekttempfindlichkeit des LightCheck[®] Sensitive

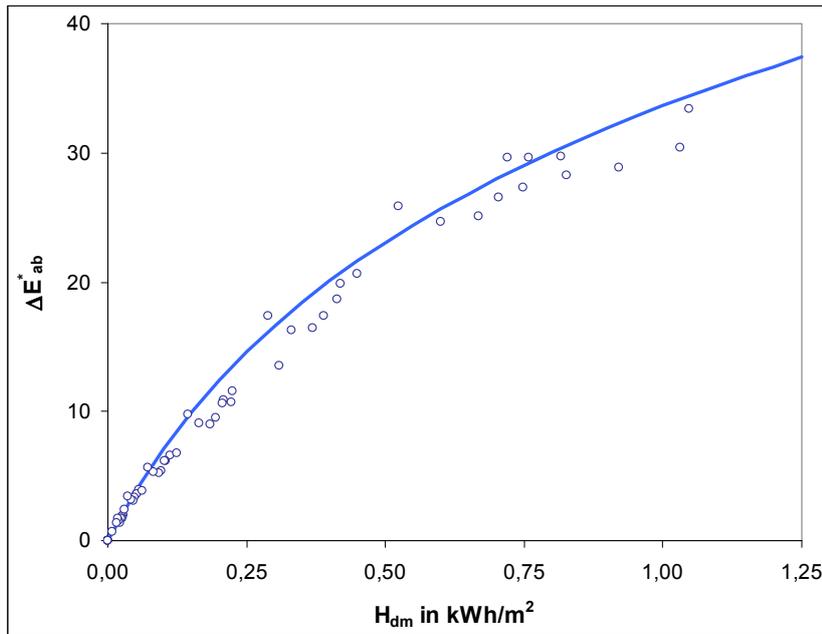


Abbildung 37: Farbabweichung ΔE^*_{ab} als Funktion der wirksamen Bestrahlung H_{dm} (Dosis) für LightCheck[®] Sensitive

Die wirksame Schwellenbestrahlung erhöht sich jeweils circa um den Faktor 1,5 von Blaumaßstab Nr. 1 bis Nr. 3. Zum Blaumaßstab Nr. 4 bzw. Nr. 5 ergibt sich ein größerer Abstand mit einem Faktor von circa 4. Beim Vergleich der wirksamen Schwellenbestrahlung ist jedoch immer auch die unterschiedliche relative spektrale Objektempfindlichkeit der einzelnen Proben zu beachten. Diese ist bei allen Blaumaßstäben für längerwellige sichtbare Strahlung niedriger als für die kurzwellige sichtbare Strahlung, was bei den Blaumaßstäben Nr. 4 bzw. Nr. 5 besonders deutlich ausfällt.

Der LightCheck[®] Sensitive weist einen untypischen Verlauf der relativen spektralen Objektempfindlichkeit auf. Neben hohen Werten im UV-Bereich fällt besonders eine höhere Empfindlichkeit im langwelligen sichtbaren Bereich zwischen 600 nm und 700 nm auf. Zusätzlich bedeutet der niedrige Wert der wirksamen Schwellenbestrahlung eine sehr hohe Empfindlichkeit.

3.2.3 Sanierung der künstlichen Beleuchtung im Bode-Museum Berlin

Um die Möglichkeiten der modernen LED-Technik zu demonstrieren, wurden in zwei Ausstellungssälen des Bode-Museums Berlin die Beleuchtungsanlagen saniert. Zur exakten Bewertung der alten und neuen Strahler wurden diese im Labor unter verschiedenen Gesichtspunkten untersucht. Die Lichtquellen werden dabei durch elektrische (Leistung P , Leistungsfaktor $\cos\phi$), photometrische (Lichtstrom Φ_v , Leuchtdichte L_v , Lichtstärkeverteilungskurve LVK), radiometrische (Strahlungsleistung Φ_e , Strahldichte L_e , spektrale Bestrahlungsstärke $E_\lambda(\lambda)$), colorimetrische (Farbort x, y oder u', v' , allgemeiner Farbwiedergabeindex R_a , spezielle Farbwiedergabeindizes R_i , ähnlichste Farbtemperatur T_{cp}) und aktinische (Schädigungspotenzial p) Größen beschrieben.

Oberlichtsaal im Bode-Museum Berlin

Im Raum 212 im Obergeschoss des Bode-Museums wurden die in Stromschienen montierten 14 konventionellen Halogenglühlampenstrahler durch 15 neue LED-Strahler ausgewechselt (Abbildung 38). Die Bestandsanlage war mit 35 W und 100 W Niedervolthalogenglühlampen bestückt, die von manuell dimmbaren elektronischen Vorschaltgeräten gespeist wurden. Bei den LED-Strahlern handelt es sich um zwei verschiedene Typen der Serie Optec der Firma ERCO: Vier Narrow Spot mit 8 W LED-Leistung dienen der gezielten Anstrahlung einzelner Objekte aus größerer Entfernung. Die weiteren elf Strahler mit 24 W LED-Leistung können durch den Einsatz verschiedener Linsen von Spot bis Wide-Flood oder auch als ovaler Strahler oder Wandfluter eingesetzt werden. Mit Hilfe dieser Wechseloptiken kann eine für die individuellen Bedürfnisse der Ausstellung angepasste Ausleuchtung der Objekte erzielt werden. Durch den Austausch der Strahler wurde die maximale installierte Leistung von 1,36 kW um fast 70 % auf 410 W reduziert.



Abbildung 38: Installation der LED-Strahler im Oberlichtsaal (Bode-Museum)

Oberhalb der doppelt verglasten Staubdecke befinden sich 108 80 W T5-Leuchtstofflampen mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von $T_{cp} = 4000 \text{ K}$ (Abbildung 39). Die elektronischen Vorschaltgeräte sind über eine 1-10V-Schnittstelle dimmbar, jedoch wird diese Funktion nicht zur tageslichtabhängigen Regelung genutzt. Es wird lediglich eine niedrige Dimmstufe fest eingestellt, um die Sicherheit auf den Verkehrswegen im Ausstellungssaal zu gewährleisten. Aus diesem Grund wird die Oberlichtbeleuchtung in den weiteren Untersuchungen nicht berücksichtigt.



Abbildung 39: 80 W T5-Leuchtstofflampen als Ergänzungsbeleuchtung der Tageslichtdecke

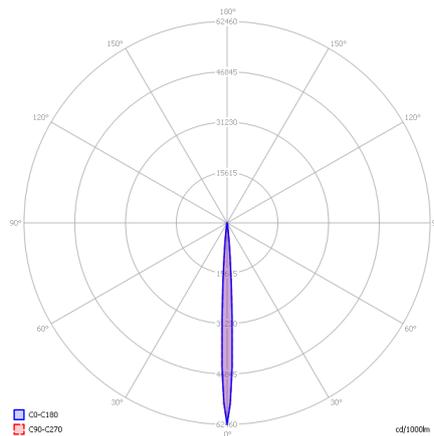
HGL-Strahler 35 W

Ein Exemplar der mit einer konventionellen 35 W Halogenglühlampe bestückten Strahler aus der Bestandsanlage wurde im Labor messtechnisch untersucht. In Tabelle 13 sind zunächst die gemessenen elektrischen und lichttechnischen Größen eingetragen. Zur Bewertung der Energieeffizienz dient die Systemlichtausbeute η , die das Verhältnis des ausgestrahlten Lichtstroms Φ zur aufgenommenen elektrischen Leistung P darstellt. Dabei wird die Systemleistung betrachtet, das heißt Vorschaltgeräte werden dabei einbezogen.

Tabelle 13: Messwerte des HGL-Strahlers

Messgröße	Messwert HGL-Strahler
Spannung U	230 V ~
Strom I	168 mA
Leistung P	38,0 W
Leistungsfaktor $\cos\varphi$	0,984
Lichtstrom Φ	358 lm
Systemlichtausbeute η	9,4 lm/W

Mit einem Spiegelgoniophotometer wurde die Lichtstärkeverteilung eines HGL-Strahlers in C-Ebenen gemessen. Abbildung 40 zeigt die rotationssymmetrischen Lichtstärkeverteilungskurven (LVK) in den C0-C180 und C90-C270 Ebenen. Es zeigt sich die für einen Spot typische sehr enge Bündelung der Lichtstärken.



43 zeigt die Veränderung der ähnlichsten Farbtemperatur durch das Herunterdimmen. Eine derartige Änderung ist durch das menschliche Auge als Orangefärbung deutlich wahrzunehmen.

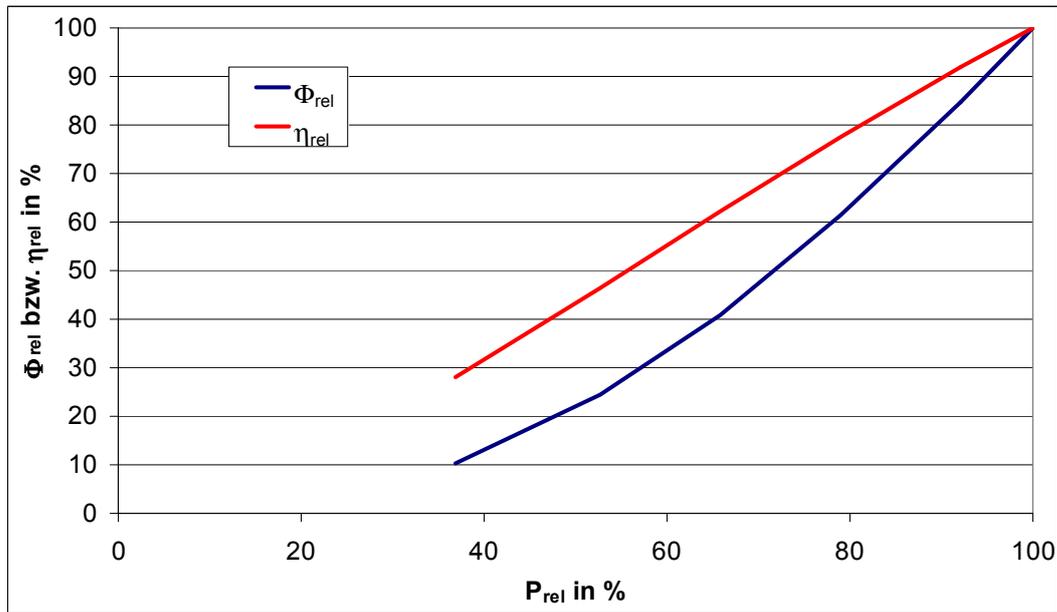


Abbildung 42: Dimmkennlinien des HGL-Strahlers

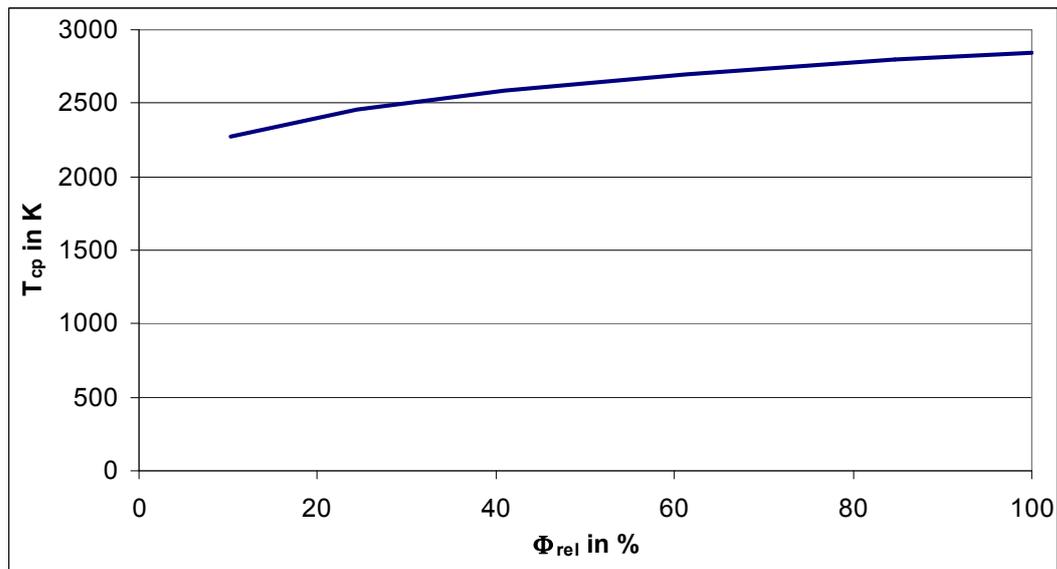


Abbildung 43: Ähnlichste Farbtemperatur in Abhängigkeit der Dimmstufe des HGL-Strahlers

Zum Vergleich der Schädigung von Museumsobjekten durch verschiedene Lichtquellen wird, wie in Abschnitt 3.2.1 erläutert, zunächst das Schädigungspotential p für zwei unterschiedliche Materialklassen berechnet, welches dann auf eine Referenzlichtquelle normiert wird. In Tabelle 14 ist das Schädigungspotential des zu untersuchenden HGL-Strahlers ($T_{cp} = 2840$ K) in verschiedenen Dimmzuständen im Vergleich zu einem typischen HGL-Strahler mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von $T_{cp} = 2800$ K ohne UV-Filter eingetragen.

Tabelle 14: Schädigungspotentiale des HGL-Strahlers bei verschiedenen Dimmstufen

	Herkömmlicher HGL-Strahler mit $T_{cp}=2800$ K ohne UV-Filter	Untersuchter HGL-Strahler mit Dimmstufen					
		100%	85%	61%	41%	24%	10%
p in mW / lm für b = 0,012	0,193	0,201	0,198	0,192	0,185	0,180	0,172
p_{rel}	1,00	1,04	1,03	0,99	0,96	0,93	0,89
p in mW / lm für b = 0,038	0,0037	0,0050	0,0048	0,0042	0,0038	0,0033	0,0025
p_{rel}	1,00	1,35	1,30	1,14	1,03	0,89	0,68

Die besonders für zeitungspapierähnliche Objekte ($b = 0,038$) höheren Werte für p_{rel} sind mit der höheren ähnlichsten Farbtemperatur des untersuchten HGL-Strahlers gegenüber des Vergleichsstrahlers zu erklären.

Aus den gemessenen spektralen Größen lassen sich der Farbort im Normvalenzsystem (x, y) und (u', v'), die ähnlichste Farbtemperatur T_{cp} sowie die speziellen Farbwiedergabeindizes R_i berechnen. Diese sind in Tabelle 15 zusammengestellt. Als Mittelwert der ersten acht speziellen Farbwiedergabeindizes ist zusätzlich der allgemeine Farbwiedergabeindex R_a definiert. Die sehr guten Farbwiedereigenschaften der Halogenleuchte werden durch das Dimmen nicht beeinträchtigt.

Tabelle 15: Farb- und Farbwiedereigenschaften des HGL-Strahlers bei Dimmstufe 100%

Farbort	
x	0,4485
y	0,4076
u'	0,2565
v'	0,5245
Ähnlichste Farbtemperatur T_{cp} in K	2840
Spezielle Farbwiedergabeindizes R_i	
1	100
2	100
3	100
4	100
5	100
6	100
7	100
8	100
9	100
10	100
11	100
12	100
13	100
14	100
Allgemeiner Farbwiedergabeindex R_a	100

LED-Strahler „Optec“

Als Ersatz für den vorher beschriebenen HGL-Strahler wurden zwei Strahler in LED-Technik der Firma ERCO ausgewählt. Der mit 35 W bestückten HGL-Strahler lässt sich durch einen eng gebündelter Strahler mit 8 W LED-Leistung austauschen, Wattagen bis 100 W lassen sich mit dem LED-Strahler mit 24 W nomineller Leistung ersetzen. Die elektrischen und lichttechnischen Messwerte sind in Tabelle 16 eingetragen. Bei diesen Strahlern ist die Systemlichtausbeute etwa um den Faktor 5 größer als bei der Halogenglühlampenversion.

Für den 24 W LED-Strahler sind fünf verschiedene Optikvorsätze mitgeliefert, die es ermöglichen, die Ausstrahlcharakteristik an die erforderlichen Gegebenheiten anzupassen. Die jeweiligen Lichtstärkeverteilungskurven sind in Abbildung 44 gezeigt.

Tabelle 16: Messwerte der „Optec“ LED-Strahler

Messgröße	Messwert LED 8 W	Messwert LED 24 W
Spannung U	230 V ~	230 V ~
Strom I	71 mA	132 mA
Leistung P	11,2 W	28,5 W
Leistungsfaktor $\cos\varphi$	0,690	0,943
Lichtstrom Φ	479 lm	1700 lm
Systemlichtausbeute η	43,8 lm/W	59,6 lm/W

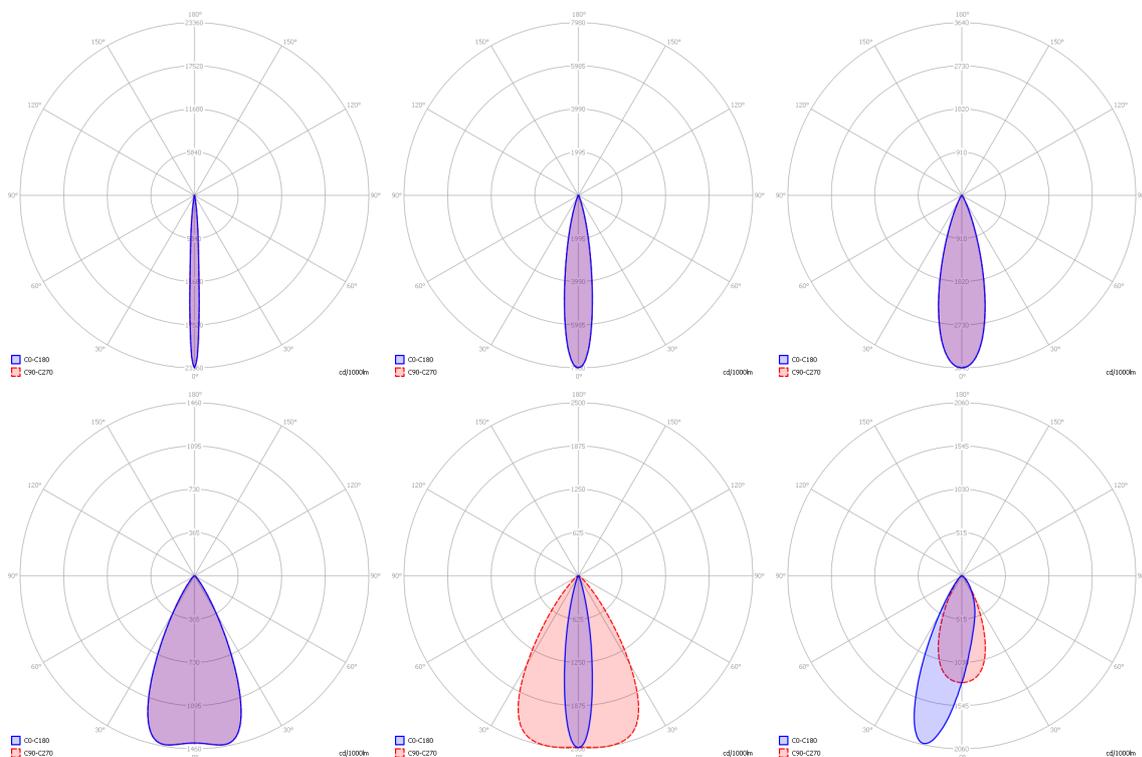


Abbildung 44: Lichtstärkeverteilungskurven in C0-C180 und C90-C270 Ebenen der LED-Strahler (von links oben nach rechts unten): Narrow-Spot (8 W); Spot; Flood; Wide Flood; Oval; Wallwash (alle 24 W)

Aus der in Abbildung 45 gezeigten relativen spektralen Strahlungsverteilung ergeben sich im Vergleich zu HGL-Systemen deutlich geringere Schädigungspotentiale (Tabelle 17). Die errechneten Kennwerte für die Farb- und Farbwiedergabewerte sind entsprechend in Tabelle 18 eingetragen.

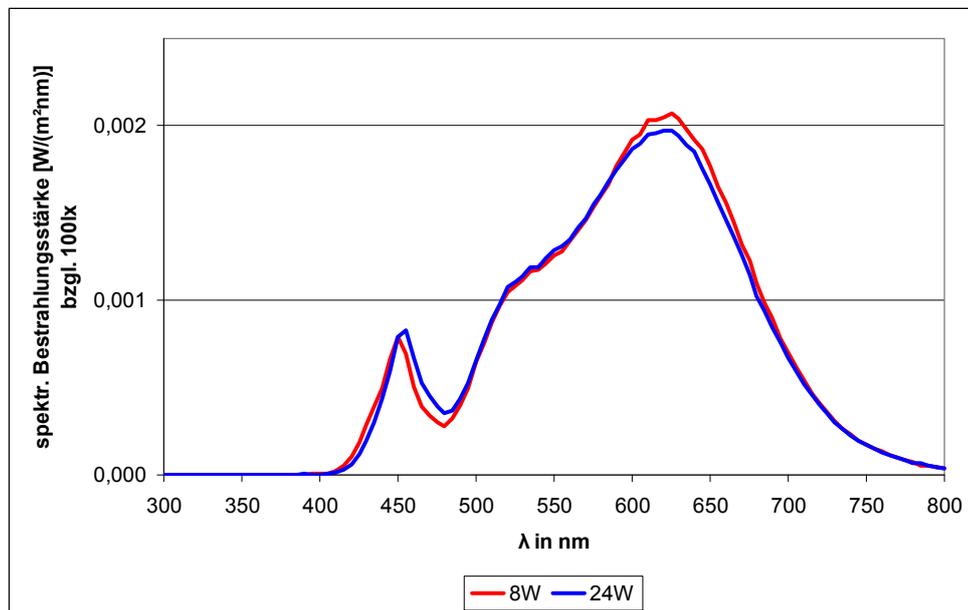


Abbildung 45: Relative spektrale Strahlungsverteilung der „Optec“ LED-Strahler

Tabelle 17: Schädigungspotentiale der „Optec“ LED-Strahler bei verschiedenen Dimmstufen

	LED-Strahler mit Dimmstufen					
	8W 100%	8W 36%	8W 18%	24W 100%	24W 48%	24W 20%
p in mW / lm für b = 0,012	0,145	0,143	0,141	0,146	0,143	0,142
p_{rel}	0,75	0,74	0,73	0,76	0,74	0,74
p in mW / lm für b = 0,038	0,0013	0,0012	0,0011	0,0012	0,0011	0,0011
p_{rel}	0,35	0,32	0,30	0,32	0,30	0,30

Tabelle 18: Farb- und Farbwiedergabeeigenschaften der „Optec“ LED-Strahler bei Dimmstufe 100%

LED-System	8W	24W
Farbort		
x	0,4509	0,4431
y	0,4110	0,4112
u'	0,2566	0,2515
v'	0,5261	0,5251
Ähnlichste Farbtemperatur T_{cp} in K	2835	2955
Spezielle Farbwiedergabeindizes R_i		
1	92	91
2	93	94
3	95	96
4	93	92
5	91	90
6	93	92
7	92	93
8	81	81
9	55	54
10	85	84
11	94	93
12	81	77
13	92	91
14	96	97
Allgemeiner Farbwiedergabeindex R_a	91	91

Abbildung 46 zeigt die relativen Verläufe des Lichtstroms und der Systemlichtausbeute über der Systemleistung. Es ist ein für Dimmfunktionen deutlich besserer Verlauf der Systemlichtausbeute zu erkennen als beim HGL-Strahler. Für das 24 W-System steigt die Kurve beim Herunterdimmen bis 60 % sogar an, was darauf hindeutet, dass bei voller Leistung die Kühlung der LEDs nicht so effektiv funktioniert, wie im gedimmten Betrieb. Bei steigender Temperatur der LEDs sinkt die Lichtausbeute dann entsprechend ab. Abbildung 47 zeigt die Veränderung der ähnlichsten Farbtemperatur durch das Herunterdimmen. Eine derartige geringe Änderung ist nicht wahrnehmbar. Der Farbort und die Farbwiedergabeeigenschaften ändern sich dadurch ebenfalls kaum.

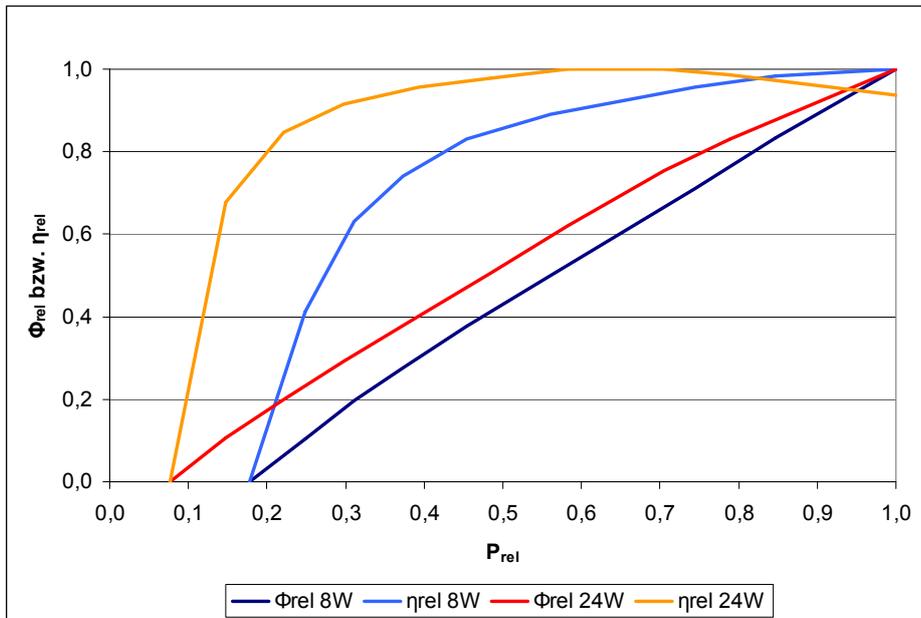


Abbildung 46: Dimmkennlinien der „Optec“ LED-Strahler

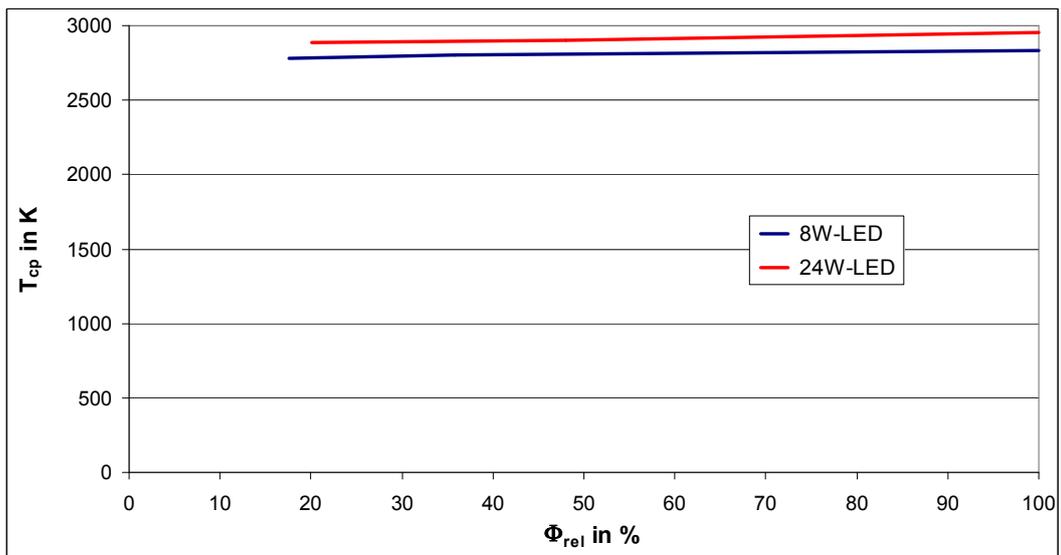


Abbildung 47: Ähnlichste Farbtemperatur in Abhängigkeit der Dimmstufe der „Optec“ LED-Strahler

Raum mit Seitenfenstern im Bode-Museum Berlin

Der Ausstellungssaal 124 im Erdgeschoss ist mit fast raumhohen, großflächigen Seitenfenstern ausgestattet, deren Lichttransmissionsgrad bei Bedarf mit einem innenliegenden Sonnenschutzstore herabgesetzt werden kann. Als Akzentbeleuchtung dienten bisher elf 70 W HIT-Strahler sowie acht 100 W HGL-Strahler, die in 3-Phasenstromschienen befestigt waren (Abbildung 48). Die installierte Leistung und damit bei einem unregelmäßigen System auch der Energieumsatz konnte durch den Einsatz von LED-Strahlern bei gleichzeitiger Reduzierung der Anzahl auf zwölf Strahler insgesamt ähnlich wie im Oberlichtsaal um ca. 70 % gesenkt werden. Dabei ergaben sich jedoch weitere erhebliche Vorteile durch den Einsatz von LEDs mit sehr guter Farbwiedergabe: So ist eine Auswahl der ähnlichsten Farbtemperatur zwischen 3000 K und 6000 K möglich. Das eingesetzte System ist bei nahezu gleichbleibender Farbtemperatur im Bereich von 14 % bis 100 % dimmbar.



Abbildung 48: Installation der „High CRI“ LED-Strahler im Ausstellungssaal mit Seitenfenstern

Zur Sanierung der Beleuchtung dieses Ausstellungssaals wurden zwölf Stück „High CRI Strahler“ der Firma OSRAM installiert (Abbildung 49). Diese Strahler zeichnen sich besonders durch eine in sieben Stufen einstellbare ähnlichste Farbtemperatur aus. Zusätzlich lässt sich die Leistung jeweils in zwölf Stufen dimmen.



Abbildung 49: „High CRI“ LED-Strahler der Firma Osram

Ein Exemplar dieses Typs wurde im Labor messtechnisch untersucht. Die für die einzelnen Farbstufen bei 100 % Leistung ermittelten elektrischen und lichttechnischen Messwerte sind in Tabelle 19 eingetragen.

Tabelle 19: Messwerte des „High CRI“ LED-Strahlers bei Dimmstufe 100%

Farbstufe	2900 K	3350 K	3800 K	4150 K	4650 K	5100 K	5400 K
Spannung U	230 V						
Strom I	0,154 A	0,178 A	0,200 A	0,165 A	0,150 A	0,132 A	0,127 A
Leistung P	33,2 W	39,0 W	43,7 W	36,0 W	32,1 W	28,0 W	26,6 W
Leistungsfaktor $\cos\varphi$	0,94	0,95	0,96	0,95	0,93	0,92	0,91
Lichtstrom Φ	1092 lm	1359 lm	1600 lm	1325 lm	1130 lm	1005 lm	957 lm
Systemlichtausbeute η	33 lm/W	35 lm/W	37 lm/W	37 lm/W	35 lm/W	36 lm/W	36 lm/W

Es ist zu erkennen, dass der Lichtstrom je nach Farbstufe zwischen etwa 1000 lm und 1600 lm variiert. Dies ist auf das Funktionsprinzip der Leuchte zurückzuführen: Zwei Typen von weißen LEDs (warmweiß und kaltweiß) werden zusammen mit roten, grünen und blauen LEDs betrieben. Die Mischung ergibt dann die unterschiedlichen ähnlichsten Farbtemperaturen. Im Bereich um 4000 K tragen alle LEDs zum Lichtstrom bei, dort finden sich dann die höchsten Lichtstromwerte. Die Lichtausbeute von etwa 35 lm/W ist für Strahler mit LED-Technik relativ niedrig. Dies ist der Optimierung auf eine besonders gute Farbwiedergabe geschuldet. Abbildung 50 zeigt die auf 100 lx bezogene spektrale Bestrahlungsstärke in Abhängigkeit der Farbstufe. Hier ist das beschriebene Funktionsprinzip der gezielten Mischung mehrerer LEDs zu erkennen, je niedriger die ähnlichste Farbtemperatur ist, desto höher ist der Anteil der roten LED (660 nm). Entsprechend geringer fällt der Anteil der blauen und der kaltweißen LED aus.

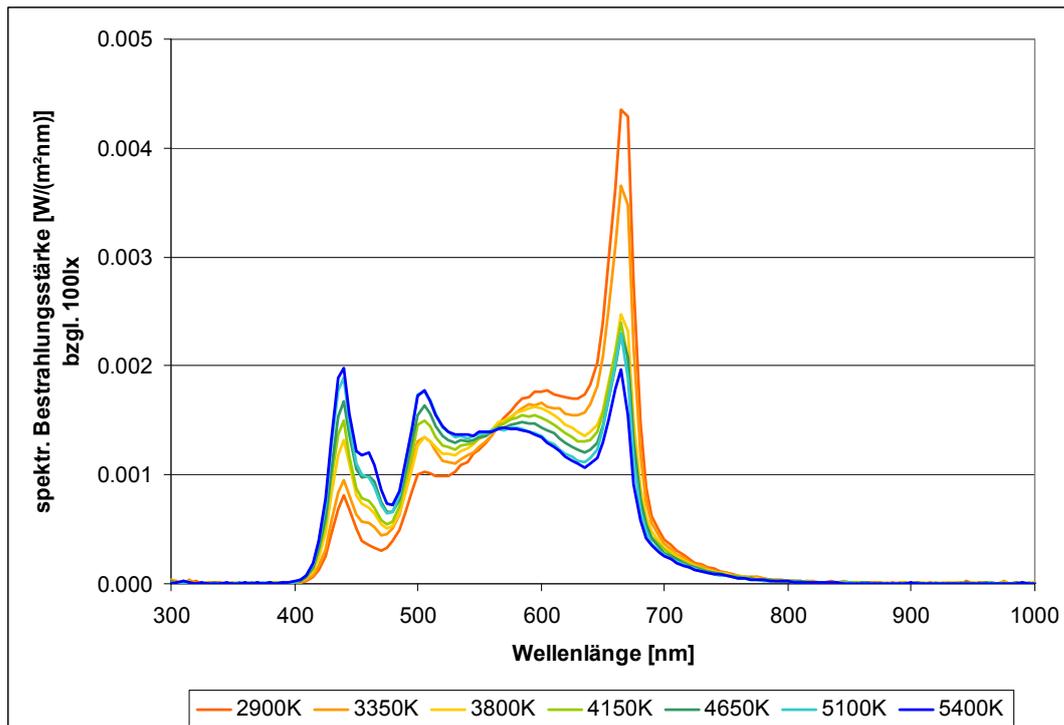


Abbildung 50: spektrale Bestrahlungsstärke bzgl. 100 lx in Abhängigkeit der Farbstufe des „High CRI“-LED Strahlers

Aus diesen spektralen Verläufen lassen sich die in Tabelle 20 eingetragenen Werte für die Farb- und Farbwiedergabeeigenschaften berechnen. Hervorzuheben sind die sehr guten Werte für den allgemeinen Farbwiedergabeindex R_a sowie die zumindest bei niedrigen ähnlichsten Farbtemperaturen sehr hohen Werte für die Wiedergabe gesättigten Rots (R_9).

Die Einstellung der ähnlichsten Farbtemperatur T_{cp} sowie der für eine optimale Erkennbarkeit notwendigen Dimmstufe geschah während der Installation der LED-Strahler über eine visuelle Bewertung im Beisein der Restauratoren und des Ausstellungsleiters.

Tabelle 20: Farb- und Farbwiedergabeeigenschaften des „High CRI“ LED-Strahlers bei Dimmstufe 100%

Farbstufe	2900 K	3350 K	3800 K	4150 K	4650 K	5100 K	5400 K
Farbort							
x	0,4450	0,4156	0,3898	0,3755	0,3568	0,3439	0,3348
y	0,4088	0,3998	0,3858	0,3800	0,3669	0,3629	0,3531
u'	0,2538	0,2386	0,2276	0,2206	0,2134	0,2063	0,2039
v'	0,5244	0,5165	0,5069	0,5023	0,4937	0,4899	0,4839
Ähnlichste Farbtemperatur T_{cp} in K	2910	3350	3810	4150	4660	5100	5420
Spezielle Farbwiedergabeindizes R_i							
1	95	97	92	93	95	93	93
2	96	98	94	95	95	94	94
3	98	99	98	98	98	97	97
4	96	98	94	95	96	93	93
5	96	98	93	95	96	94	94
6	95	98	93	94	95	93	94
7	96	98	95	95	96	93	94
8	96	98	89	91	94	92	90
9	95	97	72	77	83	80	74
10	95	99	90	92	93	90	90
11	98	95	96	96	95	93	94
12	92	94	90	91	92	88	90
13	95	98	93	93	95	93	93
14	99	99	99	99	99	99	99
Allgemeiner Farbwiedergabeindex R_a	96	98	94	94	95	94	94

Die aus den Spektralmesswerten berechneten Schädigungspotentiale sind in Tabelle 21 eingetragen. Dabei zeigt sich, dass die „High CRI“ LED-Leuchte besonders für zeitungspapierähnliche museale Objekte sehr gut geeignet ist. Für alle empfindlichen Ausstellungsstücke ist die Auswahl einer niedrigen Farbstufe empfehlenswert, da mit steigender ähnlichster Farbtemperatur aufgrund des höheren Blauanteils das Schädigungspotenzial ansteigt.

Tabelle 21: Schädigungspotentiale des „High CRI“ LED-Strahlers bei Dimmstufe 100%

	Osram LED-Strahler mit unterschiedlichen T _{cp}						
	2900 K	3350 K	3800 K	4150 K	4650 K	5100 K	5400 K
p in mW / lm für b = 0,012	0,160	0,178	0,196	0,209	0,227	0,240	0,251
p_{rel}	0,83	0,92	1,02	1,08	1,18	1,24	1,30
p in mW / lm für b = 0,038	0,0015	0,0019	0,0025	0,0028	0,0032	0,0035	0,0038
p_{rel}	0,41	0,51	0,67	0,76	0,86	0,96	1,02

Abbildung 51 zeigt die in der Farbstufe 2900 K gemessenen Lichtstärkeverteilungskurven in den C0-C180 und C90-C270 Ebenen. Diese gilt stellvertretend für alle Farbstufen, da die Ausstrahlgeometrie nicht verändert werden kann. Es sind lediglich die unterschiedlichen maximal möglichen Lichtströme zu beachten.

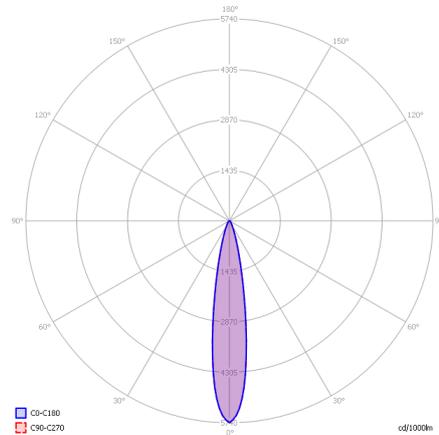


Abbildung 51: Lichtstärkeverteilungskurven in C0-C180 und C90-C270 Ebenen

Zur Beurteilung der Effizienz im gedimmten Betrieb sind in Abbildung 52 die Dimmkennlinien für die einzelnen Farbstufen relativ aufgetragen. Es zeigt sich, dass der Dimmbetrieb im Allgemeinen bei warmweißen Farbeinstellungen effizienter funktioniert als bei kaltweißem Licht. Die ähnlichste Farbtemperatur bleibt dabei, wie in Abbildung 53 zu sehen ist, zwischen 100 % bis etwa 30 % annähernd konstant, erst bei sehr geringen Dimmstufen werden Abweichungen deutlich.

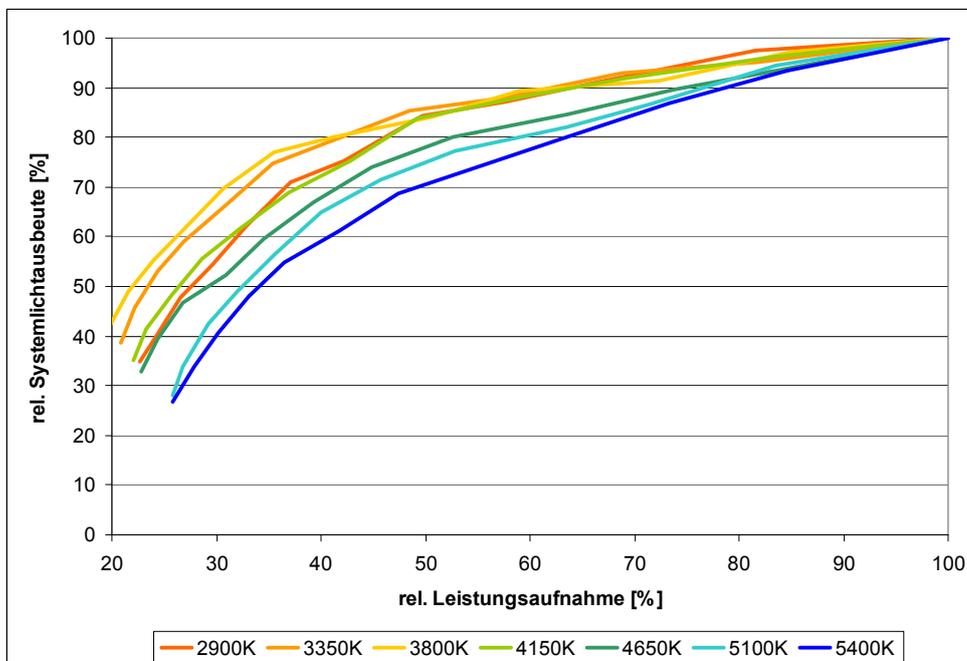


Abbildung 52: Dimmkennlinien in Abhängigkeit der Farbstufe

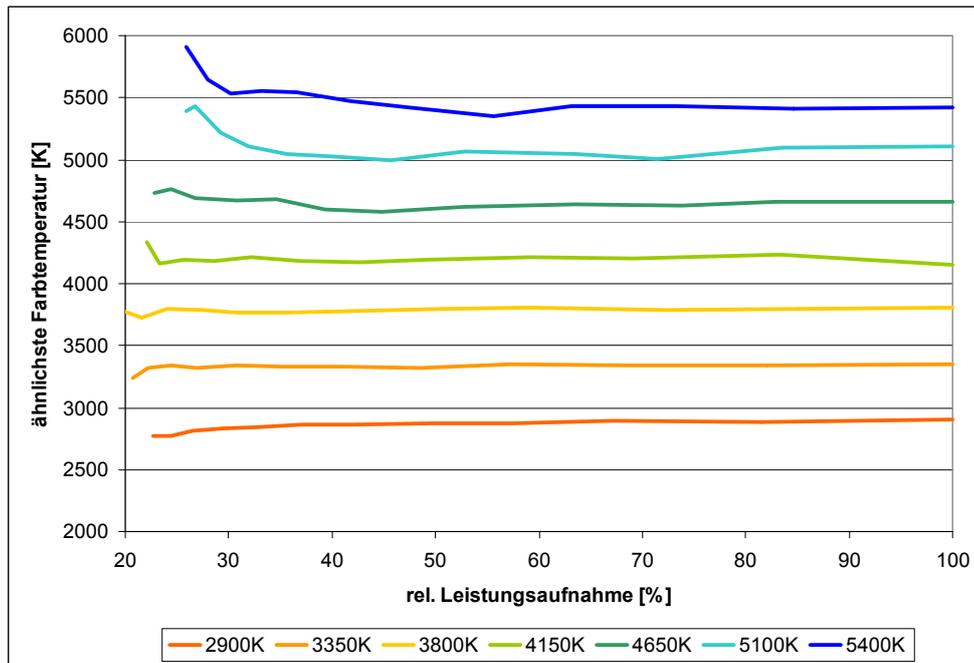


Abbildung 53: ähnlichste Farbtemperatur in Abhängigkeit der relativen Leistungsaufnahme

3.2.4 Beleuchtung mit Oberlicht in der Kunsthalle Mannheim

In dem in den Jahren 2010 bis 2013 generalsanierten Jugendstilbau der Kunsthalle Mannheim (KHM) wurde für einen Ausstellungsraum mit Oberlicht (Abbildung 54) im Zeitraum von Oktober 2013 bis August 2014 der Energieumsatz der künstlichen Oberlichtbeleuchtung gemessen. Zur Bewertung der Ergebnisse wurde die Tageslichtsituation aufgenommen und die Beleuchtungsstärken im Innenraum im 5-Minuten-Intervall registriert.



Abbildung 54: Installation der Messtechnik im Oberlichtsaal der Kunsthalle Mannheim

Tageslichtsystem

Im Zuge der Sanierung wurden die bis dahin nicht mehr genutzten Oberlichter in den Sälen des 1.OG wieder freigelegt und mit neuen Tageslichtsystemen ausgestattet. Abbildung 55 zeigt das Spiegelraster im Scheibenzwischenraum der Schrägdachverglasung, das einen direkten Sonneneinfall verhindert. Der Lichttransmissionsgrad dieses statischen Sonnenschutzsystems beträgt bei diffusem Lichteinfall 0,21. Zusätzlich verfügt das Glas über einen UV-Schutzfilter, was durch die Messung der in Abbildung 56 dargestellten relativen spektralen Bestrahlungsstärke durch Tageslicht im Zwischendachbereich belegt wurde.



Abbildung 55: Tageslichtsystem mit Spiegelraster im SZR für die Dachschrägen der Kunsthalle Mannheim

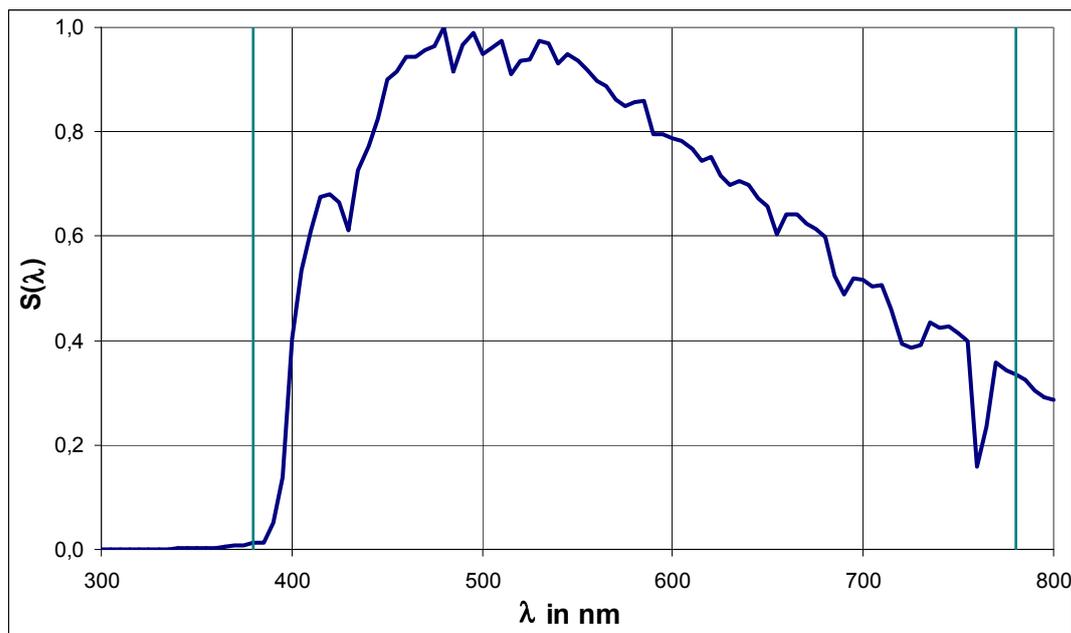


Abbildung 56: Relative spektrale Bestrahlungsstärke durch Tageslicht im Zwischendachbereich

Künstliche Oberlichtbeleuchtung

Zur Ergänzung des Tageslichts und zur Allgemeinbeleuchtung des Oberlichtsaals ist im Zwischen-dachbereich eine künstliche Beleuchtungsanlage installiert, die mit 48 Leuchten mit je einer 35 W T5-Leuchtstofflampe vom Typ 840 eine elektrische Gesamtleistung von 1,85 kW aufweist (Abbildung 57). Die Leuchten sind dimmbar und werden über ein Gebäudemanagement angesteuert. Die für die tageslichtabhängige Regelung notwendigen Sensoren sind auf den vier Wänden des Ausstellungssaals in einer Höhe von 5 m montiert.



Abbildung 57: Glasdach mit integriertem Sonnenschutz, künstliche Ergänzungsbeleuchtung mit T5-Leuchtstofflampen und Staubdecke in der Kunsthalle Mannheim

Staubdecke

Um eine möglichst gleichmäßige Beleuchtung im Ausstellungsraum zu erzielen, ist die Oberlichtverglasung der Staubdecke stark streuend ausgeführt (Abbildung 58). Damit herrscht im Ausstellungsraum eine nahezu gleich bleibende Lichtverteilung. Abbildung 59 zeigt den im Labor ermittelten Verlauf des spektralen Transmissionsgrades im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 800 nm. Durch den steilen Abfall bei 400 nm ist ein zusätzlicher UV-Schutz gegeben. Der relativ gleichmäßige Verlauf im Durchlassbereich sorgt für möglichst geringe Verfälschungen der Farbeigenschaften des Tageslichts und der künstlichen Beleuchtung.

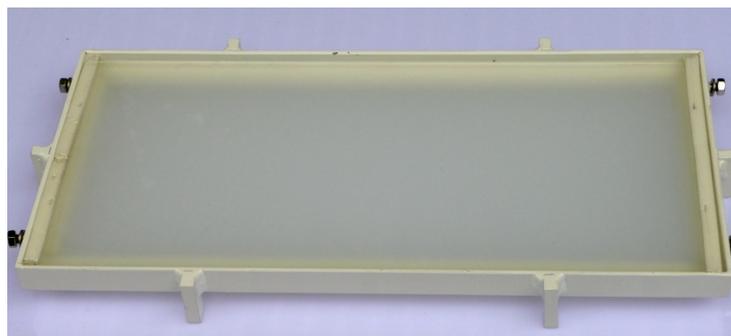


Abbildung 58: Oberlichtverglasung der Staubdecke der Kunsthalle Mannheim

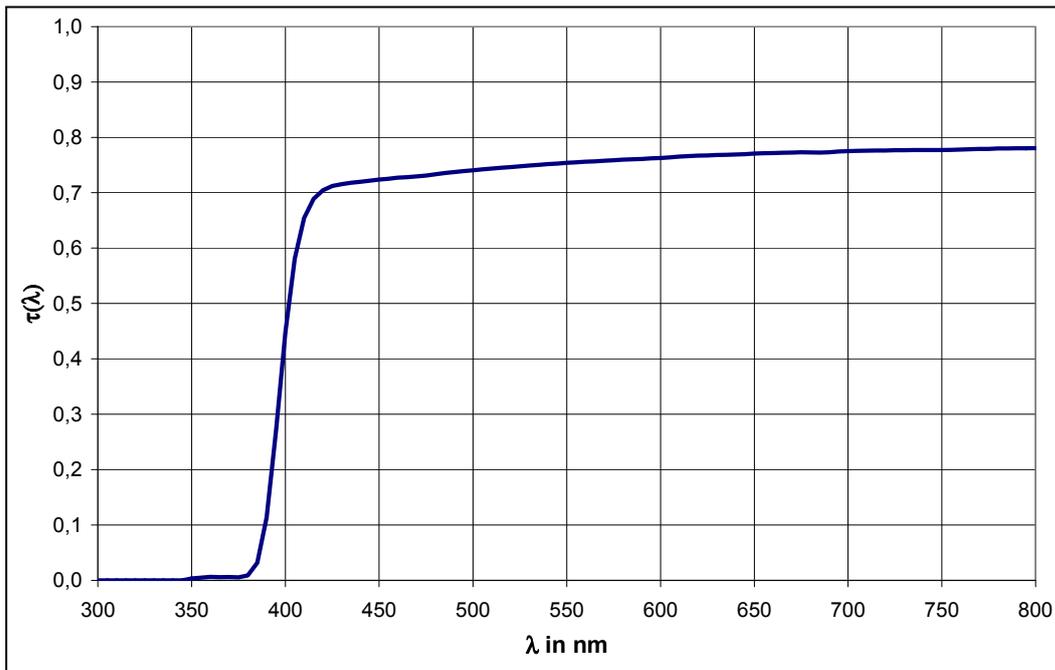


Abbildung 59: Spektraler Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ der Staubdecke

Die sich aus der Kombination der Tageslichtsysteme ergebende Strahlungsfunktion der Tageslichtbeleuchtung im Innenraum wurde durch eine Messung der spektralen Bestrahlungsstärke auf einer horizontalen Fläche in der Raummitte auf einer Höhe von 0,4 m mit Hilfe eines Spektralradiometers gemessen (Abbildung 60). In Tabelle 22 sind die aus dieser Spektralverteilung ermittelten Farb- und Farbwiedergabeeigenschaften sowie das Schädigungspotenzial eingetragen.

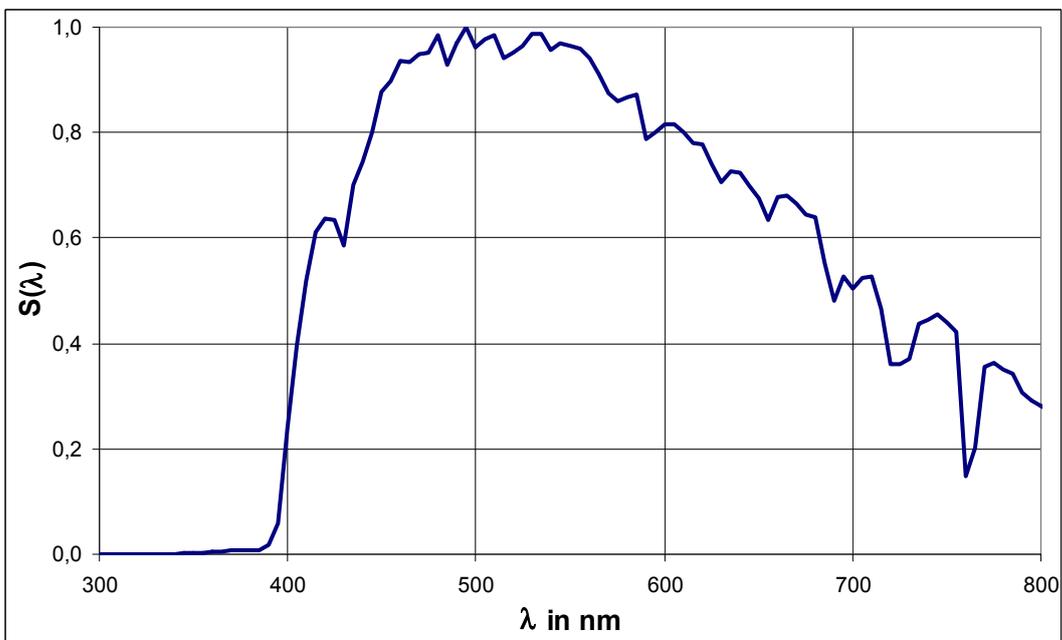


Abbildung 60: Relative spektrale Bestrahlungsstärke durch Tageslicht im Ausstellungssaal mit Oberlicht

Tabelle 22: Farb- und Farbwiedergabeeigenschaften sowie Schädigungspotenzial des Tageslichts im Ausstellungssaal mit Oberlicht

Farbort		
x		0,3219
y		0,3526
u'		0,1955
v'		0,4817
Ähnlichste Farbtemperatur T_{cp}/K		5950
Spezielle Farbwiedergabeindizes R_i		
1		92
2		96
3		98
4		92
5		93
6		96
7		97
8		90
9		70
10		92
11		91
12		92
13		93
14		89
allgemeiner Farbwiedergabeindex R_a		94
Schädigungspotenzial p	b=0,012	0,294
Relatives Schädigungspotenzial p_{rel}		1,5
Schädigungspotenzial p	b=0,038	0,0059
Relatives Schädigungspotenzial p_{rel}		1,6

Durch die Tageslichtbeleuchtung ergibt sich eine Beleuchtung mit einem deutlich höheren Schädigungspotenzial als mit HGL-Strahlern. Entsprechend sollten die Beleuchtungsstärken niedriger bzw. die Ausstellungszeiten kürzer gehalten werden. Die Farbwiedergabe ist annähernd ideal, leichte Einschränkungen erfährt lediglich die Wiedergabe des gesättigten Rots.

Aufgrund der Lichttransmissionsgrade des Tageslichtsystems und der Staubdecke sowie der Minderung des Tageslichtes durch Verschmutzung und Versprossung insbesondere im Zwischendachbereich ist die Tageslichtbeleuchtung auf eine maximal zulässige Beleuchtungsstärke begrenzt. Es ist zu erwarten, dass die Energieeinsparung durch Tageslichtbeleuchtung mit diesem statischen Tageslichtsystem gering ausfällt.

3.2.5 Monitoring der Museumsbeleuchtung

Aufbau und Funktion des Messsystems

Basierend auf den Erfahrungen mit dem Monitoringsystem bei den in Kapitel 3.1.5 beschriebenen Untersuchungen im Schulgebäude wurde ein neuer Datenschreiber entwickelt, der gegenüber dem vorherigen System Verbesserungen in wesentlichen Punkten erzielt. Die Laufzeit fällt aufgrund eines größeren Datenspeichers und des geringeren Energieumsatzes im Akkubetrieb mit etwa 10 Wochen mehr als doppelt so lang aus. Alternativ ist auch ein Netzteilbetrieb möglich, bei dem die Laufzeit theoretisch 10 Jahre und mehr betragen kann. Der Datenschreiber ist so konzipiert, dass die bestehenden Sensorplatinen über eine mit dem alten System identische Schnittstelle weiter verwendet werden können [Bauer, 2014].

Das Grundmodul des Messsystems ist ein Datenschreiber, der auf Basis eines R8C/13 16bit-Mikrocontrollers mit angeschlossenen 10bit-A/D-Umsetzer die Messdaten in einem einzustellenden Intervall in den nichtflüchtigen Speicher einer SD-Speicherkarte schreibt. Da mehrere Geräte parallel betrieben werden sollen, ist ein Zeitabgleich der einzelnen Datenschreiber notwendig. Dies geschieht über einen Funkempfänger, der das von der PTB ausgesendete DCF77-Funkuhrsignal auswertet und bei Abweichungen die Systemuhr synchronisiert. Die Konfiguration des Datenschreibers erfolgt über eine ASCII-Datei, die auf die SD-Karte geschrieben wird. Dort kann das Messintervall eingestellt werden, in welchem Tageszeitraum gemessen werden soll und welche Kanäle und damit welche Sensoren verwendet werden sollen. Die verschiedenen Zustände des Programmablaufs werden über zwei LEDs angezeigt.

Über einen 30-poligen Pfostenstecker (Sensormodulanschluss) wird eine Sensorplatine an den Datenschreiber angeschlossen, die mit maximal vier verschiedenen Sensoren bestückt werden kann. Dieser Anschluss ist so ausgeführt, dass die bisher genutzten Sensorplatinen weiter genutzt werden können. Das System für das Monitoring in Museen ist so ausgelegt, dass an festzulegenden Bezugspunkten die horizontale und vertikale Beleuchtungsstärke sowie die wirksame Bestrahlungsstärke für Objektschädigung in einem Messintervall von fünf Minuten gemessen und für eine spätere Auswertung gespeichert werden. Abbildung 61 zeigt das aufgebaute Messsystem mit Gehäuse.

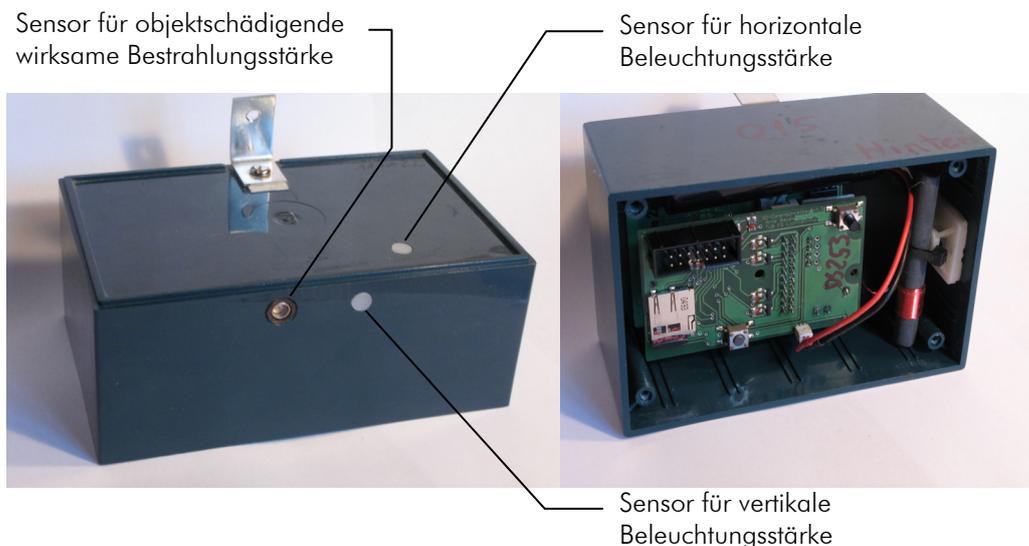


Abbildung 61: Messsystem mit Sensorplatine für Museumsbeleuchtung

Sensortypen und Kalibrierung

Beleuchtungsstärken

Die horizontale und vertikale Beleuchtungsstärke wird mit zwei Hamamatsu S1087 Photodioden realisiert, die durch spezielle Grün-Filter an die $V(\lambda)$ -Kurve angepasst wurden. Für eine korrekte kosinusförmige Winkelbewertung sorgt eine vorgesetzte Schicht aus diffus transmittierendem Plexiglas. Die Absolutkalibrierung erfolgt durch Vergleichsmessungen mit einem Luxmeter der Klasse L.

Objektschädigend wirksame Bestrahlungsstärke

Als Sensor zur Messung der objektschädigend wirksamen Bestrahlungsstärke wurde eine auf Siliziumcarbit basierende UV-Photodiode SIC01M ausgewählt. Diese UV-Photodiode ist für UV-Strahlung und für Strahlung im blauen Bereich der sichtbaren Strahlung zwischen 300 nm und 400 nm empfindlich und damit im UV-Bereich hinreichend genau an die objektschädigend wirksame Strahlungsfunktion angenähert. In Abbildung 62 ist die relative spektrale Empfindlichkeit $s(\lambda)_{rel}$ der UV-Photodiode in Abhängigkeit der Wellenlänge aufgetragen.

Um eine Aussage über die absolute wirksame Bestrahlungsstärke und durch zeitliche Integration auch der wirksamen Dosis treffen zu können, wird der Sensorwert mit dem durch eine Messung der spektralen Bestrahlungsstärke berechneten Wert verglichen und ein Kalibrierungsfaktor bestimmt. Dies geschieht unter Bestrahlung mit einer Xe-Höchstdrucklampe mit vorgeschaltetem Filter, wodurch eine einem mittleren Tageslicht im Außenraum angenäherte Strahlungsfunktion erzielt wird.

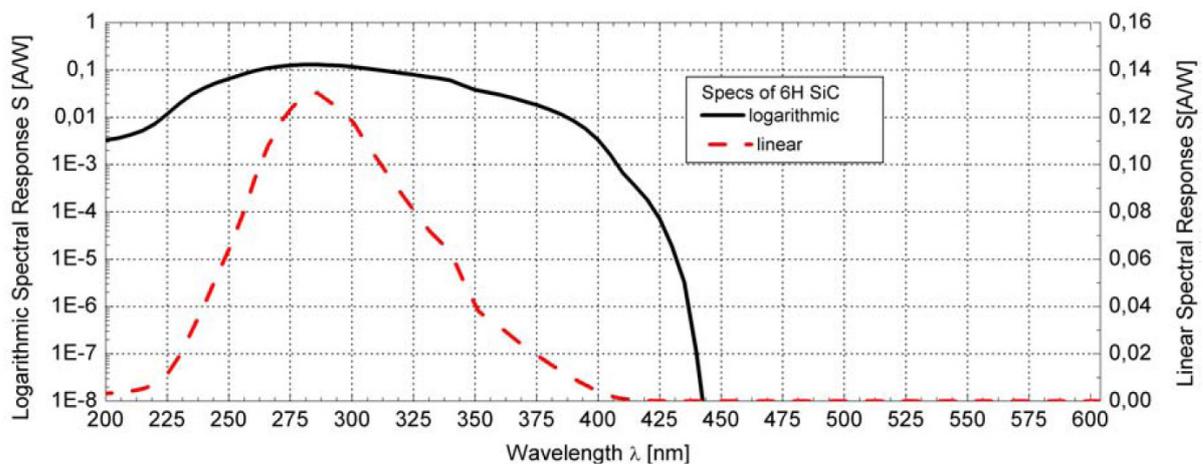


Abbildung 62: relative spektrale Empfindlichkeit der UV-Photodiode SIC01M in Abhängigkeit von der Wellenlänge [Roithner, 2012]

Energieumsatz der künstlichen Beleuchtung

Der Energieumsatz einer Beleuchtungsanlage kann ohne Eingriff in die elektrische Installation durch relative Messungen der Dimmstufen ermittelt werden, indem diese über die Dimmkennlinie in die zum Zeitpunkt der Messung umgesetzte Leistung umgerechnet werden (vgl. Abschnitt 3.1.5). Dies kann über einen Beleuchtungsstärkesensor geschehen, solange davon keine andere Lichtquelle erfasst wird. Eine Kalibrierung ist dabei nicht erforderlich, da alle Werte auf den bei einer 100%-Dimmstufe gemessenen höchsten Wert bezogen werden.

Aufstellung der Messgeräte

Für das Monitoring im Ausstellungssaal mit Oberlicht wurden insgesamt drei Messgeräte verwendet. Oberhalb der Staubdecke sind zwei Datenschreiber montiert. Ein Gerät ist direkt unter einer Leuchte der künstlichen Beleuchtungsanlage platziert und misst über die integrierte UV-Photodiode die Dimmstufe der Leuchtstofflampen. Dies ist möglich, da der UV-Anteil des Tageslichts bereits durch die Glasscheiben des Tageslichtsystems herausgefiltert wird. Das zweite Messgerät ist oberhalb der Leuchten befestigt. Der horizontale Beleuchtungsstärkeempfänger wird somit nur vom Tageslicht beleuchtet und ermöglicht so eine relative Messung des Tageslichteintrags.

Im Ausstellungsraum selbst wurde ein drittes Messsystem zur Registrierung der Vertikal- und Horizontalbeleuchtungsstärke in der Ecke auf einer Höhe von 2,5 m installiert (Abbildung 63). Da für die Bewertung der Beleuchtung von Gemälden die Vertikalbeleuchtungsstärke maßgebend ist, wurden in den folgenden Untersuchungen nur die Messwerte des entsprechenden Sensors herangezogen. Aus ästhetischen Gründen war eine Anbringung in der Wandmitte nicht möglich. Aufgrund der nahezu gleich bleibenden Lichtverteilung im Saal können die Messwerte am Sensor mit einem von der Position auf den Wänden abhängigen Faktor korrigiert werden. Dazu wurden die Verhältnisse der Vertikalbeleuchtungsstärken an den Punkten auf der Wand zur der am Sensor ermittelt. Die Messpunkte an der Wand wurden auf eine Höhe von 1,65 m festgelegt. Abbildung 64 zeigt die bei Tageslichtbeleuchtung ermittelten Korrekturfaktoren.

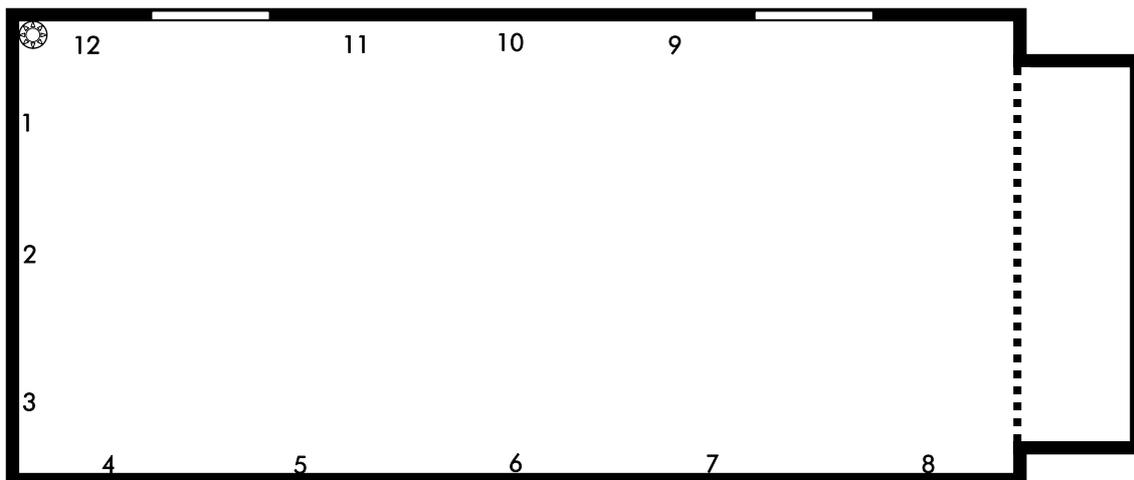


Abbildung 63: Ausstellungssaal mit Oberlicht in der Kunsthalle Mannheim:
Grundriss mit Messpunkten an den Wänden und Position des Sensors 
Breite: 7,5 m; Länge: 13,2 m (15,7 m mit Erker); Höhe: 7,0 m

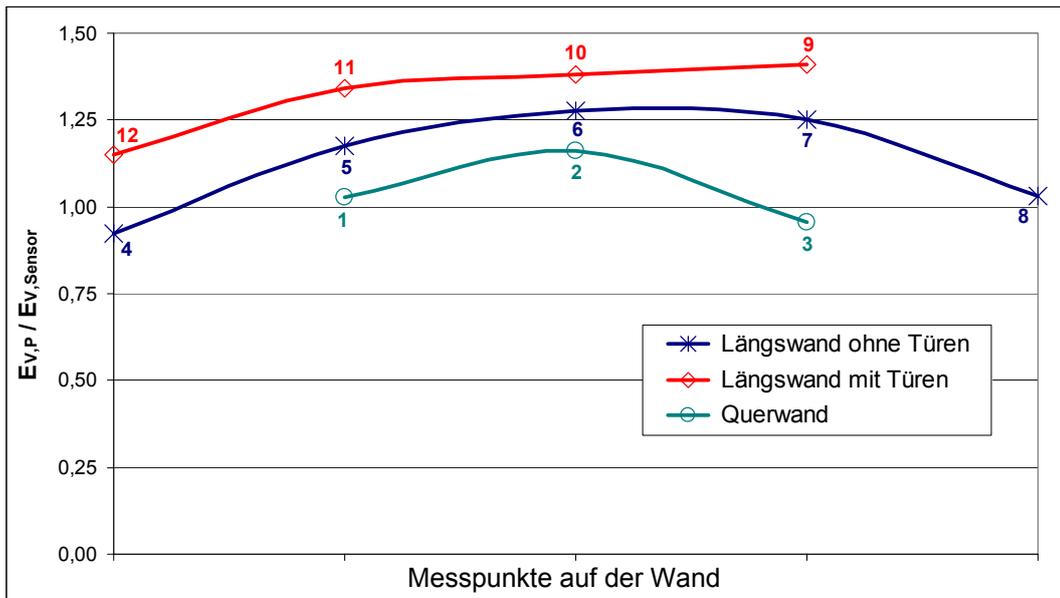


Abbildung 64: Örtlicher Verlauf der Verhältnisse der Vertikalbeleuchtungsstärken an den Messpunkten zur Vertikalbeleuchtungsstärke am Sensor bei Tageslichtbeleuchtung

Auswertung

Zur Ermittlung des Tageslichtbeitrags für die Vertikalbeleuchtungsstärke im Innenraum wurde die Horizontalbeleuchtungsstärke an einem Punkt im Zwischendachbereich gemessen. Aufgrund der stark streuenden Eigenschaften der Staubdecke ist die relative Lichtverteilung im Innenraum nahezu gleichbleibend. Aus diesem Grund ergibt sich ein konstantes Verhältnis zwischen der Vertikalbeleuchtungsstärke am Sensor im Innenraum zur im Dachbereich gemessenen Beleuchtungsstärke durch das Tageslicht. Am 24.12.2013 ergab sich bei ausschließlicher Tageslichtbeleuchtung ein Verhältnis von 0,05. Damit lassen sich die Beiträge des Tageslichts zur Beleuchtungsstärke für alle Positionen im Innenraum berechnen.

Die Dimmstufen der künstlichen Beleuchtung werden relativ bezogen auf die höchste Dimmstufe dargestellt. Diese Werte sind auf der sekundären y-Achse abzulesen. In den folgenden Abbildungen ist nun für verschiedene Tage der Verlauf der Vertikalbeleuchtungsstärke im Ausstellungsraum am Sensor, des Tageslichtbeitrags zur Vertikalbeleuchtungsstärke und der relativen Dimmstufen der künstlichen Oberlichtbeleuchtung aufgetragen.

Abbildung 65 zeigt die Tagesverläufe an einem Wintertag, an dem das Museum geschlossen war, weshalb die künstliche Beleuchtung ausgeschaltet blieb. Es ist zu sehen, dass die Vertikalbeleuchtungsstärken am Sensor maximal etwa 60 lx betragen. Der Verlauf der Beleuchtungsstärken im Raum folgt dem Beitrag des Tageslichts.

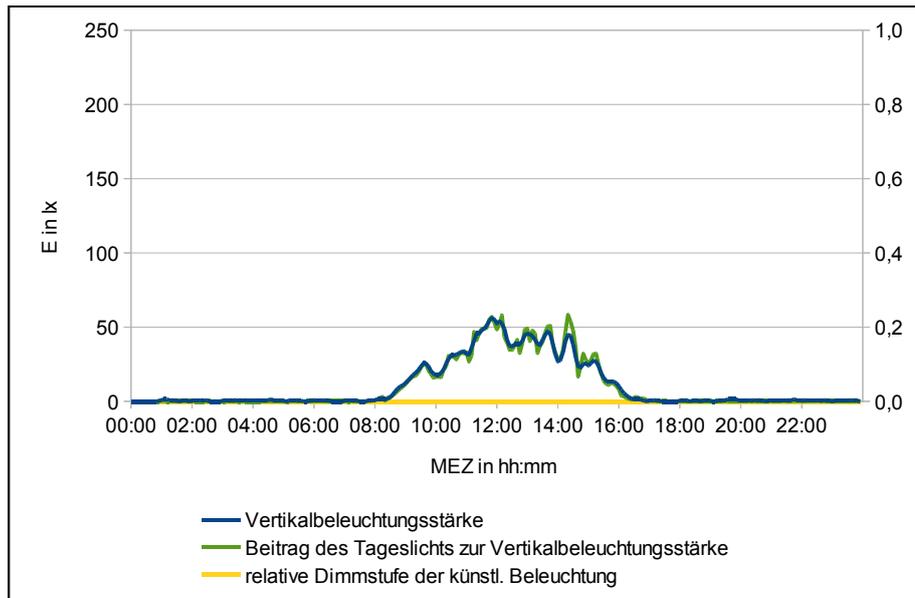


Abbildung 65: Vertikalbeleuchtungsstärke am Sensor im Saal, Beitrag des Tageslichts zur Vertikalbeleuchtungsstärke und relative Dimmstufe der künstlichen Beleuchtung 24.12.2013

Am darauf folgenden Tag (Abbildung 66) war das Museum wieder geöffnet und die Beleuchtungsanlage von 10 bis 20 Uhr aktiv. Es ist zu erkennen, dass die künstliche Beleuchtung an diesem Wintertag dauerhaft in einer hohen Dimmstufe arbeitete, um den geringen Tageslichteintrag zu ergänzen. Am Sensor werden dabei Vertikalbeleuchtungsstärken von circa 140 lx erreicht, was nach Umrechnung mit dem Korrekturfaktor von 1,4 im Punkt 10 auf der Wand etwa 200 lx entspricht. Dies ist zu diesem Zeitpunkt offenbar die Regelsollgröße.

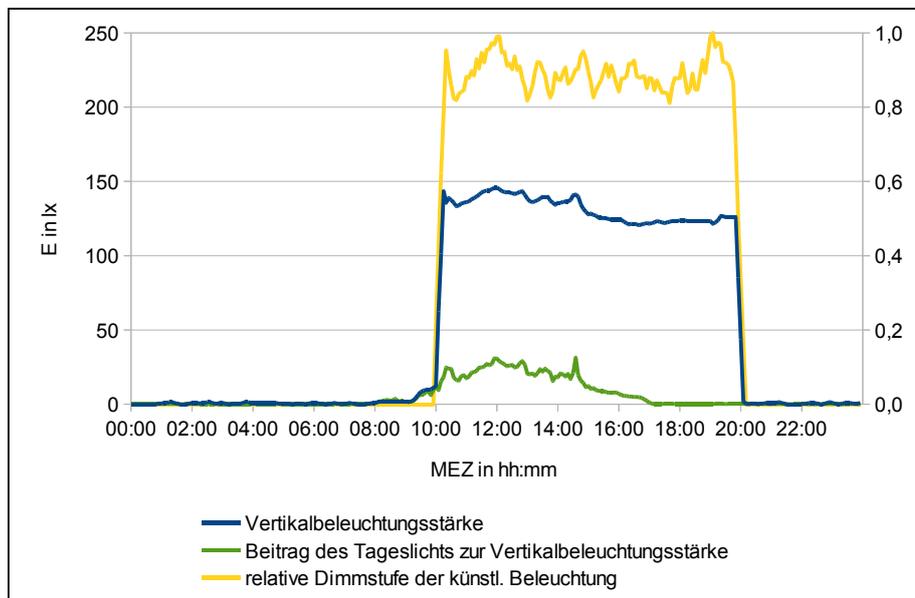


Abbildung 66: Vertikalbeleuchtungsstärke am Sensor im Saal, Beitrag des Tageslichts zur Vertikalbeleuchtungsstärke und relative Dimmstufe der künstlichen Beleuchtung 25.12.2013

Abbildung 67 und Abbildung 68 zeigen die Verläufe an zwei Tagen im März 2014. Es sind wieder die Ein- und Ausschaltzeitpunkte der künstlichen Beleuchtung zu erkennen. Zu dieser Jahreszeit trägt

die Tageslichtbeleuchtung zu einem deutlich größeren Maß zur Beleuchtung des Innenraums bei, die künstliche Beleuchtungsanlage ist größtenteils stark gedimmt, um die Sollbeleuchtungsstärke einzuhalten. An diesen Beispielen ist zu erkennen, dass die Regelung der Beleuchtungsanlage auch bei stark veränderlichen Bedingungen funktioniert. Die Werte der Vertikalbeleuchtungsstärke von ca. 175 lx am Sensor entsprechen etwa 250 lx am Punkt 10 auf der Wand. Offenbar wurde der Sollwert in der Regelungsanlage geändert, was auf unterschiedlichen Beleuchtungsanforderungen bei wechselnden Ausstellungen zurückzuführen ist.

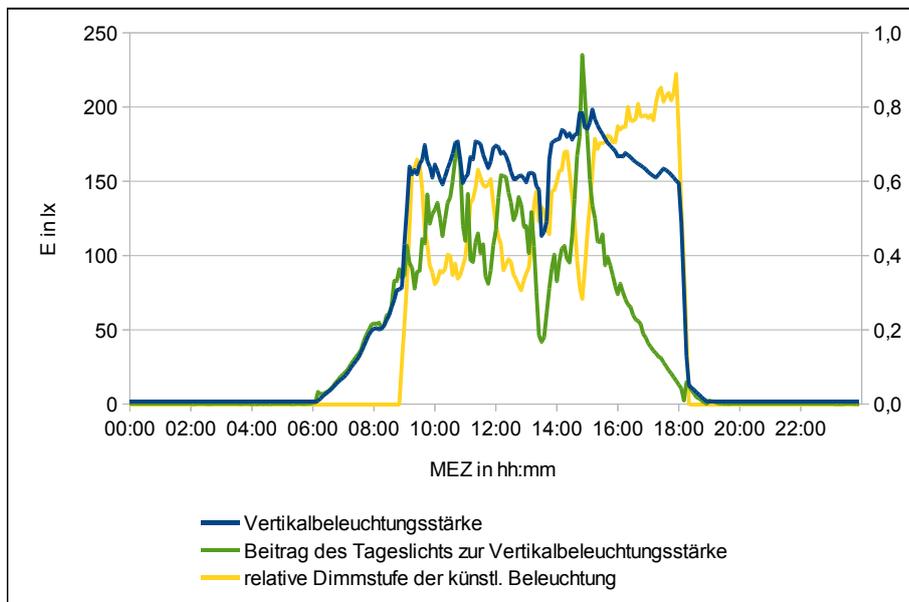


Abbildung 67: Vertikalbeleuchtungsstärke am Sensor im Saal, Beitrag des Tageslichts zur Vertikalbeleuchtungsstärke und relative Dimmstufe der künstlichen Beleuchtung 25.03.2014

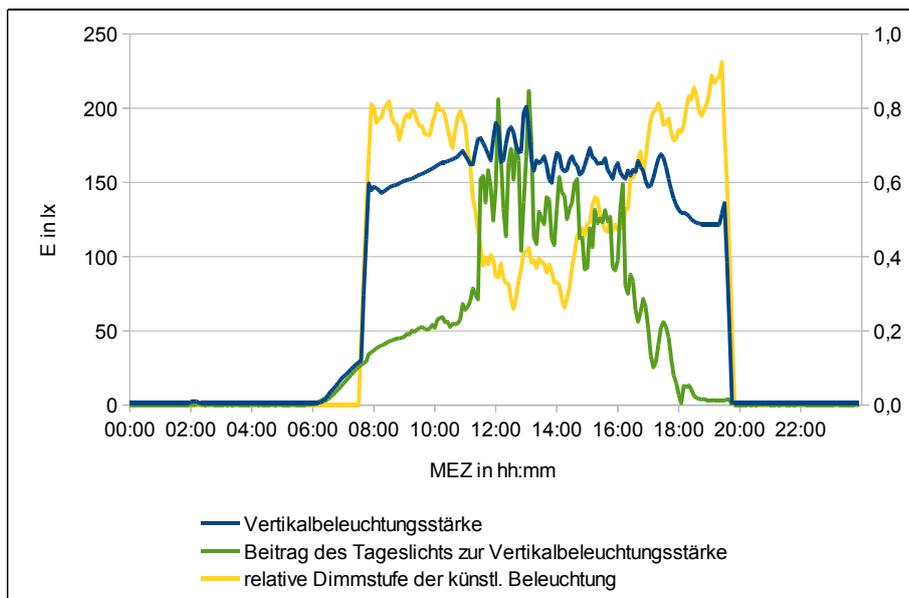


Abbildung 68: Vertikalbeleuchtungsstärke am Sensor im Saal, Beitrag des Tageslichts zur Vertikalbeleuchtungsstärke und relative Dimmstufe der künstlichen Beleuchtung 26.03.2014

Die Auswertung der Summenhäufigkeit der Vertikalbeleuchtungsstärke über den gesamten Beobachtungszeitraum (Abbildung 69) ergibt, dass, sobald die künstliche Beleuchtungsanlage aktiviert war, Werte von über 140 lx auf dem Sensor erzielt wurden, maximal betrug sie etwa 250 lx. Dieser breite Regelbereich ist einerseits der für die Regelung notwendigen Hysterese geschuldet. Andererseits können auch für verschiedene Ausstellungen im Beobachtungszeitraum unterschiedliche Sollwerte programmiert worden sein. Weiterhin ist es möglich, dass bei extremen Sonneneinfallswinkeln das Tageslichtsystem nicht immer ideal vor der Sonne schützt. Dabei könnte aufgrund der nicht vollkommen streuenden Staubdecke teilgerichtetes Sonnenlicht auf den Sensor des Messsystems fallen, was von den Sensoren der Regelungsanlage nicht detektiert und damit nicht ausgeregelt würde.

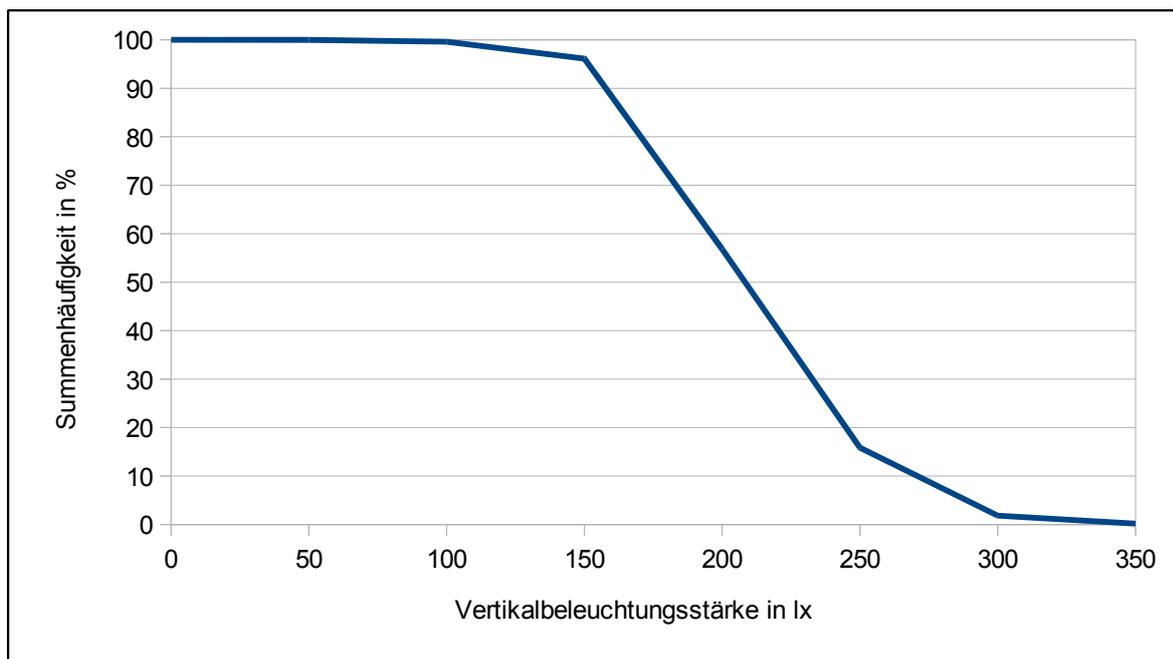


Abbildung 69: Summenhäufigkeit der Vertikalbeleuchtungsstärke am Sensor im Saal für Zeiten mit aktivierter künstlicher Beleuchtungsanlage im Zeitraum November 2013 – August 2014

Energetische Bewertung des künstlichen Oberlichts

Aus den gemessenen Dimmstufen kann unter Berücksichtigung der Dimmkennlinie von T5-Leuchtstofflampen durch Aufsummierung über die Zeit und Multiplikation mit der installierten Gesamtleistung der Beleuchtungsanlage von 1,85 kW der Energieumsatz berechnet werden. Abbildung 70 zeigt beispielhaft den täglichen Energieumsatz in den Monaten Juli und August. Es sind deutlich die unterschiedlichen Energieumsätze an Wochentagen und Wochenenden zu erkennen, was im Wesentlichen auf kürzere Öffnungszeiten zurückzuführen ist. Weitere Schwankungen sind der unterschiedlichen Tageslichtversorgung geschuldet. In Abbildung 71 sind die Energieumsätze aller gemessenen Monate aufgetragen. Für die künstliche Oberlichtbeleuchtungsanlage ergibt sich ein hochgerechneter Jahresenergieumsatz von 4000 kWh/a. Über die Nutzungszeiten der Beleuchtungsanlage lässt sich als Vergleichswert ein theoretischer Energieumsatz bei rein geschaltetem Betrieb von 6850 kWh/a errechnen. Damit ergibt sich eine relative Energieeinsparung durch die tageslichtabhängige Regelung von etwa 40 %.

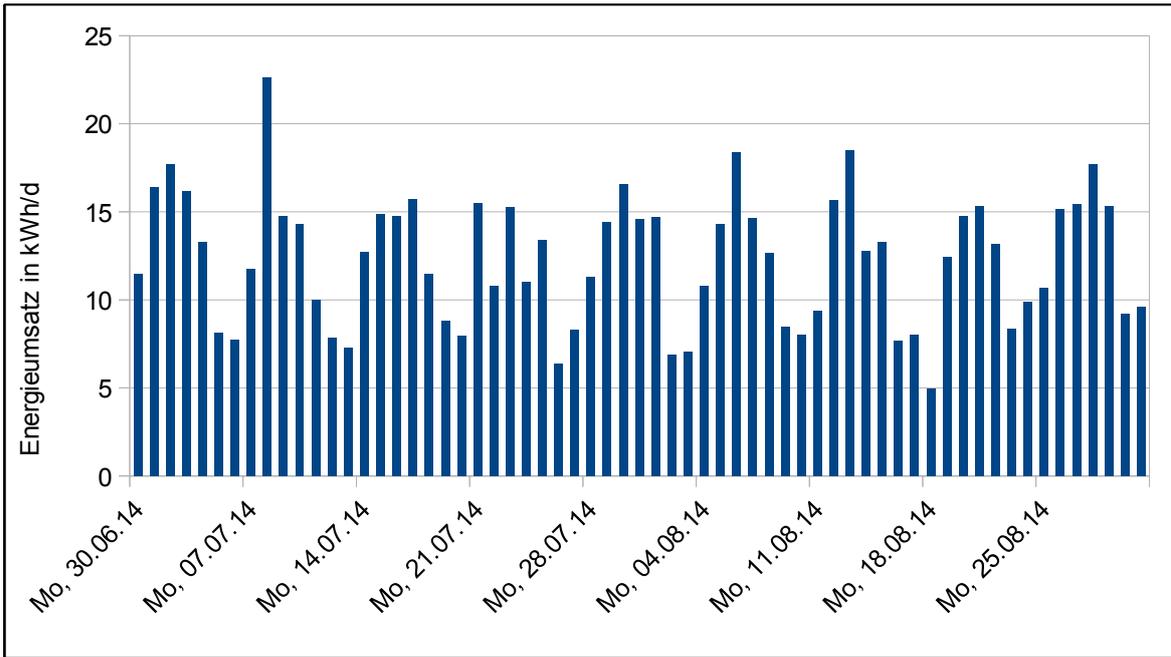


Abbildung 70: Täglicher Energieumsatz der künstlichen Oberlichtbeleuchtung im Zeitraum 30.06. – 31.08.2014

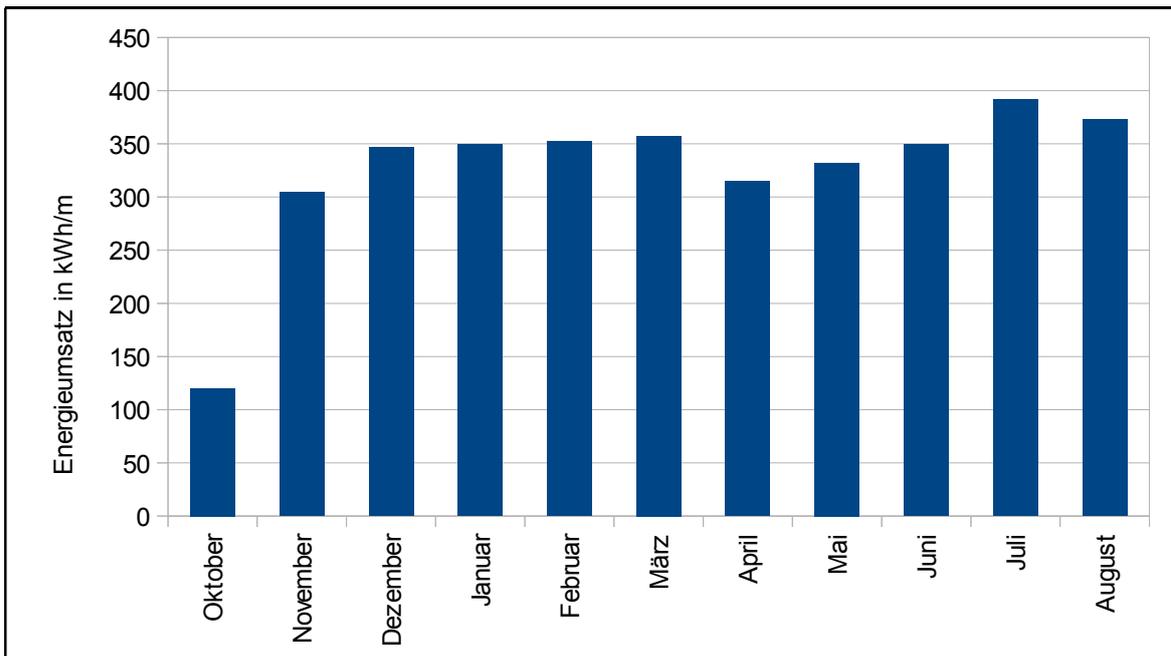


Abbildung 71: Monatlicher Energieumsatz der künstlichen Oberlichtbeleuchtung im Zeitraum Oktober 2013 – August 2014

3.2.6 Zusammenfassende Betrachtung zur Museumsbeleuchtung

Die in CIE 157 vorgeschlagenen und in der Praxis verwendeten einfachen Dosimeter sind nur bedingt zur Bewertung der wirksamen Bestrahlung geeignet. So sind die Blaumaßstäbe Nr. 6 bis Nr. 8 für den Einsatz in Museen viel zu unempfindlich. Die Blaumaßstäbe Nr. 4 und Nr. 5 verhalten sich annähernd gleich und könnten zu einem Maßstab zusammengefasst werden. Lediglich die Blaumaßstäbe Nr. 1 bis Nr. 3 weisen nahezu gleich abgestufte Unterschiede sowohl in der relativen spektralen Objektempfindlichkeit als auch in der wirksamen Schwellenbestrahlung auf. Daher können nur diese Blaumaßstäbe als Dosimeter im Museum eingesetzt werden. Aufgrund der speziellen relativen spektralen Objektempfindlichkeit, die auch durch den spektralen Absorptionsgrad $\alpha(\lambda)$ bedingt ist, ist der im Museum häufig verwendete LightCheck[®] Sensitive nicht als Dosimeter zur Bewertung der Objektschädigung geeignet. Die niedrige wirksame Schwellenbestrahlung ermöglicht jedoch einen Einsatz in kurzzeitigen Sonderfällen wie z. B. zur Überprüfung der Bestrahlung während eines Transports des Ausstellungsstückes.

Mit dem Ersatz der herkömmlichen HGL- durch LED-Strahler konnte eine erhebliche Energieeinsparung um bis zu 70 % erzielt werden. Im gedimmten Betrieb kann sich dieser Wert aufgrund der besser geeigneten Dimmkennlinie der LEDs noch weiter erhöhen. Dies geht einher mit einer verringerten Objektschädigung durch UV- und kurzwellige sichtbare Strahlung. Gleichzeitig ermöglicht die LED-Technik eine Beleuchtung ohne thermische Belastungen der Objekte durch IR-Strahlung.

Bei der Auswahl der LED-Leuchten muss eine Balance zwischen maximaler Energieeffizienz und optimaler Farbwiedergabe gefunden werden. Sehr effiziente Leuchten erreichen meist für Ausstellungszwecke nur befriedigende Farbwiedergabewerte, wohingegen Lösungen, die ein besonders breites Spektrum aufweisen, definitionsbedingt aufgrund der $V(\lambda)$ -Bewertung geringere Lichtausbeuten erzielen. Da das Schädigungspotenzial direkt von der ähnlichsten Farbtemperatur abhängt, ist bei der Wahl der LED-Leuchten eine Abwägung der konservatorischen Anforderungen unerlässlich.

Das Monitoring der Beleuchtungssituation im Oberlichtsaal der Kunsthalle Mannheim ergab, dass die Beleuchtungsstärke im Raum durch die Regelungsanlage im Rahmen der technischen Möglichkeiten ausreichend konstant gehalten werden konnte. Es zeigte sich aber ein über das gesamte Jahr gleichbleibend hoher Energieumsatz, der dem stationären Sonnenschutzsystem geschuldet ist, das die Nutzungszeiten und damit die Energieeinsparung durch die Tageslichtnutzung erheblich verringert. Hier könnte die Energieeinsparung durch den Einsatz eines dynamisch geregelten Tageslichtsystems erhöht werden, bei dem z. B. der Sonnenschutz nur bei Bedarf aktiviert wird. Dazu zeigt [Belendorf u.a., 2009] ein Verfahren zur Berechnung der Energieeinsparpotenziale derartiger geregelter Tageslichtsysteme.

Die aus den Messwerten des Energieumsatzes und den Nutzungszeiten ermittelte relative Energieeinsparung durch die Regelung der künstlichen Oberlichtbeleuchtung fällt mit 40 % sehr hoch aus. Dies ist auf die baulich bedingte geringe Tageslichtversorgung zurückzuführen, wo eine Regelung gegenüber dem geschalteten Betrieb eine entsprechend hohe Energieeinsparung erzielen kann. Außerdem werden in der realen Anwendung unregelmäßige Systeme aber auch dauerhaft im abgesenkten Dimmbetrieb eingestellt, was die relative Einsparung durch ein Regelungssystem reduzieren würde. Insgesamt ließe sich an dieser Position durch Einsatz der LED-Technik gegenüber der T5-Leuchtstofflampentechnik schon alleine aufgrund der unterschiedlichen Dimmkennlinien Energie einsparen.

3.3 Büroräume in Verwaltungsgebäuden

Die energetische Optimierung der Beleuchtung von Büroarbeitsplätzen ist mit spezifischen Fragestellungen verbunden, die sich aus dem Nutzerprofil und dem Gebäudetyp ergeben. Dazu wurde ein Bürogebäude untersucht, das mit neuen LED-Stehleuchten ausgestattet wurde, die über einen Direkt- und einen Indirektanteil verfügen. Dieses Gebäude eignete sich besonders für eine Evaluierung, da sich LED-Leuchten bisher vor allem in Anwendungen etabliert haben, bei denen sie eine wirtschaftliche Alternative darstellen. Wesentliche Argumente für den Einsatz von LED-Leuchten sind deren effizienter Betrieb sowie die Realisierung von Zusatzfunktionen, so dass sie wegen ihrer Lebensdauer und Dimmbarkeit nun auch in Büroräumen in Konkurrenz nicht nur zu Leuchtstofflampen sondern auch zu Hochdruckentladungslampen treten.

Im Bonner Hauptgebäude des Bundesrechnungshofes (BRH) mit insgesamt 322 Büroräumen für ca. 450 Mitarbeiter wurden relevante lichttechnische, farbmetrische und energetische Messungen durchgeführt. Dazu wurde auch ein Messsystem aufgebaut, das in 40 repräsentativ ausgewählten Büroräumen ein Jahr lang die entsprechenden Größen in 5-Minuten-Intervallen ermittelte. Der jährliche Energiebedarf Q ist dann mit den nach DIN V 18599-4 berechneten Werten nach EnEV 2009 verglichen worden.

3.3.1 Anforderungen an die Beleuchtung in Büroräumen

Für Büroräume gibt die DIN EN 12464-1 klare Vorgaben bezüglich der Beleuchtungsstärken auf dem Arbeitsplatz und der Umgebung. So wird im Bereich der Arbeitsaufgabe einen Wert der Beleuchtungsstärke \bar{E}_m von 500 lx bei einer Gleichmäßigkeit U_0 von 0,6 gefordert. Im unmittelbaren Umgebungsbereich müssen mindestens 300 lx erreicht werden. Im Hintergrundbereich muss davon noch ein Drittel erreicht werden. Zum Erreichen angemessener Umfeldleuchtdichten sind bei üblichen Reflexionsgraden der Raumbegrenzungsflächen für die Wände im Büroraum Wert der Beleuchtungsstärke von mindestens 75 lx und für die Decke von mindestens 50 lx notwendig. Der allgemeine Farbwiedergabeindex R_a soll dabei einen Wert von 80 nicht unterschreiten. Für Bildschirmarbeitsplätze müssen die Leuchten und deren Positionierung so gewählt werden, dass Reflexblendung auf den Bildschirmen verhindert bzw. unter einer vom Bildschirm und Anwendung abhängigen maximalen Leuchtdichte bleibt. Ergänzend wird in DIN EN 12464-1 noch auf die Vorteile der Tageslichtbeleuchtung hingewiesen, jedoch ohne quantitative Vorgaben zu machen.

Um die Sicherheit und den Gesundheitsschutz von Beschäftigten in den Büroräumen sicherzustellen, ergänzt die Arbeitsstättenrichtlinie A3.4 [ASR A3.4] vor allem in diesem Bereich die Angaben der DIN EN 12464-1. Hervorzuheben ist die Angabe einer minimalen mittleren Vertikalbeleuchtungsstärke von 175 lx für Sehaufgaben auf vertikalen Flächen.

Die Arbeitsstättenverordnung [ArbStättV] setzt diese Anforderungen in geltendes Recht um, indem im Abschnitt „3.4 Beleuchtung und Sichtverbindung“ festgelegt wird, dass Arbeitsstätten „möglichst ausreichend Tageslicht erhalten und mit Einrichtungen für eine der Sicherheit und dem Gesundheitsschutz der Beschäftigten angemessenen künstlichen Beleuchtung ausgestattet sein“ müssen. Weiterhin dürfen sich durch die Beleuchtung keine Unfallgefahren ergeben.

3.3.2 Tageslichtbeleuchtung

Die einachsigen Räume sind mit zwei Fenstern ausgestattet und weisen eine Raumbreite von 3,5 m auf. Die 1,5-achsigen Räume haben bei einer Raumbreite von 5,25 m drei Fenster. Die Raumtiefe aller Büros beträgt 5,0 m, die Raumhöhe 3,9 m. Die Anordnung der Arbeitsplätze und die individuelle Gestaltung der Büroräume haben einen entscheidenden Einfluss auf die Tageslichtbeleuchtung an den Arbeitsplätzen. Abbildung 72 zeigt Fotos zweier Tageslichtsituationen.



Abbildung 72: Tageslichtbeleuchtung: Zusätzliche Verschattung durch Fenstervorhänge

Zur Beurteilung der Tageslichtversorgung der Räume wird wie in Abschnitt 3.1.3 der Tageslichtquotient herangezogen. Zur Ermittlung der Verteilung des Tageslichtquotienten auf der Nutzenebene wurden mehrere Simulationen bei verschiedenen Verbauungssituationen z. B. durch seitliche Gebäudeteile im Innenhof oder Vegetation vor den Fenstern durchgeführt. In Abbildung 73 sind die Ergebnisse grafisch dargestellt.

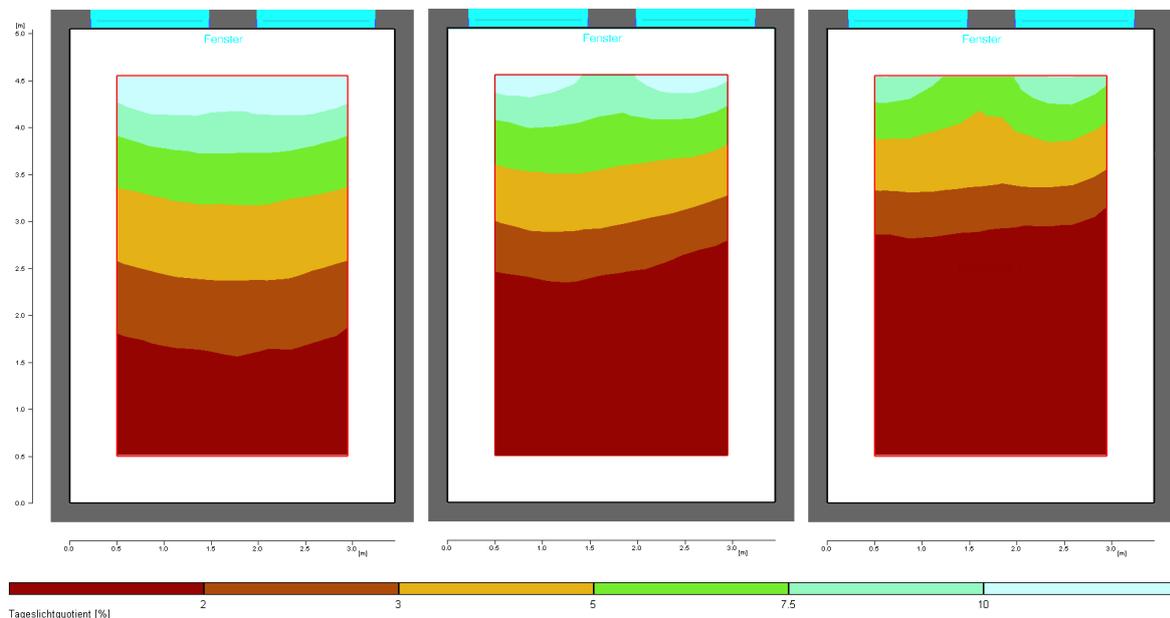


Abbildung 73: Simulation der Verteilung des Tageslichtquotienten auf der Nutzenebene:
links: ohne Verbauung; mittig: geringe Verbauung im 2. OG; rechts: starke Verbauung im EG

Es ist zu sehen, dass sich der einer guten bzw. mittleren Tageslichtversorgung entsprechende Tageslichtquotient in der Raummitte von 4 % bzw. 2,5 % (ohne bzw. geringe Verbauung) durch seitliche

und gegenüberliegende Gebäudeteile sowie durch Vegetation auf ca. 1,5 % bei starker Verbauung reduziert. Dies entspricht dann nur noch einer geringen Tageslichtversorgung.

Bei der Aufnahme der Beleuchtungssituation in den 40 repräsentativen Räumen stellte sich heraus, dass 75 % aller Arbeitsplätze in der Fensternähe und weitere 23 % in der Raummitte aufgestellt waren. Lediglich ein Arbeitsplatz war in der Tiefe des Raums aufgestellt. Dies bedeutet, dass die Tageslichtversorgung am Arbeitsplatz im Mittel gut bis sehr gut ist. Dies wird durch eine Befragung der Nutzer bezüglich der Tageslichtbeleuchtung bestätigt, bei der sich lediglich eine leichte Tendenz ergab, den Arbeitsplatz und den Raum als zu dunkel einzuschätzen [Aydınlı u.a., 2013].

3.3.3 Künstliche Beleuchtungsanlage

Bestandsanlage

Die alte künstliche Beleuchtung war als eine direkte Beleuchtung mit Spiegelraster-Deckenanbauleuchten ausgeführt, die mit jeweils einer T8-Leuchtstofflampe 36 W und VVG ausgestattet waren. Die künstliche Beleuchtung war weder mit Präsenzmeldern noch einer tageslichtabhängigen Regelung versehen. Die Büroräume mit zwei Fenstern (einachsig) waren mit zwei Leuchtenreihen mit je zwei Leuchten ausgestattet; in den Büroräumen mit drei Fenstern (1,5-achsig) waren zwei Leuchtenreihen mit je drei Leuchten installiert.

Die Beleuchtungssimulation mit ähnlichen Leuchten zeigt, dass die alte künstliche Beleuchtung nur als Grundbeleuchtung mit einer mittleren Beleuchtungsstärke von 300 lx diente (Abbildung 74). In diesem Fall ist eine Tischleuchte für die Arbeitsplatzbeleuchtung notwendig. Ein Interview mit Nutzern bestätigte diese Annahme. Bei den Berechnungen des Energieumsatzes wurde deshalb eine zusätzliche Tischleuchte mit einer 60 W-Glühlampe berücksichtigt.

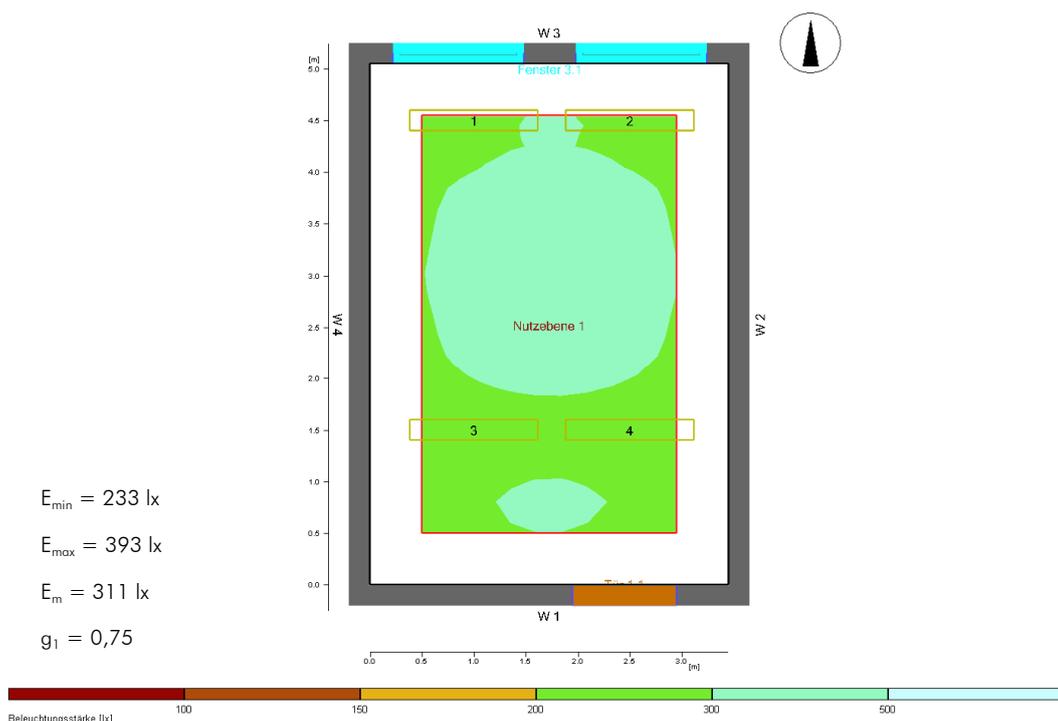


Abbildung 74: Bestandsanlage – Verteilung der Beleuchtungsstärke auf der Nutzebene (0,75 m)

Neue LED-Stehleuchte

Sämtliche Büros wurden mit je einer LED-Stehleuchte mit einem Direkt- und einem Indirektanteil neu ausgestattet. Die Leuchtenlänge beträgt 0,40 m; die Leuchtenbreite 0,20 m und der Abstand zwischen Leuchtenzentrum und Fuß der Leuchte 0,46 m. Die 18 LEDs für den Direktanteil sind jeweils mit unterschiedlichen optischen Systemen kombiniert, die manuell zuschaltbaren LEDs für den Indirektanteil sind dagegen freibrennend. Lichttechnische Vermessungen im Labor ergaben die in Abbildung 75 gezeigten asymmetrischen Lichtstärkeverteilungskurven. Die Leuchte ist damit für eine Aufstellung seitlich des Arbeitsplatzes optimiert. Die Systemlichtausbeute beträgt für die gesamte Leuchte 55 lm/W bei einer elektrischen Leistung von 130 W.

Die Stehleuchte ist mit einem Stand-Alone DALI-Regelsystem ausgestattet, das über einen Präsenz- und Helligkeitssensor verfügt. Mit Hilfe des Präsenzsensors schaltet die Leuchte automatisch ein und aus, über den Helligkeitssensor wird der Lichtstrom tageslichtabhängig geregelt. Die Sollbeleuchtungsstärke auf dem Arbeitsplatz kann über einen Taster vom Nutzer individuell eingestellt und gespeichert werden.

Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke in der Nutzebene zeigen keine UV- und IR-Strahlung, die ähnlichste Farbtemperatur T_{cp} fällt mit 6100 K relativ hoch aus, kommt so aber der Farbtemperatur des mittleren Tageslichts D_{65} sehr nahe. Dagegen ist der allgemeine Farbwiedergabeindex R_a kleiner als 80. Damit werden die Vorgaben der DIN EN 12464-1 für die Bürobeleuchtung nicht erfüllt. Zusätzlich ist die Farbwiedergabe für gesättigtes Rot mit $R_9 = -28$ besonders niedrig.

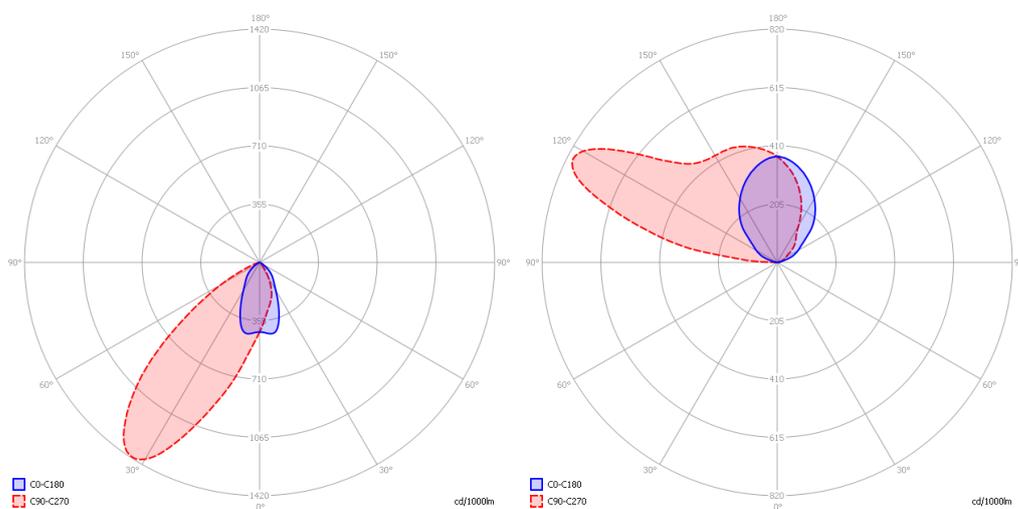


Abbildung 75: LVK LED-Leuchte direkter Anteil links, indirekter Anteil rechts

Diese messtechnisch gewonnenen Lichtstärkeverteilungskurven wurden in eine Lichtberechnungssoftware als Leuchte importiert und die Beleuchtungssituation für einen einachsigen Büroraum simuliert. Abbildung 76 zeigt beispielhaft ein Simulationsergebnis als Rendering.



Abbildung 76: Simulation der Beleuchtungssituation in einem einachsigen Büroraum im BRH

3.3.4 Energetische Bewertung der Beleuchtungsanlage

Bewertung der Tageslichtbeleuchtung

Auf Grundlage der in Abschnitt 3.3.2 ermittelten Werte des Tageslichtquotienten in der Raummitte wurden die einzelnen Räume des Haupthauses des Bundesrechnungshofs einer Tageslichtversorgungs-kategorie zugeordnet. In Tabelle 23 sind die Orientierung, die zugeordnete Tageslichtversorgung und die Anzahl der Räume wiedergegeben.

Tabelle 23: Orientierung, zugeordnete Tageslichtversorgung und Anzahl der Büroräume

Raum	Orientierung	Tageslichtversorgung	Anzahl der Räume
Einachsig	NO	gut	79
Einachsig	SW	gut	21
Einachsig	SW	mittel	51
Einachsig	SW	gering	25
Einachsig	SO	gut	3
Einachsig	SO	mittel	35
Einachsig	SO	gering	18
Einachsig	NW	mittel	38
Einachsig	NW	gering	20
1,5-achsig	NO	gut	22
1,5-achsig	SW	mittel	2
1,5-achsig	SW	gering	1
1,5-achsig	SO	mittel	5
1,5-achsig	SO	gering	2

Bewertung der Beleuchtung nach DIN V 18599-4

Die alte künstliche Bürobeleuchtung und die neue Beleuchtung mit LED-Stehleuchten wurden nach DIN V 18599-4 energetisch bewertet und der Beleuchtung des Referenzgebäudes nach EnEV 2009 gegenübergestellt. In Abbildung 77 und Tabelle 24 sind die elektrische Leistung P in kW und der berechnete jährliche Energiebedarf Q in MWh/a für drei Beleuchtungsarten im Vergleich dargestellt. Daraus ist zu erkennen, dass der Energiebedarf der alten künstlichen Beleuchtung trotz deutlich niedrigerer installierter Leistung nahezu dem Wert des Referenzgebäudes entspricht. Das liegt daran, dass die alte Beleuchtungsanlage als eine arbeitsplatzorientierte Beleuchtung – Grundbeleuchtung mit einer mittleren Beleuchtungsstärke von 300 lx und einer Arbeitsplatzleuchte – geplant war. Die Gesamtleistung der Beleuchtung mit LED-Stehleuchten liegt im Vergleich zur alten Beleuchtung um 44 % und der jährliche Energiebedarf um 67 % niedriger als die der alten Beleuchtung.

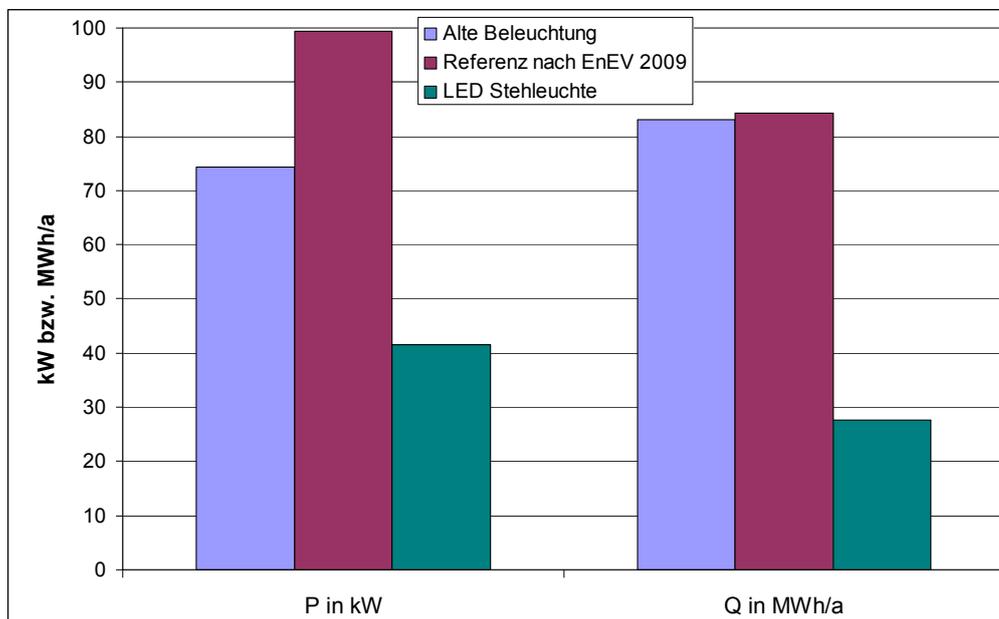


Abbildung 77: Gesamtleistung P und jährlicher Energiebedarf Q der drei Beleuchtungsarten

Tabelle 24: Leistung und jährlicher Energiebedarf im Vergleich

	Leistung in kW	Jährlicher Energiebedarf in MWh/a
Bestandsanlage	74,4	83,1
Referenz nach EnEV 2009	99,5	84,2
LED-Stehleuchte	41,5	27,6
Bestandsanlage – LED-Leuchte	32,8	55,5
in %	44	67

Aus Abbildung 77 ist erkennbar, dass sich die LED-Beleuchtung in der Beurteilung nach EnEV 2009 deutlich besser als die alte Beleuchtung darstellt. Dies gilt für die Gesamtleistung und besonders stark für den jährlichen Energiebedarf, dessen Verringerung sich auf drei Anteile stützt (Abbildung 78):

1. Der Einfluss der Leuchte aufgrund besserer Energieeffizienz liefert einen Anteil von 64 % an der Gesamtreduzierung des jährlichen Energiebedarfs.
2. Die Installation eines Präsenzmelders trägt zu 19 % zur Verminderung bei.
3. Die tageslichtabhängige Regelung der Leuchte hat 17 % Anteil an der Verringerung.

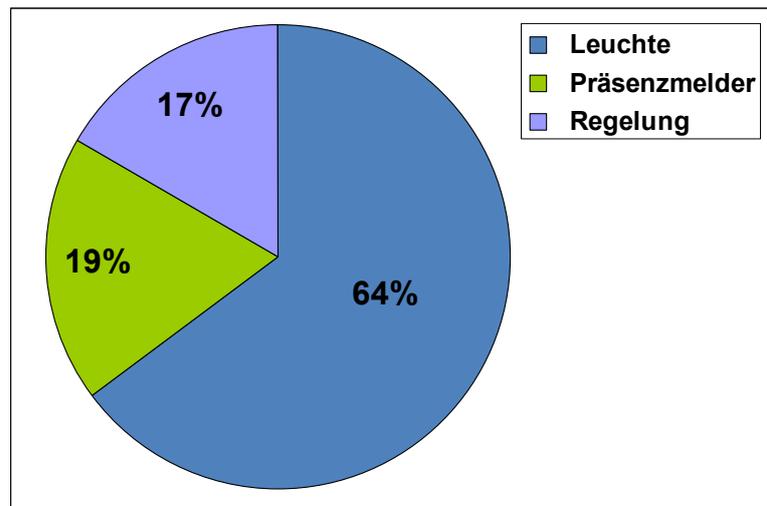


Abbildung 78: relative Anteile der technischen Maßnahmen an der Energieeinsparung

3.3.5 Monitoring der Bürobeleuchtung

Dezentrale Messtechnik

In 40 ausgewählten Büroräumen wurden von Anfang März 2012 bis Ende März 2013 über ein Jahr relevante lichttechnische Größen in 5-Minuten-Intervallen aufgenommen. Hierfür wurde das in Abschnitt 3.2.5 beschriebene Messsystem verwendet. Die Sensorplatinen wurden entsprechend an die Erfordernisse angepasst. Es wurden Sensoren zur Erfassung von Beleuchtungsstärke, Dimmstufe und Raumtemperatur aufgebaut. Die elektrische Leistungsaufnahme der LED-Leuchten wurde über ein von der Haustechnik des BRH betriebenes funkgestütztes Messsystem ermittelt.

Der modulare Aufbau erlaubt eine spezielle Anpassung der Sensorplatine an die Anforderungen des Monitorings im BRH: Das Monitoringsystem ist so ausgelegt, dass an den Bezugspunkten die horizontale Beleuchtungsstärke, der Einschaltzustand des Indirektanteils sowie die Raumtemperatur in einem Messintervall von fünf Minuten gemessen und für eine spätere Auswertung registriert werden können. Das Grundmodul des Messsystems war wieder ein Datenschreiber, dessen Stromversorgung durch ein externes 5V-Netzteil bereitgestellt wurde, zur Überbrückung kürzerer Ausfallzeiten der Spannungsversorgung wurde ein Gold-Cap-Kondensator dazugeschaltet.

Der mit einer S1087-Photodiode realisierte Sensor zur Ermittlung des Einschaltzustands des oberen Leuchtenteils und der Dimmstufe wird direkt an den LEDs im oberen Leuchtenteil befestigt und wird über eine geschirmte Signalleitung per Steckverbindung an das Messsystem angeschlossen (Abbildung 79).

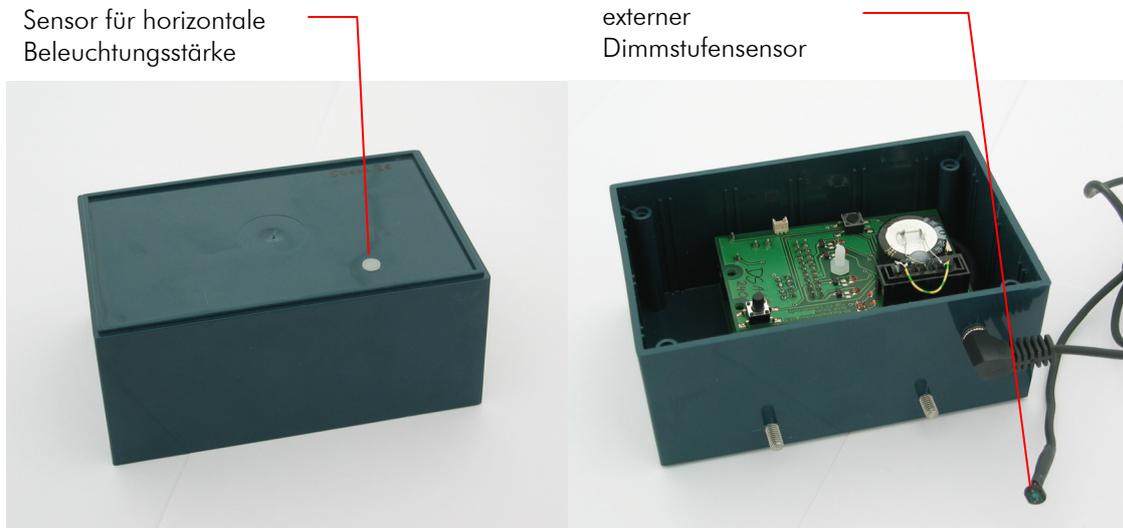


Abbildung 79: Messsystem mit Sensoren für Beleuchtungsstärke und Dimmstufe

Auswertung

Für die Ermittlung des Jahresenergiebedarfs der LED-Stehleuchten wurde von der Haustechnik des Bundesrechnungshofs ein funkgestütztes Leistungsmesssystem eingesetzt, das in den 40 zur Untersuchung ausgewählten Büroräumen zum jeweiligen Zeitpunkt die Leistung misst. Die Leistungsmessdaten wurden in Tabellenform auf einem zentralen Rechner gespeichert.

Zur Auswertung wurden die im Verlauf des Jahres vom April 2012 bis März 2013 gesammelten ca. 9 Millionen Datensätze zunächst in eine SQL-Datenbank importiert. Mit Hilfe einer speziell erstellten Analysesoftware wurden fehlende Datensätze interpoliert, die aufgrund der nicht zu 100 % ausfallsicheren Funkübertragung auftreten konnten.

Durch Integration der Leistungsmesswerte über die entsprechenden Zeiträume ergaben sich die in Tabelle 25 eingetragenen monatlichen Energieumsätze für die Beleuchtung in den einzelnen Räumen. Die Summation der Monatswerte ergab jeweils den Jahresenergieumsatz. Ergänzend ist die Kategorie der Tageslichtversorgung für jeden Raum eingetragen. Die Sortierung erfolgte nach dem Jahresenergieumsatz in aufsteigender Reihe.

Tabelle 25: Energieumsatz für die Beleuchtung der 40 ausgewählten Räume;
 Monatswerte in kWh/M, Jahreswerte in kWh/a

	Raum- nummer	Tageslicht- Versorgung	eingestellter Sollwert E _{AP}	Apr 12	Mai 12	Jun 12	Jul 12	Aug 12	Sep 12	Okt 12	Nov 12	Dez 12	Jan 13	Feb 13	März 13	Jahreswerte	
unteres Drittel	610	gut	345	0,4	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,6	1,0	2,2	1,1	0,6	0,2	7	
	354	mittel	385	0,3	0,2	0,5	0,3	0,1	1,2	1,5	1,5	2,3	3,1	1,5	0,1	12	
	280	gering	116	0,5	0,9	1,1	0,6	1,0	1,2	1,5	1,6	1,6	1,8	0,6	0,5	13	
	430	mittel	429	1,0	0,6	0,7	0,6	0,7	0,8	1,3	1,3	3,0	1,9	2,4	1,4	16	
	390	mittel	220	2,2	1,2	1,1	1,2	1,0	2,0	1,5	2,5	2,8	1,8	1,8	1,5	21	
	383	mittel	562	1,0	1,0	1,1	1,0	1,8	1,3	1,9	2,3	2,1	3,4	2,1	1,6	21	
	368	mittel	376	1,0	0,7	0,5	1,2	0,9	1,1	3,5	4,0	2,3	2,3	1,7	1,6	21	
	524	gut	549	1,8	0,8	1,0	0,4	0,9	0,5	1,8	3,6	3,6	5,5	2,5	1,6	0,6	21
	406	gut	664	1,2	0,8	0,9	2,2	1,5	1,8	2,5	3,0	3,9	3,9	3,1	2,1	1,6	25
	625	gut	1191	1,1	0,5	0,5	3,1	1,4	1,7	2,4	0,3	5,5	5,5	4,9	4,0	1,0	26
	426	mittel	1333	4,0	2,7	0,3	2,5	2,8	1,4	2,1	3,4	2,2	2,2	2,6	1,7	1,1	27
	472	mittel	570	0,7	0,8	1,1	0,6	0,8	0,8	1,3	3,8	5,8	3,5	5,3	4,0	1,7	29
	394	mittel	815	0,9	1,6	0,7	1,8	2,0	1,1	1,1	3,2	4,2	5,5	5,8	3,3	1,1	31
mittleres Drittel	321	mittel	662	0,5	0,4	0,6	1,1	1,2	1,4	2,8	4,0	4,4	7,9	5,2	1,5	31	
	487	mittel	980	1,1	3,7	3,4	0,8	4,0	2,7	1,8	3,1	4,1	3,5	2,5	1,6	32	
	240	gering	407	0,6	1,6	2,2	2,5	4,4	3,3	1,7	3,5	3,6	3,3	4,5	3,0	34	
	203	gut	760	0,8	0,9	0,7	2,3	2,5	2,1	3,6	3,4	4,8	5,6	6,2	3,8	37	
	443	mittel	648	3,5	2,7	2,6	0,6	1,1	3,4	4,7	7,4	3,3	4,2	3,0	2,1	39	
	337	mittel	406	2,1	4,0	7,1	3,4	3,3	7,0	3,3	1,7	2,1	2,0	1,7	1,0	39	
	458	mittel	681	1,2	1,7	1,8	0,7	2,5	3,1	5,1	7,0	7,4	7,6	3,2	3,4	45	
	342	mittel	597	1,0	2,0	2,1	4,5	4,0	2,4	3,9	6,5	4,8	7,9	5,6	3,6	48	
	286	gering	795	2,1	2,2	0,7	2,9	3,4	3,9	5,1	5,8	6,3	7,3	5,0	3,6	48	
	384	mittel	917	0,2	0,4	2,0	1,0	0,2	3,5	6,8	7,1	8,9	10,9	5,1	2,6	49	
	504	gut	176	4,4	2,6	2,2	5,0	5,6	3,7	4,7	6,7	4,9	4,6	4,4	2,7	52	
	484	mittel	880	2,7	4,0	2,6	6,0	2,6	3,0	3,2	4,0	4,7	10,0	8,1	4,4	55	
	265	gering	334	2,4	2,6	3,1	3,2	5,3	4,0	7,0	6,2	9,5	4,4	6,4	4,3	58	
oberes Drittel	493	mittel	1508	1,3	1,2	1,7	1,6	2,9	2,3	5,0	8,7	11,1	13,5	10,1	6,8	66	
	238	gering	540	2,3	3,5	6,4	4,6	6,3	7,5	5,4	7,5	7,3	7,5	6,7	5,7	71	
	410	gut	900	0,7	1,1	2,6	2,4	0,9	4,3	9,5	14,1	19,7	13,2	5,1	3,8	77	
	254	gering	622	3,0	4,2	2,7	6,3	8,3	7,9	10,7	10,5	6,9	11,4	7,1	3,4	82	
	223	gering	1054	5,1	6,1	6,4	4,8	4,5	6,1	6,1	9,9	7,2	15,9	11,5	7,7	91	
	221	gering	1175	2,9	5,7	5,5	9,1	10,8	10,0	14,3	13,2	16,2	8,9	5,9	7,3	110	
	470	mittel	800	2,3	2,6	4,0	4,3	2,7	8,8	16,9	25,6	19,6	12,2	8,0	5,2	112	
	445	mittel	1445	4,8	4,1	4,8	8,6	13,0	0,6	8,3	10,1	15,8	18,8	15,2	9,3	113	
	268	gering	333	8,8	9,0	10,0	8,6	11,0	10,0	11,2	13,8	10,2	16,3	10,7	7,9	127	
	305	gut	854	5,5	5,3	6,3	8,8	3,8	7,8	14,6	17,5	20,8	16,7	13,2	9,4	130	
	323	mittel	1223	9,9	7,4	5,1	14,8	8,0	13,4	13,0	14,7	15,0	20,0	15,2	11,0	148	
	253	gering	767	6,6	13,6	11,4	12,7	14,0	13,5	14,9	19,2	16,7	16,2	12,8	11,6	169	
	372a	mittel	1020	7,1	5,1	13,2	21,4	17,7	14,7	18,2	14,5	16,2	12,8	18,3	11,7	171	
278	gering	350	9,5	9,9	8,7	15,1	12,6	18,0	21,7	12,3	13,7	18,9	15,8	20,0	176		

Aufgrund der extremen Unterschiede zwischen den Jahresenergieumsätzen einzelner Räume (Minimalwert: 7 kWh/a; Maximalwert: 176 kWh/a) wurden für die folgenden Betrachtungen die 40 Räume in drei annähernd gleichgroße Teile geteilt (13-14-13). Für jedes Drittel wurden monatliche Mittelwerte gebildet. Tabelle 26 zeigt die Werte zusammen mit den Mittelwerten aller 40 Räume und den jeweiligen Jahreswerten. Eine grafische Darstellung ist in Abbildung 80 gezeigt.

Tabelle 26: Mittlerer Energieumsatz pro Monat in kWh/M und Jahressumme in kWh/a

Mittelwert in kWh/M	Apr 12	Mai 12	Jun 12	Jul 12	Aug 12	Sep 12	Okt 12	Nov 12	Dez 12	Jan 13	Feb 13	Mrz 13	Jahressumme
alle Räume	2,7	3,0	3,2	4,3	4,3	4,6	6,3	7,3	7,7	8,2	6,1	4,3	62,0
unteres Drittel	1,2	0,8	0,7	1,2	1,1	1,2	2,1	2,6	3,2	3,2	2,3	1,1	20,7
mittleres Drittel	1,7	2,2	2,3	2,6	3,1	3,2	4,2	5,4	5,8	6,5	4,9	3,1	45,2
oberes Drittel	5,3	6,0	6,7	9,3	8,7	9,4	12,7	14,1	14,2	14,9	11,3	8,8	121,4

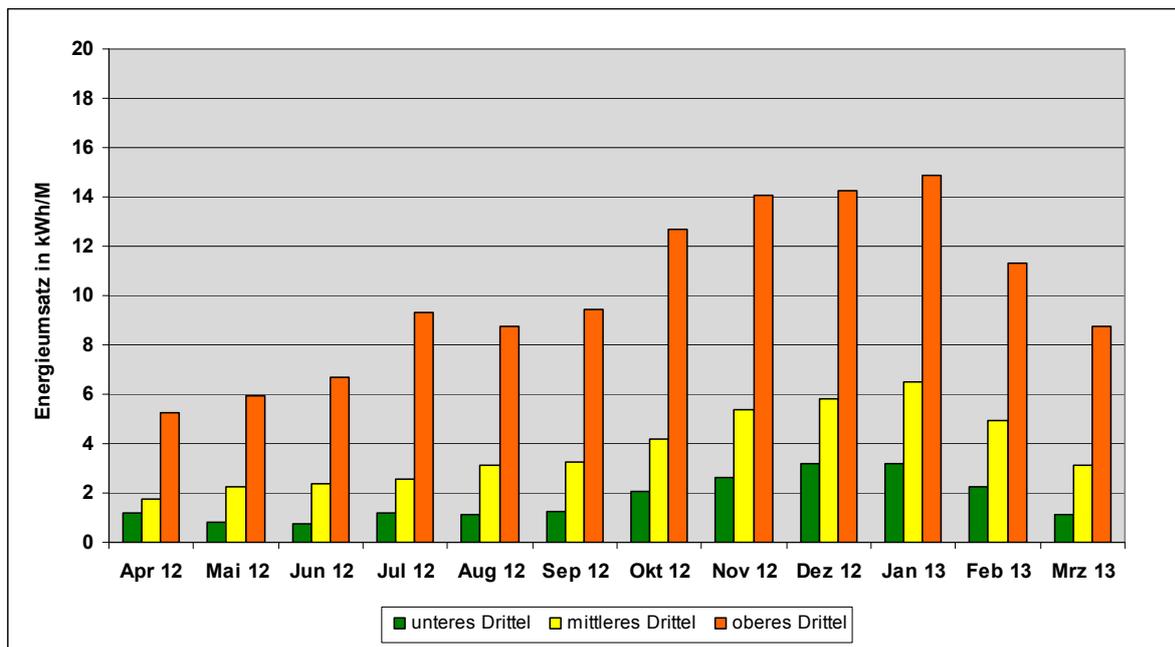


Abbildung 80: mittlerer Energieumsatz in den zum Monitoring ausgewählten Räumen

In den drei Dritteln zeigt sich ein deutlicher Jahresverlauf. In den Frühlings- und Sommermonaten ist der monatliche Energieumsatz für die Beleuchtung niedrig, er steigt in den Herbstmonaten an und erreicht das Maximum in der dunklen Jahreszeit im Dezember und Januar. In der Darstellung der Ergebnisse ist jedoch die in Abbildung 81 gezeigte unterschiedliche Anzahl von Arbeitstagen pro Monat im Bundesland Nordrhein-Westfalen nicht berücksichtigt. Diese liegen im Mittel etwa bei 20

Tagen pro Monat, betrachtet man jedoch die Monate Juli und August sowie den Dezember erklären sich die etwas höheren bzw. niedrigeren Energieumsätze in diesen Zeiträumen.

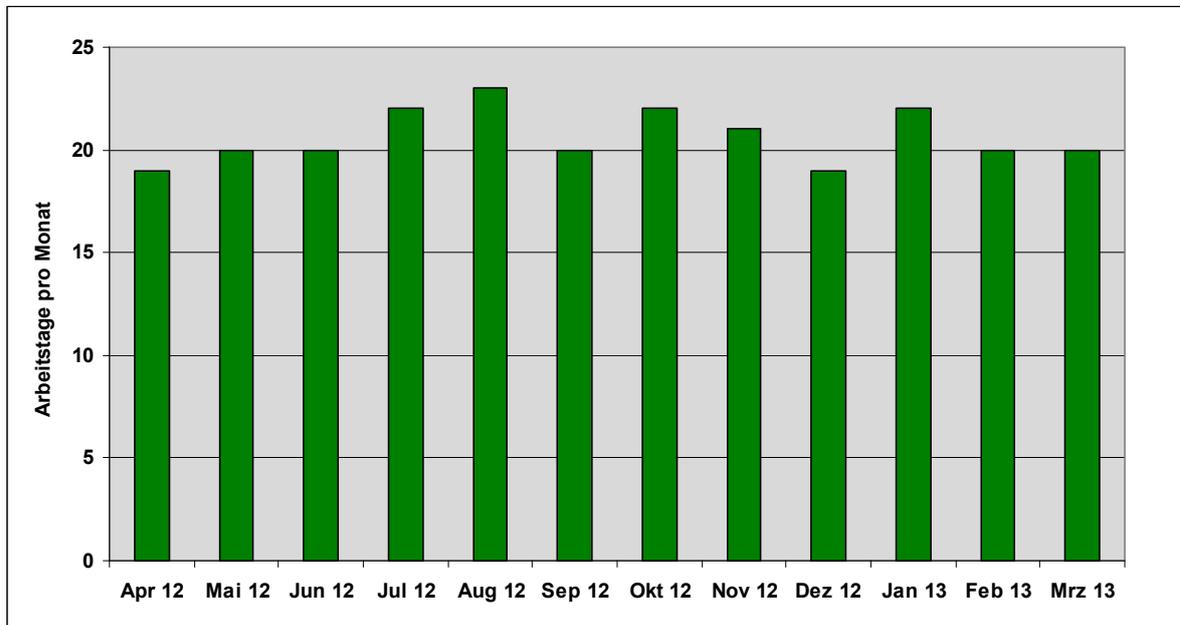


Abbildung 81: Arbeitstage pro Monat in Nordrhein-Westfalen

Vergleicht man nun die in Tabelle 27 gegenübergestellten Jahresenergieumsätze für die Beleuchtung eines durchschnittlichen Raumes und aller Räume im BRH-Haupthaus, dann zeigt sich, dass die von April 2012 bis März 2013 gemessenen Werte noch unterhalb der nach dem Verfahren der DIN V 18599-4 ermittelten Werte (siehe Abschnitt 3.3.4) liegen.

Tabelle 27: Vergleich des Energieumsatzes – DIN V 18599-4 und gemessene Werte

Energieumsatz	nach DIN V 18599-4	gemessener Wert
durchschnittlicher Raum	86 kWh/a	62 kWh/a
alle Büroräume im Haupthaus des BRH	27,6 MWh/a	20 MWh/a

Die Tageslichtversorgung hat im Mittel einen Einfluss auf den Energieumsatz, so gehen die geringeren Jahresenergieumsätze im unteren Drittel mit einer mittleren bis guten Tageslichtversorgung einher. Dagegen überwiegen im oberen Drittel die nur gering mit Tageslicht versorgten Büroräume. Dass jedoch von der Tageslichtversorgung nicht direkt auf den Energieumsatz geschlossen werden kann, zeigt die Betrachtung einzelner Räume. So ist sowohl mit guter als auch mit geringer Tageslichtversorgung ein hoher oder niedriger Energieumsatz möglich.

Die Gründe für die Unterschiede zwischen den Berechnungsergebnissen und den Messwerten sind vielseitig. So wird z. B. bei der Berechnung nach DIN V 18599-4 die gesamte Beleuchtungsanlage, d. h. der direkte und indirekte Anteil, als zusammengeschaltet betrachtet. In der Realität wird dagegen ein Teil der Nutzer den indirekten Anteil gezielt ein- oder ausschalten. Wichtig ist auch zu beachten, dass die Messungen über ein Jahr nicht stellvertretend für alle Jahre gelten können. Die meteorologischen Schwankungen der einzelnen Jahre können einen erheblichen Einfluss auf die für

die Beleuchtung aufzuwendende Energie haben. Die gemessenen Werte betragen etwa 72 % der berechneten Werte und sind unter Berücksichtigung der genannten Einflussfaktoren sehr plausibel.

Ein weiterer Faktor, der auch die extremen Unterschiede der Messwerte in den 40 Büroräumen erklären kann, sind die in dieser Untersuchung nicht zu erfassenden Abwesenheitszeiten durch Dienstreisen oder Urlaubszeiten. Wird ein Büro nur selten genutzt, schaltet die Leuchte entsprechend selten ein, so ist der Energieumsatz für diesen Raum entsprechend niedrig.

Die in der zweiten Spalte der Tabelle 25 eingetragenen von den Nutzern selbst eingestellten Sollwerte für die künstliche Beleuchtung haben ebenfalls einen Einfluss auf den Energieumsatz. Auch hier sind die Unterschiede zwischen den Einzelräumen sehr deutlich. Jedoch lässt sich aus der Einstellung nicht auf den jährlichen Energieumsatz schließen. Sehr hohe und sehr niedrige Einstellungen finden sich in allen Bereichen der Tabelle. Ohne Wissen über die Anwesenheitszeiten der Büronutzer lässt sich daraus keine Vorhersage tätigen. Gleiches gilt für die Tageslichtversorgung der einzelnen Räume. Diese hat zwar einen direkten Einfluss auf die theoretischen Energieumsätze für die Beleuchtung, jedoch müssen die real gemessenen Werte für die Räume damit nicht korrelieren.

Entscheidend ist jedoch, dass das nach DIN V 18599-4 berechnete Energieeinsparpotential als relativer Wert von den oben genannten Einflussfaktoren unbeeinflusst ist. Daher lassen sich die theoretisch ermittelten Werte direkt in der Praxis anwenden.

3.3.6 Zusammenfassende Betrachtung zur Bürobeleuchtung

Durch den Einsatz der LED-Stehleuchten konnte die installierte elektrische Leistung für die Beleuchtung um mehr als die Hälfte verringert werden. Gegenüber den Werten des EnEV 2009-Referenzgebäudes erzielt die Bestandsanlage nahezu gleiche Energieumsätze. Dies kommt dadurch zustande, dass beim Referenzgebäude der gesamte Raum auf der Nutzebene mit dem Wartungswert der Beleuchtungsstärke beleuchtet wird, die Bestandsanlage aber nach dem Konzept der arbeitsplatzorientierten Beleuchtung geplant wurde.

Der energetische Vergleich der Bestandsanlage mit den neuen LED-Leuchten nach DIN V 18599-4 ergab eine Reduzierung des Jahresendenergiebedarfs für die Beleuchtung in den Büroräumen um zwei Drittel. An dieser Reduzierung hat die moderne Lampen- und Leuchtentechnik einen relativen Anteil von 64 %, 19 % geht auf den Einsatz von Präsenzmeldern und 17 % auf die Verwendung intelligenter Regelungstechnik zurück.

Die aus Messungen in 40 ausgewählten repräsentativen Büroräumen ermittelten Werte des jährlichen Energieumsatzes für den Zeitraum April 2012 bis März 2013 ergaben um etwa 30 % geringere Werte als bei der Berechnung nach DIN V 18599-4. Einer der vielseitigen Gründe ist die Tatsache, dass die zur Berechnung zugrunde liegenden Werte der DIN V 18599-10 mittlere Werte für eine durchschnittliche Nutzung über eine Vielzahl von Jahren darstellen. Diese müssen also nicht zwingend zu 100 Prozent für einzelne Jahre für ein bestimmtes Bürogebäude zutreffen. Weiterhin zeigten die Messungen einen Zusammenhang zwischen der Tageslichtversorgung in den Büros und dem Energieumsatz auf. Allerdings gilt dies nur im Mittel, es können keine Vorhersagen für einzelne Räume getroffen werden.

4 Ausreichende Beleuchtungsstärke bei seitlichem Tageslichteinfall

In diesem Teil der Arbeit wird, wie in Kapitel 2.2 geschildert, der Einfluss des seitlichen Tageslichteinfalls auf die Sehleistung und damit der Einfluss der Leuchtdichtekontrastwiedergabe mit Probandenversuchen unter kontrollierten Beleuchtungsbedingungen im Labor untersucht. Dazu wurde ein Testraum auf der Basis einer beleuchtungstechnischen Planung realisiert, der sowohl mit einer konventionellen künstlichen Beleuchtungsanlage beleuchtet werden kann, aber auch durch ein Fenster, das von einem künstlichen Himmel beleuchtet wird [Gramm u.a., 2013]. Im Folgenden werden zunächst die Hintergründe aufgezeigt, die zur Fragestellung führten und ein geeignetes Versuchsdesign entwickelt.

4.1 Reflexblendung und Kontrastwiedergabefaktor

Als Reflexblendung „wird die Beeinträchtigung der visuellen Informationsaufnahme durch Spiegelung heller Flächen an glänzenden Oberflächen“ bezeichnet [LiTG, 1991]. Dabei muss zwischen der psychologischen Störung durch Ablenkung des Beobachters aufgrund heller Flächen im Umfeld der Sehaufgabe und der physiologischen Störung des Sehvorgangs durch Kontrastminderung im Infeld unterschieden werden.

Im Umfeld können Flächen mit gegenüber der mittleren Leuchtdichte der Sehaufgabe hohen Leuchtdichten die Blickrichtung vom eigentlichen Sehdetail ablenken, sodass eine unerwünschte Verschiebung der Aufmerksamkeit möglich ist. Dabei können wiederholte Adaptationsvorgänge an die hohe Leuchtdichte der Reflexion und an die Leuchtdichte der eigentlichen Sehaufgabe nötig sein, was Ermüdung verursachen kann. Für die Beschreibung dieser Effekte sind bisher keine Kriterien bekannt.

Zur Bewertung der durch die Minderung des Kontrasts bedingten Reflexblendung im Infeld wurde 1991 von der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft LiTG der von [Egger, 1984] vorgestellte sogenannte Kontrastwiedergabefaktor CRF (Contrast-Rendering-Factor) als weiteres Gütekriterium der Innenraumbeleuchtung festgelegt [LiTG, 1991]. Er beschreibt das Verhältnis des Leuchtdichtekontrastes einer Sehaufgabe bei der zu bewertenden Beleuchtung C zu dem Leuchtdichtekontrast der gleichen Sehaufgabe bei einer Referenzbeleuchtung C_0 . Diese Referenzbeleuchtung ist definiert als vollkommen diffus strahlende Halbkugel mit konstanter Leuchtdichte.

Der Kontrastwiedergabefaktor berechnet sich wie folgt:

$$CRF = \frac{C}{C_0}$$

wobei gilt:

- CRF > 1 Kontrastwiedergabe mit gegebener Beleuchtung ist besser als mit Referenzbeleuchtung
- CRF = 1 Gegebene Beleuchtung ist gleich mit der Referenzbeleuchtung
- CRF < 1 Sehaufgabe hat durch gegebene Beleuchtung gegenüber der Referenzbeleuchtung an Kontrast verloren

Dabei ist der Leuchtdichtekontrast definiert als:

$$C = \frac{L_u - L_o}{L_u}$$

mit:

L_u : Leuchtdichte des unmittelbaren Umfelds

L_o : Leuchtdichte des Sehobjektes

Mit dieser durch den CRF beschreibbaren physiologischen Beeinträchtigung des Sehvorgangs können zusätzlich auch psychologische Störungen einhergehen, für die bisher keine Bewertungskriterien existieren. So können zu hohe Leuchtdichten zu direkter Blendung führen, die Akkomodations-, Vergenz- und Fusionschwierigkeiten bedingt. Diese Störungen sind nach [LiTG, 1991] im Vergleich zu der von der Kontrastminderung verursachten Störung relativ gering, solange die Kontrastwiedergabeeigenschaften der Beleuchtungsanlage und damit die Werte des CRF hoch genug sind.

Im Absatz 4.5.4 „Schleierreflexionen und Reflexblendung“ der DIN EN 12464-1 werden allgemeine Vorschläge zur Vermeidung dieser Effekte gegeben, wie z. B. die Anordnung der Arbeitsplätze in Bezug zu den Leuchten, Fenstern und Dachoberlichtern. Ist die Raumnutzung zum Zeitpunkt der Beleuchtungsplanung jedoch unbekannt, wird zumeist eine allgemeine Beleuchtung vorgesehen, die in ungünstigen Fällen zur Anordnung der Leuchten direkt über dem Arbeitsplatz führen kann.

Daher ist bei der Innenraumbelichtung zu beachten, dass der Winkel von den Leuchten oder Tageslichtöffnungen zum Beobachter eine entscheidende Rolle spielt. Die beschriebene Kontrastminderung tritt nur auf, wenn die Leuchten so ungünstig zum Arbeitsplatz angeordnet sind, dass Reflexblendung entsteht. Bei seitlich einfallendem Tageslicht, ist allein aus der Geometrie zu erkennen, dass Reflexblendungen wenn überhaupt nur minimal auftreten können (Abbildung 82). Daher sind Petrys Ergebnisse der besseren Sehbedingungen bei seitlich einfallendem Tageslicht nicht zu bestreiten [Petry, 1984]. Und es ist zu erwarten, dass sich für stark glänzende Proben bei seitlich einfallendem Tageslicht sehr viel bessere CRF-Werte einstellen, als bei direkter künstlicher Beleuchtung. Die durch die Reflexblendung hervorgerufenen Störungen korrelieren somit mit dem CRF. Daraus zieht Petry die Schlussfolgerung, dass der Wartungswert der Beleuchtungsstärke für seitlich einfallendes

Tageslicht herabgesetzt werden kann. Es ist dabei aber nicht nachgewiesen, ob die Kontrastminderung durch die künstliche Beleuchtung wirklich die Sehleistung und damit die Arbeitsleistung des Menschen vermindert.

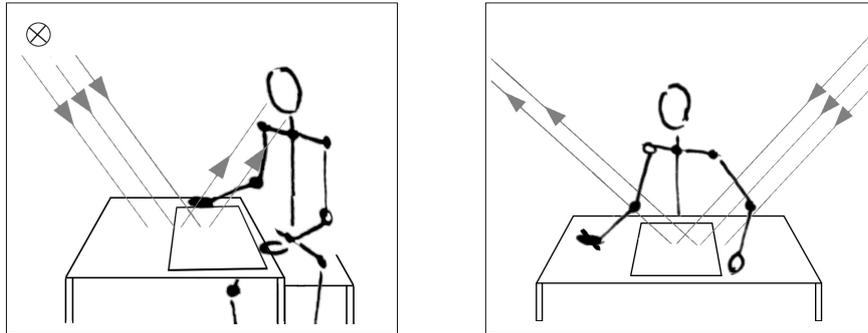


Abbildung 82: Geometrien verschiedener Lichteinfallrichtungen [Hartwig, 2013]

Die Effekte der Verringerung des CRF treten allerdings nur bei stark glänzenden Flächen bzw. Flächen mit vorwiegend gerichteter Reflexion auf, nicht so bei komplett diffus reflektierenden matten Oberflächen. [Fischer, 1981] bemerkt, dass die Gefahr durch Kontrastminderung nicht überbewertet werden sollte, da bei Beleuchtungsstärken um 500 lx die Decke nicht so stark mit Leuchten gefüllt sei, dass man den Störungen nicht durch einfache Änderung der Blickrichtung oder Lage der Sehaufgaben ausweichen könnte.

Es ist jedoch auch möglich, dass die bessere Kontrastwiedergabe nicht die einzige Ursache darstellt, die zur Akzeptanz niedrigerer Beleuchtungsstärken bei Tageslichtbeleuchtung führen. So wird die Qualität der Beleuchtung nicht nur durch die Sehleistung bestimmt, sondern auch durch das Wohlbefinden. Es ist möglich, dass eine Tageslichtverteilung im Raum zu einem größeren Wohlbefinden führt, als eine Lichtverteilung der künstlichen Allgemeinbeleuchtung. Ebenso kann allein das Wissen über die Präsenz von Tageslicht ein größeres Wohlbefinden bewirken.

4.2 Versuchsdesign

Zur Untersuchung der Einflüsse des CRF auf die Sehleistung und zur Verifizierung der theoretischen Berechnungen wurde der im folgenden beschriebene Probandenversuch durchgeführt, bei dem verschiedene Parameter gezielt variiert wurden, die Einfluss auf die Sehbedingungen haben könnten.

4.2.1 Parameter

Papiersorten

Die Kontrastminderung durch Reflexblendung ist abhängig von den Reflexionseigenschaften des Papiers. Da nicht alle im täglichen Gebrauch vertretenen Papiersorten untersucht werden können, aber trotzdem ein breiter Bereich abgedeckt werden soll und da bekannt ist, dass die Kontrastminderung nur bei glänzenden Papiersorten auftritt, wurden zwei glänzenden Papiersorten, seidenmattes und hochglänzendes Papier, und ein mattes Papier ausgewählt. Eine genaue Beschreibung der Papiersorten ist in Abschnitt 4.4.5 zu finden.

Beleuchtungsstärke

Es wurden die drei Beleuchtungsstärkeniveaus 100 lx, 300 lx und 500 lx ausgewählt. Diese Abstufungen sind in Anlehnung an die Beleuchtungsstärkeskala in DIN EN 12464-1 Abs. 4.3.2 ausgesucht, um wahrnehmbare Unterschiede zu erhalten. 500 lx wurden gewählt, da sie in DIN EN 12464-1 Absatz 5.26.2 für Lese und Schreibtätigkeit in Büroräumen angesetzt sind. 300 lx ergeben sich als das 0,6-fache der 500 lx, und 100 lx wurden ausgewählt, um eine untere Grenze auszuloten.

Beleuchtungsgeometrien

Es ergeben sich zwei Beleuchtungsgeometrien: die direkte Allgemeinbeleuchtung und das seitlich einfallende Tageslicht. Da das natürliche Tageslicht ständigen Schwankungen unterliegt und somit keine definierten konstanten Zustände zu erreichen sind, wurde entschieden, die Untersuchungen mit einem künstlichen Tageslicht durchzuführen. Wie oben erwähnt, ist der Lichteinfallswinkel ein maßgeblicher Einflussfaktor für die Kontrastminderung durch Reflexblendung. Um jedoch Einflüsse wie die Tageslichtverteilung im Raum und das Bewusstsein der Anwesenheit von Tageslicht mit zu berücksichtigen, wurde nicht einfach eine seitliche Anordnung der Leuchten realisiert, sondern ein künstlicher Himmel hinter einem realen Fenster. Genaue Angaben zum Aufbau sind in Abschnitt 4.3 zu finden.

Da es sich in diesem Versuch um kein echtes Tageslicht handelt, die Leuchtdichteverteilung und damit der Lichteinfall dem Tageslicht nachempfunden sind, aber keine Verwechslung mit echtem Tageslicht aufkommen soll, werden im Folgenden die Begriffe künstliches Tageslicht sowie künstlicher Himmel verwendet. Weiter ist zu bemerken, dass auch die ähnlichste Farbtemperatur sowie die Lichtverteilung im Raum nahezu der des vollkommen bedeckten Himmels entsprechen.

4.2.2 Methodik

Aus den Parametern drei verschiedene Papiersorten (matt, seidenmatt, glänzend), zwei Beleuchtungsgeometrien und drei Beleuchtungsstärkeniveaus (100 lx, 300 lx, 500 lx) ergeben sich 18 verschiedene Szenarien. Eine Situation aus diesen 18 verschiedenen Kombinationen wird im Folgenden als ein Szenario bezeichnet. Die 18 Szenarien wurden jedem Proband in einer randomisierten Reihenfolge dargeboten.

Es werden drei Methoden gewählt, um zu bestimmen, ob sich bei seitlich einfallendem Tageslicht der Wartungswert der Beleuchtungsstärke auf das 0,6-fache reduzieren lässt. Um möglichst objektiv zu testen, ob die Arbeitsleistung bei seitlichem Tageslicht aber geringerem Beleuchtungsniveau im Vergleich zur direkten Allgemeinbeleuchtung gleich bleibt, wurde der d2-R Test ausgewählt. Für die Überprüfung des subjektiven Empfindens wurden zwei Strategien verfolgt. Zum einen wurde die subjektive Empfindung jedes Szenarios mit Hilfe eines Fragebogens abgefragt, des Weiteren sollten die Probanden die untere Annehmlichkeitsschwelle der Helligkeit selbst einstellen.

d2-R Test

Um die Arbeitsleistung in Abhängigkeit von der Beleuchtung und vom Papier zu erfassen, wurde als allgemeiner Leistungstest der d2-R Aufmerksamkeits- und Konzentrationstest ausgewählt. Er er-

schien erstmals 1962 unter dem Namen d2-Test und wurde stetig weiterentwickelt. Für diesen Versuch wurde die 10. Auflage von 2010 verwendet [Brickenkamp u.a., 2010].

Die Aufgabe des Probanden ist es, Zeichen zu unterscheiden die einander mehr oder weniger ähnlich sind. Ein Test beinhaltet 14 Testzeilen à 57 Zeichen, wobei sich drei Zeilen in Blöcken wiederholen. Pro Block gibt es 171 Zeichen mit jeweils 77 Zielobjekten („d“ mit zwei Strichen) und 94 Distraktoren („d“ mit mehr oder weniger als zwei Strichen, „p“ mit beliebig vielen Strichen). Abbildung 83 zeigt einen derartigen d2-R Testbogen. Die Bearbeitungszeit beträgt normalerweise 20 Sekunden pro Zeile. In der 9. Auflage des Tests [Brickenkamp, 2002] wird darauf hingewiesen, dass es möglich ist, die Bearbeitungszeit auf 15 Sekunden je Zeile zu verkürzen und die Daten auf 20 Sekunden hochzurechnen, um eine Normierung vornehmen zu können. Damit wird die Gesamtbearbeitungszeit von 4 min 40 s auf 3 min 30 s verkürzt, was eine für die Probanden zumutbare Gesamtversuchszeit ermöglicht.

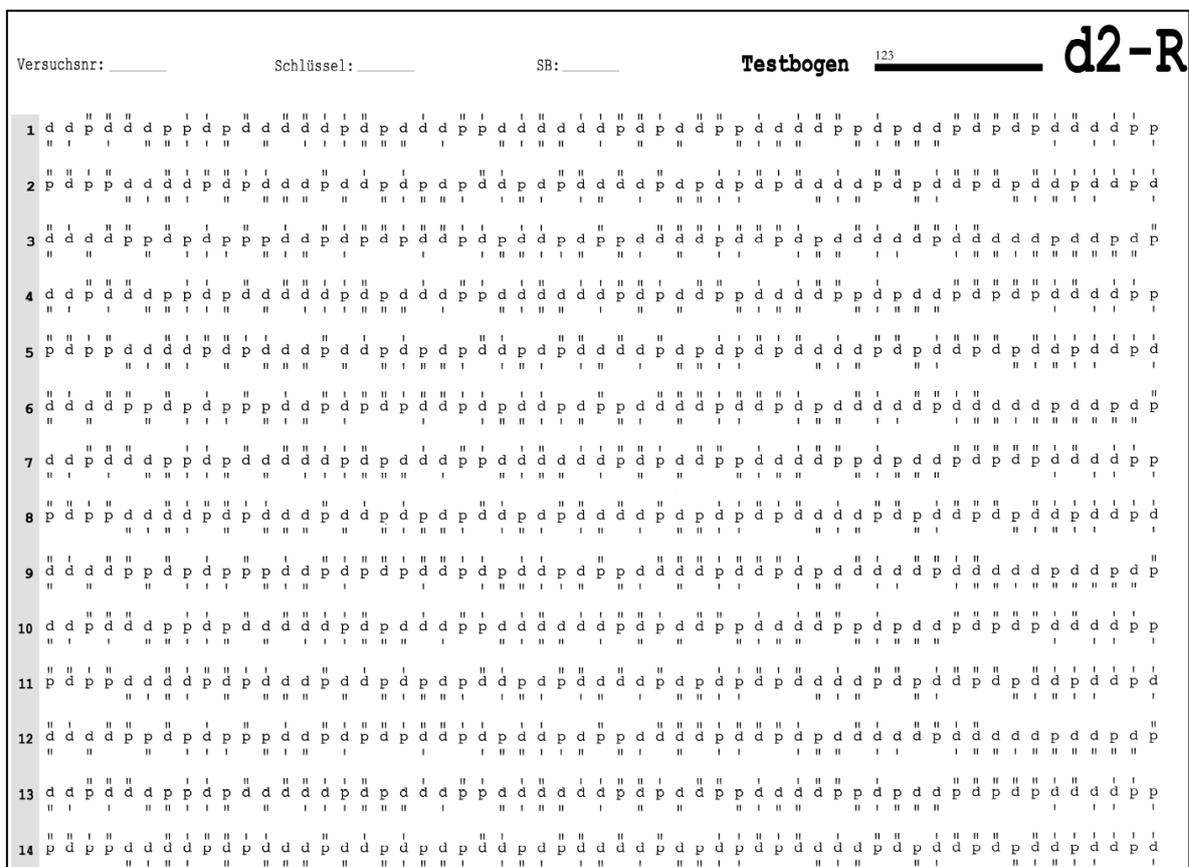


Abbildung 83: Testbogen des d2-R Tests

Es werden sowohl die Schnelligkeit (Quantität) der Bearbeitung anhand der bearbeiteten Zeichen (BZO), als auch die Genauigkeit (Qualität) anhand der Fehler erfasst. Daraus wird die Konzentrationsleistung (KL) bzw. die konzentrierte Aufmerksamkeit ermittelt. Ein großer Vorteil bei der Verwendung dieses Tests ist, dass durch die jahrelange Weiterentwicklung und Erprobung alle Testgütekriterien (Objektivität, Reliabilität, Validität, Skalierung, Normierung, Testökonomie, Nützlichkeit, Zumutbarkeit, Unverfälschbarkeit und Fairness) erfüllt werden. Des Weiteren ist der Test kriteriumsvalid, was bedeutet, dass das Verhalten innerhalb des Tests auf ein Kriterium außerhalb der Testsituation schließen lässt. In diesem Versuch ist das Verhalten innerhalb der Testsituation die sich erge-

bende Konzentrationsleistung. Das äußere Kriterium sind die Lichtverhältnisse in Kombination mit den Papiersorten. Zu jedem der 18 Szenarien wird dem Proband der d2-R Test dargeboten. Da nach [Brickenkamp u.a., 2010] bei Wiederholung des Tests eine anfängliche Leistungssteigerung von 25 % zu erwarten ist, wurden zwei d2-R Tests als Vortest durchgeführt, um damit den Lerneffekt vorweg zu nehmen.

Um 18 verschiedene d2-R Testbögen zu generieren, wurden die drei Zeilen in einem Block vertauscht, und der Block mit den vertauschten Zeilen wiederholt. Ebenso wurden drei vertikale Blöcke von je 19 Zeichen vertauscht. Die 18 verschiedenen d2-R Bögen wurden in jedem Versuch randomisiert den drei verschiedenen Papiersorten zugewiesen, um durch die Vertauschungen entstandene mögliche systematische Fehler zu vermeiden.

Fragebogen zur subjektiven Bewertung der Helligkeit

Zur Erfassung der subjektiven Empfindung der Probanden zu den einzelnen Szenarien wurde ein Fragebogen zur subjektiven Bewertung der Beleuchtungssituation erstellt (Abbildung 84). Er besteht aus vier Frageblöcken zur Helligkeit bezüglich der Lese- und Schreibtätigkeit, zur Helligkeit im Raum, zur Sehaufgabe und zur Reflexion des Papiers, die jeweils durch Ankreuzen eines Kästchens auf einer siebenstufigen Skala beantwortet werden sollten. Dieser Fragebogen wurde von den Probanden nach jedem d2-R Test ausgefüllt. Die Reihenfolge der Fragen wurde auf jedem der 18 Fragebogen im Test randomisiert.

Helligkeit einstellen

Die Erfahrung zeigt, dass die Nutzer tageslichtversorgter Räume eine manuell geschaltete künstliche Beleuchtungsanlage erst bei sehr viel niedrigeren Beleuchtungsstärken auf der Sehaufgabe einschalten, als es z. B. in DIN EN 12464-1 gefordert wird. So zeigen Untersuchungen von [Hunt, 1980] in verschiedenen Räumen Minimalwerte von etwa 75 lx in der Arbeitsebene, bei denen die Beleuchtung mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % eingeschaltet wurde.

Um in diesem Laborversuch eine solche untere Schwelle zu finden, wurden die Probanden in jedem der 18 Szenarien angewiesen, das Licht soweit herunter zu dimmen, dass sie gerade noch angenehm über längere Zeit unter dieser Beleuchtung auf dem Tisch arbeiten könnten. Dies geschah mit zwei Tastern, mit der Aufschrift „heller“ und „dunkler“. So war es auch ungeübten Probanden möglich, diese Aufgabe leicht zu bewältigen. Gleichzeitig war es für den Probanden nicht möglich, den aktuellen Stand der Helligkeitseinstellung auf einer Skala o. ä. abzulesen. Es war nicht erlaubt, direkt aus dem Szenario heraus heller zu dimmen. Falls aber zu dunkel gedimmt wurde, war es erlaubt, wieder heller zu dimmen. Wurde die Aufgabenstellung nicht richtig verstanden, gab der Versuchsleiter den Hinweis, das Licht soweit herunter zu dimmen, bis der Proband eine andere Lichtquelle dazu schalten würde. Die von den Probanden eingestellte Helligkeit wurde mit einem Luxmeter an einem Referenzpunkt gemessen, der Messwert wurde dem Probanden während des Versuchs nicht mitgeteilt.

4.2.3 Operationalisierung

Aus diesem Versuchsdesign ergeben sich die folgenden in Tabelle 28 eingetragenen Variablen.

Tabelle 28: Variablen des Probandenversuchs

Unabhängige Variable	Abhängige Variable	Methode
Beleuchtungsstärke: 500 lx, 300 lx, 100 lx	Konzentrationsleistung, Qualität und Quantität der Arbeit	d2-R-Test
Lichteinfallrichtung: Direktbeleuchtung, seitlicher Lichteinfall	Helligkeitswahrnehmung im Raum und für die Sehaufgabe, Wahr- nehmung der Reflexblendung	Fragebogen
Reflexionseigenschaften des Papiers: matt, halbgläzend, glänzend	Subjektive untere Annehmlichkeitsgrenze	Helligkeit einstellen

Alle weiteren Einflussgrößen wie z. B. Umgebungstemperatur und Sitzposition wurde bestmöglich konstant gehalten. Die Festlegung der Altersklasse der Probanden zwischen 20-39 Jahren orientierte sich an den Normierungstabellen des d2-R Tests, wo für diese Altergruppe eine gemeinsame Tabelle gilt. Aufgrund des ungleichen Körperschattens bei seitlichem Lichteinfall mussten Linkshänder ausgeschlossen werden. Es wurde bewusst für die Innenraumbeleuchtung eine ähnlichste Farbtemperatur T_{cp} von 6500 K gewählt, um beim Wechsel zwischen künstlichem Himmel und Innenraumbeleuchtung mögliche Einflüsse aufgrund unterschiedlicher Lichtfarben auszuschließen.

4.3 Aufbau des Versuchsraums mit künstlichem Himmel

Der Mock-up-Büroraum misst 4,5 m Breite, 4,6 m Tiefe und 3,2 m Höhe und stellt somit ein Einzelbüro mit ca. 20 m² dar (Abbildung 85). Das Fenster für den seitlichen Lichteinfall befindet sich in der Mitte der kürzeren Seite und ist 3 m breit und 1,9 m hoch. Es ist zweiflügelig, die reine Glasfläche ohne Versprossungsanteil beträgt 4,125 m² (2 x 1,25 m x 1,65 m). Der in Abschnitt 4.1 der ASR A3.4 „Ausreichendes Tageslicht“ geforderte Wert für das Verhältnis von lichtdurchlässigen Fensterflächen zur Raumgrundfläche von mindestens 1:10 wird mit diesem Aufbau zweifach übererfüllt. Damit wird eine gute bis sehr gute Tageslichtversorgung ermöglicht. Zusätzlich sind lichtundurchlässige Rollos an der Innenseite angebracht, um die Fensterfläche variabel gestalten zu können. Die Unterkante der durchsichtigen Verglasung des Fensters befindet sich auf 0,92 m Höhe.

In die Trennwand zwischen dem Büroraum und dem Bereich des künstlichen Himmels wird ein reales Fenster mit Einfachverglasung installiert. Hinter dem Fenster befindet sich ein weißer Raum mit abgerundeten Ecken, wodurch der Raum nicht mehr als solcher wahrgenommen wird. Um den Eindruck eines echten Ausblicks aus dem Fenster zu verstärken wurde ein realistisches Foto-Panorama angebracht (Abbildung 86).

Dieser künstliche Himmel wird durch 40 Stück T5-Leuchtstofflampen vom Typ 865 mit einer ähnlichsten Farbtemperatur T_{cp} von 6500 K und einem Farbwiedergabeindex R_a von 80 ausgeleuchtet (Abbildung 87). Der Gesamtlichtstrom beträgt 250 klm und die elektrische Gesamtleistung 3,5 kW. Durch die DALI-steuerbaren Vorschaltgeräte kann die Leuchtdichte des „Himmels“ so geregelt werden, dass Beleuchtungsstärken bis zu 1500 lx auf der Arbeitsfläche im Innenraum entstehen. Durch

die Anbringung der Leuchten oberhalb des Fensters mit einem zusätzlichen Schatter, der einen direkten Lichteinfall in den Raum verhindert, wird eine Leuchtdichte-
 verteilung erreicht, die der des vollkommen bedeckten Himmels ähnlich ist. Dazu zeigt Abbildung 88 die gemessene Leuchtdichte-
 verteilung des künstlichen Himmels.

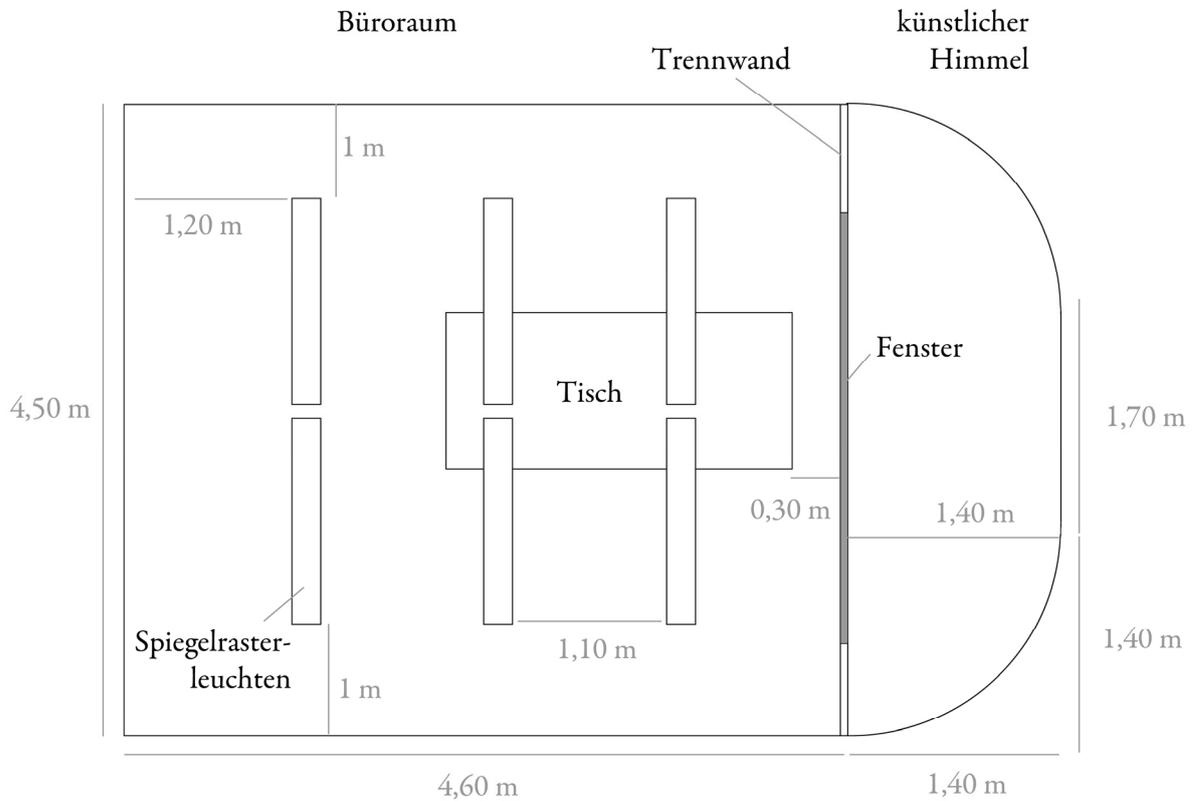


Abbildung 85: Aufbau des Versuchsaufbaus mit künstlichem Fenster: Grundriss



Abbildung 86: künstlicher Himmel und Realisierung der Umgebung mit Foto-Panorama



Abbildung 87: künstlicher Himmel mit 40 Leuchtstofflampen vom Typ T5 865 80 W

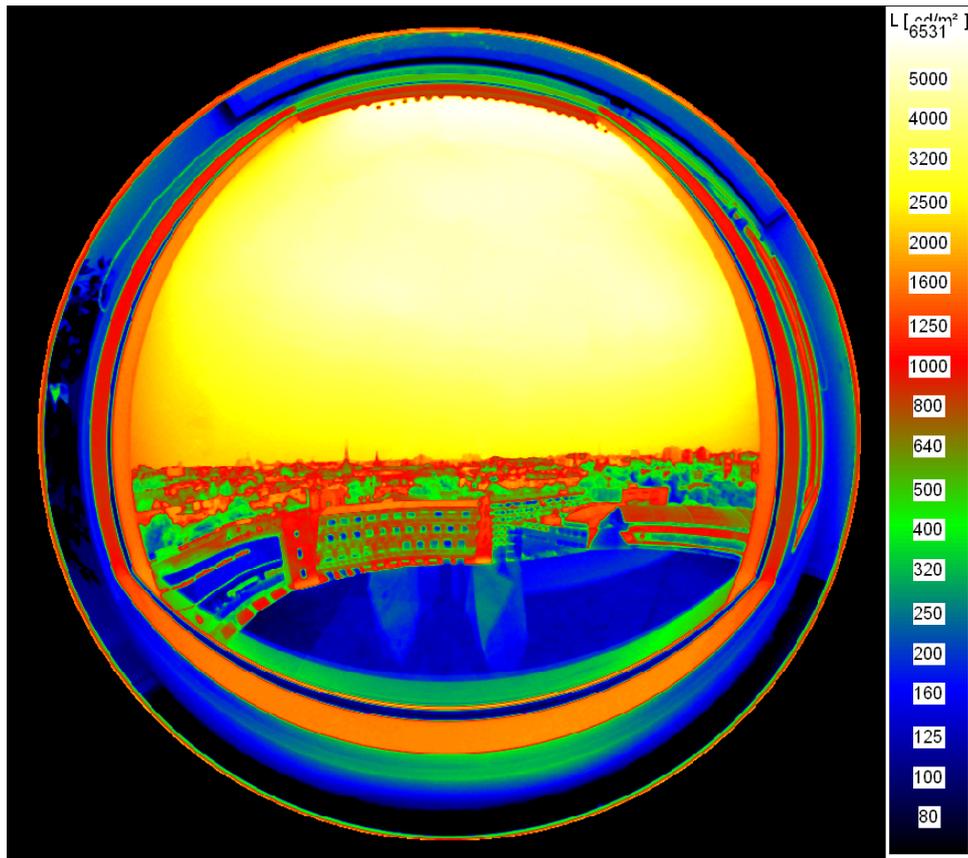


Abbildung 88: Gemessene Leuchtdichteverteilung des künstlichen Himmels bei Maximaleinstellung der Leuchtstofflampenleistung

Für die direkte Beleuchtung im Innenraum wurden sechs abgehängte Spiegelrasterleuchten angebracht; bestückt mit jeweils einer DALI-dimmbaren T8/58 W Leuchtstofflampe. Um den möglichen Einfluss durch unterschiedliche ähnlichste Farbtemperaturen auszuschließen, wurden R_a und T_{cp} gleich der Beleuchtung im künstlichen Himmel ausgesucht. Abbildung 89 und Abbildung 90 zeigen die Ansicht des Testraums mit der Anordnung des Fensters, der künstlichen Beleuchtung und dem Foto-Panorama mit den sich damit ergebenden zwei Beleuchtungsgeometrien, die direkte Allgemeinbeleuchtung und der seitliche Lichteinfall des künstlichen Himmels.

Der Schreibtischarbeitsplatz ist mittig in 0,3 m Abstand vor dem Fenster situiert. Diese Aufstellung mit einem Abstand, der kleiner als das Ein- bis Dreifache der Fensterhöhe ausfällt, ermöglicht nach [SLG u.a., 1975] eine ausreichende Versorgung mit Tageslicht. Der Arbeitstisch misst 0,8 m mal 1,6 m und ist auf eine Höhe von 0,75 m eingestellt. Damit beträgt die Nutzebene über dem Boden ebenfalls 0,75 m. Die Sitzposition ist 1,2 m vom Fenster entfernt, direkt unter einer Leuchte mit Blickrichtung parallel zum Fenster in Richtung Tür angeordnet. Der Bereich der Sehauflage ist auf ein 0,3 m mal 0,4 m großes Feld eingeschränkt. Dieses ist durch einen Rahmen aus weißem Klebeband markiert, in welchem der Proband das A4 Blatt auf dem sich die Sehauflage befindet bewegen darf. Zum Konstanthalten des Blickwinkels der Probanden während des Versuchs wird eine höhen- und winkelverstellbare Kinnstütze montiert. Der Blickwinkel befindet sich bei allen Probanden im Bereich von 0° bis 45° was einem üblichen Blickwinkel bei Schreib- und Leseaufgaben entspricht [LiTG, 1991].



Abbildung 89: Realisierter Versuchsraum: Situation mit seitlichem Lichteinfall durch „Tageslicht“



Abbildung 90: Realisierter Versuchsraum: Situation mit direkter Beleuchtung

4.4 Messtechnische Erfassung

Zur Beschreibung der Beleuchtungsbedingungen im Versuchsraum wurde dieser in Hinblick auf verschiedene Parameter lichttechnisch untersucht.

4.4.1 Reflexionsgrade

Die durchschnittlichen Reflexionsgrade bei diffuser Beleuchtung der Wand liegen bei 0,8, an der Decke bei 0,9 und am Boden bei 0,2. Die Werte liegen somit innerhalb der in DIN EN 12464-1 Abs. 4.2.2 vorgegebenen Grenzen für die Reflexionsgrade von Raumoberflächen. Die Reflexionsgrade wurden mit einem ρ_{dif} -Messgerät ermittelt.

4.4.2 Tageslichtquotient

Aus den geometrischen Abmessungen des Raumes und des Fensters lässt sich unter Berücksichtigung der Reflexionseigenschaften der Raumoberflächen die Verteilung des Tageslichtquotienten auf der 0,85 m Ebene mit Hilfe einer Lichtsimulationssoftware berechnen (Abbildung 91). In den beiden Bezugspunkten nach DIN 5034-1 in halber Raumtiefe mit einem Meter Abstand zu den Seitenwänden auf einer Höhe von 0,85 m stellt sich ein Tageslichtquotient von 3 % ein, in der Raummitte beträgt er 3,7 %. In der Mitte des definierten Arbeitsplatzes beträgt der Tageslichtquotient auf der 0,75 m Tischebene circa 10 %.

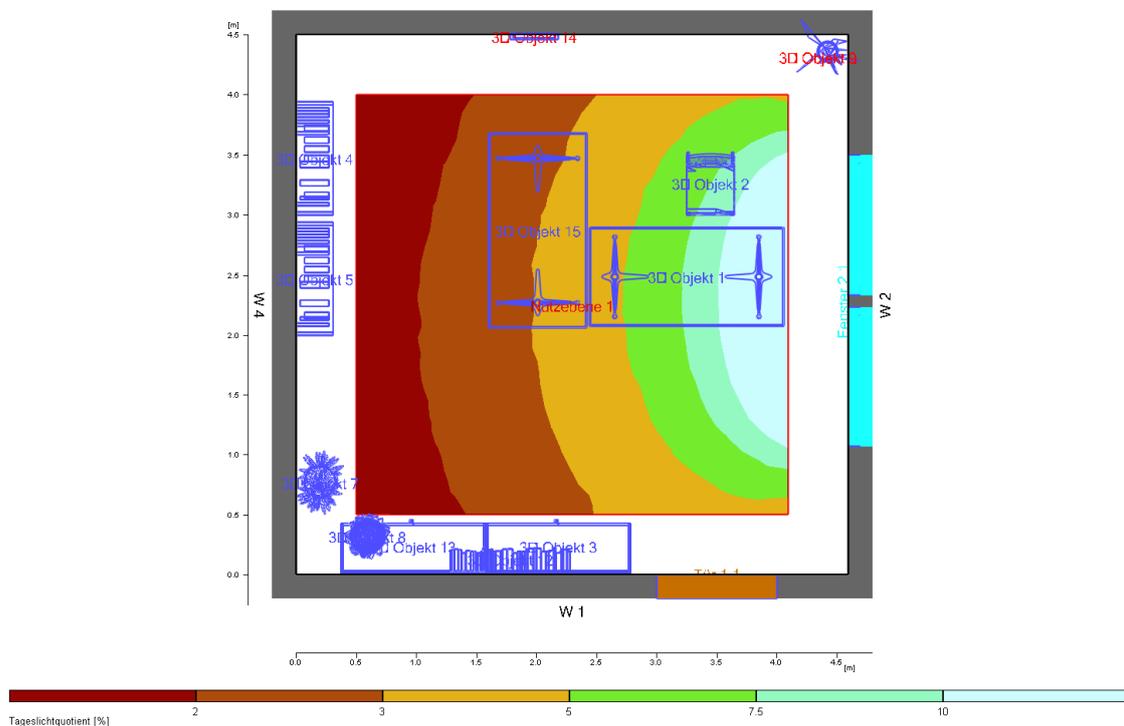


Abbildung 91: Simulierte Verteilung des Tageslichtquotienten im Versuchsraum; Nutzebene 0,85 m

Diese Werte des Tageslichtquotienten bestätigen die bei der Planung der Fenstergröße anvisierte sehr gute Versorgung mit „Tageslicht“. Die in DIN 5034-1 geforderten Werte für in den Abmessungen Wohnräumen ähnliche Büroräume von $D_{\text{mittel}} \geq 0,9$ sowie $D_{\text{min}} \geq 0,75$ werden damit um das

Drei- bis Vierfache übererfüllt. Die in der Arbeitsstättenrichtlinie ASR A3.4 formulierten Anforderungen für ausreichendes Tageslicht am Arbeitsplatz von $D_{Ap} > 2\%$ werden ebenfalls vielfach übererfüllt.

Zum Vergleich der Simulationswerte mit dem realen Versuchsraum zeigt Abbildung 92 die mit einem Klasse A Beleuchtungsstärkemessgerät gemessene Beleuchtungsstärkeverteilung bei Beleuchtung durch den künstlichen Himmel normiert auf den Maximalwert. Es zeigt sich eine für die geplante Untersuchung hinreichend gute Übereinstimmung mit der tatsächlichen Beleuchtungsstärkeverteilung bei vollkommen bedecktem Himmel.

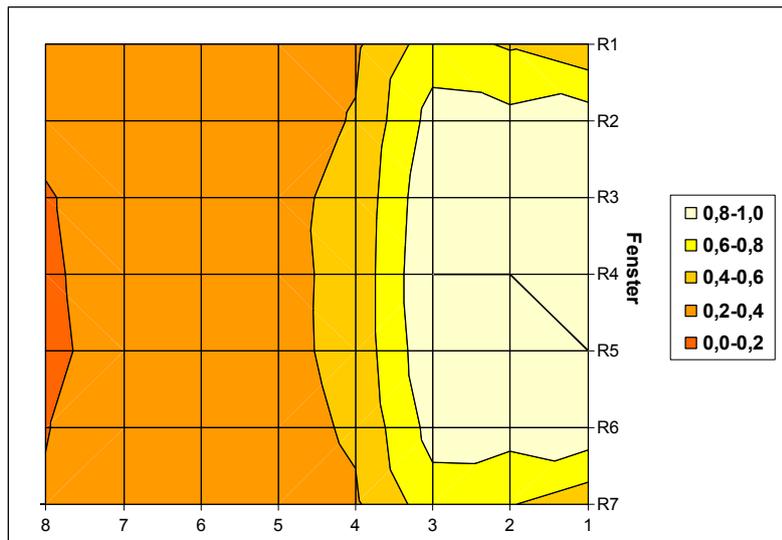


Abbildung 92: Verteilung der relativen Beleuchtungsstärke auf einer Nutzebene von 0,75 m im Versuchsraum bei „Tageslichtbeleuchtung“

4.4.3 Gleichmäßigkeit

Die Gleichmäßigkeit $U_0 = E_{\min}/E_m$ der Beleuchtungsstärke für eine künstliche Beleuchtungsanlage nach DIN EN 12464-1 muss im Bereich der Sehaufgabe mindestens bei 0,6 liegen, im unmittelbaren Umgebungsbereich muss sie mindestens 0,4 und im Hintergrundbereich mindestens 0,1 betragen. Die gemessene relative Beleuchtungsstärkeverteilung bei direkter Beleuchtung ist in Abbildung 93 gezeigt. Der nachfolgenden Tabelle 29 ist zu entnehmen, dass die geforderten Gleichmäßigkeiten bei direkter Beleuchtung im Versuchsraum erfüllt werden.

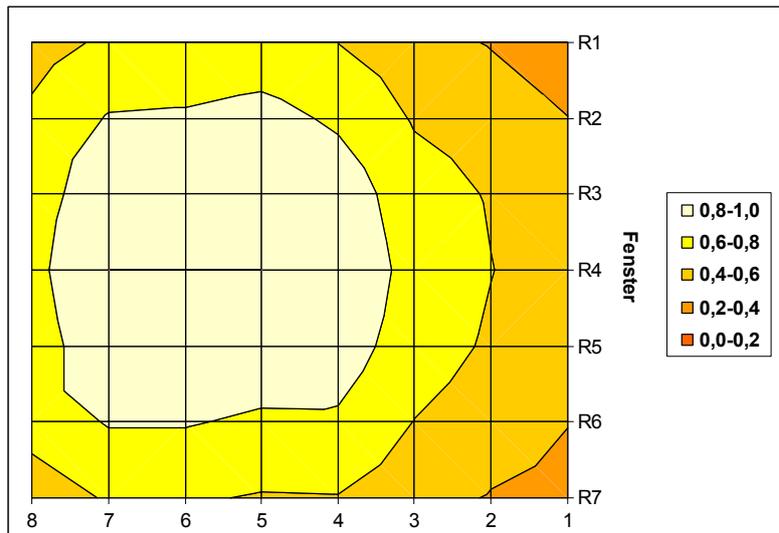


Abbildung 93: Verteilung der relativen Beleuchtungsstärke auf einer Nutzebene von 0,75 m im Versuchsraum bei Direktbeleuchtung

Tabelle 29: Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke

U_0	im Bereich der Sehaufgabe	unmittelbarer Umgebungsbereich	Hintergrundbereich
künstliches Tageslicht	0,83	0,59	0,19
direkte Beleuchtung	0,74	0,56	0,10

4.4.4 Leuchtdichteverteilung

Zur messtechnischen Bewertung der „Helligkeit“ eines Raumes bietet sich die Messung der ortsauflösten Leuchtdichteverteilung an. Dies wurde mit einer CCD-Leuchtdichtekamera unter Zuhilfenahme eines zusätzlichen in der Kalibrierung berücksichtigten Fischaugenobjektivs durchgeführt. Abbildung 94 zeigt das Messbild bei direkter Beleuchtung mit 500 lx im Mittelpunkt des Arbeitsbereichs mit den in der Auswertung genutzten Bewertungsfeldern. In Abbildung 95 ist das entsprechende Messbild bei seitlicher Beleuchtung durch den künstlichen Himmel mit 500 lx im Mittelpunkt des Arbeitsbereichs zu sehen. Die Aufnahmen wurden jeweils aus der Perspektive des Probanden aufgenommen und gleich skaliert.

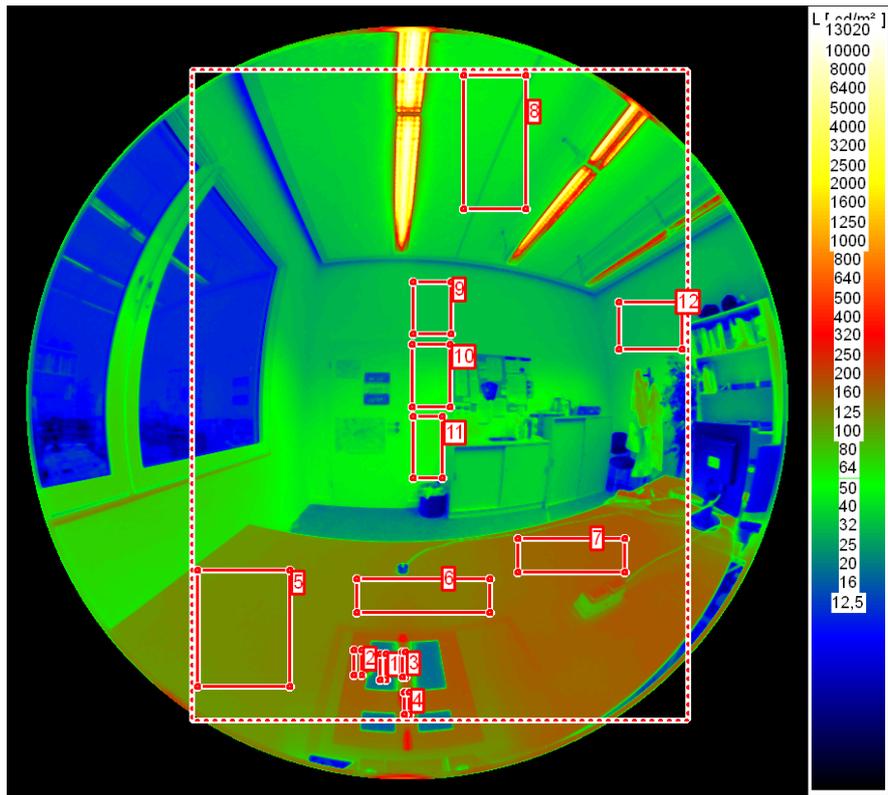


Abbildung 94: Leuchtdichteverteilung im Versuchsraum bei Direktbeleuchtung 500 lx;
12 Bewertungsfelder

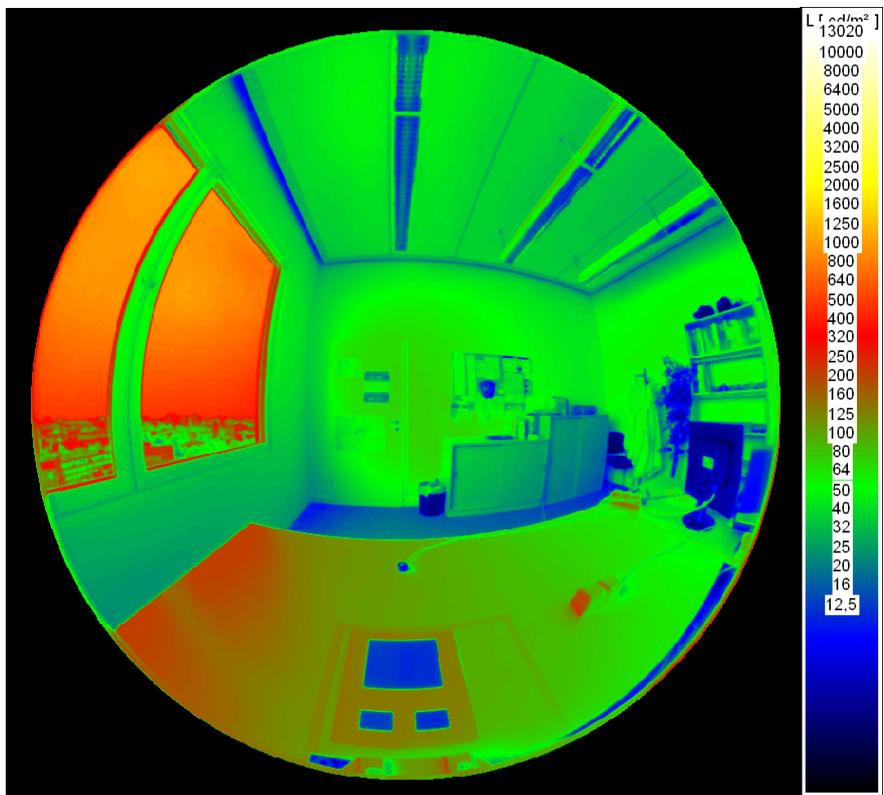


Abbildung 95: Leuchtdichteverteilung im Versuchsraum bei „Tageslichtbeleuchtung“ 500 lx

Zum Vergleich der unterschiedlichen Beleuchtungsszenarien sind in Tabelle 30 die mittleren Leuchtdichten ausgewählter in Abbildung 94 eingezeichneter Bewertungsfelder eingetragen.

Tabelle 30: Mittlere Leuchtdichten ausgewählter Oberflächen mit Nummer des Bewertungsfeldes

Lichteinfall- richtung	E in lx	L in cd/m ² auf dem Tisch			L in cd/m ² im Raum				
		Links [5]	Mitte [6]	Rechts [7]	Decke [8]	Wand oben [9]	Wand- mitte [10]	Wand- unten [11]	Rück- wand [12]
direkt	500	121	138	165	43	33	43	55	30
	300	79	89	107	28	21	28	35	19
	100	27	30	36	9	7	10	12	7
künstlicher Himmel	500	167	105	77	39	59	72	71	56
	300	102	64	47	24	36	44	44	35
	100	35	22	16	8	12	15	15	12

Auf dem Tisch ist bei direkter Beleuchtung ein Abfall der Leuchtdichte zur Fensterwand von etwa 20 % zu erkennen. Beim seitlichen Lichteinfall beträgt der Leuchtdichteabfall in die Raumtiefe auf der Tischoberfläche circa 50 %. Hier sorgt also die direkte Beleuchtung für eine gleichmäßigere Ausleuchtung des Arbeitstisches.

Auf den Raumbegrenzungsflächen zeigt sich ein gegenläufiges Verhalten: Bei seitlichem Lichteinfall schwanken die Leuchtdichten auf der dem Probanden gegenüberliegenden Wand um etwa 10 %, bei direkter Beleuchtung sind die Unterschiede mit ungefähr 30 % erheblich höher.

Wichtig sind aber auch die absoluten Leuchtdichtewerte bei gleicher Beleuchtungsstärke auf dem Arbeitsplatz. Es ergeben sich doppelt so hohe Leuchtdichten auf dem oberen Bereich der gegenüberliegenden Wand sowie der Rückwand bei seitlichem Lichteinfall durch den künstlichen Himmel gegenüber der direkten Beleuchtung. Es ist also zu erwarten, dass der Raum bei „Tageslichtbeleuchtung“ deutlich heller empfunden wird als bei direkter Beleuchtung.

4.4.5 Glanzeigenschaften des Papiers

Alle drei ausgewählten Papiere sind weiß und lichtundurchlässig. Die Papiertypen wurden gemäß [LiTG, 1991] klassifiziert und sind in ihrem Reflektometerwert etwa gleichabständig. Die Herstellerbeschreibungen sind Tabelle 31 zu entnehmen.

Tabelle 31: Papiertypen

Papiertyp / Klassifizierung	Hersteller	Beschreibung	Bezeichnung	Grammatur in g/m ²	Format
matt	mondi	Karton	Maestro Extra	160	A4
seidenmatt / semi	mondi	Bilderdruckpapier	Color Copy coated glossy	170	A4
glänzend	mondi	Fotopapier	Chromolux	200	A4

Gemäß [DIN 67530] wurde mit einem Reflektometer der Reflektometerwert der drei Papiersorten messtechnisch bestimmt. Dazu wurde unter drei Messgeometrien von 20°, 60°, 85° und an drei charakteristischen Stellen des Papiers der Reflektometerwert ermittelt. Allgemein wird der bei einem Einstrahlungswinkel von 20° ermittelte Wert zur Bewertung hochglänzender Materialien verwendet, der Einstrahlungswinkel von 60° wird für mittel-glänzende und der 85°-Winkel für matte Prüfkörper verwendet. In [LiTG, 1991] wird vorgeschlagen, für die Bewertung von Schreibtisch-Sehaufgaben den Messwinkel von 20° zu wählen, da dieser im Bereich des häufigsten Blickwinkels von 25° liegt. Da die Messungen unter verschiedenen Messgeometrien pauschal nicht vergleichbar sind und die drei Papiertypen von hochglänzend bis matt alle Geometrien abdecken, wurde unter jeder Geometrie eine Einzelwinkelmessung durchgeführt.

Problematisch ist die Veränderung der Glanzeigenschaften der Papiere durch die schwarze Bedruckung. Dies wurde zu minimieren versucht, indem die matte und seidenmatte Papierprobe mit einem Laserdrucker und die glänzende Probe mittels eines Tintenstrahldruckers bedruckt wurden. Die aus jeweils drei Messungen gemittelten Reflektometerwerte sind Tabelle 32 zu entnehmen.

Tabelle 32: Gemessene Reflektometerwerte der Papiertypen

Papiertyp	Messgeometrie	weißes Papier	Bedruckung
matt	20°	1,4	0,3
	60°	4,5	2,4
	85°	7,6	19,5
seidenmatt / semi	20°	7,3	0,4
	60°	35,9	3,1
	85°	79,6	51,8
glänzend	20°	55,3	34,8
	60°	77,4	68,9
	85°	96,9	94,4

4.4.6 Messung des Kontrastwiedergabefaktors

Der Referenzkontrast C_0 für die drei Papierproben wurde, wie es für den CRF definiert ist, unter Beleuchtung einer vollkommen diffus strahlenden Halbkugel konstanter Leuchtdichte mit ca. 3,5 m Durchmesser ermittelt. Der Kontrast ist dabei unabhängig vom Beobachtungswinkel. Jede Papierprobe wurde mit einem schwarzen Quadrat mit einer Kantenlänge von 11 cm bedruckt, was eine verlässliche Messung der Leuchtdichten im bedruckten und unbedruckten Teil ermöglichte. Aus den gemessenen Leuchtdichten ließen sich die in Tabelle 33 eingetragenen Leuchtdichtekontraste bei diffuser Beleuchtung berechnen.

Tabelle 33: Leuchtdichtekontraste bei diffuser Beleuchtung

Papiertyp	Leuchtdichtekontrast C_0
matt	0,93
semi	0,92
glänzend	0,88

Um die Verteilung des Kontrastes im Bereich der Sehaufgabe bei real gegebener Beleuchtungssituation zu messen, wurde nach Vorgaben der LiTG Publikation Nr. 13 [LiTG, 1991] ein 112 Punkte-Raster im A3-Format erstellt und in schwarz auf die drei Papiersorten gedruckt. Mit einer CCD-Leuchtdichtekamera wurde für alle 18 Szenarien die Leuchtdichteverteilung des Punkte-Rasters aufgenommen (Abbildung 96).

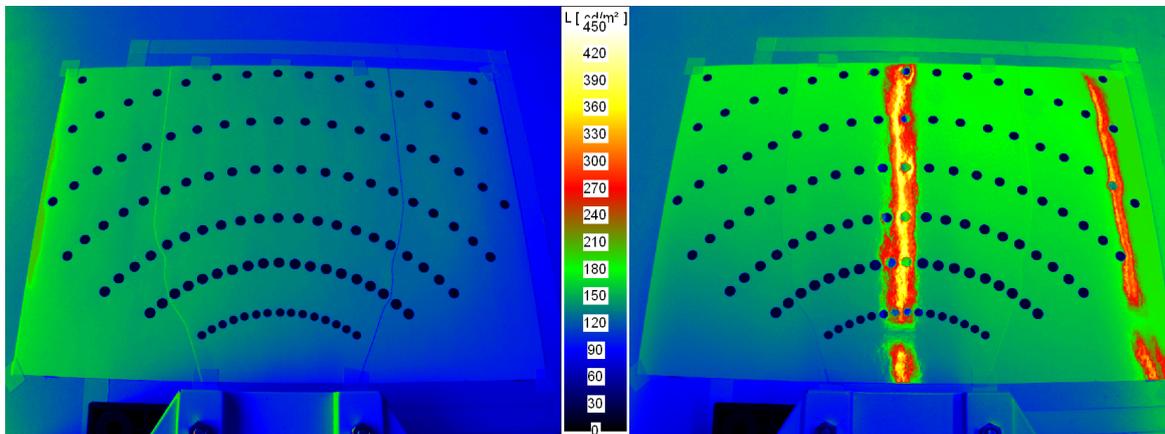


Abbildung 96: Verteilung der Leuchtdichte im Bereich der Sehaufgabe auf glänzendem Papier, links: „Tageslichtbeleuchtung“, rechts: direkte Beleuchtung; $E_m = 500 \text{ lx}$

Aus den Leuchtdichtemesswerten wurde für jeden Punkt der Kontrast C berechnet und unter Bezug auf den Leuchtdichtekontrast bei diffuser Beleuchtung C_0 der CRF ermittelt. Es zeigte sich erwartungsgemäß, dass der Kontrast C , und damit auch der CRF, unabhängig von der Beleuchtungsstärke ist. Daher ergeben sich für drei Papiersorten mit zwei Lichteinfallrichtungen sechs verschiedene CRF-Verteilungen. Abbildung 97 bis Abbildung 102 zeigen die Verteilung des CRF für mattes, seidenmattes und glänzendes Papier bei direkter Beleuchtung und seitlichem Lichteinfall.

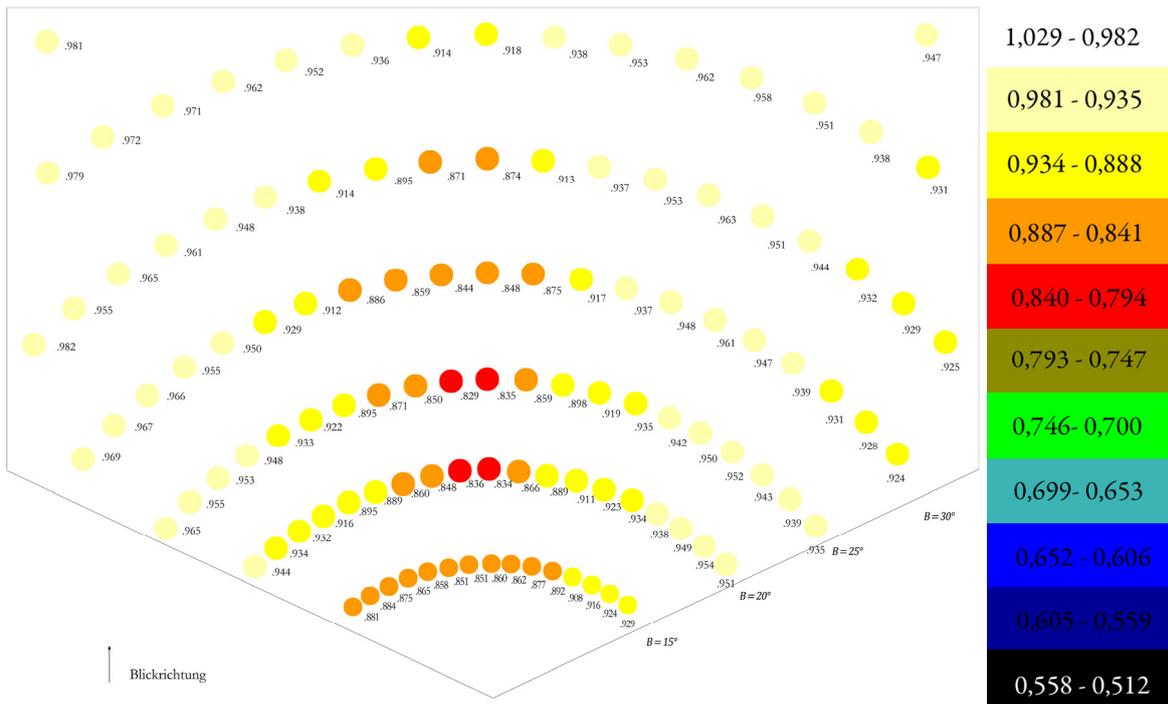


Abbildung 97: Verteilung des Kontrastwiedergabefaktors CRF im Bereich der Sehaufgabe direkte Beleuchtung, mattes Papier

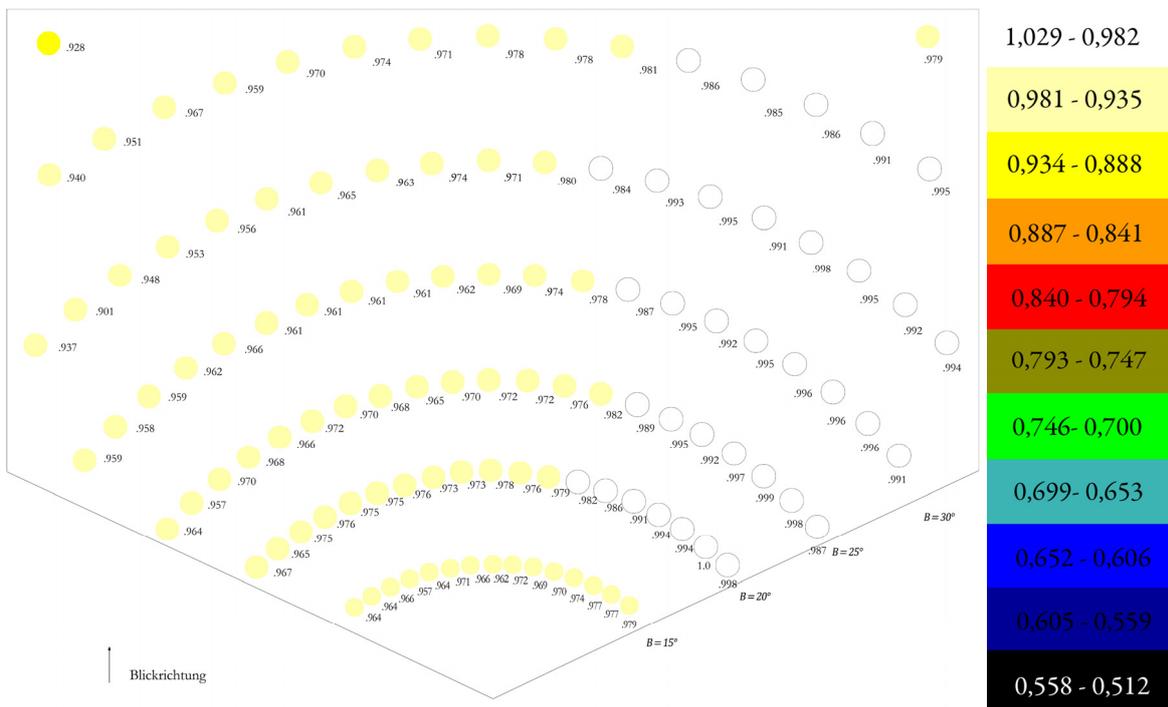


Abbildung 98: Verteilung des Kontrastwiedergabefaktors CRF im Bereich der Sehaufgabe „Tageslichtbeleuchtung“, mattes Papier

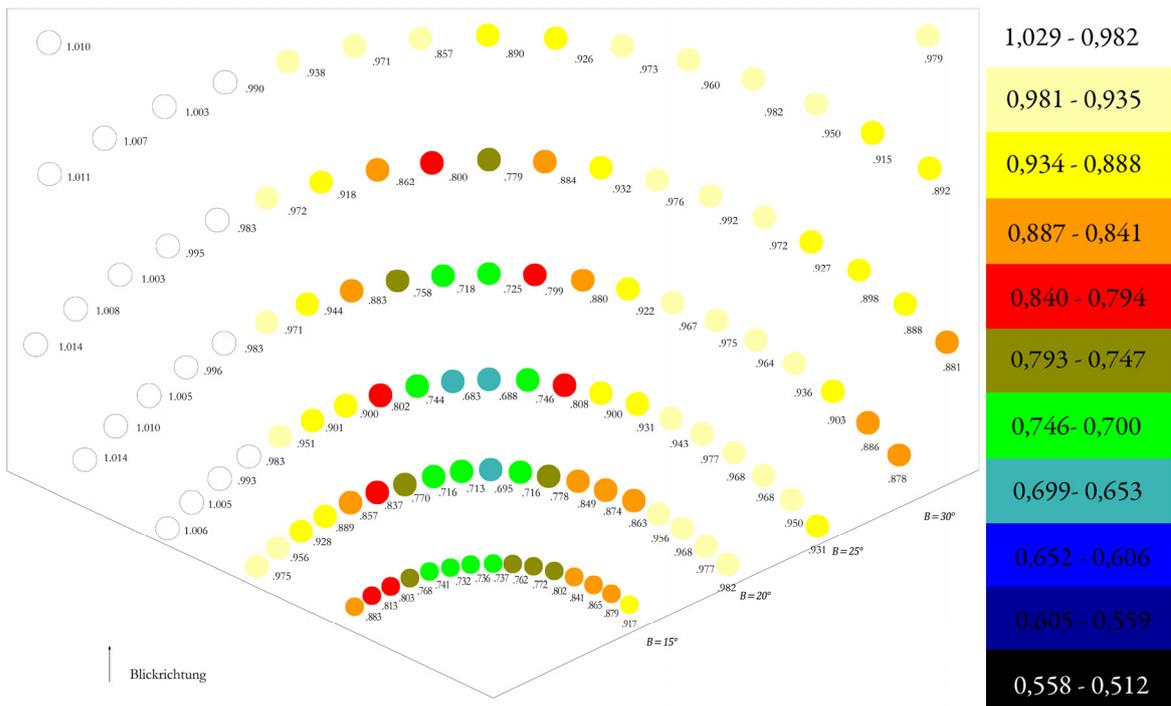


Abbildung 99: Verteilung des Kontrastwiedergabefaktors CRF im Bereich der Sehaufgabe direkte Beleuchtung, semi Papier

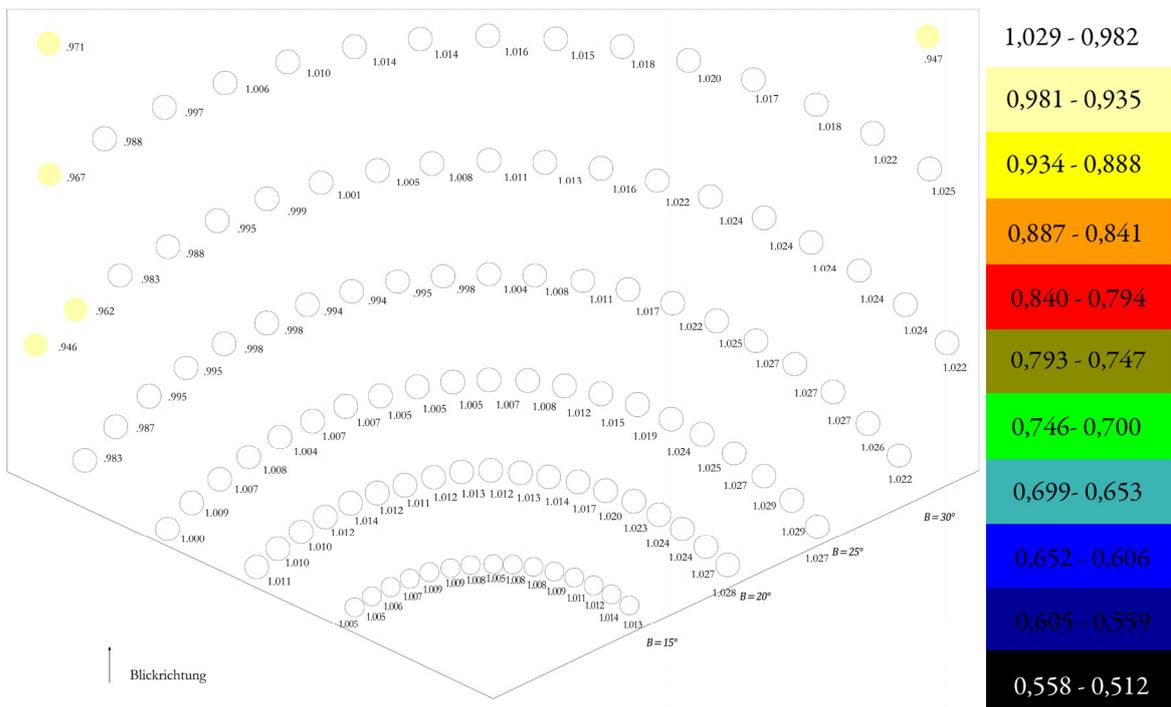


Abbildung 100: Verteilung des Kontrastwiedergabefaktors CRF im Bereich der Sehaufgabe „Tageslichtbeleuchtung“, semi Papier

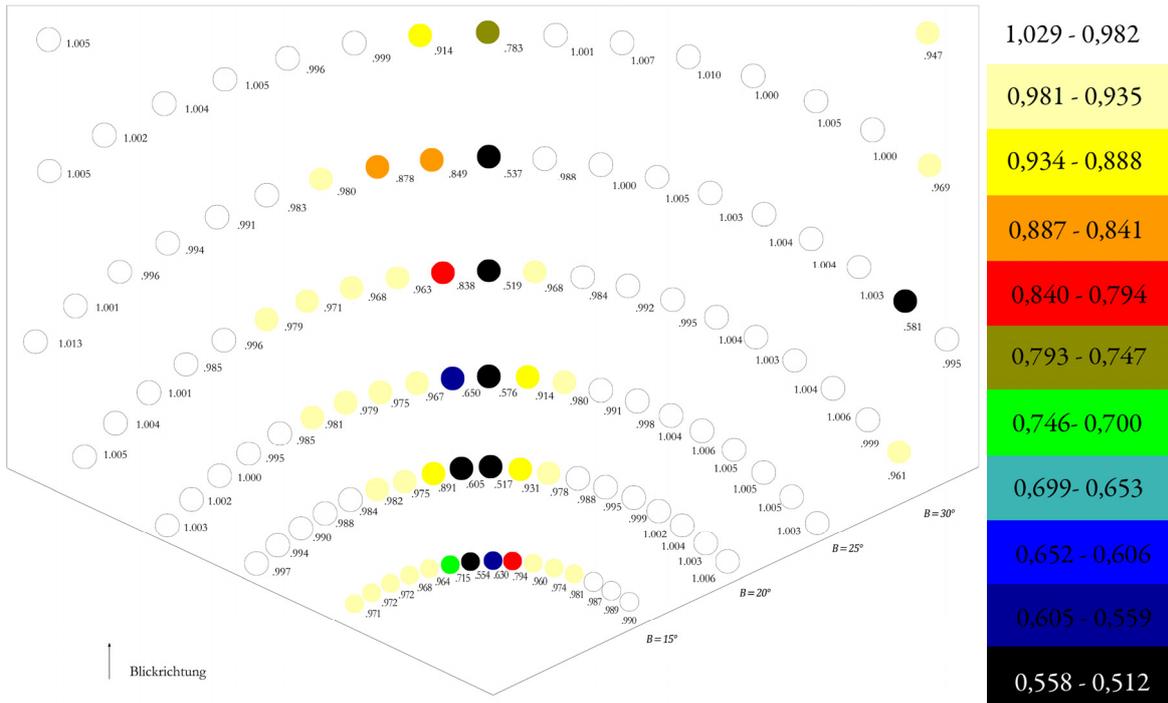


Abbildung 101: Verteilung des Kontrastwiedergabefaktors CRF im Bereich der Sehaufgabe direkte Beleuchtung, glänzendes Papier

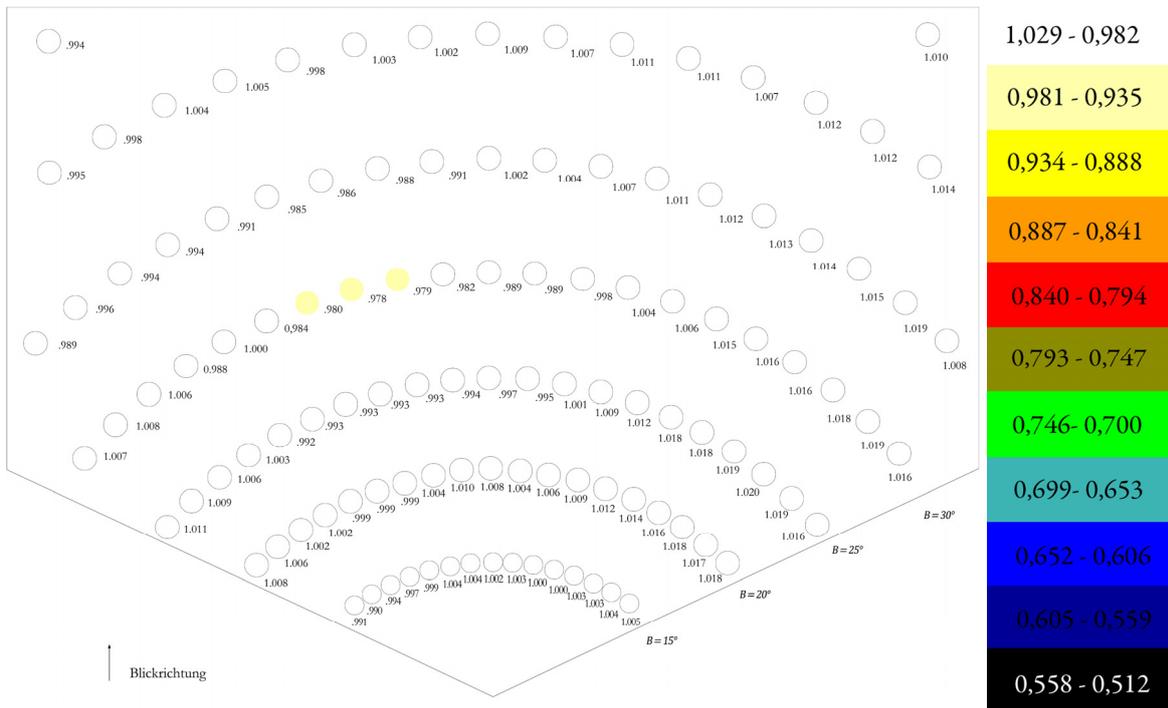


Abbildung 102: Verteilung des Kontrastwiedergabefaktors CRF im Bereich der Sehaufgabe „Tageslichtbeleuchtung“, glänzendes Papier

Es ist zu erkennen, dass der CRF beim seitlichen Lichteinfall durch das „Tageslicht“ unabhängig von den Reflexionseigenschaften des Papiers sehr hohe und gleichmäßig verteilte Werte von 0,93 bis 1,03 annimmt. Die geringen vor allem beim matten Papier noch auftretenden Unterschiede lassen sich auf die verschiedenen Bedruckungsarten der Papiere zurück führen. Des Weiteren zeigt sich, dass der CRF bei direkter Beleuchtung im zentralen Bereich der Sehaufgabe deutlich niedriger ausfällt. Dies ist auf die Kontrastminderung durch Reflexion (vgl. Abschnitt 4.1) der Leuchten zurückzuführen, welche direkt über dem Arbeitstisch angebracht waren. Bei der matten Papierprobe fällt dieser Effekt aufgrund der stark streuenden Reflexion am geringsten aus. Beim glänzenden Papier tritt dieser Effekt am stärksten auf, wodurch im Zentralfeld die niedrigsten CRF Werte von 0,51 bis 0,75 erreicht werden. Weiter ist zu erkennen, dass im rechten Bereich des Bewertungsfeldes bei direkter Beleuchtung auf dem glänzenden Papier ebenfalls ein leichter Abfall der CRF Werte zu beobachten ist. Dies ist auf die Reflexion der mittleren Leuchtenreihe zurückzuführen. In den Messpunkten außerhalb dieser Bereiche, liegen die Werte des CRF bei direkter Beleuchtung und „Tageslichtbeleuchtung“ weitestgehend auf gleichem Niveau. Die geringere Kontrastwiedergabe bei direkter Beleuchtung lässt sich daher auf die Anordnung der Leuchten in Bezug auf den Arbeitsplatz begründen.

Diese gemessenen Werte des CRF lassen sich nicht direkt mit Petrys Berechnungen vergleichen, da in seinen Untersuchungen andere Proben für die Sehaufgaben gewählt wurden [Petry, 1984]. Am nächsten an die für den Probandenversuch ausgewählten Papiersorten mit Bedruckung kommen Petrys Proben Nr. 3 „Fotokopie von Schreibmaschinenschrift auf mattem Papier“ und Nr. 4 „Bleistift auf glänzendem Papier“. Die für den vollkommen bedeckten Himmel und ohne Verbauung berechnete sehr gleichmäßige Verteilung des CRF stimmt mit der gemessenen Verteilung grundsätzlich überein. Ebenfalls ergibt sich bei direkter künstlicher Beleuchtung eine starke Abnahme des CRF im Bereich unterhalb der Leuchtenreihen. Damit herrschen für den Probandentest relativ gleiche Bedingungen wie bei Petrys Berechnungen.

CRF als abhängige Variable

Zur statistischen Analyse der Abhängigkeiten des CRF von den unabhängigen Variablen müssen zunächst für jede Szene Mittelwerte des CRF gebildet werden. Damit vor allem bei direkter Beleuchtung der Einfluss der niedrigen Werte im Bereich der Sehaufgabe nicht zu stark durch die höheren Werte in der unmittelbaren Umgebung ausgeglichen wird, findet eine Begrenzung des Bewertungsbereichs für die Mittelwertbildung auf die Größe eines Hochkant A5-Formats statt.

Anhand des in Abbildung 103 gezeigten Boxplots ist nochmals zu erkennen, dass der CRF unabhängig von der Beleuchtungsstärke ist. Ebenfalls ist eine große Streuung der Werte bei direkter Beleuchtung zu sehen. Die CRF-Werte liegen für direkte Beleuchtung für die jeweilige Papiersorte immer unter denen bei seitlichem Lichteinfall. Besonders bei glänzendem Papier und direkter Beleuchtung werden die sehr schlechten Werte sichtbar, welche im Boxplot als Ausreißer dargestellt sind. Wie auch in Abbildung 101 zu sehen ist, fallen die Werte des CRF bei direkter Beleuchtung auf glänzendem Papier nur in den Bereichen, in denen die Leuchte direkt reflektiert wird, sehr niedrig aus. In den anderen Bereichen werden ähnlich hohe Werte wie bei seitlichem Lichteinfall erreicht. Damit ist die breite Streuung in den Boxplots bei direkter Beleuchtung zu erklären.

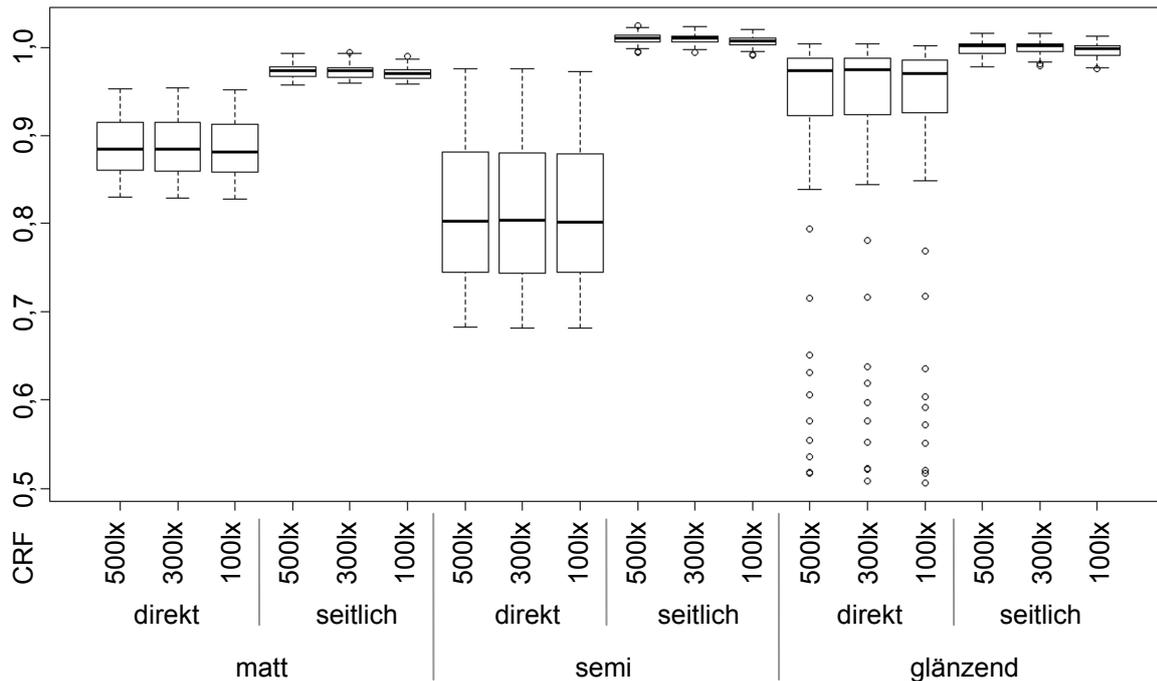


Abbildung 103: Boxplot der CRF-Werte im A5-Bewertungsbereich für 18 Szenarien

Für die statistischen Auswertungen bezüglich des CRFs werden die in Tabelle 34 eingetragenen Mittelwerte verwendet. Durchschnittlich fallen die Mittelwerte des CRFs bei seitlichem Lichteinfall für alle Papiertypen um 0,12 besser aus als bei direkter Beleuchtung. Zur Klassifizierung dient die in Tabelle 35 eingetragene Stufeneinteilung nach [LiTG, 1991]. Dabei wird zusätzlich zum Mittelwert auch der Minimalwert des CRF berücksichtigt. Ein solcher wird auch von [Boyce u.a., 1981] mit einem Wert von 0,7 gefordert. Damit wird deutlich, dass für die ausgewählten Sehaufgaben nur der seitliche Lichteinfall hohen Anforderungen an die Kontrastwiedergabe gerecht wird. Die direkte Beleuchtung ist für semi- und glänzendes Papier nur bei geringen Kontrastwiedergabeanforderungen geeignet.

Tabelle 34: CRF-Werte im A5-Bewertungsfeld

Lichteinfallrichtung	Papiertyp	CRF-Mittelwert	CRF-Minimalwert
direkt	matt	0,89	0,83
	semi	0,82	0,68
	glänzend	0,90	0,52
seitlich	matt	0,97	0,93
	semi	1,01	0,95
	glänzend	1,00	0,98

Tabelle 35: Stufeneinteilung der Kontrastwiedergabe nach [LiTG, 1991]

Anforderungen an die Kontrastwiedergabe	Bereich der CRF-Mittelwerte	CRF-Minimalwerte
hoch	$1,0 \leq \text{CRF}$	$\geq 0,95$
mittel	$0,85 \leq \text{CRF} < 1,0$	$\geq 0,7$
gering	$0,7 \leq \text{CRF} < 0,85$	$\geq 0,5$

Die in Tabelle 36 gezeigten Ergebnisse einer mehrfaktoriellen Varianzanalyse zeigen, dass der CRF signifikant von der Lichteinfallrichtung und vom Papiertyp abhängt. Dabei gibt der p-Wert die Fehlerwahrscheinlichkeit der ersten Art an. Ist dieser p-Wert kleiner als das gewählte Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$, so ist das Ergebnis signifikant.

Tabelle 36: Ergebnisse der mehrfaktoriellen Varianzanalyse bzgl. des CRF-Werts

	F	p	$p \leq 0.05$
Lichteinfallrichtung	$2,63 \cdot 10^{32}$	$< 0,001$	*
Beleuchtungsstärke	$1,74 \cdot 10^0$	0,196	
Papiertyp	$1,17 \cdot 10^{31}$	$< 0,001$	*
Lichteinfallrichtung:Beleuchtungsstärke	$1,30 \cdot 10^0$	0,263	
Lichteinfallrichtung:Papiertyp	$5,33 \cdot 10^{32}$	$< 0,001$	*
Beleuchtungsstärke:Papiertyp	$0,915 \cdot 10^0$	0,405	
Lichteinfallrichtung:Beleuchtungsstärke:Papiertyp	$1,21 \cdot 10^0$	0,306	

4.5 Versuchsablauf

Um eine ausreichende Sehschärfe des Probanden sicherzustellen, wird der Visus bei 30 cm mittels eines Sehtests mit Hilfe eines Binoptometers ermittelt. Dabei ist zu bemerken, dass auch Personen mit Sehschwäche zum Versuch zugelassen werden, sobald sie den Sehtest mit ihrer Sehhilfe bestehen.

Nachdem der Proband mit Hilfe der Kinnstütze und dem höhenverstellbaren Bürostuhl eine angenehme Sitzposition gefunden hat, wird ihm der Versuchsablauf erklärt. Zunächst wird das Helligkeit-Einstellen mit entsprechender Aufgabenstellung (vgl. Abschnitt 4.2.2) geübt. Mithilfe der Kurzanleitung und den standardisierten Instruktionen wird der d2-R Test erklärt. Es wird beim gesamten Versuch darauf geachtet, den Begriff „Durchstreichtest“ zu verwenden. Daraufhin werden die zwei Vortests durchgeführt, um den Probanden an den Ablauf zu gewöhnen und die Lerneffekte beim d2-R Test zu minimieren. Bei den zwei Vortests wird an einem zweiten Referenzpunkt der Einfluss des individuellen Körperschattens ermittelt. Um zu gewährleisten, dass der Körperschatten nicht durch unterschiedliche Farbe der Kleidung beeinflusst wird, trägt jeder Proband einen weißen Kittel. Nach den zwei Vortests bearbeitet der Proband einen Fragebogen zum aktuellen Wohlbefinden. Dieser dient zur Überprüfung eines gleichbleibenden Wohlbefindens des Probanden über den gesamten Zeitraum des Versuchsdurchlaufs.

Danach beginnt der Hauptversuch. Vom Versuchsleiter wird eine vorprogrammierte Lichtszene eingestellt. Dann führt der Proband den d2-R Test durch, gefolgt vom Ausfüllen des Fragebogens zur subjektiven Bewertung der Beleuchtungssituation. Anschließend darf die Helligkeit mit der oben genannten Aufgabenstellung vom Proband selbst herunter gedimmt werden. Dieser Ablauf wird 18 mal wiederholt. Nach eineinhalb Stunden, bzw. neun Durchläufen wird eine Erholungspause von 1,5 Stunden eingelegt. Am Beginn und am Ende sowie vor und nach der Pause wird ein Fragebogen zum aktuellen Wohlbefinden beantwortet. Nach der Pause werden die verbliebenen neun Szenarien durchlaufen. Am Ende darf der Proband optional auf einem abschließenden Blatt Anregungen und Anmerkungen zum Versuch geben. Um den Einfluss des Versuchsleiters möglichst gering zu halten, wurde darauf geachtet, die Anweisungen identisch und immer gleich zu halten.

4.6 Auswertung

4.6.1 Beschreibung der Probanden

Insgesamt wurden 34 Probandenversuche durchgeführt. Die Alters- und Geschlechtsverteilung zeigt Abbildung 104 als Histogramm. Aufgrund der geometrischen Bedingungen des seitlichen Lichteinfalls durch den künstlichen Himmel und der Aufstellung des Arbeitsplatzes im Versuchsraum wurden als Probanden nur Rechtshänder eingeschlossen. Um sicherzustellen, dass die Aufgabenstellungen und die verschiedenen Fragebögen richtig verstanden werden, wurde in der Vorbereitung ein ausreichendes Instruktionsverständnis überprüft. Knapp die Hälfte der Probanden benötigte eine Sehhilfe, um einen Visus von 1,0 zu erreichen. Ein Viertel der Probanden gaben ihre lichttechnischen Kenntnisse als professionell an, der Rest teilt sich jeweils zur Hälfte in Laien und lichttechnisch interessierte Personen auf.

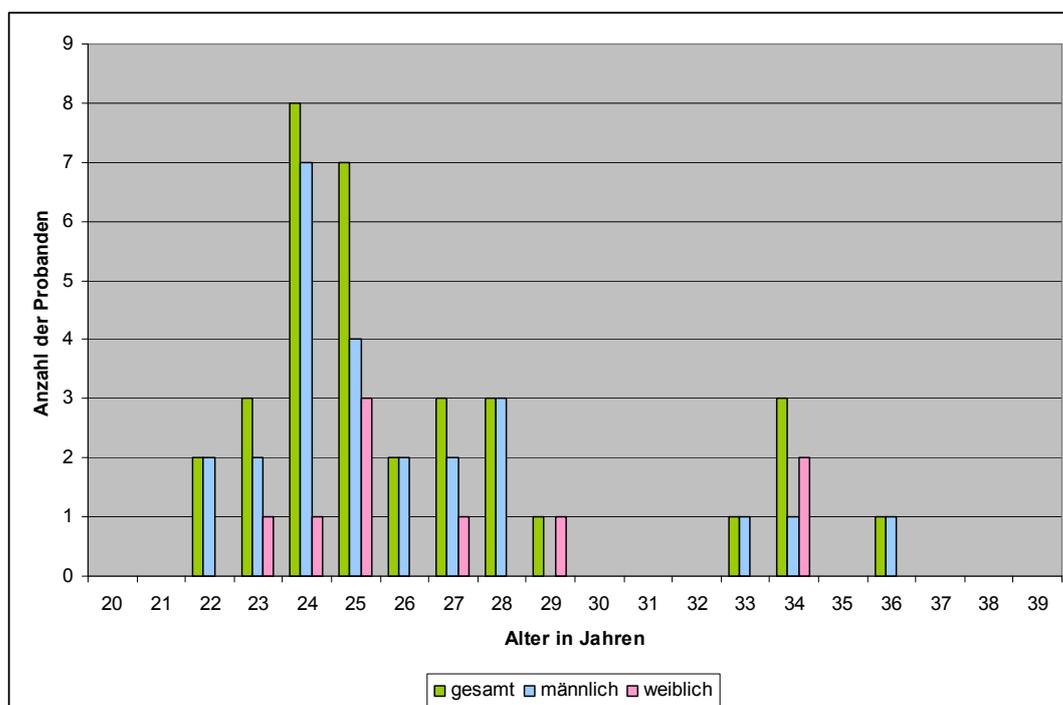


Abbildung 104: Altersstruktur der Probanden

Jeweils zu Beginn (Zeitpunkt 1 und 3) und Ende (Zeitpunkt 2 und 4) der zwei Versuchsteile füllten die Probanden einen Fragebogen zum allgemeinen Wohlbefinden aus. In Abbildung 105 ist der zeitliche Verlauf der gemittelten Selbsteinschätzung bezüglich der Wachheit gezeigt. Es zeigte sich, dass die Probanden ihren Wachheitszustand vor der Pause selbst um 0,6 Skalenpunkte niedriger einschätzten als zu Beginn des Versuchs. Nach der circa 1,5-stündigen Pause wurden wieder die Werte wie beim Versuchsbeginn erreicht. Ein sehr ähnlicher Verlauf ergab sich bei der Selbsteinschätzung der Konzentration, der in Abbildung 106 gezeigt ist. Auch hier zeigte sich während der Pause zwischen den Zeitpunkten 2 und 3 ein deutlicher Erholungseffekt.

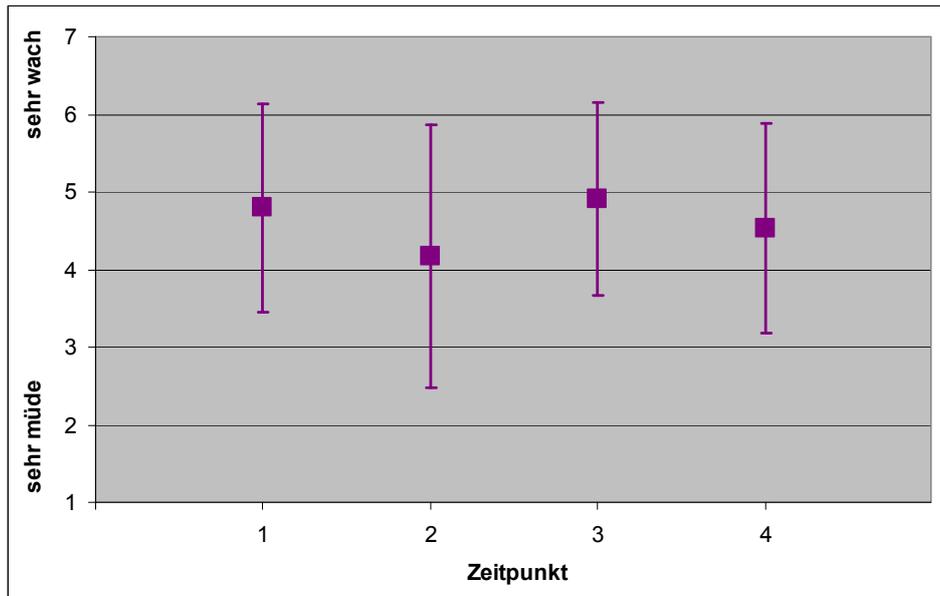


Abbildung 105: Selbsteinschätzung der Probanden: Wie fühlen Sie sich momentan? (Wachheit); Fehlerbalken +/- 1 SD

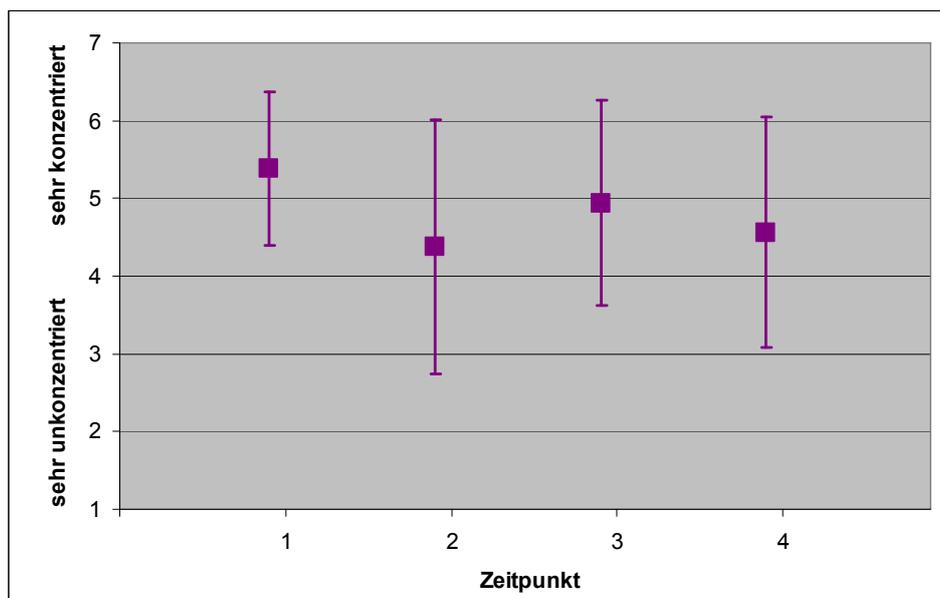


Abbildung 106: Selbsteinschätzung der Probanden: Wie fühlen Sie sich momentan? (Konzentration); Fehlerbalken +/- 1 SD

Weitere Abfragen im Fragebogen zum aktuellen Wohlbefinden ergaben ein überdurchschnittliches Interesse von 4,8 (1 sehr gelangweilt – 7 sehr interessiert). Die Probanden waren mit einem Mittelwert von 5,8 eher entspannt (1 sehr angespannt – 7 sehr entspannt) und fühlten sich mit einem mittleren Wert von 5,8 relativ wohl (1 sehr unwohl – 7 sehr wohl). Die Sitzposition mit der Kinnstütze zum Einhalten eines gleichbleibenden Beobachtungswinkels auf die Sehaufgabe wurde mit 3,9 durchschnittlich (1 sehr angenehm – 7 sehr unangenehm) bewertet. Der Büroraum wirkte im Allgemeinen mit einer Bewertung von 2,9 eher angenehm (1 sehr angenehm – 7 sehr unangenehm). Dies bedeutet, dass die Probanden im Mittel der Untersuchung positiv eingestellt waren und nicht mit negativen Einflüssen durch den Aufenthalt im Versuchsraum selbst zu rechnen ist.

4.6.2 d2-R Test

Bei der Auswertung eines d2-R Konzentrations- und Aufmerksamkeitstests ergeben sich die in Tabelle 37 erläuterten Kennwerte, die unterschiedliche Aussagen treffen lassen. Im Wesentlichen misst der d2-R Test die individuelle Konzentrationsleistung einer Person. Weiter können Aussagen über die Qualität (Genauigkeit) und Quantität (Schnelligkeit) der Testbearbeitung gemacht werden. Da Lerneffekte bis über ein halbes Jahr anhalten können, wurde jede Person nach der Instruktion befragt, ob sie diesen Test schon einmal bearbeitet habe. Nur ein Proband hatte den d2-Test schon einmal vor ca. zwei Jahren durchgeführt. Damit ist sichergestellt, dass nicht mit Ausreißern aufgrund vorheriger individueller Lerneffekte zu rechnen ist.

Tabelle 37: Kennwerte des d2-R Tests nach [Brickenkamp u.a., 2010]

Kennwert	Bezeichnung	Erläuterung/Berechnung
BZO	Tempo bei Testbearbeitung	Anzahl bearbeiteter Zielobjekte
AF	Auslassungsfehler	Anzahl ausgelassener Zielobjekte
VF	Verwechslungsfehler	Anzahl markierter Distraktoren
KL	Konzentrationsleistung	$KL = BZO - AF - VF$
F%	Sorgfalt bei Testbearbeitung; Fehleranteil	$F\% = (AF + VF) / BZO * 100\%$

Tabelle 38 zeigt die Resultate einer mit den Einzelergebnissen aller d2-R Tests durchgeführten mehrfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung bzgl. des KL Wertes. Diese Form der Analyse wurde gewählt, um die Unterschiede zwischen den Szenarien innerhalb jeder einzelnen Versuchsperson herauszuarbeiten und nicht die von den individuellen Fähigkeiten einzelner Probanden abhängigen absoluten Unterschiede der Konzentrationsleistungen.

Es zeigt sich, dass die Lichteinfallrichtung und die Beleuchtungsstärke einen signifikanten Einfluss auf die Konzentrationsleistung hatten. Der Einfluss des Papiertyps ist nicht signifikant. Weiterhin zeigt sich eine signifikante Abhängigkeit der Konzentrationsleistung vom CRF. Eine Koabhängigkeit zwischen Lichteinfallrichtung, Papiertyp und Beleuchtungsstärke ist nicht gegeben. Ebenfalls wird bestätigt, dass der CRF unabhängig von der Beleuchtungsstärke ist (vgl. Abschnitt 4.4.6).

Tabelle 38: Ergebnisse der mehrfaktoriellen Varianzanalyse bzgl. des KL-Werts

	F	p	p≤0.05
Lichteinfallsrichtung	19,3	<0,001	*
Beleuchtungsstärke	5,15	0,030	*
Papiertyp	0,173	0,842	
Lichteinfallsrichtung:Beleuchtungsstärke	0,273	0,605	
Lichteinfallsrichtung:Papiertyp	2,89	0,062	
Beleuchtungsstärke:Papiertyp	0,091	0,913	
Lichteinfallsrichtung:Beleuchtungsstärke:Papiertyp	0,025	0,975	
CRF	16,8	<0,001	*
Beleuchtungsstärke:CRF	0,156	0,695	

In Abbildung 107 sind die berechneten Mittelwerte der Konzentrationsleistung in Abhängigkeit von der Lichteinfallsrichtung und der drei Beleuchtungsstärkeniveaus für die Papiertypen matt (links) und glänzend (rechts) aufgetragen. Zusätzlich wurde zur besseren Einschätzung der Unterschiede der Konzentrationsleistung Fisher's Least Significant Difference (FLSD) bestimmt und eingetragen. Der ermittelte Wert von 3,32 stellt den maximalen Bereich dar, in dem mögliche Unterschiede nicht signifikant sind. Es ist zu erkennen, dass nur für glänzendes Papier bei seitlichem Lichteinfall durch das künstliche Tageslicht für das jeweilige Beleuchtungsstärkeniveau signifikant höhere Werte der Konzentrationsleistung erreicht werden als bei direkter Beleuchtung. Beim matten Papiertyp sind keine signifikanten Unterschiede festzustellen. Ebenfalls ist nur beim glänzenden Papiertyp eine Abhängigkeit der KL-Werte von der Beleuchtungsstärke festzustellen, diese ist jedoch nicht signifikant. Grundsätzlich werden aber bei 500 lx höhere Werte erreicht als bei 300 lx oder 100 lx.

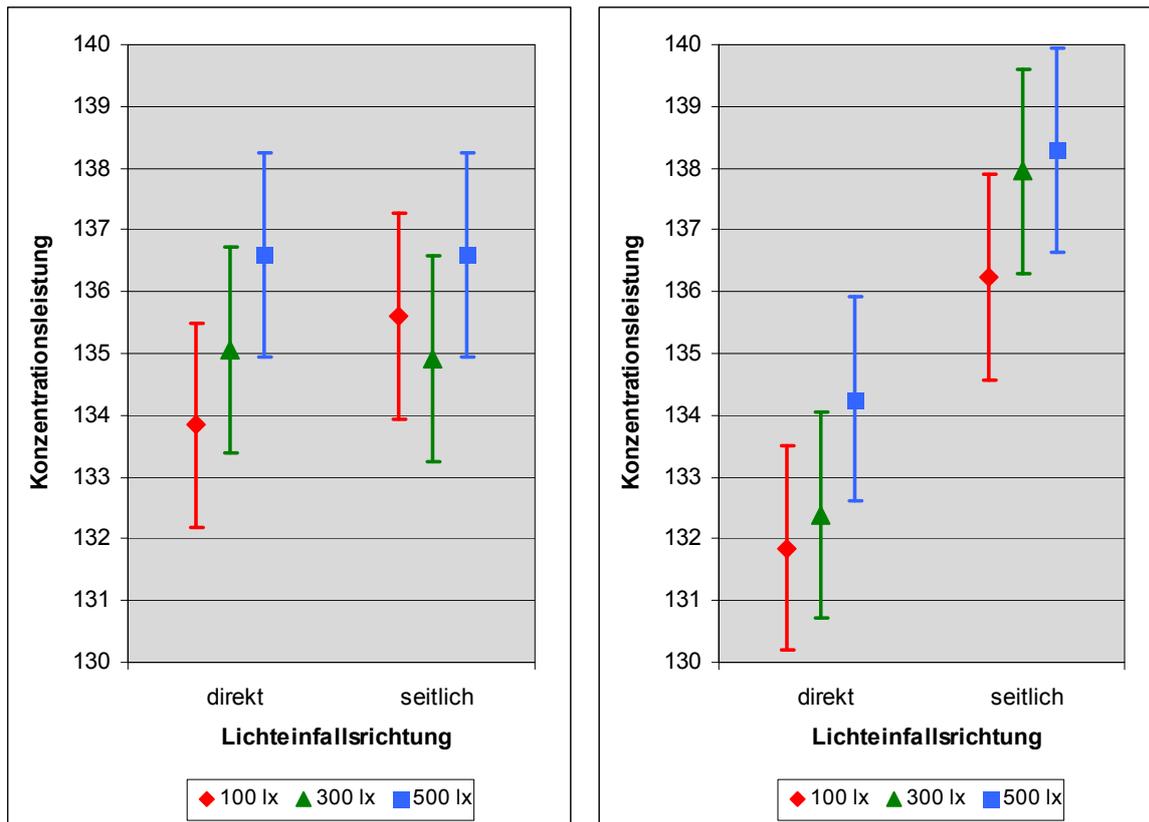


Abbildung 107: Mittelwerte der Konzentrationsleistung KL in Abhängigkeit der Lichteinfallsrichtung und der Beleuchtungsstärke; links: mattes Papier, rechts: glänzendes Papier; Fehlerbalken: FLSD: 3,32

Die Ergebnisse einer mehrfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung bzgl. der Anzahl der bearbeiteten Zeichen BZO, welche ein Maß für die Schnelligkeit der Testbearbeitung ist, zeigen die gleichen Abhängigkeiten wie für die Konzentrationsleistung KL. Für die Werte des Fehleranteils F%, der ein Kennwert für die Sorgfalt bei der Testbearbeitung ist, lassen sich keine signifikanten Abhängigkeiten zwischen den Variablen finden. Deshalb wird in der weiteren Auswertung nur noch die Konzentrationsleistung KL betrachtet.

Zur genaueren Untersuchung der Einflüsse auf die Konzentrationsleistung wurden ergänzend post-hoc-tests durchgeführt, um die Unterschiede zwischen direkter Beleuchtung und seitlichem Lichteinfall durch das Fenster für die einzelnen Szenarien herauszuarbeiten. Ergänzend dazu wurde zur besseren Bewertung als Maß für die Effektstärke Cohen's d ermittelt. Dabei bedeutet nach [Cohen, 1988] $0,2 \leq |d| < 0,5$ einen kleinen, $0,5 \leq |d| < 0,8$ einen mittleren und $|d| \geq 0,8$ einen großen Effekt. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 39.

Tabelle 39: Ergebnisse der post-hoc-tests bzgl. des KL-Werts

Beleuchtungsstärke	Papiertyp	KL direkte Beleuchtung	KL seitlicher Lichteinfall	p	p≤0.05	ΔKL	Cohen's d
100	matt	133,8	135,6	0,420		1,8	0,07
	semi	133,1	137,8	0,050	*	4,7	0,20
	glänzend	131,9	136,2	0,004	*	4,3	0,18
300	matt	135,1	134,9	0,951		-0,2	0,00
	semi	132,6	137,2	0,085		4,6	0,19
	glänzend	132,4	137,9	0,003	*	5,5	0,22
500	matt	135,7	136,6	0,668		0,9	0,04
	semi	135,2	138,8	0,057		3,6	0,14
	glänzend	134,3	138,3	0,017	*	4,0	0,17

Die Konzentrationsleistung unterscheidet sich zwischen den beiden Lichteinfallrichtungen für glänzendes Papier bei allen Beleuchtungsstärken signifikant. Bei glänzendem Papier und seitlichem Lichteinfall ergibt sich eine um durchschnittlich 4,6 Skalenwerte höhere Konzentrationsleistung. Cohen's d weist dabei einen kleinen Effekt aus. Bei semiglänzendem Papier ergeben sich bei seitlichem Lichteinfall im Mittel höhere KL-Werte von 4,3 Skalenwerten und gegenüber dem glänzenden Papier etwas geringere Effektstärken, allerdings ist der Zusammenhang nur für das 100 lx Niveau signifikant. Derartige Unterschiede der Konzentrationsleistung entsprechen ein bis zwei Schritten der vergleichenden Standardwerte in der Normtabelle 6 für den d2-R Test in [Brickenkamp u.a., 2010]. Bei mattem Papier ist bei keiner Beleuchtungsstärke ein signifikanter Unterschied zwischen den Lichteinfallrichtungen festzustellen.

Da zwischen CRF und Konzentrationsleistung ein signifikanter Zusammenhang gefunden wurde, jedoch nicht zwischen Papiertyp und Konzentrationsleistung, wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse des Papiertyps bezüglich der Konzentrationsleistung durchgeführt (Tabelle 40). Es zeigt sich, dass eine signifikante Abhängigkeit der Konzentrationsleistung vom Papiertyp und der Lichteinfallrichtung nur bei glänzendem Papier gegeben ist.

Tabelle 40: Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse des Papiertyps bzgl. des KL-Werts

Papiertyp	F	p	p≤0.05
matt	0,188	0,668	
semi	3,90	0,056	
glänzend	6,33	0,017	*

[Reitmaier, 1977] weist darauf hin, dass eine Abhängigkeit der Leistung vom CRF nur gegeben sei, wenn das Sehdetail und seine Umgebung schwach glänzend sind, da bei matter Oberfläche die Lichteinfallrichtung aufgrund der Reflexionseigenschaften nicht wichtig sein sollte. Dies kann insofern bestätigt werden, als dass sich nur bei stark glänzendem Papier eine signifikante Abhängigkeit der Konzentrationsleistung vom Papiertyp und der Lichteinfallrichtung ergibt. Das bedeutet, dass der CRF die Sehleistung nicht für alle Oberflächeneigenschaften wiedergeben kann.

4.6.3 Fragebogen

Einschätzung der Helligkeit bzgl. der Sehaufgabe

Tabelle 41 zeigt die Ergebnisse der mehrfaktoriellen Varianzanalyse bezüglich der Frage „Wie beurteilen Sie die Helligkeit der Beleuchtungssituation für die Lese- und Schreibtätigkeit?“. Es zeigt sich, dass die Einschätzung der Helligkeit signifikant von der Lichteinfallrichtung und der Beleuchtungsstärke abhängen. Zum Papiertyp ergibt sich keine signifikante Abhängigkeit. Eine Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke war zu erwarten, da die drei Beleuchtungsstärkeniveaus in Anlehnung an die Beleuchtungsstärkeskala in DIN EN 12464-1 gewählt wurden, welche nach wahrnehmbaren Unterschieden unterteilt ist.

Tabelle 41: Ergebnisse der mehrfaktoriellen Varianzanalyse bzgl. der Helligkeit (Sehaufgabe)

Papiertyp	p	p≤0.05
Lichteinfallrichtung	<0,001	*
Beleuchtungsstärke	<0,001	*
Papiertyp	0,848	

In Abbildung 108 sind die Mittelwerte der Einschätzung der Helligkeit bzgl. der Sehaufgabe in Abhängigkeit von der Lichteinfallrichtung und von der Beleuchtungsstärke dargestellt.

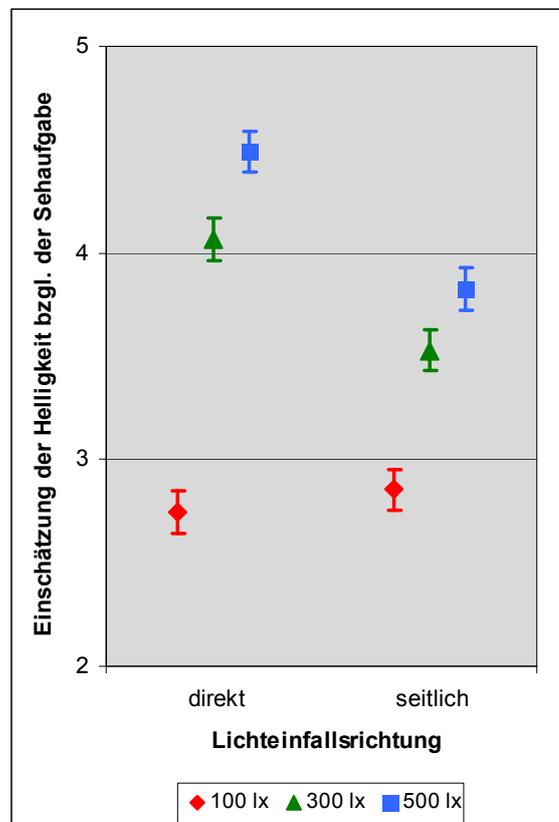


Abbildung 108: Mittelwerte der Einschätzung der Helligkeit (Sehaufgabe) (1 zu dunkel, 7 zu hell); Fehlerbalken: FLSD: 0,10

Zur genaueren Untersuchung der Abhängigkeit von der Lichteinfallrichtung wurden post-hoc-tests durchgeführt und mit der Berechnung von Cohen's d ergänzt (Tabelle 42). Für die Beleuchtungsstärkeniveaus 300 lx und 500 lx ergeben sich signifikante Unterschiede in der Einschätzung der Helligkeit bzgl. der Sehaufgabe zwischen den beiden Lichteinfallrichtungen mit großen Effekten. Dabei wurde die Helligkeit bei seitlichem Lichteinfall um etwa eine halbe Skaleneinheit dunkler eingeschätzt als bei direkter Beleuchtung. Bei 100 lx ergeben sich nur kleine Effekte und keine signifikanten Unterschiede.

Tabelle 42: Ergebnisse der post-hoc-tests bzgl. Einschätzung der Helligkeit (Sehaufgabe)

Beleuchtungsstärke	Papiertyp	Mittelwert der Helligkeitseinschätzung (Sehaufgabe) direkte Beleuchtung	Mittelwert der Helligkeitseinschätzung (Sehaufgabe) seitlicher Lichteinfall	p	p≤0.05	Cohen's d
100	matt	2,71	2,97	0,193		0,29
	semi	2,65	2,79	0,432		0,18
	glänzend	2,88	2,79	0,681		-0,09
300	matt	4,12	3,50	<0,001	*	-0,77
	semi	3,97	3,65	0,039	*	-0,46
	glänzend	4,12	3,44	<0,001	*	-0,83
500	matt	4,47	3,76	<0,001	*	-0,95
	semi	4,44	3,91	<0,001	*	-0,86
	glänzend	4,56	3,79	<0,001	*	-1,01

Einschätzung der Helligkeit im Raum

Die Einschätzung der Helligkeit im Raum („Wie empfinden Sie die Lichtverhältnisse im gesamten Raum im Allgemeinen?“; zu dunkel – zu hell) fällt sehr ähnlich wie die Einschätzung der Helligkeit in Bezug auf die Sehaufgabe aus. Bei der mehrfaktoriellen Varianzanalyse, deren Ergebnisse Tabelle 43 zeigt, ergibt sich ebenfalls eine signifikante Abhängigkeit der Helligkeitseinschätzung von der Beleuchtungsstärke, was mit der gleichen Begründung wie bei der Bewertung bzgl. der Sehaufgabe zu erklären ist. Ebenfalls ergibt sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Einschätzung der Helligkeit im Raum und der Lichteinfallrichtung. In der grafischen Darstellung der Mittelwerte für die Einschätzung der Helligkeit im Raum in Abbildung 109 ist zu erkennen, dass die Helligkeit im Raum bei seitlichem Lichteinfall mit 300 lx und 500 lx um etwa eine halbe Skaleneinheit dunkler eingeschätzt wurde als die direkte Beleuchtung (vgl. Fragebogen in Abbildung 84). Für 100 lx ergibt sich kein signifikanter Unterschied.

Die Helligkeit im Raum wurde fast genau wie die Helligkeit bezüglich der Sehaufgabe bewertet. Werden aber die von der Lichteinfallrichtung abhängigen in Abschnitt 4.4.4 gezeigten unterschiedlichen Leuchtdichteverteilungen im Raum berücksichtigt, deutet dies darauf hin, dass die bei direkter Beleuchtung gegenüber dem seitlichen Lichteinfall höheren Leuchtdichten auf der Arbeitsfläche einen starken Einfluss auf die Bewertung des Raumes hatten.

Tabelle 43: Ergebnisse der mehrfaktoriellen Varianzanalyse bzgl. der Helligkeit (Raumeindruck)

Papiertyp	p	p≤0.05
Lichteinfallsrichtung	<0,001	*
Beleuchtungsstärke	<0,001	*
Papiertyp	0,277	

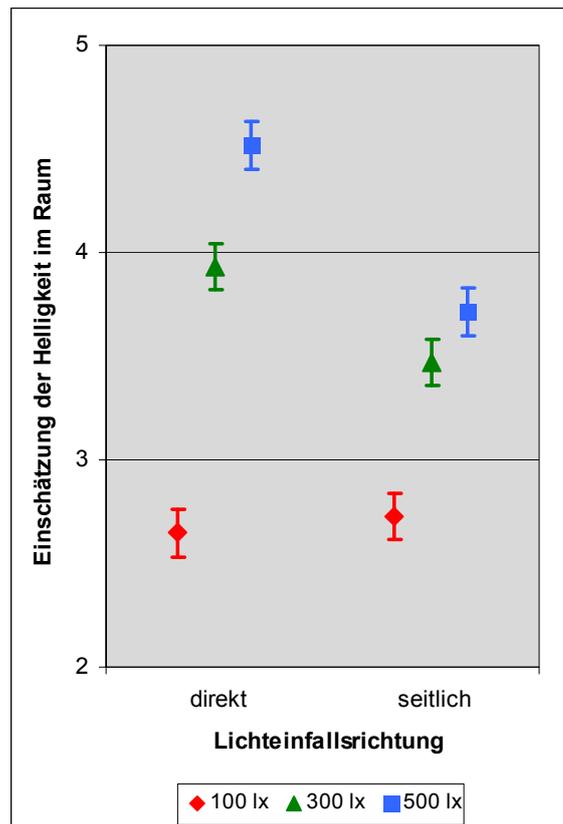


Abbildung 109: Einschätzung der Helligkeit im Raum (1 zu dunkel, 7 zu hell); Fehlerbalken: FLSD: 0,11

Einschätzung der Lichtverhältnisse bzgl. der Sehaufgabe (Anstrengung)

Die Bewertung der Lichtverhältnisse bzgl. der Sehaufgabe („Wie bewerten Sie die Sehaufgabe, in Bezug auf die momentanen Lichtverhältnisse, für die Augen?“; überhaupt nicht anstrengend – sehr anstrengend) zeigt signifikante Zusammenhänge zur Lichteinfallrichtung, zur Beleuchtungsstärke und dem Papiertyp (Tabelle 44).

Tabelle 44: Ergebnisse der mehrfaktoriellen Varianzanalyse bzgl. der Augenanstrengung

Papiertyp	p	p≤0.05
Lichteinfallrichtung	<0,001	*
Beleuchtungsstärke	<0,001	*
Papiertyp	<0,001	*

Abbildung 110 zeigt die grafische Darstellung der Mittelwerte der Bewertung der Anstrengung für die Augen. Bei seitlichem Lichteinfall fiel die Bewertung um eine (100 lx) bis zu zwei (500 lx) Skaleneinheiten geringer aus als bei direkter Beleuchtung. Das Beleuchtungsstärkeniveau von 100 lx wurde dabei immer als anstrengendste Situation bewertet (links). Die Bewertungen von 300 lx und 500 lx unterscheiden sich nicht signifikant. Diese Lichtverhältnisse wurden also als ähnlich anstrengend bzw. unanstrengend bewertet. Bei seitlichem Lichteinfall fielen die Bewertungen für alle Papiere gleich gering aus (rechts). Im Gegensatz dazu wurden die Lichtverhältnisse bei direkter Beleuchtung bei mattem Papier sogar um eine Skaleneinheit anstrengender bewertet als bei seitlichem Licht. Bei glänzendem Papier wurde die Situation um mehr als drei Skaleneinheiten anstrengender eingeschätzt.

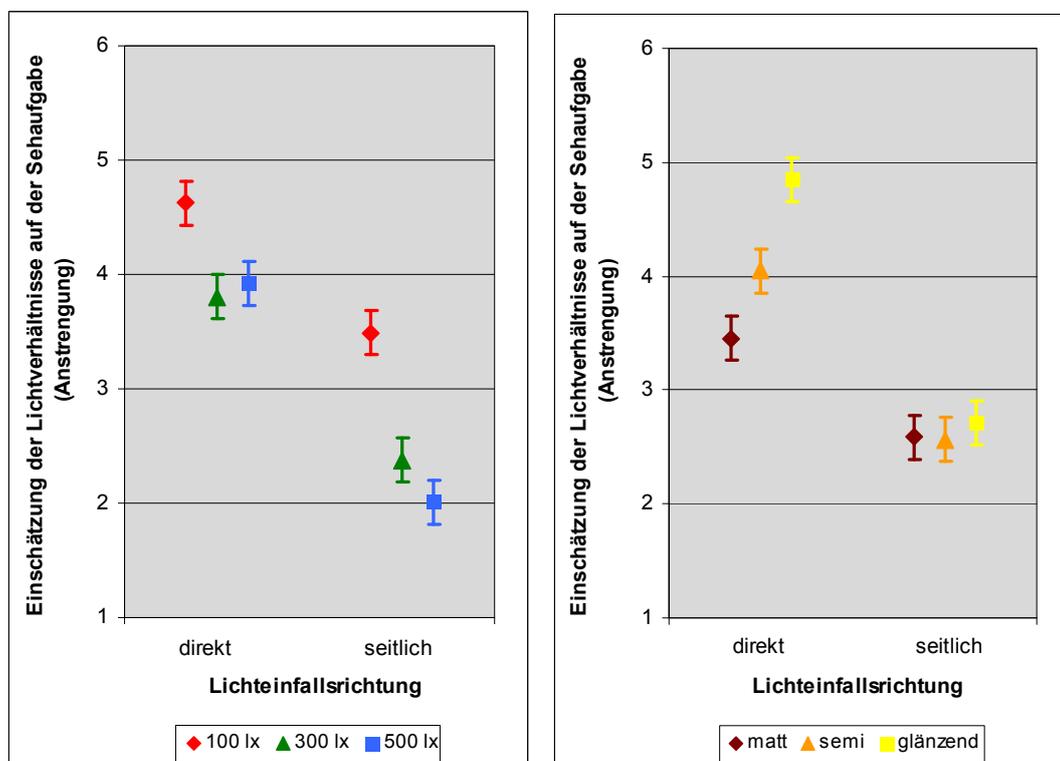


Abbildung 110: Lichtverhältnisse der Sehaufgabe (1 überhaupt nicht anstrengend, 7 sehr anstrengend); Parameter: Beleuchtungsstärke (links), Papiertyp (rechts); Fehlerbalken: FLSD: 0,19

Einschätzung der Lichtverhältnisse im Raum (Annehmlichkeit)

Die Varianzanalyse zur Einschätzung der Lichtverhältnisse im Raum bzgl. der Annehmlichkeit („Wie empfinden Sie die Lichtverhältnisse im gesamten Raum im Allgemeinen?“; sehr angenehm – sehr unangenehm) zeigt signifikante Abhängigkeiten von der Lichteinfallrichtung, Beleuchtungsstärke sowie vom Papiertyp (Tabelle 45). Die Ergebnisse fallen sehr ähnlich wie bei der Bewertung der Lichtverhältnisse bzgl. der Sehaufgabe (Anstrengung) aus.

Tabelle 45: Ergebnisse der mehrfaktoriellen Varianzanalyse bzgl. der Annehmlichkeit

Papiertyp	p	p≤0.05
Lichteinfallrichtung	<0,001	*
Beleuchtungsstärke	<0,001	*
Papiertyp	0,018	*

Abbildung 111 zeigt die Mittelwerte der Einschätzung der Lichtverhältnisse im Raum bzgl. der Annehmlichkeit. Auf der linken Seite ist zu sehen, dass die Lichtverhältnisse im Raum bei Beleuchtung durch seitlichen Lichteinfall um eine Skaleneinheit angenehmer bewertet wurden. Wobei sowohl bei direkter Allgemeinbeleuchtung als auch bei seitlichem Tageslicht das 100 lx am wenigsten angenehm und 500 lx am angenehmsten bewertet wurden. Dabei ist der Unterschied von 300 lx zu 500 lx nicht signifikant. Rechts ist zu erkennen, dass die Lichtverhältnisse bei seitlichem Lichteinfall für alle Papiertypen um eine Skaleneinheit und damit signifikant angenehmer beurteilt wurden als bei direkter Beleuchtung. Dort fällt auf, dass die Lichtverhältnisse im Raum bei glänzendem Papier signifikant unangenehmer eingeschätzt wurden.

Die signifikante Abhängigkeit der Einschätzung der Annehmlichkeit der Lichtverhältnisse im Raum bei direkter Beleuchtung vom Papiertyp ist überraschend. Möglicherweise hatten wie schon bei der Bewertung der Helligkeit im Raum auch hier die höhere Leuchtdichte auf der Arbeitsfläche und zusätzlich die durch die direkte Beleuchtung bei glänzendem Papier gegebenen Nachteile durch Reflexionen einen Einfluss auf die Bewertung der Annehmlichkeit der Lichtverhältnisse im Raum. Diese Interpretation wird von der Tatsache unterstützt, dass der Fragebogen selbst auf dem jeweiligen Papiertyp gedruckt war, um bei der Beantwortung der Fragen als Referenz zu dienen.

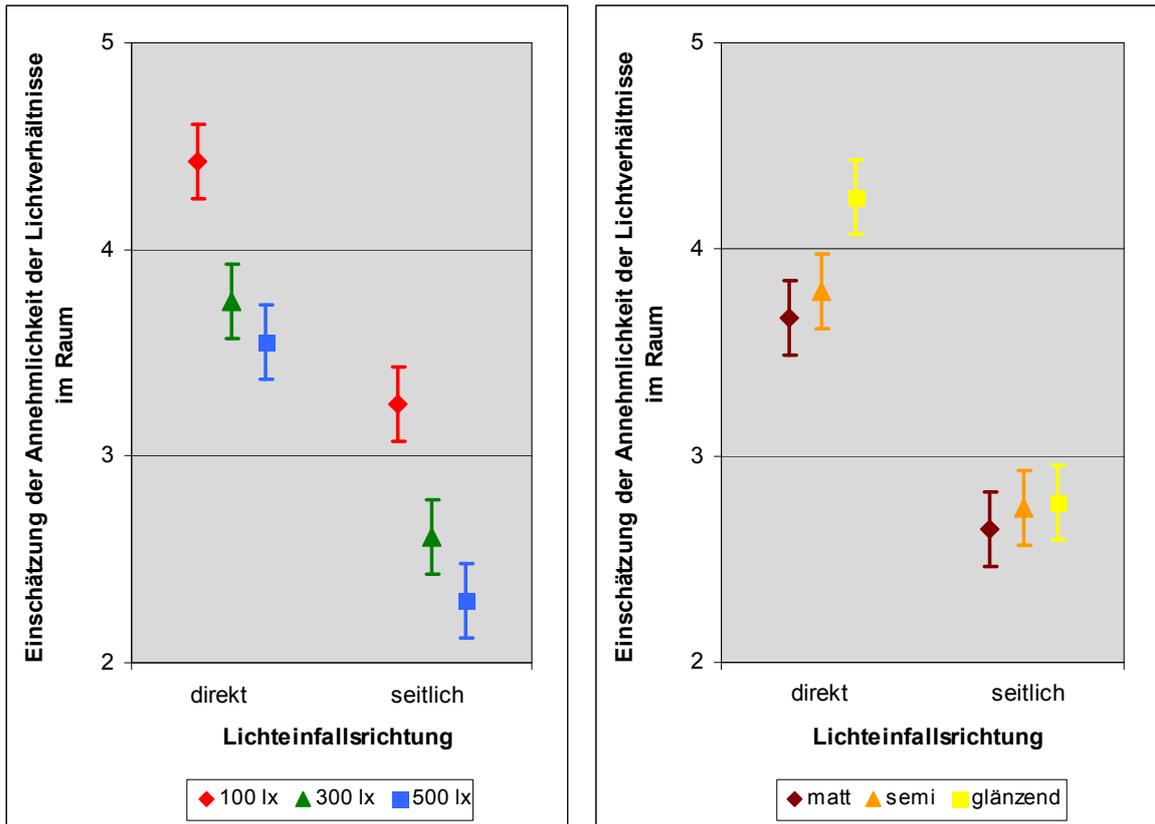


Abbildung 111: Lichtverhältnisse im Raum (1 sehr angenehm, 7 sehr unangenehm);
 Parameter: Beleuchtungsstärke (links), Papiertyp (rechts); Fehlerbalken: FLSD: 0,18

Einschätzung der Reflexion

Die ursprünglich drei Fragen zur Bewertung der Reflexblendung konnten auf die erste Frage reduziert werden, da sich die Ergebnisse auf die Frage, wie störend die Reflexion ist, auch in der Frage der Wahrnehmung widerspiegeln. Im Übrigen stellte sich während des Versuchs heraus, dass die Tätigkeiten beim Durchstreichtest von den Probanden nicht als Schreibarbeit identifiziert wurden und daher auch nicht von der Lesearbeit differenziert werden konnte.

Die Antwort auf die Frage „Nehmen Sie Reflexion auf dem Papier wahr?“ ist signifikant abhängig vom Papiertyp und der Lichteinfallrichtung (Tabelle 46). In Abbildung 112 ist zu erkennen, dass die Reflexion bei seitlichem Lichteinfall kaum bis gar nicht wahrgenommen wurde. Die Reflexion wurde bei direkter Beleuchtung gegenüber dem seitlichen Lichteinfall für glänzendes Papier um ca. vier Skaleneinheiten, bei seidenmattem Papier um etwa drei Skaleneinheiten und bei mattem Papier nur geringfügig störender eingeschätzt.

Tabelle 46: Ergebnisse der mehrfaktoriellen Varianzanalyse bzgl. der Reflexionswahrnehmung

Papiertyp	p	p≤0.05
Lichteinfallrichtung	<0,001	*
Beleuchtungsstärke	0,263	
Papiertyp	<0,001	*

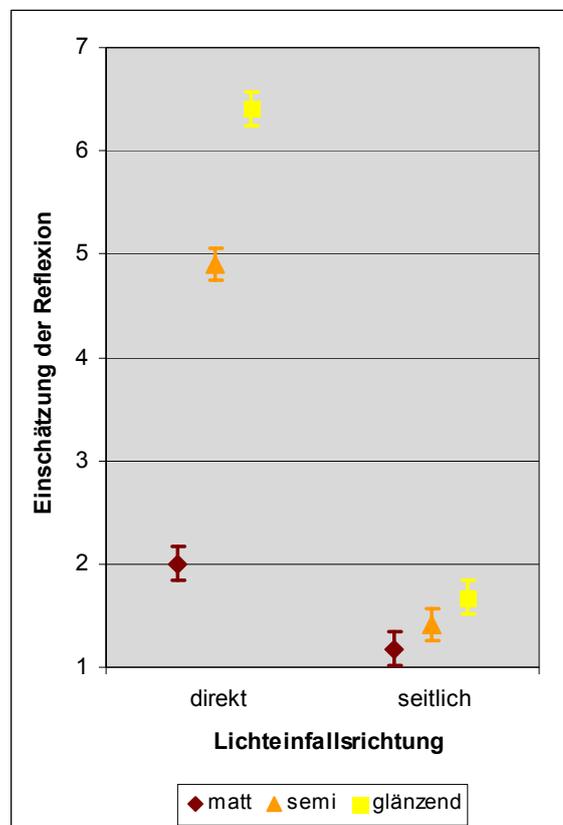


Abbildung 112: Einschätzung der Reflexion (1 nein überhaupt nicht, 7 ja sehr); Fehlerbalken: FLSD: 0,16

4.6.4 Subjektive untere Annehmlichkeitsgrenze

Für die von den Probanden eingestellten Beleuchtungsstärken „bei denen Sie gerade noch angenehm über einen längeren Zeitraum arbeiten könnten“ wurde eine mehrfaktorielle Varianzanalyse durchgeführt, deren Ergebnisse Tabelle 47 zeigt.

Tabelle 47: Ergebnisse der Varianzanalyse bzgl. der eingestellten Beleuchtungsstärke

	F	p	p≤0.05
Lichteinfallrichtung	14,070	<0,001	*
Beleuchtungsstärke	48,478	<0,001	*
Papiertyp	2,1054	0,130	

Die eingestellte Beleuchtungsstärke ist signifikant abhängig von der vor Beginn des Dimmvorgangs vorhandenen Beleuchtungsstärke sowie von der Lichteinfallrichtung, nicht jedoch vom Papiertyp. Die Abhängigkeit vom Beleuchtungsstärkeniveau lässt sich mit dem während des d2-R Tests und Ausfüllen des Fragebogens angepassten Adaptationsniveau der Probanden erklären [Völker, 2000].

Abbildung 113 zeigt die Mittelwerte der eingestellten Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Lichteinfallrichtung und des vorherrschenden Beleuchtungsstärkeniveaus. Es ist zu erkennen, dass die eingestellten Beleuchtungsstärken bei seitlichem Lichteinfall jeweils unter den bei direkter Beleuchtung eingestellten Beleuchtungsstärken liegen. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass bei tageslichtähnlicher Lichtverteilung im Raum niedrigere Beleuchtungsstärken akzeptiert werden, als bei künstlicher Direktbeleuchtung.

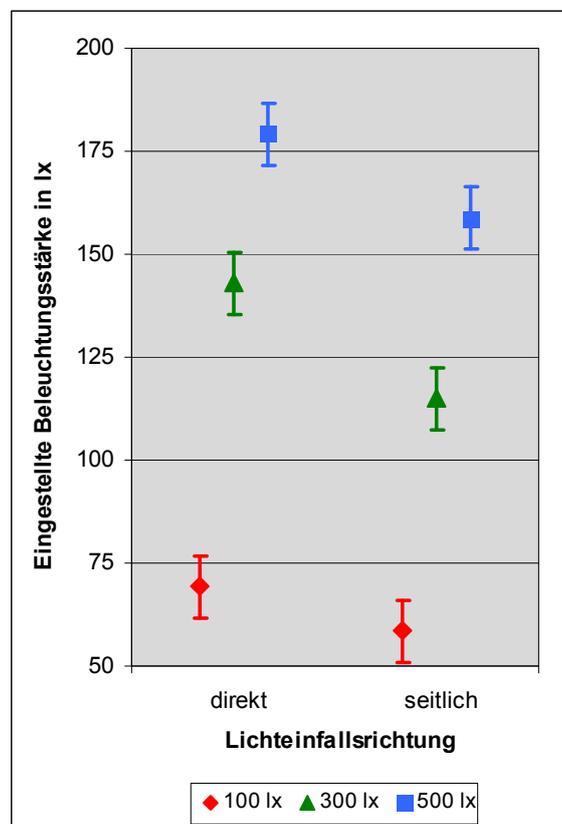


Abbildung 113: Mittelwerte der eingestellten Beleuchtungsstärken; Fehlerbalken: FLSD: 15,1

Zur genaueren Prüfung wurden post-hoc-tests zum Vergleich der zwei Lichteinfallrichtungen durchgeführt. In Tabelle 48 sind die zusammengefassten Ergebnisse dargestellt. Bei allen Szenarien, außer bei 500 lx seidenmattem und glänzendem Papier, ergeben sich signifikante Unterschiede der eingestellten Beleuchtungsstärken zwischen den Lichteinfallrichtungen mit kleiner bis mittlerer Effektstärke. Aus der Kenntnis, dass der Papiertyp keinen signifikanten Unterschied bewirkt, wurden in Tabelle 49 für jedes Beleuchtungsstärkeniveau Mittelwerte gebildet. Bei seitlichem Lichteinfall wurden im Durchschnitt um 15 % niedrigere Werte eingestellt als bei direkter Beleuchtung.

Tabelle 48: Ergebnisse der post-hoc-tests bzgl. der eingestellten Beleuchtungsstärke

Beleuchtungsstärke	Papiertyp	E in lx direkte Beleuchtung	E in lx seitlicher Lichteinfall	p	p≤0.05	Cohen's d
100	matt	71,8	58,5	0,002	*	-0,41
	semi	68,5	59,6	0,004	*	-0,32
	glänzend	66,6	57,6	0,010	*	-0,28
300	matt	150	119	0,002	*	-0,37
	semi	141	111	0,009	*	-0,38
	glänzend	139	115	0,005	*	-0,32
500	matt	197	152	<0,001	*	-0,35
	semi	174	157	0,099		-0,15
	glänzend	166	168	0,555		0,01

Tabelle 49: Relative Differenzen der mittleren eingestellten Beleuchtungsstärke

Beleuchtungsstärke	Ē in lx direkte Beleuchtung	Ē in lx seitlicher Lichteinfall	relative Differenz in %
100	69	59	14
300	143	115	21
500	179	159	11

Die Faktoren, wie weit von der Ausgangsbeleuchtungsstärke herunter gedimmt wurde, sind erwartungsgemäß vom Adaptationsniveau abhängig. Vom für Bürobeleuchtung in DIN EN 12464-1 vorgesehenen Wert der Beleuchtungsstärke von 500 lx ausgehenden Niveau wurde auf etwa ein Drittel herunter gedimmt.

Die Ergebnisse dieses Versuchsteils sind grundsätzlich mit Vorsicht zu genießen, da die Probanden die Beleuchtungsstärke zwar so weit herunter gedimmt haben, dass sie „über einen längeren Zeitraum“ unter dieser Beleuchtung arbeiten könnten, dies aber aus versuchsökonomischen Gründen nicht überprüft werden konnte. Da diese untere Annehmlichkeitsschwelle keine Relevanz für die ursprünglichen Fragestellungen hat, ob bei seitlichem Tageslichteinfall für den Wert der Beleuchtungsstärke ein Faktor von 0,6 auch in der Praxis gerechtfertigt ist, werden diese Ergebnisse nur der Vollständigkeit halber gezeigt.

4.7 Zusammenfassende Betrachtung des Probandenversuchs

d2-R

Die in DIN EN 12464-1 geforderten Wartungswerte der Beleuchtungsstärke gelten als Minimalwerte, die dazu dienen, auch in ungünstigen Situationen über einen längeren Zeitraum noch akzeptable Sehleistungen sicher zu stellen. Eine besonders ungünstige Beleuchtungssituation ergibt sich bei glänzenden Oberflächen und direkter Beleuchtung, bei der die Leuchten über der horizontalen Arbeitsebene angebracht sind. Bei Beleuchtungssituationen mit seitlichem Tageslichteinfall können laut DIN 5034-1 die gleichen Sehbedingungen mit um einen Faktor von 0,6 niedrigeren Beleuchtungsstärken erreicht werden.

In diesem Probandenversuch ergeben sich nur für glänzendes Papier bei seitlichem Lichteinfall signifikant höhere Werte der Konzentrationsleistung gegenüber der direkten Beleuchtung. Dabei sind die KL-Werte bei 100 lx bei seitlichem Lichteinfall mit den Werten vergleichbar, die bei 500 lx und direkter Beleuchtung erzielt werden. Dies deutet darauf hin, dass für den ungünstigen Fall des glänzenden Papiers mit 0,2 ein noch niedrigerer Faktor als in der Norm angesetzt werden könnte. Beim matten Papiertyp treten keine signifikanten Unterschiede der Konzentrationsleistung in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke und der Lichteinfallrichtung auf. Dies bestätigt und übertrifft in Teilen die erste Forschungshypothese (vgl. Abschnitt 2.2), wenn berücksichtigt wird, dass die Angaben der Norm für den ungünstigsten Fall vorgesehen sind. Bei mattem Papier ergeben sich durchgehend gleiche KL-Werte, hier ist also kein mit einem Faktor zu beschreibender Unterschied festzustellen, aber im Vergleich zur Situation mit glänzendem Papier auch nicht notwendig. Es könnte also bei mattem Papier grundsätzlich auch mit niedrigeren Beleuchtungsstärken von 300 lx oder sogar 100 lx gearbeitet werden. Darauf weisen auch die schon lange bekannten Untersuchungen von [Hunt, 1980] hin.

Gleichzeitig wird die zweite Forschungshypothese (Abschnitt 2.2) bestätigt: Die Unterschiede der Konzentrationsleistungen zwischen den Lichteinfallrichtungen sind größer, je stärker das Papier glänzt.

Der Kontrastwiedergabefaktor CRF kann nicht pauschal als Maß für die Sehleistung herangezogen werden, da dieser nur bei glänzenden Materialien mit der Konzentrationsleistung korreliert. Damit lässt sich die dritte Forschungshypothese nicht bestätigen.

Fragebogen

Bei der Befragung wurde die Beleuchtung mit seitlichem Lichteinfall um bis zu eine Skaleneinheit dunkler eingeschätzt als die direkte Beleuchtung. Dabei sind die Unterschiede bei 300 lx und 500 lx Beleuchtungsstärkeniveau signifikant. Auf die Frage welche Beleuchtungsart angenehmer sei, fallen die Antworten für das seitlich einfallende „Tageslicht“ signifikant besser aus. Dies bestätigt die vierte Forschungshypothese. Die Annahme, dass eine dunkler eingeschätzte Lichtsituation auch als unangenehmer wahrgenommen wird, trifft hier nicht zu. Es zeigt sich, dass das seitlich einfallende „Tageslicht“ gleichzeitig dunkler und angenehmer wahrgenommen wird als die direkte „künstliche Beleuchtung“.

Die Beleuchtungssituationen bei 100 lx wurden immer signifikant dunkler eingeschätzt, als bei 300 lx und 500 lx, allerdings ergaben sich bei diesen niedrigen Beleuchtungsstärken keine Unterschiede mehr zwischen den Lichteinfallrichtungen. Zusammen mit den deutlich schlechteren Annehmlichkeitsbewertungen der 100 lx-Szenarien deutet dies darauf hin, dass bei diesem Beleuchtungsstärkeniveau tatsächlich eine Akzeptanzschwelle unterschritten wurde. Dies spricht gegen die beim d2-R Test gefundene Möglichkeit, einen noch kleineren Faktor als 0,6 für seitlichen Tageslichteinfall anzusetzen.

Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass die Reflexion auf dem Papier bei seitlichem Lichteinfall unabhängig vom Papiertyp kaum bis gar nicht wahrgenommen wird. Dies zeigt, dass auch bei glänzenden Oberflächen gerichtete Beleuchtung störungsfrei möglich ist, sobald eine passende geometrische Anordnung des Arbeitsplatzes zur Lichtquelle gewählt wird. Hängen die Leuchten jedoch im ungünstigsten Winkel zum Betrachter, so wird die Reflexion bei glänzendem Papier am stärksten wahrgenommen und bei mattem Papier am geringsten. Weiter ist zu anmerken, dass die Beurteilung der Reflexion für die in dieser Untersuchung verwendeten Beleuchtungsstärkeniveaus nicht von der Beleuchtungsstärke abhängt, die Reflexion wird bei niedrigen Beleuchtungsstärken genauso stark störend beurteilt wie bei hohen Beleuchtungsstärken.

5 Zusammenfassende Bewertung

Seit der Änderung der Energieeinsparverordnung im Jahr 2007 wird bei der Bewertung des Energieumsatzes von Gebäuden auch die Beleuchtung berücksichtigt. Dies ist entscheidend, da gerade im Gewerbe-, Handels- und Dienstleistungsbereich besonders hohe Anteile des elektrischen Energieumsatzes auf die Beleuchtung zurückzuführen sind. Durch den relativ hohen Primärenergiefaktor für die Stromerzeugung in Deutschland bewirkt eine Senkung des Energieumsatzes für die Beleuchtung eine entsprechend größere Reduktion des CO₂-Ausstoßes. Wird noch das Alter der Beleuchtungsanlagen berücksichtigt, das nach ZVEI in 75 % aller Nichtwohngebäude bei über 25 Jahren liegt, wird die Dringlichkeit von Sanierungsmaßnahmen deutlich.

Dass neu geplante Beleuchtungsanlagen aufgrund der moderneren Technik erhebliche Energieeinsparpotenziale von bis zu 70 % erreichen, wurde in dieser Arbeit für mehrere Gebäudetypen demonstriert. Gleichzeitig wurden die Einflüsse unterschiedlicher Maßnahmen durch Berechnungen und Messungen in der realen Nutzung untersucht. Dies sind die Lampen- und Leuchtentechnik, eine Präsenzüberwachung sowie eine tageslichtabhängige Regelung. Je nach Nutzungsanforderung hat die verbesserte Lampen und Leuchtentechnik mit über zwei Dritteln den größten Anteil an der Energieeinsparung. Neben den energetischen Optimierungen müssen für eine gute Beleuchtung aber immer auch weitere wichtige Aspekte berücksichtigt werden. So wurde die Beleuchtungsqualität in allen gezeigten Beispielen erheblich verbessert, in Museen steht zusätzlich noch der Schutz der Ausstellungsobjekte vor Schädigung durch optische Strahlung im Mittelpunkt. Die Optimierung dieser wichtigen Parameter bei gleichzeitiger Verbesserung der Energieeffizienz ist durch den Einsatz der LED-Technik erstmals möglich.

Eine gute Beleuchtungsplanung berücksichtigt immer auch das Tageslicht im Innenraum. Dies stellt eine sehr effiziente und qualitativ hochwertige Beleuchtung dar. Die Auswirkungen auf den Energieumsatz für die Beleuchtung bei unterschiedlich guter Tageslichtversorgung in Schulklassenräumen und Büroarbeitsplätzen konnten nachgewiesen werden. Eine weitere Möglichkeit, den Energieumsatz für die Beleuchtung in tageslichtversorgten Bereichen zu senken, ist die Nutzung der Vorteile des seitlichen Tageslichteinfalls. Dazu gibt DIN 5034-1 einen Faktor von 0,6 an, um den bei seitlichem Tageslichteinfall der Wertungswert der Beleuchtungsstärke für horizontale Sehaufgaben reduziert werden darf. Da diese Angabe bisher nur auf Berechnungen beruhte, wurden in einem Probandentest unter kontrollierten Laborbedingungen die Auswirkungen des seitlichen Tageslichteinfalls gegenüber einer konventionellen künstlichen Beleuchtungsanlage bei unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten der Sehaufgabe weitergehend untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass für die Bewältigung der Sehaufgabe sogar noch kleinere Faktoren zu begründen wären. Jedoch fielen die Bewertungen der Annehmlichkeit durch die Probanden bei Faktoren <0,6 erheblich schlechter aus. Der in der Norm vorgeschlagene Faktor von 0,6 ist damit als Kompromiss für eine bestmögliche Energieeinsparung bei gleichzeitig guter Voraussetzung zur Bewältigung der Sehaufgaben und einer angenehmen Beleuchtungssituation bestätigt.

Bei diesen Untersuchungen wurden wirtschaftliche Aspekte nicht berücksichtigt. Die Amortisationszeiten fallen jedoch aufgrund des sehr hohen Energieeinsparpotenzials von bis zu 70 % gegenüber ineffizienter Altanlagen relativ kurz aus. Je nach Investitionsaufwand und individueller Nutzung können sie jedoch auch größer ausfallen, sodass sich die Sanierung der Beleuchtungsanlage monetär

nicht rentiert. Um in diesen Fällen einen ewigen Weiterbetrieb besonders ineffizienter Anlagen zu verhindern, sind zukünftig gesetzliche Anforderungen festzulegen, die als Mindestgrenzen für die Energieeffizienz beim Betrieb von Beleuchtungsanlagen gelten. Damit wird definiert, wann Altanlagen außer Betrieb genommen werden müssen und welche Anforderungen eine Neuanlage zur Inbetriebnahme mindestens erfüllen muss.

6 Literatur

- [2010/31/EU] Europäisches Parlament und Rat (Mai 2010). *Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung)*. Verfügbar unter <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:32010L0031> [06.03.2015]
- [AGEB, 2013] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (November 2013). *Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2011 und 2012 mit Zeitreihen von 2008 bis 2012*. Verfügbar unter http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_endbericht_anwendungsbilanzen_2011-2012_endg.pdf [12.01.2015]
- [ArbStättV] Bundesministerium der Justiz (August 2004). *Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung – ArbStättV)*. Saarbrücken: juris GmbH.
- [ASR A3.4] Bundesministerium für Arbeit und Soziales (April 2011). *Technische Regeln für Arbeitsstätten ASR A3.4: Beleuchtung*. Verfügbar unter <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Arbeitsstaetten/ASR/ASR-A3-4.html> [19.12.2014]
- [Aydınlı u.a., 1983] Aydınlı, S., Hilbert, G. S. & Krochmann, J. (1983) Über die Gefährdung von Ausstellungsgegenständen durch optische Strahlung. *LICHT-Forschung*, 5 (1), 35-47.
- [Aydınlı u.a., 2013] Aydınlı, S., Böhm, M., Gramm, S., Kaase, H. & Völker, S.: Effizienz und Nutzerakzeptanz: Evaluierung der LED-Beleuchtung eines Bürogebäudes, *LICHT*, 65 (9), 76-79.
- [Bauer, 2014] Bauer, A. (2014). *Entwicklung und Realisierung eines praxisorientierten dezentralen Messsystems zum Langzeitmonitoring von Beleuchtungsanlagen*. Nicht veröffentlichte Studienabschlussarbeit, Technische Universität Berlin, Berlin.
- [Belendorf u.a., 2009] Belendorf, H., Aydınlı, S., de Boer, J. & Kaase, H.: Ein Modell zur Bestimmung der Energieeinsparung durch tageslichtabhängige Beleuchtungskontrolle, *LICHT*, 61 (7-8), 530-536.
- [de Boer u.a., 2006] de Boer, J., Aydınlı, S., Cornelius, W., Jakobiak, R., Krebs, P., Rosemann, A. & Schmits, P. W.: Die Ermittlung des Energiebedarfs für Beleuchtungszwecke, DIN V 18599 Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung, *LICHT*, 58 (1-2), 86-97.

- [Boyce u.a., 1981] Boyce, P., Slater, A. (1981). The application of CRF to office lighting design. *Lighting Research and Technology*, 13 (2). 65-79.
- [Brickenkamp, 2002] Brickenkamp, R. (2002). *Test d2: Aufmerksamkeits-Belastungs-Test*. Göttingen: Hogrefe.
- [Brickenkamp u.a., 2010] Brickenkamp, R., Schmidt-Atzert & L., Liepmann, D. (2010). *Test d2 – Revision: Aufmerksamkeits- und Konzentrationstest*. Göttingen: Hogrefe.
- [CIE 157] Commission Internationale de l’Eclairage (2004). *CIE 157 – Technical Report: Control of damage to museum objects by optical radiation*. Wien.
- [Cohen, 1988] Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences: Second Edition*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- [DIN 5034-1] Deutsches Institut für Normung e.V. (Juli 2011). *DIN 5034-1 Tageslicht in Innenräumen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [DIN 5034-5] Deutsches Institut für Normung e.V. (November 2010). *DIN 5034-5 Tageslicht in Innenräumen – Teil 5: Messung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [DIN 6169-2] Deutsches Institut für Normung e.V. (Februar 1976). *DIN 6169-2 Farbwiedergabe – Teil 2: Farbwiedergabe-Eigenschaften von Lichtquellen in der Beleuchtungstechnik*. Berlin, Köln: Beuth Verlag GmbH.
- [DIN 67530] Deutsches Institut für Normung e.V. (Januar 1982). *DIN 67530 Reflektometer als Hilfsmittel zur Glanzbeurteilung an ebenen Anstrich- und Kunststoff-Oberflächen*. Berlin, Köln: Beuth Verlag GmbH.
- [DIN EN 12464-1] Deutsches Institut für Normung e.V. (August 2011). *DIN EN 12464-1 Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen; Deutsche Fassung EN 12464-1:2011*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [DIN EN ISO 105-B08] Deutsches Institut für Normung e.V. (Februar 2010). *DIN EN ISO 105-B08 Textilien – Farbechtheitsprüfungen – Teil B08: Überprüfung der blauen Lichtechtheitstypen aus Wollgewebe 1 bis 7 (ISO 105-B08:1995 + Amd 1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 105-B08:1999 + A1:2009*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- [DIN EN ISO 11664-4] Deutsches Institut für Normung e.V. (Juni 2012). *DIN EN ISO 11664-4 Farbmeterik – Teil 4: CIE 1976 L*a*b* Farbenraum (ISO 11664-4:2008); Deutsche Fassung EN ISO 11664-4:2011*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [DIN V 18599] Deutsches Institut für Normung e.V. (Februar 2007). *DIN V 18599 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwasser und Beleuchtung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [DIN V 18599-4] Deutsches Institut für Normung e.V. (Februar 2007). *DIN V 18599-4 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwasser und Beleuchtung – Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [DIN V 18599-10] Deutsches Institut für Normung e.V. (Februar 2007). *DIN V 18599-10 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [Egger, 1984] Egger, W. (1984). CRF – Qualitätsmerkmal einer Beleuchtungsanlage. *LICHT-Forschung*, 6 (2), 77-86.
- [ENEV 2007] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Juli 2007). *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV)*. Verfügbar unter http://www.enev-online.net/enev_2007/enev2007_070726_bundesanzeiger_leseversion.pdf [16.03.2015]
- [ENEV 2009] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (April 2009). *Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung*. Verfügbar unter http://www.enev-online.org/enev_2009_volltext/ [19.12.2014]
- [ENEV 2014] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (November 2013). *Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung*. Verfügbar unter http://www.enev-online.org/enev_2014_volltext/ [06.03.2015]
- [Fischer, 1981] Fischer, D. (1981). Ein Vereinfachtes Verfahren zur Bewertung von Kontrastwiedergabe bei der Bürobeleuchtung. *LICHT-Forschung* 3 (1), 25-31.

- [Gramm u.a., 2013] Gramm, S., Hartwig, U., Aydınli, S., Kaase, H. & Völker, S. (2013). Artificial sky for the determination of the visual performance with lateral light incidence. In LUX EUROPA 2013 Organising Committee (Hrsg.) *Tagungsband Lux Europa 2013*. Warschau: Polski Komitet Oświetleniowy SEP, 2013, S. 449-454
- [Hartwig, 2013] Hartwig, U. (2013). *Untersuchung mit künstlichem Himmel zur Bestimmung der Sehleistung bei seitlichem Lichteinfall*. Nicht veröffentlichte Studienabschlussarbeit, Technische Universität Berlin, Berlin.
- [Hunt, 1980] Hunt, D.R.G. (1980). Predicting artificial lighting use – a method based upon observed patterns of behaviour. *Lighting Research and Technology*, 12, 7-14.
- [Kaase u.a., 2013] Kaase, H., Aydınli, S. & Gramm, S. (2013). Energieeffiziente Beleuchtung in Museen unter Einbeziehung konservatorischer Aspekte. *Bauphysik*, 35 (3), 205-211.
- [LiTG, 1991] Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e. V. (1991). *Der Kontrastwiedergabefaktor CRF – Ein Güte Merkmal der Innenraumbeleuchtung*. LiTG-Fachausschuss Innenbeleuchtung Arbeitsgruppe Blendung. Berlin.
- [Markytán, 2008] Markytán, A. (2008). *Untersuchung zur flächenbezogenen Beleuchtung in Büroräumen*. Tönning: Der Andere Verl.
- [Petry, 1984] Petry, K. (1984). *Zur Bewertung der Mindestbeleuchtungsstärke und der Nutzungszeit von tageslichtorientierten Arbeitsplätzen mit Hilfe des Kontrastwiedergabefaktors und der äquivalenten Kugelbeleuchtungsstärke*. Dissertation, Darmstadt.
- [Petzold, 2011] Petzold, C. (2011). *Energetische Bewertung der Beleuchtungsanlage einer Schule nach DIN V 18599*. Nicht veröffentlichte Studienabschlussarbeit, Technische Universität Berlin, Berlin.
- [Reitmaier, 1977] Reitmaier, J. (1977). *Untersuchungen über Glanz und Lichtreflexe*. Dissertation, Karlsruhe.
- [Roithner, 2012] Roithner Lasertechnik GmbH (November 2012). *SIC01M Broad Band SiC based UV photodiode A = 0,22 mm²*. Verfügbar unter <http://www.roithner-laser.com/datasheets/pd/sic01m.pdf> [22.11.2012]
- [SLG u.a., 1975] SLG, LTAG & LiTG (Hrsg.). (1975). *Handbuch für Beleuchtung* (4. Auflage). Essen: W. Giradet.

- [Szerman, 1994] Szerman, M. (1994). *Auswirkung der Tageslichtnutzung auf das energetische Verhalten von Bürogebäuden*. Dissertation, Stuttgart.
- [Völker, 2000] Völker, S. (2000). *Ermittlung von Beleuchtungsniveaus für Industriearbeitsplätze*. Dortmund, Berlin: Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft GmbH.
- [ZVEI, 2013] Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (Mai 2013). Energieeffizienz rechnet sich. *Themenblatt: Elektrisches Licht*. Verfügbar unter <http://www.zvei.org/Downloads/Energiewende/Lampen-Licht-Energieeffizienz-S8.pdf> [06.03.2015]