# Konzeption und Aufbau eines Monitoringsystems zur Vermeidung von Schädigungen durch optische Strahlung an Sammlungsgut

Vorgelegt von
Dipl.-Ing.
Heiko Herzberg
aus Borgsdorf

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

Doktor der Ingenieurwissenschaften
– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

**Promotionsausschuss:**

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Reinhold Orglmeister
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. S. Völker
Gutachter: Prof. Dr. sc. nat. Ch. Schierz

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 08. November 2013

Berlin 2014
D 83

# Danksagung

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Stephan Völker für die exzellente Betreuung, bei Herrn Prof. Dr. sc. nat. Ch. Schierz für die Anfertigung des Gutachtens und Herrn Prof. Dr. rer. nat. a. D. Heinrich Kaase für die Überlassung des Themas. Weiterhin gilt besonderer Dank Herrn Dr.-Ing. Sırrı Aydınlı für die theoretische und praktische Unterstützung bei schwierigen Problemstellungen.

Der Firma Zumtobel möchte ich für die Unterstützung bei der Umsetzung des Konzeptes der Messtechnik zum Produkt danken. Für die Unterstützung bei Messungen und Untersuchungen im Museum gilt mein Dank den Staatliche Museen Berlin sowie dem Rathgen Forschungslabor.

Außerdem möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Carolin Liedtke für Ihre kompetente lichttechnische Unterstützung und meinem Vater Manfred Herzberg sowie Jörg Oertwig für die kompetente technische und handwerkliche Unterstützung bedanken.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Frau für den geistigen und seelischen Beistand bedanken, sowie bei meinen Töchtern Anastasia und Leandra.

# Einleitung

*Diese Arbeit mag für einen Lichttechniker in Teilen Grundkenntnisse enthalten. Mir ist jedoch aufgefallen, dass genau diese Grundkenntnisse zu Verständigungsproblemen zwischen Lichttechnikern, Restauratoren und Kuratoren führen. Wegen der fachübergreifenden Thematik ist dies wichtig zum Verständnis.*

*Wo viel Licht ist, ist auch viel Schatten.*

*Johann Wolfgang von Goethe, 28.08.1749 - 22.03.1832*
*dt. Schriftsteller*

Bereits im Altertum war bekannt, dass Licht eine sehr hohe Dynamik in seiner natürlichen Ausprägung aufweist. Im 15. Jh. wurden erste Untersuchungen, hinsichtlich des Spektrums im sichtbaren Bereich und der spektralen Zerlegung des Sonnenlichts, von Isaak Newton durchgeführt. Erst im 18. Jh. kamen grundsätzliche Fragen der Wirkung der einzelnen Spektralbereiche auf. Im Jahr 1801 machte der deutsche Physiker Johann Wilhelm Ritter[1] [Ritter, 1801] die Beobachtung, dass Strahlen gerade jenseits des violetten Endes im sichtbaren Spektrum unglaublich effektiv im Schwärzen von Silberchloridpapier waren. In den Annalen der Physik schrieb er:

> *... „Am 22sten Febr. habe ich auch auf der Seite des Violetts im Farbspectrum, ausserhalb desselben, Sonnenstrahlen angetroffen, und zwar durch Hornsilber aufgefunden. Sie reduciren noch stärker, als das violette Licht selbst, und das Feld dieser Strahlen ist sehr gross. Nächstens mehr davon.“* [Ritter, 1801]

Zwei Jahre darauf veröffentlichte Ritter einen Artikel zu „Versuchen über das Sonnenlicht“. Er nannte die Strahlen jenseits des violetten Farbspektrums zunächst „de-oxidierende Strahlen“, um ihre chemische Wirkung zu betonen [Ritter, 1803]. Meinhard von Pfaundler[2] beschrieb die Biosynthese von Vitamin-D3 als das „in das Reagenzglas gebannte Sonnenlicht“, nach einer Untersuchung der Wirkung von Sonnenlicht auf den menschlichen Organismus. In Zuge dessen bemerkte er, dass einige Spektralbereiche eine erheblich größere Wirkung aufwiesen als andere. Auch die Wirkung auf das menschliche Auge wurde und wird untersucht. So wurde 1924 die Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ von der CIE festgelegt und 1982 überarbeitet.

[1] (* 1776- † 1810)
[2] (* 7. Juni 1872 - † 20. Juli 1947)

Seit dem Russel und Abney-Report von 1888 [Russel & Abney, 1888] sind Auswirkungen optischer Strahlung auf Kunstwerke bekannt. Dies führte Anfang bis Mitte des 20. Jahrhunderts zu umfangreichen Untersuchungen. Ziel war die Ermittlung der Grenzwerte optischer Strahlung an Sammlungsgut. Bereits durch die ersten Untersuchungen von Genard [Genard, 1951] wurde klar, dass kurzwellige Strahlungsanteile ein weitaus größeres Schädigungspotenzial aufweisen als langwellige sichtbare Strahlungsanteile. Auf Basis ausführlicher Untersuchungen an so genannten „low grade papers“ veröffentlichte Judd 1953 [NBS, 1953] in einem Bericht den relativen Schädigungsfaktor $D_\lambda$. In Deutschland veranlasste 1982 das damalige Institut für Museumskunde der Staatlichen Museen Preussischer Kulturbesitz die TU Berlin eine Untersuchung konservatorisch relevanter Wirkungen auf typische im Museum ausgestellte Gegenstände durchzuführen. Folge dieser Untersuchungen war die Definition der *relativen spektralen Objektempfindlichkeit* $s(\lambda)_{dm,rel}$ im Jahr 1983 [Aydinli et al., 1983]. Bezieht man diese ersten einfachen Ergebnisse auf die Beleuchtung und Lagerung von Kulturgütern, ergeben sich nicht nur lichttechnische, sondern auch kulturelle und ökonomische Fragestellungen, wie z. B. die originalgetreue Darbietung der Farben eines Kunstwerkes oder die Energieeffizienz der Beleuchtung.

Der zeitgemäße Kultur- und Museumstourismus ist eine Mischung aus mehreren Erfolgsfaktoren. Für die touristische Aufmerksamkeit von Museen sind sowohl die Museumsarchitektur, eine interessante Ausstellungspolitik, aber auch die Dienstleistungsqualität und die Professionalität der touristischen Inwertsetzung der einzelnen Angebote von zentraler Bedeutung. Dem entgegen steht größtenteils die Aufgabe eines jeden Museums, die Kulturgüter zu schützen und zu bewahren. Aus konservatorischer Sicht ist jedes ausgestellte Kulturgut dem Verfall unterlegen.[3] Diese weitestgehend irreversiblen Zerstörungen können auf vielfältige Ursachen u.a. Vandalismus, Abrieb durch Sand, Luftfeuchtigkeit, Temperatur und optische Strahlung begründet sein. Aufgrund der Komplexität und des Umfangs dieser Problematik bezieht sich diese Arbeit auf die Schädigungen durch Exposition der Kunstwerke gegenüber optischer Strahlung, speziell kurzwelliger Strahlungsanteile. Aufbauend auf die Arbeiten von Krochmann, Aydinli und Hilbert wird gezeigt, welche qualitativen und quantitativen Auswirkungen diese Strahlungsanteile auf Kunstwerke haben. Darüber hinaus werden neue Messverfahren und Methoden werden vorgestellt. Eine in diesem Bereich fälschlicherweise immer noch praktizierte Beurteilung der Materialien nach dem Blaumaßstab[4] in Ausstellungen ist nicht aussagekräftig aufgrund der Tatsache, dass die verwendeten Wollstreifen und deren Farben eigenen chemischen Reaktionen unterliegen.

[3] Quelle: Statistik des Neuen Museums in Berlin, 2005

[4] „Blue Wool Standard“; DIN 54004:1966 bzw. DIN EN ISO 105-B02:2011

## Kurzfassung

Kunstwerke, die in jeglicher Art beleuchtet werden, sind der Schädigung durch optische Strahlung ausgesetzt. Die spektral schädigende Wirkung der Strahlung auf Kunstwerke ist bekannt, jedoch bezieht die Praxis in den Museen und Galerien sich weiterhin auf die Messung und Festlegung von Beleuchtungsstärken. Begründet ist dies nicht nur in der fehlenden Messtechnik, sondern auch in der nicht ausreichenden Sensibilisierung und Fachkenntnis bezüglich der Lichttechnik bei Restauratoren und Kuratoren. Neben den lichttechnischen Grundlagen zur Betrachtung der optischen Strahlung am Kunstwerk wird erstmals eine Methode zur Anpassung optischer Messtechnik, in Bezug auf die 2004 von der CIE veröffentlichen spektralen Objektempfindlichkeit, vorgestellt. Darüber hinaus kann auf dieser Grundlage erstmals eine permanente Überwachung (Monitoring) der Kunstwerke durchgeführt werden. Realisiert wurde dies über ein ZigBee-basiertes Sensornetz mit Funkübertragung. Der Kurator bzw. Restaurator ist somit zukünftig jederzeit in der Lage, jedes Kunstwerk für sich real zu bewerten und Gegenmaßnahmen einzuleiten.

## Abstract

Any illuminated artwork is exposed to optical radiation. The damaging effect is based on the spectral absobtion of radiation. Although the parameter 'relative spectral responsivity' is scientifically established, in common conservation practice only the photometric indicator 'illuminance' is used for measurements and monitoring of the lighting installations. The problem is not only based on the lack of measurement technology but also on conservator's and curator's insufficient awareness and expertise regarding lighting. In addition to basics in photometry a method to adjust optical metrology to spectral responsivity - as published in 2004 by CIE - is shown. Moreover a permanent monitoring is realized at the first time. The monitoring system is based on a ZigBee sensor network with radio transmission. Thus curators and conservators are able to evaluate all artworks and measurements at any time.

# Inhaltsverzeichnis

**Einleitung** ii

**Kurzfassung** iv

**Abstract** iv

**1 Wirkung objektschädigender Strahlung auf Kunstwerke** 1
- 1.1 Bisheriger Kenntnisstand . . . 3
  - 1.1.1 Farb-, Stoff- und Papierproben . . . 8
- 1.2 Verfahren und Methoden zur Strahlungsbegrenzung und Erfassung in Museen . . . 9
  - 1.2.1 Relative spektrale Schädigungsfunktion . . . 9
  - 1.2.2 Schwellenbestrahlung $H_{s,dm}$ . . . 12
  - 1.2.3 Lichtbeständigkeit . . . 13
  - 1.2.4 Schädigungspotenzial und Expositionsdauer . . . 14
  - 1.2.5 Schutzpotenzial . . . 15
  - 1.2.6 Zulässige Beleuchtungsstärke . . . 16
  - 1.2.7 Mischung von Tageslicht mit künstlicher Beleuchtung 17
  - 1.2.8 Bewertung der Beleuchtung in Tageslichtmuseen . . . 17
- 1.3 Verfahren zur Strahlungsminimierung . . . 20
  - 1.3.1 „Lichtschutz“ an der Fassade . . . 20
  - 1.3.2 „Lichtschutz“ in Innenräumen . . . 23
  - 1.3.3 UV- und IR-Verminderung an der Lampe . . . 25
  - 1.3.4 UV- und IR-Verminderung in der Leuchte . . . 25
  - 1.3.5 UV-Schutz am Kunstwerk . . . 26
  - 1.3.6 Weitere Maßnahmen . . . 26
- 1.4 Berechnungsbeispiele . . . 27

**2 Analyse derzeit verwendeter Maßzahlen zur Erfassung der Beleuchtungssituation im Museum** 29
- 2.1 Bestehende Normen und Richtlinien . . . 29
- 2.2 Bestehende Messverfahren . . . 32
- 2.3 Spektrale Fehlbewertung . . . 33
- 2.4 Folgerung der Notwendigkeit einer neuen Messtechnik . . . 36

2.5 Folgerung der Notwendigkeit eines Monitoringsystems . . . . 36
2.6 Folgerung der Notwendigkeit einer speziellen Lichtplanung und Simulation . . . . . 37

**3 Voruntersuchungen Teil 1 bezüglich der Messung der objektschädigenden Stahlung 38**
3.1 Umbau der Bestrahlungsanlage von Krochmann und Aydinli 38
3.2 Festlegung des Formfaktors $b$ der relativen spektralen Objektempfindlichkeit . . . . . 43
3.3 Voruntersuchung aktueller Lichtquellen und Leuchten für Museen und Galerien . . . . . 44
3.4 Fazit . . . . . 46

**4 Neue Messtechnik 48**
4.1 Technische Konzeption . . . . . 48
4.2 Messtechnische Umsetzung . . . . . 49
4.2.1 Auswahl der Sensoren . . . . . 49
4.2.1.1 Sensor SIC01S und Filter N-WG280 . . . . . 50
4.2.1.2 Sensor EPD-440 und Filter UG5 . . . . . 51
4.2.1.3 Sensor S5973-02 und Filter BG42 . . . . . 52
4.2.1.4 Gesamtsensor zur Erfassung objektschädigender Strahlung . . . . . 53
4.2.1.5 Sensor zur Messung der Beleuchtungsstärke . 55
4.2.2 Hardware zur Photostromwandlung . . . . . 56
4.2.3 Kalibrierung . . . . . 59
4.2.4 Ermittlung des aktuellen Bestrahlungsniveaus . . . . . 61
4.3 Validierung des Messkopfes und der elektronischen Schaltung 62
4.3.1 Spektrale Fehlbewertung . . . . . 64
4.3.2 Richtungsabhängige Fehlbewertung . . . . . 64
4.3.3 Linearität gegenüber der Bestrahlung . . . . . 66
4.3.4 Signal – Rausch – Verhalten . . . . . 67
4.3.5 Quantisierungsgenauigkeit . . . . . 68
4.3.6 Statistische Messabweichungen . . . . . 71
4.3.7 Messunsicherheit . . . . . 71
4.4 Fazit . . . . . 72

**5 Voruntersuchungen Teil 2 bezüglich des Monitorings schädigungsrelevanter Messgrößen am Kunstwerk 74**
5.1 Untersuchung kurzzeitig auftretender Strahlungsereignisse . . 74
5.1.1 Direkte Sonneneinstrahlung . . . . . 75
5.1.2 Photoblitz während der Ausstellung . . . . . 76
5.2 Festlegung des Zeitintervalls $\Delta t_m$ für eine Langzeitmessung . 78
5.3 Klassifizierung nach unterschiedlichen Messbedingungen . . . 79
5.3.1 Exponierte Kunstwerke . . . . . 79

5.3.2 Expedierte Kunstwerke . . . 80
5.3.3 Magazinierte Kunstwerke . . . 80
5.4 Fazit . . . 81

**6 Monitoringsystem zur permanenten Überwachung der optischen Strahlung an Sammlungsgut 83**
6.1 Technische Konzeption . . . 84
6.1.1 Hardwarekonzept Embedded Systems . . . 84
6.1.1.1 Mikrocontroller . . . 84
6.1.1.2 Adhoc-Netze . . . 84
6.1.1.3 Multi-Hop Adhoc-Netze (MANET) oder Mesh-Netzwerke . . . 85
6.1.1.4 Routing in Multi-Hop Adhoc-Netzen . . . 86
6.1.1.5 Adhoc On Demand Distance Vector Routing (AODV) . . . 87
6.1.1.6 Sensornetzwerke . . . 88
6.1.2 Softwarekonzept . . . 89
6.1.3 Embedded Programmierung mit der Java 2 Micro Edition . . . 89
6.1.3.1 Connected Limited Device Configuration (CLDC) . . . 89
6.1.3.2 Generic Connection Framework . . . 90
6.1.3.3 Mobile Information Device Profile (MIDP) . . . 91
6.1.4 Sicherheit . . . 92
6.2 Standortbestimmung für ein Monitoring unterschiedlicher Ausstellungsgegenstände . . . 93
6.3 Integration der Sensorknoten am Kunstwerk . . . 98
6.4 Zusätzliche Spezialsensoren . . . 101
6.4.1 Sonnenscheindetektor zur Anbringung an der Fassade eines Gebäudes . . . 101
6.4.2 Temperatur – Luftfeuchte – Sensor . . . 105
6.5 Technische Umsetzung . . . 106
6.5.1 Sensorknoten . . . 106
6.5.2 Energieversorgung . . . 108
6.6 Softwaretechnische Umsetzung . . . 108
6.6.1 Applikationsserver . . . 109
6.6.2 Datenbankanbindung . . . 110
6.6.3 Serviceorientierte Architekturen mit Web Services . . . 111
6.6.4 Informationsbereitstellung für die Regelung der künstlichen bzw. Tageslichtbeleuchtung . . . 112
6.6.5 Netzwerk- und Verbindungsuntersuchungen . . . 113
6.6.6 Administrations- und Managementwerkzeuge . . . 115
6.6.7 Realisierung der Software . . . 115

**7 Schlussfolgerung** **118**
7.1 Résumé der Ergebnisse . . . . . 118
7.2 Erweiterungsvorschläge . . . . . 118

**Definitionen** **120**
Erklärung der Formelzeichen . . . . . 120
Lichttechnische Größen und deren radiometrische Entsprechung . . 122

**Literaturverzeichnis** **123**

**Abbildungsverzeichnis** **129**

**Tabellenverzeichnis** **131**

# Kapitel 1

# Wirkung objektschädigender Strahlung auf Kunstwerke

*Licht schafft in jeder Ausstellung visuelle Erlebnisse. Es wirkt als modulierender und akzentuierender Erlebnisfaktor, es stützt die publikumswirksame Präsentation. Ohne Licht sind Raumeindruck und Kunstgenuss nicht möglich.*

*„Gutes Licht für Museen, Galerien, Ausstellungen“*
*licht.wissen 18; Fördergemeinschaft Gutes Licht*

Circa 100 Millionen Menschen besuchen jedes Jahr die Museen in Deutschland. Die Besucher haben dabei die Auswahl von über 6.000 Museen mit ganz unterschiedlichen Sammlungen, ausgerichtet als interaktive Erlebniswelt oder in klassischer Form zur stillen Betrachtung. Für jedes Museum besteht auch die Aufgabe die Kulturgüter zu schützen und zu bewahren.

Ausgestellte, transportierte (expedierte) sowie magazinierte Kulturgüter sind dem Zerfall unterlegen. Es gilt herauszufinden und zu beschreiben, wie stark die Umwelteinflüsse an diesem beteiligt sind. Für ausgestellte Kulturgüter gab es in der Vergangenheit bereits viele Untersuchungen. Kaum betrachtet ist jedoch der Verfall magazinierter Kulturgüter. Es werden veraltete Verfahren praktiziert, die sich dem Anschein nach in der Praxis bewährt haben (vergleiche [Nordrhein-Westfahlen-Stiftung, 2001]). Ausnahmen sind bekannt (vergleiche [CIE157, 2004]; [Hilbert, 1996], [Saunders & Kirby, 1994]), werden jedoch vernachlässigt, da keine alternativen Verfahren zur Verfügung stehen.

Betrachtet man Kunstwerke, welche sehr starken Zerstörungen unterlegen sind, stellt man fest, dass ein großer Teil der Schädigung durch optische Strahlung hervorgerufen wird. Dies wird deutlich, wenn man die dem Licht zugewandten Seiten mit dem Licht abgewandten Seiten vergleicht. Im

**Abbildung 1.1:** „Andachtsbild mit hl. Jakobus“; Freiburg, um 1785; Augustinermuseum Freiburg; Inv. Nr. K 35/3 [Waller, 11.08.2009]

Bild 1.1 ist eine deutliche Farbveränderung zu sehen. Es handelt sich hierbei um eine Tapisserie aus dem 18. Jh. Links ist die dem Licht zugewandte Seite zu sehen. Im Vergleich mit der rechten Seite erkennt man eine deutliche Farbveränderung des Mantels der abgebildeten Person.Weiterhin zeigt die Tapisserie einen deutlichen Unterschied im Grad der Zerstörung in Abhängigkeit der eingesetzten Farbe. Gelbe Bereiche zeigen geringere Farbabstände auf als die roten Bereiche. Demzufolge reicht es, nicht ausschließlich die Strahlungsleistung, sondern auch die Materialien, zu dokumentieren.

Die Farbveränderung ist allerdings nur ein Teilaspekt der Schäden durch optische Strahlung. Es verändert sich meist auch der pH-Wert und die Festigkeit. Die Materialien (Seide, Kunststoffe etc.) werden zunehmend sauer und brüchig, unter Umständen ohne erhebliche Farbveränderungen. Während die ermittlung der Farbveränderungen durch Farbvergleich, Farbmessgeräte oder Densitometer möglich ist, lassen sich die Festigkeitswerte am Exponat schlecht messen. Aus diesem Grund wird als Maß der Lichtsensibilität die Farbveränderung herangezogen.

## 1.1 Bisheriger Kenntnisstand

Bereits 1951 berichtete Genard [Genard, 1951] dem 1949 gegründeten Komitee für Museumstechnik ICOM in Brüssel über seine Untersuchungsergebnisse. Er hatte 96 Leuchtstofflampen unterschiedlicher Lichtfarbe, 43 verschiedener Typen und Hersteller, spektralanalytisch untersucht. Daraufhin konnte er feststellen, dass eine geringe, jedoch nicht zu vernachlässigende Strahlungsleistung im Bereich von 290 - 300 nm vorlag.

> *„Tubular florescent lamps emit an ultra-violet radiation extending as far as 280 - 290 nm in the short wavelength. Their spectra always contain lines in the region of 300 nm, of certainly more than negligible intensity and sometimes also a continuum which is also of appreciable intensity.“* [Genard, 1951]

Er bemerkte allerdings auch, dass je nach Fabrikat und Lichtfarbe erhebliche Abweichungen auftreten können. Fast zeitgleich veröffentlichte D.B. Judd 1953 [D.B. Judd, 1953] im Auftrag des „National Bureau of Standards“ (NBS, heute NIST[1]) eine systematische Untersuchung der Schädigungen an so genannten „low grade paper“[2]. Impuls dieser Untersuchungen war die richtige Lagerung und Ausstellung der Unabhängigkeitserklärung und der Verfassungsurkunde der USA. Judd beschreibt den relativen Schädigungsfaktor (relative damage factor; siehe Tabelle 1.1). Da dieser sich auf 5 gemessene Werte im Bereich zwischen 360 und 550 nm bezieht, zeigt er nur grob den Einfluss der Wellenlänge auf die Schädigung des Sammlungsgutes.

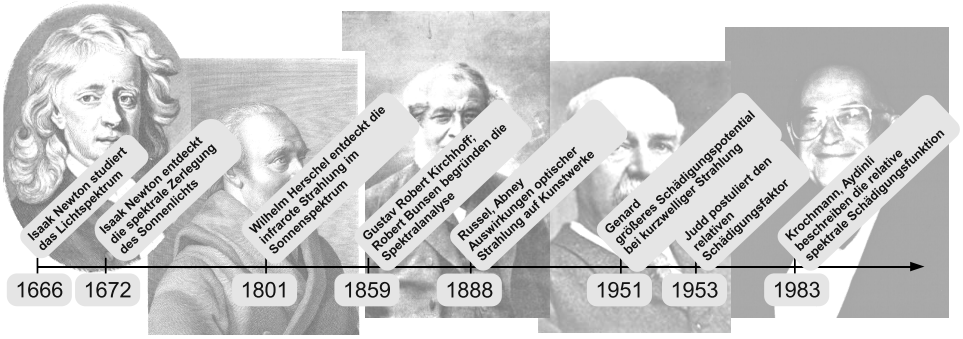



**Abbildung 1.2:** Wiss. Untersuchungen im Bereich der Objektschädigung

Er bewertet den Faktor bei einer Wellenlänge von 546 nm mit 1, so dass sich bei kürzeren Wellenlängen die gemessene Wirkung als Vielfaches ergibt. Um Strahlung unter 360 nm einzubeziehen, extrapolierte Judd die Werte des

[1] National Institute of Standards and Technology; www.nist.gov; August 2009
[2] „minderwertiges“ Papier, Zeitungspapier, Pergamentpapier

**Tabelle 1.1:** Relativer Schädigungsfaktor nach Judd (NBS 1953)

| Wellenlänge $\lambda$ (nm) | $D_\lambda$ |
|---|---|
| 546 | 1 |
| 436 | 22 |
| 405 | 60 |
| 389 | 90 |
| 365 | 135 |

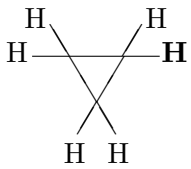
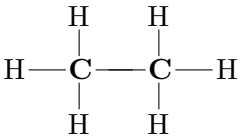
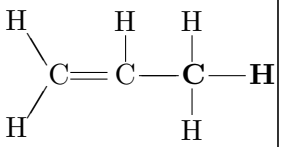
Schädigungsfaktors $D_\lambda$ bis auf 300 nm. Die Schlussfolgerung der Restauratoren und Kuratoren war eine deutliche Reduzierung optische Strahlung der Wellenlängen unter 500 nm. In den 60iger Jahren wurde diese Erkenntnis in die Praxis umgesetzt. Als Filter diente eine zwischen zwei Glasplatten eingeschweißte Folie, die im Bereich von 310 - 460 nm jegliche Strahlung absorbiert. Die dargebotenen Pergamente erschienen infolge der Filterung in einem gelblichen Farbton. In Bezug auf die erwähnte Unabhängigkeitserklärung der USA wurden zusätzlich die Scheinwerfer mit den gleichen Filtern ausgestattet. Da der gesamte Innenraum der Halle infolgedessen in gelbliches Licht getaucht wurde, erfährt der Besucher eine farbliche Umstimmung. Nachdem diese abgeschlossen ist, erscheinen die Dokumente nahezu weiß [Hilbert, 1996]. Eine zeitliche Einordnung der wichtigsten Untersuchungen zu diesem Thema, ist in Abbildung 1.2 zu sehen. Während D.B. Judd die Pergamente der amerikanischen Unabhängigkeitserklärung und der Verfassung untersuchte, benutzte Harrison [1953] diese Angaben zu einer konservatorischen Bewertung verschiedener Beleuchtungssituationen. Die Ergebnisse der Arbeit von Aydinli et al. [1983] und Aydinli [1992] berücksichtigten die Ergebnisse von Judd und führten zur Definition der relativen spektralen Schädigungsfunktion $s(\lambda)_{dm,rel}$, welche letztendlich in dem CIE Report 157 (2004) veröffentlicht wurde. Saunders und Kirby [1994] bezogen sich auf diese Ergebnisse und untersuchten weitere Proben, mitunter auch den zur Schädigungsdetektion herangezogenen Blue Wool Standard. Sie konnten zeigen, dass rote bzw. rötliche und grüne Farben der relativen spektralen Objektempfindlichkeit (Gleichung 1.8) folgten. Bei blauen Farben ist jedoch eine zum Teil erhebliche Abweichung zu erkennen. Der Grund dieser Abweichungen ist in Kapitel 1.2.1 zu finden.

Betrachtet man die Wirkung der Strahlung aus chemischer Sicht, kommt man zu weiteren Erkenntnissen. Die Energie der Strahlung wird von Molekülen des Kunstwerkes absorbiert oder reflektiert. Die Absorption der Strahlungsenergie kann neben unterschiedlichen chemischen Reaktionen, die ohne Ausnahme zu Materialschäden führen, auch Effekte wie Erwärmung und Fluoreszenz hervorrufen. Der Zerstörungsprozess wird allgemein „Photochemische Zersetzung“ genannt. Jedes Molekül des Kunstwerkes benötigt

eine bestimmte Mindestenergie die Dissoziationsenergie[3], damit eine Reaktion mit anderen Molekülen stattfinden kann.

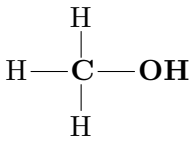
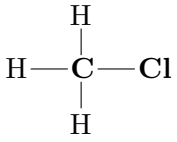
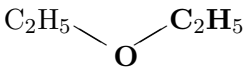
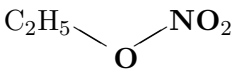
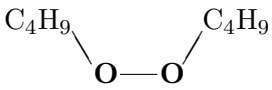
Diese Dissoziationsenergie ist für jede Art von Molekül unterschiedlich. Sobald die zugeführte Energie die Dissoziationsenergie eines bestimmten Moleküls erreicht oder übersteigt, kann es zur direkten Photolyse der Molekülbindung kommen [Patkus, 2007]. Häufiger geschieht der Zerfall durch Photooxidation unter Beteiligung von Fremdmolekülen wie Sauerstoff, Wasserdampf oder Schadstoffen. Auch Oberflächenverschmutzungen können diese Prozesse katalysieren [Koesling, 2000]. Die notwendige Dissoziationsenergie zur direkten Spaltung von Bindungen kleinerer Moleküle ist weitgehend bekannt. In Tabelle 1.2 (nach Koesling) werden nur einige Beispiele genannt. Sie gelten strikt nur für die betroffenen Moleküle, geben jedoch eine gute Orientierung, um die Stabilität entsprechender Bindungen bei größeren Molekülen abzuschätzen.

**Tabelle 1.2:** Dissoziationsenergien einiger Verbindungsklassen bei Bildung von Radikalen [Koesling, 2000]

| **Molekültyp** | **Formel** | **Dissoziationsenergie** $E_{diss}$ **in kJ/mol** |
|---|---|---|
| Alkane | $C_2H_5C$-**H**  | 415 |
| | $H_3$**C-C**$H_3$  | 368 |
| Alkene | $H_2C = CH -$ **C**$H_2$-**H**  | 344 |
| Alkohole | **C**$H_3$-**OH** | 419 |
| *fortgesetzt auf nächster Seite* | | |

[3] auch Aktivierungsenergie

*fortgesetzt aus vorheriger Seite*

| **Molekültyp** | **Formel** | **Dissoziationsenergie $E_{diss}$ in kJ/mol** |
|---|---|---|
| |  | |
| Halogenide | **C**$H_3$**-Cl**<br>  | 344 |
| Ether | $C_2H_5$**O-C**$_2H_5$<br>  | 331 |
| Nitrate | $C_2H_5$**O-N**$O_2$<br>  | 151 |
| Peroxide | $C_4H_9$**O-O**$C_4H_9$<br>  | 147 |

Zum Vergleich dazu sind in Tabelle 1.3 die Dissoziationsenergien optischer Strahlung aufgezeigt. Geht man davon aus, dass sämtliche Energie eines Photons zur Dissoziation beiträgt, lassen sich die Dissoziationsenergien über das Plancksche Wirkungsquantum berechnen:

$$E_{diss} = h \cdot \frac{c}{\lambda} \cdot N_A \tag{1.1}$$

**Tabelle 1.3:** Dissoziationsenergien der optischen Strahlung

| **Benennung der Strahlung** | **Wellenlänge** $\lambda$ **[nm]** | **Dissoziationsenergie** $E_{diss}$ **in kJ/mol** |
|---|---|---|
| UV-Strahlung | $100 - 280$ | $1197 - 428$ |
| | $280 - 315$ | $428 - 380$ |
| | $315 - 380$ | $380 - 315$ |
| sichtbare Strahlung | $380 - 780$ | $315 - 153$ |
| IR-Strahlung | $780 - 1400$ | $153 - 85{,}5$ |
| | $1400 - 3000$ | $85{,}5 - 39{,}9$ |
| | $3000 - 10^6$ | $39{,}9 - 0{,}12$ |

Bedeutung der Symbole:

$E_{diss}$: Dissoziationsenergie

$h$: Plancksches Wirkungsquantum; $6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Js

$c$: Lichtgeschwindigkeit im Vakuum; $3 \cdot 10^8$ m/s

$N_A$: Avogadro-Konstante; $6{,}022 \cdot 10^{23}$ mol$^{-1}$

Im Jahre 1859 wurde von Robert Wilhelm Bunsen und Sir Henry Roscoe das Reziprozitätsgesetz aufgestellt [Bunsen R, 1859]. Sie hatten die Schwärzung photografischer Filme unter veränderten Bestrahlungen und Bestrahlungsstärken untersucht. Ihre Feststellung war, dass der Schwärzungsgrad quantitativ gleich ist, wenn das Produkt aus wirksamer Strahlstärke $I_{eff}$ und Einwirkzeit $t$ gleich ist:

$$I_{eff} \cdot t = \text{const.} \tag{1.2}$$

Kleine Strahlstärken können also dieselbe Wirkung haben wie große, wenn sie nur entsprechend lange einwirken. Der Astronom Karl Schwarzschild entdeckte 1899, dass die Empfindlichkeit einer Fotoschicht bei Belichtungen über einer Sekunde exponentiell abnahm, also die erwartete Schwärzung nach Bunsen & Roscoe nicht mit der erreichten Schwärzung übereinstimmte [Schwarzschild, 1899]. Darauf hin beschrieb Schwarzschild die dynamische Strahlstärke in Abhängigkeit der Zeit.

$$i = f(I_{eff} \cdot t^p) \tag{1.3}$$

Bedeutung der Symbole:

$i$: dynamische Strahlstärke

$t$: Bestrahlungszeit

$p$: Schwarzschild-Exponent, $0 < p \leq 1$ (meist ca. 0,9 bei stark reagierenden Materialien)

Damit konnte Schwarzschild nachweisen, dass bei sehr langen Belichtungszeiten oder hohen Bestrahlungsstärken das Gesetz von Bunsen & Roscoe nicht

mehr gilt. In den 1990er Jahren hatte Aydinli [Aydinli, 1992] durch gezielte Bestrahlung von Leinwänden mit verschiedenen Farbaufträgen nachgewiesen, dass der Schwarzschildeffekt vernachlässigbar klein ist und für Bestrahlungsuntersuchungen in erster Näherung das Reziprozitätsgesetz angesetzt werden kann.

Wichtig für die Beurteilung der Schädigungen ist die Verteilung der photochemischen Reaktionen in der Materialtiefe bei Festkörpern. Die Schwächung der Strahlstärke in Abhängigkeit von der Schichtdicke kann mit Gleichung 1.4 beschrieben werden. Demnach nimmt der Strahlungsfluss exponentiell mit der Schichtdicke ab. Der wellenlängenspezifische Absorptionskoeffizient ist eine materialspezifische Kenngröße und kann über eine Messung der spektralen Absorption im betrachteten Spektralbereich bestimmt werden.

$$\Phi_e = \Phi_0 \cdot e^{-(k \cdot d)} \tag{1.4}$$

Bedeutung der Symbole:

$\Phi_e$: Strahlungsfluss nach Durchlaufen der Schicht

$\Phi_0$: Strahlungsfluss vor Durchlaufen der Schicht

$d$: Schichtdicke

$k$: wellenlängenspezifischer Absorptionskoeffizient.

Bei Flüssigkeiten kann der wellenlängenspezifische Absorptionskoeffizient sehr klein sein. Daher ist meist nach vielen Metern noch Strahlung nachzuweisen. Bei Kunstwerken aus nicht durchscheinenden Feststoffen liegt ein großer und wellenlängenspezifischer Absorptionskoeffizient vor. Meist sind nur Eindringtiefen von einigen Mikrometer sogar Nanometer zu erwarten.

### 1.1.1 Farb-, Stoff- und Papierproben

Systematische Reihenuntersuchungen zu Veränderungen museumstypischer Materialien wurden 1987 an der TU Berlin unter der Leitung von Krochmann [Krochmann, 1987] durchgeführt. In dem, von der Stiftung Preussischer Kulturbesitz geförderten Forschungsvorhaben, wurden insgesamt 54 Proben untersucht. Die Proben lassen sich in folgende Gruppen unterteilen:

- Aquarellproben (23 Proben)
- Leinwandproben (6 Proben)
- Papierproben (3 Proben)
- Zeitungspapier (6 Proben)
- Textilproben (16 Proben)

Darüberhinaus wurden 18 Sonderproben untersucht, darunter 6 Proben aus dem 17. bis 20. Jh. und diverse Seiden und Wollstoffe.

Für die Untersuchung wurden die Proben in vier Gruppen unterteilt:

- Proben Z Zeitungspapiere
- Proben A Proben mit schnellen und großen Farbänderungen
- Proben B Proben mit mittleren Farbänderungen
- Proben C Proben mit schwachen Farbänderungen

Diese Einteilung diente ausschließlich der Festlegung des Überwachungsintervalls während der Bestrahlung, sagt jedoch nichts über die Ergebnisse aus.

Als Strahlungsquelle wurde eine Xenon-Höchstdruck-Lampe[4] verwendet. Um gleiche Bedingungen für alle Proben herzustellen und mehrere Probenstreifen gleichzeitig zu bestrahlen, wurden diese auf einer Zylinderwand vertikal mit konstantem Abstand von der Lampe angeordnet. Vor jeden Probenstreifen wurde eine Blende mit 8 Öffnungen und einem jeweiligen Durchmesser von 2 cm angebracht, durch die der entsprechende Probenteil entweder direkt von der Lampe (Öffnung 1) oder durch vorgesetzte Kantenfilter (Öffnung 2-8) bestrahlt wird. Bei den Untersuchungen war die Umgebungstemperatur von 22°C ±2°C und einer Luftfeuchtigkeit von 65 % ±5 % nahezu konstant. Für alle untersuchten Proben wurde für jede einzelne Teilfläche nach jeder Teilbestrahlung der Farbabstand $\Delta E^*_{ab}$ zur unbestrahlten Probe berechnet. Unter Berücksichtigung der vorhandenen spektralen Strahlungsanteile auf der jeweiligen Probenfläche wurde die relative spektrale Objektempfindlichkeit mittels Polynomial-Regression bestimmt. Das Ergebnis dieser Reihenuntersuchung wurde in CIE157 [2004] veröffentlicht und ist in Tabelle 1.4 im Kapitel 1.2.1 zu sehen.

## 1.2 Verfahren und Methoden zur Strahlungsbegrenzung und Erfassung in Museen

### 1.2.1 Relative spektrale Schädigungsfunktion nach CIE 157:2004

Ein technischer Report der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) zum Thema „Control of damage to museum objects by optical radiation“ erschien 2004. Dieser Bericht besteht aus drei Teilen. Der erste Teil gibt einen Überblick über die wissenschaftlichen Grundlagen der durch Strahlung verursachten Schädigungsprozesse an musealen Objekten. Im zweiten Teil werden die aktuellen Forschungsarbeiten und der Kenntnisstand erörtert.

[4] Osram XBO 1600 W

Der letzte Teil betrachtet die Beleuchtung in Museen in Form einer praktischen Vorgehensweise für die Darbietung eines neuen Ausstellungsgegenstandes und dessen Überwachung der Beleuchtung während der Ausstellungszeit. [CIE157, 2004]
Im zweiten Teil dieses Reports wurde die bereits von Aydinli et al. [1983] veröffentlichte, relative spektrale Schädigungsfunktion $s(\lambda)_{dm,rel}$ übernommen. Aydinli et al. lehnten sich an Untersuchungen von Judd [1953] und Harrison [1953] an und gingen davon aus, dass die schädigende Wirkung ähnlich wie der Energiegehalt der optischen Strahlung indirekt proportional der Wellenlänge ist:

$$E_{Photon} \sim \frac{1}{\lambda} \tag{1.5}$$

Die spektrale Empfindlichkeit ist abhängig von der Fähigkeit, Strahlung bestimmter Wellenlängen zu absorbieren. Aufschluss darüber gibt der Wellenlängen abhängige Absorptionsgrad $\alpha(\lambda)$ und die materialabhängige Funktion $f(\lambda)$. Dies führt zu:

$$s(\lambda)_{dm,rel} = \alpha(\lambda) \cdot 1/\lambda \cdot f(\lambda) \tag{1.6}$$

Für viele nicht bzw. schwach pigmentierte Materialien ist der Absorptionsgrad $\alpha(\lambda) = 1$. Damit ergibt sich:

$$s(\lambda)_{dm,rel} = f'(\lambda) \tag{1.7}$$

mit $f'(\lambda) = 1/\lambda \cdot f(\lambda)$. Auf Grundlage umfangreicher Bestrahlungsuntersuchungen [Aydinli et al., 1983] stellte sich eine exponentielle Abhängigkeit der Funktion $f'(\lambda)$ heraus. Das Ziel war die Definition der relativen spektralen Objektempfindlichkeit $s(\lambda)_{dm,rel}$ [CIE157, 2004]:

$$s(\lambda)_{dm,rel} = e^{-b(\lambda - 300\ \mathrm{nm})} \tag{1.8}$$

Bedeutung der Symbole in Gleichung 1.6, 1.7 und 1.8:
$E_{Photon}$: Energie eines Photons bestimmter Wellenlänge
$s(\lambda)_{dm,rel}$: relative spektrale Objektempfindlichkeit
$\alpha(\lambda)$: spektraler Absorptionsgrad
$b$: Formfaktor (siehe Tabelle 1.4)

Zwei Erweiterungen der Exponentialfunktion sind zu erkennen.

Zum Einen erfolgte eine Normierung der Funktion auf eine Wellenlänge von 300 nm. Diese Festlegung wurde getroffen, da Strahlung der Wellenlängen unter 300 nm in Innenräumen – speziell in Museen – nicht zu erwarten ist. Damit stelle er sich gegen die Aussagen von Genard [1951] (vgl. Kapitel 1.1). Dieser beschrieb einen erheblichen Anteil UV-Strahlung bei Leuchtstofflampen. Aydinli geht jedoch davon aus, dass diese Lampen im Museum nicht einzeln sondern als Teil einer Leuchte eingesetzt werden.

Zum Anderen wurde der Formfaktor $b$ eingeführt. Dieser Faktor ist eine materialabhängige Größe, welche vom jeweiligen bestrahlten Material abhängig ist und besitzt die Einheit 1. Bestrahlungsuntersuchungen zur Ermittlung dieses Faktors sind von Aydinli et al. [1983] durchgeführt worden und in der CIE157 [2004] enthalten.

**Tabelle 1.4:** $b$-Formfaktoren der relativen spektralen Schädigungsfunktion in fünf Kategorien museumstypischen Materials nach CIE157 (2004)

| Gruppe | Proben | $b$ |
|---|---|---|
| a | Pergamente, Zeitungspapier | 0,038 |
| b | Hadernpapier | 0,0125 |
| c | Ölgemälde auf Leinwand | 0,0115 |
| d | Textilien | 0,0100 |
| e | Wasserfarben auf Hadernpapier | 0,0115 |

Ebenfalls in CIE157 [2004] erwähnt sind die Forschungen von Saunders und Kirby [1994]. Diese untersuchten von Künstlern verwendete Pigmente auf deren spektrale Empfindlichkeit. Die Herangehensweise an die Bestrahlung der Proben ist jedoch bei Saunders und Kirby eine andere als bei Aydinli. Während Aydinli zur Separation der Wellenlängenbereiche Kantenfilter benutzte und die Differenz der Farbänderung auf die gefilterten Wellenlängen bezog, benutzten Saunders und Kirby Strahlung von 70 nm Bandbreite, deren Peakwellenlänge in 50 nm Intervallen in einem Bereich von 400 bis 700 nm variierte. Genau wie bei Aydinli et al. wurde die Farbveränderung $\Delta E^*$ während der Exposition aus den gemessenen spektralen Reflektionsgraden berechnet und relativ zur Bestrahlung $H_e$ angesetzt. Die Farbänderung konnte direkt auf den transmittierten Spektralbereich bezogen werden, jedoch ist die Bestrahlungsstärke bei dieser Methode erheblich geringer. Saunders und Kirby konnten zeigen, dass rote bzw. rötliche und grüne Farben der relativen spektralen Objektempfindlichkeit folgten. Bei blauen Farben ist jedoch eine zum Teil erhebliche Abweichung zu erkennen. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse von Saunders und Kirby und Aydinli et al. zeigte eine Übereinstimmung mit der Gleichung 1.6. Durch die Abweichung der spektralen Absorption der Pigmente zur Annahme in Gleichung 1.7 sind unterschiedliche spektrale Empfindlichkeiten zu erwarten. Weiterführende Untersuchungen zur Validierung der relativen spektralen Schädigungsfunktion sind in Kapitel 1.1.1 auf Seite 8 zu finden.

### 1.2.2 Schwellenbestrahlung $H_{s,dm}$

Ein Gradmesser für die Empfindlichkeit eines Materials gegenüber optischer Strahlung ist die wirksame Schwellenbestrahlung $H_{s,dm}$ (siehe Gleichung 1.11), d. h. ab welcher Bestrahlung eine erste sichtbare Farbveränderung eintritt $\Delta E^* = 1$. Die Schwellenbestrahlung ist am Anfang der Bestrahlung sehr niedrig - bei vorgealterten Exponaten ist sie weit höher. Im Umkehrschluss heißt dies, dass die vorbelichtete Probe gegen Strahlung unempfindlicher ist, als die noch nicht bestrahlte Probe. [Fördergemeinschaft Gutes Licht, Dezember 2006] Dieser grundlegende Zusammenhang ist in Abbildung 1.3 dargestellt.

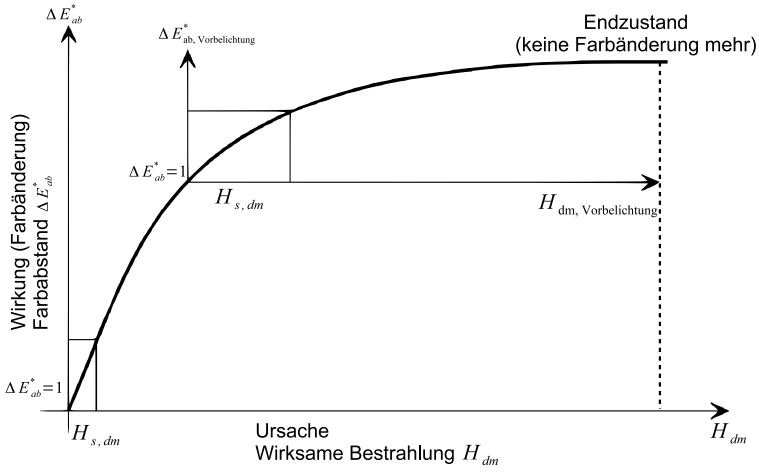



**Abbildung 1.3:** Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung objektschädigender Strahlung nach [CIE157, 2004]

Die objektschädigende Bestrahlung $H_{dm}$ wird von drei Größen bestimmt.

- Verursachende Größe ist die spektrale Bestrahlungsstärke $E_{e,\lambda}$, welche durch den relativen spektralen Strahlungsfluss $\Phi_{e,\lambda}$ der Lichtquelle, den Austritts- sowie Einfallswinkeln des Lichtes und deren Abstand zur beleuchteten Fläche gegeben ist. Bei der Verwendung von Filtern oder Gläsern müssen als zusätzlicher Faktor der zugehörige spektrale Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ und bei indirekter Beleuchtung, d. h. bei Reflexion an Flächen, der spektrale Reflexionsgrad $\rho(\lambda)$ berücksichtigt werden [Fördergemeinschaft Gutes Licht, Dezember 2006].

- Aus Sicht der ausgestellten Kunstwerke ist die von der Wellenlänge der Strahlung abhängige Schädigung durch die relative spektrale Objektempfindlichkeit $s(\lambda)_{dm,rel}$ zu berücksichtigen.

- Zur Bewertung der Bestrahlung ist die Zeit $t$ die dritte ausschlaggebende Größe.

Daraus ergeben sich folgende Zusammenhänge:

$$E_{dm} = \int_{\lambda} E_{e,\lambda} \cdot s(\lambda)_{dm,rel} d\lambda \tag{1.9}$$

$$H_{dm} = \int_{t} E_{dm}\, dt \tag{1.10}$$

$$H_{s,dm} = H_{dm}(\Delta E^*_{ab} = 1) \tag{1.11}$$

Bedeutung der Symbole:

$E_{dm}$: objektschädigende Bestrahlungsstärke

$E_{e,\lambda}$: spektrale Bestrahlungsstärke am Objekt

$s(\lambda)_{dm,rel}$: relative spektrale Objektempfindlichkeit (vgl. Kapitel 1.2.1)

$H_{dm}$: wirksame Bestrahlung

$H_{s,dm}$: Schwellenwert der wirksamen Bestrahlung (Schwellenbestrahlung) bei einem sichtbarem Farbabstand von $\Delta E^*_{ab} = 1$

$\Delta E^*_{ab}$: Farbabstand nach CIELAB (vgl. [CIE, 2004])

Wird die objektschädigende Bestrahlung als Maß der Schädigung herangezogen, gibt die Schwellenbestrahlung die maximale Expositionsdauer (nach Gleichung 1.13) bis zum eintreffen einer sichtbaren Farbveränderung an. Tabelle 1.5 zeigt die Schwellenbestrahlung in Bezug auf die, von Aydinli et al. [1983] untersuchten Proben. Vergleicht man Tabelle 1.4 mit Tabelle 1.5

**Tabelle 1.5:** Schwellenbestrahlung $H_{s,dm}$ in fünf Kategorien museumstypischen Materials nach CIE157 (2004)

| Gruppe | Proben | $H_{s,dm}$ (Wh/m$^2$) |
|---|---|---|
| a | Pergamente, Zeitungspapier | 5 |
| b | Hadernpapier | 1200 |
| c | Ölgemälde auf Leinwand | 850 |
| d | Textilien | 290 |
| e | Wasserfarben auf Hadernpapier | 175 |

stellt man fest, dass sich der Formfaktor der spektralen Objektempfindlichkeit nicht erheblich ändert. Im Gegensatz hierzu ist die Schwellenbestrahlung abhängig vom Material.

### 1.2.3 Lichtbeständigkeit

Die Lichtbeständigkeit von Pigmenten ist sehr unterschiedlich. Hersteller von Künstlerfarben vermerken die Lichtbeständigkeit meist auf den Farbtuben. Eine Liste ist in Tabelle 1.6 [Thomson, 2000]:

**Tabelle 1.6:** Einteilung der Lichtbeständigkeit von Pigmenten nach Thomson

| | |
|---|---|
| extrem lichtbeständig | Elfenbeinschwarz, Titanweiß (Rutil), Zinkweiß, Kobaltviolett, Ultramarin, Kobaltblau, Chromgrün, Malachit, Erdfarben, Neapelgelb, Bleizinngelb, Orpigment... |
| beständig | Manganblau, Preußischblau, Zinkgelb, Cadmiumgelb, Zinnober, Karminrot... |
| mäßig beständig | Verdigris (Kupferacetat), Chromgelb, Chromrot, Smalte... |
| wenig beständig | die meisten organischen Farbstoffe, Magenta... |

Die Lichtbeständigkeit der einzelnen Pigmente hängt darüber hinaus vom Bindemittel ab. So zeigt sich Smalte[5] in Öl instabil, in Wasserfarben jedoch sehr stabil. Indigo ist in Malfarben mäßig haltbar, auf Wolle jedoch sehr stabil. Eine weit größere Rolle spielt jedoch die Schichtdicke: in dünner Lasur aufgebrachte Pigmente, besitzen eine bis zu fünffach höhere Lichtsensibilität als Volltonfarben [Michalski, 1987]. Auch aus diesem Grund müssen Aquarelle als besonders lichtempfindlich eingestuft werden. Noch empfindlicher sind organische pflanzliche oder tierische Farbstoffe, was durch ihren chemischen Aufbau und den zumeist dünnen Auftrag bedingt ist.

### 1.2.4 Schädigungspotenzial und Expositionsdauer

Kennzeichnende Größe zur Bestimmung der Expositionsdauer ist das Schädigungspotenzial $P_{dm}$. Nach der Definition ist das Schädigungspotenzial das Verhältnis der objektschädigenden Bestrahlungsstärke zur Beleuchtungsstärke.

$$P_{dm} = \frac{E_{dm}}{E} = \frac{\sum\limits_{\lambda} E_{e,\lambda} \cdot \tau(\lambda) \cdot s(\lambda)_{dm,rel} \Delta\lambda}{K_m \sum\limits_{\lambda} E_{e,\lambda} \cdot \tau(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda} \qquad \left(\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{lx}} = \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{lm}}\right) \quad (1.12)$$

[5] Smalte ist ein mit Cobalt(II)-oxid gefärbtes Kaliumsilikatglas. Es ist als Vorläufer des Kobaltblau, das älteste bekannte Kobaltpigment.

Bedeutung der Symbole:

$E_{dm}$: objektschädigende Bestrahlungsstärke

$E$: Beleuchtungsstärke

$E_{e,\lambda}$: Spektrale Bestrahlungsstärke der beleuchtenden Lichtart

$\tau_\lambda$: Transmissionsgrad des verwendeten Filters; ist kein Filter vorhanden kann $\tau_\lambda = 1$ gesetzt werden

$s(\lambda)_{dm,rel}$: relative spektrale Objektempfindlichkeit (siehe auch Kapitel 1.2.1)

$V(\lambda)$: Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges

Das Schädigungspotenzial ist die entscheidende Größe zur Beschreibung der zu erwartenden und von der Beleuchtungssituation abhängigen Schädigung eines Exponats oder Materials. Aus den bekannten Größen kann die Schwellenbestrahlungsdauer $t_S$ berechnet werden. Sie ist diejenige Zeit, die ein Objekt oder Material einer Beleuchtungssituation ausgesetzt sein muss, bis die dadurch verursachten Schäden, z. B. Farbveränderungen, merklich werden. Dies ist der Fall, wenn die Schwellenbestrahlung $H_{S,dm}$ eines Materials erreicht ist. [Fördergemeinschaft Gutes Licht, Dezember 2006]

$$t_S = \frac{H_{S,dm}}{E_{dm}} = \frac{H_{S,dm}}{P_{dm} \cdot E} \tag{1.13}$$

### 1.2.5 Schutzpotenzial

Für weitere Erklärungen wird an diesem Punkt das Schutzpotenzial definiert. Im Gegenteil zum Schädigungspotenzial im Kapitel 1.2.4 gibt das Schutzpotenzial keine spektral abhängige Größe wieder, sondern beinhaltet die zeitliche Komponente. Es ist die Relation der minimal möglichen Bestrahlung zur gesamten Bestrahlung einer über der Zeit konstanten spektralen Strahlungsverteilung der Lichtquelle.

$$P_{pres} = \frac{H_{dm,min}}{H_{dm}} \leq 1 \tag{1.14}$$

Bei der gesamten Bestrahlung $H_{dm}$ handelt es sich um das Produkt der schädigend wirksamen Bestrahlungsstärke mit der Dauert der Exposition des Kunstwerkes. Ist in diesem Zeitraum eine Reduzierung der schädigend wirksamen Bestrahlungsstärke möglich, ergibt sich eine minimale Bestrahlung $H_{dm,min}$ – z. B. bei Abwesenheit des Betrachters. Die minimale Bestrahlung kann maximal so groß werden wie die gesamte Bestrahlung, womit das Schutzpotenzial mit dem maximalen Wert 1 definiert ist. Das Schutzpotenzial ist dimensionslos. Allgemein gilt der Ansatz:

$$P_{pres} = \frac{\int_0^{t_{min}} E_{dm} dt}{\int_0^{t_{ges}} E_{dm} dt} \text{ für } t_{min} \leq t_{ges} \tag{1.15}$$

Bei ausschließlicher Beleuchtung mit künstlichem Licht unveränderlicher spektraler Zusammensetzung kann die Gleichung 1.15 verkürzt werden.

$$P_{pres} = \frac{t_{min}}{t_{ges}} \tag{1.16}$$

Bei unstetigem Verlauf der minimalen Bestrahlungsstärke ist diese in Zeitintervalle zu zerlegen. Somit ergibt sich:

$$P_{pres} = \frac{\sum_{min=1}^{n} \int_{0}^{t_{min}} E_{dm} dt}{\int_{0}^{t_{ges}} E_{dm} dt} \text{ mit } \sum_{min=1}^{n} t_{min} \leq t_{ges} \tag{1.17}$$

Bedeutung der Symbole:

$P_{pres}$: Schutzpotenzial

$t_{min}$: minimale Bestrahlungsdauer

$t_{ges}$: Gesamtbestrahlungsdauer

### 1.2.6 Zulässige Beleuchtungsstärke

Die zulässige Beleuchtungsstärke ist von der Expositionsdauer, dem Schädigungspotenzial und der Schwellenbestrahlung abhängig. Aus Gleichung 1.13 ergibt sich somit:

$$E = \frac{H_{s,dm}}{P_{dm} \cdot t_S} \tag{1.18}$$

Wie bereits beschrieben, ist das Schädigungspotenzial von der spektralen Verteilung der Lichtquelle abhängig und vergleichsweise einfach zu bestimmen. Gleichung 1.18 beinhaltet zwei unbekannte Größen. Die Schwellenbestrahlung $H_{s,dm}$ ist eine objektspezifische Größe und kann ausschließlich näherungsweise experimentell bestimmt werden, da die Vorbelastung des Kunstwerkes nicht bekannt ist (vgl. Kapitel 1.2.2). Die Expositionsdauer kann in den meisten Fällen nur sehr schwer angegeben werden, da ein Kunstwerk so lange wie möglich ohne sichtbare Schädigungen ($t_S \mapsto \infty$) ausgestellt werden sollte. Demnach würde dies die Beleuchtungsstärke von Null ($E \mapsto 0$) ergeben. Einige Berechnungsbeispiele zur Beleuchtungsstärke und Expositionsdauer sind in Kapitel 1.4 nachzulesen. Eine sehr grobe Einteilung der Kunstwerke bezüglich der maximalen Beleuchtungsstärke ist in den Schriften DIN EN 16163 [2010] und Prevart GmbH [2008] enthalten. Dort werden weder Expositionsdauer noch Schädigungspotenzial der Lichtquelle berücksichtigt. Diese Einteilung sollte daher als Orientierung und nicht als Vorschrift dienen.

### 1.2.7 Mischung von Tageslicht mit künstlicher Beleuchtung

Der in Absatz 1.2.6 gezeigte Ansatz kann bei ausschließlich künstlich beleuchteten Museen und Galerien gültig sein. Jedoch bei Tageslichtmuseen, welche eine zusätzliche künstliche Beleuchtung beinhalten, erhält man als Resultat der Gesamtstrahlung die Summe beider Strahlungsarten.

$$E_{e,Ges} = E_{e,Artificial} + E_{e,Tageslicht} \tag{1.19}$$

$$E_{e,Tageslicht}(t, P) = (E_{e,S}(t) + E_{e,H}(t)) * \varepsilon(P) \tag{1.20}$$

$$E_{e,Ges}(t, P) = (E_{e,Artificial}(t) + E_{e,S}(t) + E_{e,H}(t)) * \varepsilon(P) \tag{1.21}$$

Bedeutung der Symbole:

$E_{e,Ges}$: Gesamtbestrahlungsstärke

$E_{e,Artificial}$: Bestrahlungsstärke durch künstliche Beleuchtung hervorgerufen

$E_{e,S}$: Bestrahlungsstärke der Sonne (Direktanteil)

$E_{e,H}$: Bestrahlungsstärke des klaren Himmels (Indirektanteil)

$\varepsilon(P)$: Anpassungsfaktor in Abhängigkeit zum Ort $P$

Gleichung 1.21 zeigt die spektrale, zeitliche und ortsabhängige Größe der Gesamtbestrahlungsstärke auf ein Kunstwerk. Der Unterschied zwischen Bestrahlungsstärke und der meist in Museen gemessenen Beleuchtungsstärke ist die spektrale Bewertung der Beleuchtungsstärke mit der Hellempfindlichkeit des Auges. Da nach Gleichung 1.21 die Gesamtbestrahlungsstärke zeitlichen und spektralen Schwankungen unterliegt, ist eine genaue Bestimmung des Schädigungspotenzials $P_{dm}$ über spektrale Messungen nicht möglich. Lediglich über eine integrale Messmethode zu festen zeitlichen Abständen kann das Schädigungspotenzial bestimmt werden. Genauere Betrachtungen der Fehlbewertung bei Mischlicht werden im Kapitel 2.3 vorgenommen.

### 1.2.8 Bewertung der Beleuchtung in Tageslichtmuseen

Zur Bewertung der Tageslichtbeleuchtung in Museumsräumen sind tageslichttechnische Messungen an einem typischen klaren Tag mit Sonnenschutz und an einem vollkommen bedeckten Tag ohne Sonnenschutz durchzuführen, um nachvollziehbare Größen zu erhalten. Für die Berechnungen der unten aufgeführten lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kennzahlen sind spektrale und bidirektionale Messdaten des aktuellen Sonnenschutzes nötig. Dabei ist der spektrale Transmissionsgrad und der spektrale Reflexionsgrad des Lichtschutzes im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 2500 nm auszuwerten. Diese Kennzahlen sind [Herzberg, Aydinli & Kaase, 2009]:

- Lichttransmissionsgrad für Normlichtart A $\tau(A)$
- Lichtreflexionsgrad für Normlichtart A $\rho(A)$
- Lichttransmissionsgrad für Normlichtart $D_{65}$ $\tau(D_{65})$
- Lichtreflexionsgrad für Normlichtart $D_{65}$ $\rho(D_{65})$
- Transmissionsgrad für Globalstrahlung $\tau_{e,Glo}$
- Reflexionsgrad für Globalstrahlung $\rho_{e,Glo}$
- Sekundärer Emissionsgrad nach innen $q_i$
- Gesamtenergiedurchlassgrad $g$
- Farbort $(x, y)$ sowie $(u, v)$ für Referenzstrahlungsfunktion $D_{65}$
- Ähnlichste Farbtemperatur $T_C/K$ für Referenzstrahlungsfunktion $D_{65}$
- Allgemeiner Farbwiedergabeindex $R_a$ für Referenzstrahlungsfunktion $D_{65}$

Zusätzlich sollten die Streueigenschaften des Sonnenschutzes bidirektional bestimmt werden, um die Beleuchtungsstärkeverteilung auf den Oberflächen bestimmen zu können.

Zur tages- und jahreszeitlichen Bewertung der Tageslichtbeleuchtung kann nach DIN 4710 „*Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumlufttechnischen Anlagen in Deutschland*“ und DIN 5034 „*Tageslicht in Innenräumen*“ der Jahresgang der maximal möglichen Beleuchtungsstärke berechnet werden. Aus dem Jahresgang kann die größtmögliche Beleuchtungsstärke im Jahr direkt ermittelt werden. Da die maximal möglichen Werte der Beleuchtungsstärke jedoch sehr selten vorkommen, liegt es nahe die maximalen Werte der Beleuchtungsstärke bei mittlerem Himmelszustand mit einer mittleren monatlichen atmosphärischen Trübung nach DIN 5034-2 zusätzlich zu berechnen. Zur Bewertung der Tageslichtbeleuchtung bezüglich der Objektschädigung ist außer der maximalen schädigenden Bestrahlungsstärke auch die schädigend wirksame Bestrahlung und die relative jährliche Nutzungsdauer (bei der die künstliche Beleuchtung ausgeschaltet werden kann) heranzuziehen. Zu beachten sind zusätzlich geografische und geologische Gegebenheiten. Der Tageslichteintrag in einen Raum kann höher sein, als die erwarteten Rechenwerte aufzeigen. Durch ungewollte Reflexionen außerhalb der Gebäude kann zusätzlich Tageslicht in die Räume eindringen. Eine Messung im Bode Museum in Berlin zeigte einen 1,43-fachen Eintrag als erwartet. Dies lag an der Ausrichtung des Gebäudes, da vor den Räumen Richtung Süd-West ein Kanal verläuft wie in Abbildung 1.4 zu sehen ist. Dieser Eintrag kommt durch die Reflexion des Tageslichtes an der Oberfläche des Wassers zustande.

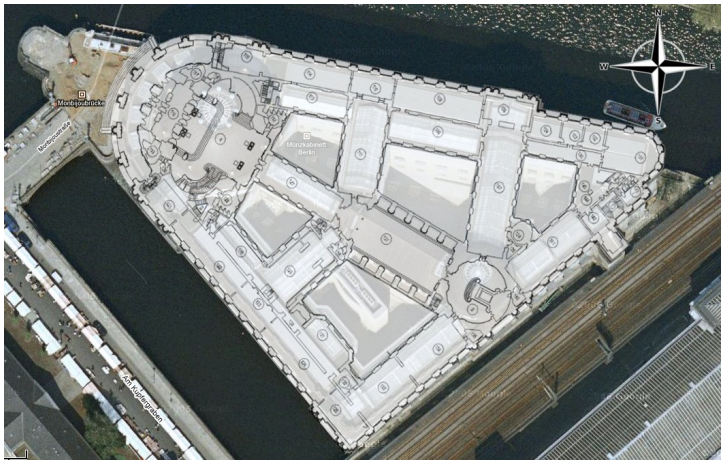


**Abbildung 1.4:** Lage und Grundriss des Bode Museums in Berlin

**Abbildung 1.5:** Alpines Museum in München (www.alpenverein.de; 2009)

Auch das Alpine Museum in München liegt an einem solchen Kanal (Abbildung 1.5). Die Auswirkungen sind hier nicht so gravierend, da die Fassade in Nord-West Richtung zeigt.

Aus den Daten der Bestandsaufnahme können verschiedene Szenarien und Kombinationen aus statischen und dynamischen Sonnenschutzsystemen in Hinblick auf die Nutzungszeiten berechnet werden. Einige Lichtschutzmaßnahmen sind im nachfolgenden Abschnitt vorgestellt.

## 1.3 Verwendete Verfahren zur Strahlungsminimierung in Museen

In Abhängigkeit der zur Beleuchtung verwendeten Lichtart gibt es unterschiedliche Methoden, die Strahlungsbelastung am Kunstwerk gering zu halten. Eine wirksame Methode zur Kontrolle der Strahlungsbelastung durch Tageslicht – bei gleichzeitiger Verringerung des Wärmeeintrags in die Ausstellungsräume – ist der Einsatz von außenliegenden geregelten Lamellensystemen. Bei künstlicher Beleuchtung sollte die Lichtquelle spektralradiometrisch untersucht werden. Liegt Strahlung im UV-Bereich vor, ist grundsätzlich ein UV-Absorbtionsfilter einzusetzen.

### 1.3.1 „Lichtschutz“ an der Fassade

Bei Tageslichtmuseen stellt die Strahlung des Tageslichtes in den Hauptnutzungszeiten den größten Anteil an der Gesamtstrahlung im Ausstellungsraum dar. Folglich muss diese Strahlung vor dem Eindringen in die Gebäude kontrollieren und geregelt werden. *Tageslichtlenksysteme* werden bereits von diversen Herstellern angeboten. Der Vorteil außenliegender Lichtschutzvorrichtungen liegt nicht nur in der Verringerung der schädigenden Strahlung, sondern auch in der gleichzeitigen Reduktion der Wärmestrahlung in Innenräumen (z. B. durch überkragende Dächer; Museum Beyeler, siehe Abbildung 1.6), vorgesetzte Sprossengitter oder Lochbleche. Dabei kann zwischen einer Vielzahl von Materialien, Farben und Lochungen gewählt werden. Standardlochungen sind Rund-, Quadrat-, Lang- oder die Zierlochungen eines vorgegebenen Musters. Bei vielen neuen Museen sind solche Elemente gestalterisch eingesetzt [Waller, 11.08.2009]. Der Neubau des Beyerler Museums ermöglichte den Konservatoren in Zusammenarbeit mit Lichtplanern ein Konzept für ein Tageslichtmuseum zu erarbeiten ohne die Objekte unnötig durch optische Strahlung zu schädigen. Für historische Gebäude eignen sich feine Lamellengitter (z. B. Centraal Museum Utrecht, siehe Abbildung 1.7), die zwar das schräg einfallende Licht vermindern, die horizontale Durchsicht jedoch weitestgehend erhalten. Markisen, Rollläden und Jalousien lassen sich durch Lichtsensoren je nach Lichteinfall steuern.

**Abbildung 1.6:** Lichtschutz durch überkragende Dächer (Museum Beyeler; www.beyeler.com; 2009)

Für eine über den Tag gleichmäßige Beleuchtungsstärke im Innenraum ist eine Tageslichtregelung wichtig. Reicht das Tageslichtangebot zur allgemeinen Beleuchtung nicht aus, kann die künstliche Beleuchtung herangezogen werden. Steht genügend Tageslicht zur Verfügung, sollte die künstliche Beleuchtung ausgeschaltet sein, um eine zu hohe Belastung der Kunstwerke zu vermeiden.

Ein Beispiel für den Lichtschutz in einem modernen Gebäude zeigt Abbildung 1.8 in Form eines rotierenden Sonnenschutzes im Audi-Museum Ingolstadt. Die Blende ist in der Weise konzipiert, dass sie je nach Sonnenazimut um das Gebäude herum fährt. Die horizontale Ausdehnung der Blende bestimmt den Lichteintrag des restlichen Himmels. Allerdings lässt sich diese Blende bei bedecktem Himmelszustand und zu Zeiten, an denen sie nicht benötigt wird, nicht öffnen.

Aktive Tageslichtlenksysteme kennzeichnen sich durch die hohe Flexibilität bei der Lenkung des Tageslichtes in die Innenräume. Dabei wird nicht nur die Lichtmenge geregelt, sondern auch die Lichtrichtung. Damit ist es möglich, direktes Sonnenlicht von den Exponaten fern zu halten, indem ein

a.) b.)

**Abbildung 1.7:** Central Museum Utrecht a.) Markisen b.) Lamellengitter (www.centralmuseum.nl; 2009)

**Abbildung 1.8:** Lichtschutz durch verfahrbare Blenden (Audi Museum; google earth; 2009)

a.) b.)

**Abbildung 1.9:** Tageslichtlenksystem a.) Außenansicht b.) Innenansicht (Fa. Warema; www.warema.de; 2009)

Teil des Lichtes auf die Decke[6] des Ausstellungsraumes geleitet wird. Abbildung 1.9 zeig ein solches geteiltes Tageslichtlenksystem. Die Grundstellung der Lamellen sowie das Verhältnis der Anzahl der oberen und unteren Lamellen sind variabel. Zudem kann die Stellung der Lamellen über ein Regelungssystem an die tatsächlichen Verhältnisse angepasst werden. In den Wintermonaten, in denen das System nicht benötigt wird, können die Lamellen beiseite gefahren werden, um ausreichend Tageslicht zur Verfügung zu stellen.

Bei der Optimierung der Sonnenschutzsysteme sind die Einflussfaktoren geografische Breite und Ausrichtung der Räume des Museums zu beachten. Weiterführende Informationen zu Lichtsteuerungssystemen sind in [Merz, Hansemann & Hübner, 2007] zu finden.

### 1.3.2 „Lichtschutz“ in Innenräumen

In Innenräumen können ebenfalls Schutzelemente angebracht werden. Dort ist die Vermeidung der Wärmestrahlung weniger effektiv wie bei außenliegendem Tageslichtlenksystemen. Grundsätzlich kann man die Techniken in zwei Arten den *Schutz durch Streuwirkung, Umlenkung und Abschwächung* und den *Schutz durch Filterung schädlicher Strahlungsanteile* unterteilen.

Zum Schutz durch Streuwirkung und Abschwächung zählen unter Anderem die Maßnahmen:

- Jalousien
- Vorhänge
- Streufolien
- Thermotrope Verglasungen
- Getöntes Glas

Jalousien werden häufig direkt vor der Verglasung oder zwischen Doppelverglasungen angebracht. Von Vorteil ist, dass sie zwischen den Scheiben weniger schnell verschmutzen. Eine nachträgliche Reparatur der innen liegenden Lamellen ist dagegen erheblich aufwändiger.

Im Raum selbst lassen sich ebenfalls Jalousien, Vertikaljalousien, Rollos oder Vorhänge anbringen, wobei den Gestaltungsmöglichkeiten kaum Grenzen gesetzt sind. In Räumen mit Wechselausstellungen bewähren sich zweistufige Verdunklungsverfahren, welche den Raum entweder völlig oder teilweise verdunkeln (z. B. übereinander ein Verdunklungsrollo und ein helles Lichtstreurollo). Infrarotstrahlung lässt sich nur mit Hilfe metallbedampfter Vorhänge wieder nach außen leiten, da nur diese in der Lage sind, die Infrarotstrahlung mit derselben Wellenlänge nach außen zu reflektieren. Im

[6] sofern sich dort keine Kunstwerke befinden

Raum befindliche Materialien absorbieren zunächst die Strahlung und geben sie dann in Form von längerwelliger Strahlung wieder ab. Für diese längerwellige Strahlung ist Fensterglas (Floatglas) undurchlässig, sodass die Wärme nicht mehr nach außen dringen kann (Treibhauseffekt). Die effizientesten Wärmeschutz-Vorhänge besitzen auf ihrer Rückseite eine metallische Beschichtung, die von außen gesehen unschön wirken oder Reflexblendungen verursachen kann.

Spezielle Vorhangstoffe absorbieren in besonderem Maße UV-Strahlung. Die Absorption der UV-Strahlung muss nicht zwingend zur Erhöhung der Temperatur im Innenraum führen, da der Anteil der UV-Strahlung gegenüber der IR-Strahlung um ein Vielfaches kleiner ist. Je nachdem welche Stoffe für die Vorhänge verwendet werden, kann die Lichtfarbe durch Vorhänge gesteuert werden.

Schutz- bzw. Streufolien werden normalerweise von innen auf die Fensterscheiben aufgeklebt. Die meisten Schutzfilme sind selbstklebend und eliminieren zusätzlich einen hohen Anteil des UV-A im Bereich 300 - 380 nm. Da bei diesem Folientyp die UV-Absorber sowohl in den Klebeschichten als auch in den PET-Schichten enthalten sind, hält die Schutzwirkung ca. 10 - 12 Jahre an. Thermotrope Verglasungen, die bei niedrigen Temperaturen Sonnenlicht und -wärme durchlassen, aber bei höheren Temperaturen (>35°C) durch Streuung bis zu 87 % reflektieren, können Gebäude vor Überhitzung schützen und wirken als Blendschutz. In der übrigen Jahreszeit bleibt die Sicht nach außen frei. Neben den thermotropen Verglasungen sind photoelektrochrome Fenster und gasochrome Fenster in der Erprobung, die sich reversibel von einem transparenten in einen blauen Zustand mit geringer Transmission schalten lassen. Auch Doppelfenster lassen sich aus neutralgrau getöntem Glas fertigen. Dies verminderte den Lichteinfall um ca. 80 % ohne den psychologisch wichtigen Durchblick nach außen zu verhindern [Waller, 11.08.2009].

Zum Schutz durch Filterung schädlicher Strahlungsanteile zählen unter anderem:

- UV-Schutzfolien
- UV-Schutzlack
- UV-Schutzglas

Filtermaßnahmen sind meist gerichtet transmittierend. Heutige UV-Schutz-Folientypen bestehen aus Polyester oder PET-Folie, die mit PS- oder Acrylklebern versehen sind. Von Herstellerseite werden Garantien von 10 bis 20 Jahren gegeben. Teilweise ist ein Anbringen an der bewitterten Außenseite möglich. Alte Folientypen neigten zur Blasenbildung. Beim Nachrüsten von Fensterscheiben wird die Folie auf der Innenseite mit ca. 4 mm Abstand zum Rahmen aufgeklebt. Werden die UV-und Spiegelfolien schon bei der

Isolierglasproduktion im Hohlraum vollflächig aufgeklebt, erhöht sich die Lebenserwartung und übertrifft oft die Lebenserwartung von Isoliergläsern (ca. 20 Jahre). Nur bei dunklen Graufolien kommt es eventuell zu einer massiven Erwärmung des Glases und zu einem schnelleren Altern des Silikons, mit dem die Gläser zusammengeklebt sind. Das Zerspringen durch das Aufkleben der Folien soll heute nicht mehr vorkommen. Auf unebenen alten Gläsern oder Gussgläsern kann nur ein UV-Schutzlack verwendet werden. Er hält nur 2-5 Jahre, ist schlecht zu entfernen und mindert die UV-Strahlung nur um ca. 80 %.

### 1.3.3 UV- und IR-Verminderung an der Lampe

Folienschläuche um röhrenförmige Leuchtstofflampen können die Lebensdauer der Lampen, aufgrund des Hitzestaus je nach Umgebungstemperatur, bis auf die Hälfte reduzieren. Besser sind fest mit den Röhren verbundene Folien wie bei den Osram UV-und Splitterschutzröhren. Manche Museen schneiden sich aus UV-Filterfolie Stücke zurecht und befestigen sie mit Kabelbindern o.ä. um die röhrenförmigen Leuchtstofflampen. Nicht alle Filterfolien bzw. UV-Absorber vertragen auf Dauer die hohen Temperaturen im Kontakt mit den Leuchtstofflampen. Ein Einsatz an der Leuchte ist daher vorzuziehen. Bei allen Folienschläuchen etc. besteht die Gefahr, dass sie beim Wechseln der Leuchtstofflampen weggeworfen oder aus Unachtsamkeit bei der neuen Lampe nicht wieder angebracht werden. Vorzuziehen sind daher UV-Filter in den Leuchten (Abschnitt 1.3.4), die beim Wechseln der Lampen nicht herausgenommen werden müssen. Die Funktionstüchtigkeit der Filter sollte in jedem Fall von Zeit zu Zeit nachgemessen werden. Eine Verringerung des IR-Anteils einer Glühlampe kann durch den Einsatz von IRC-Halogenglühlampen oder Kaltlichtreflektorlampen bewirkt werden.

### 1.3.4 UV- und IR-Verminderung in der Leuchte

Die Absorption der schädigenden Strahlung in der Leuchte bietet viele Vorteile, zumal die Temperatur, die Strahldichte und damit die aufgenommene Strahlungsenergie pro Filterfläche geringer im Vergleich zur Lampe ist. Folien und Schutzlacke sind wesentlich langlebiger. Zusätzlich kann eine Streuwirkung mit in die Filter eingebaut werden, um Licht einer gewünschten Verteilung zu erzeugen. Die Schutzmaßnahmen lassen sich in folgende Kategorien aufteilen:

- Filter (definierter Spektralbereiche)
- streuende Vorsätze
- lichtlenkende Vorsätze

Eine Kombination aus mehreren Schutzmaßnahmen ist möglich. Zu beachten ist, dass die Schutzfolien, -gläser und -lacke nicht in Bereichen der Leuchte angebracht werden, bei denen hohe Strahldichten vorherrschen. Dies kann z. B. der Fall sein, wenn sich innerhalb der Leuchte ein Hohlspiegel befindet und der Brennpunkt sich direkt auf dem Schutz befindet. Dort können wesentlich höhere Temperaturen als bei der UV- und IR-Verminderung an der Lampe auftreten, was zu einer Zerstörung des Schutzes führen kann.

### 1.3.5 UV-Schutz am Kunstwerk

Sind in einem Ausstellungsraum Kunstwerke unterschiedlicher Schutzklassen ausgestellt und lassen sich die Beleuchtungssituationen nicht dementsprechend anpassen, kann das Kunstwerk auch direkt vor schädlicher Strahlung geschützt werden. Wirksame Maßnahmen sind:

- Vitrinen
- Verglasungen
- Vorhänge

Diese Schutzmaßnahmen sind als abgeschlossene Systeme zu betrachten in denen eigene Temperatur- und Luftfeuchteverteilungen vorliegen können. Zusätzlich treten an den Grenzschichten der Verglasung immer Reflexionen auf, welche das freie Betrachten des Kunstwerkes stören, im schlimmsten Fall tritt sogar Blendung auf. Vorhänge vor Gemälden oder Tücher über Vitrinen sind eine effiziente, doch eher kuriose Art des Lichtschutzes. Das „Entdecken“ der Kunstwerke kann jedoch auch seinen Reiz haben.

### 1.3.6 Weitere Maßnahmen

Kunstwerke müssen nur dann ausreichend beleuchtet werden, wenn ein Betrachter vorhanden ist. In Zeiten ohne Betrachtung kann theoretisch die Beleuchtung komplett herunter gefahren werden. Aufschluss über die Höhe des Schutzes durch Verändern der Beleuchtung während der Ausstellung gibt das Schutzpotenzial (Kapitel 1.2.5). Bei Ausstellungsräumen mit hohem Schutzpotenzial und Ausschluss des Tageslichtes bzw. Möglichkeiten zur Verdunkelung oder Abschwächung des Tageslichtes kann die schädigende Bestrahlung erheblich vermindert und damit die Ausstellungszeit bis zum Eintreten erster farblicher Veränderungen verlängert werden. Intelligente Lichtsteuerungssysteme sind in der Lage, mittels Informationsaustausch zwischen Sensorik und Aktorik diese Aufgabe zu erfüllen.

## 1.4 Berechnungsbeispiele

In Tabelle 1.7 ist eine Gegenüberstellung verschiedener konservatorischer Maßnahmen nach [Fördergemeinschaft Gutes Licht, Dezember 2006] zu sehen. Betrachtet werden gezielte Veränderungen des Schädigungspotenzials und der Beleuchtungsstärke am Objekt und deren Auswirkungen auf die Expositionsdauer.

**Tabelle 1.7:** Gegenüberstellung verschiedener konservatorischer Maßnahmen am Beispiel der Glühlampe nach [Fördergemeinschaft Gutes Licht, Dezember 2006]

| **Schwellenbestrahlung** $H_{s,dm} =$ 290Wh/m$^2$ | **Schädigungspotenzial** $P_{dm}$(mW/m$^2 \cdot$ lx) | **Expositionsdauer** $t_s$(h) bei 200 lx [1] | $t_s$(h) bei 50 lx [1] |
|---|---|---|---|
| Glühlampe 2500 K ungedimmt | 0,209 | 6.938 | 27.752 |
| Glühlampe + Filter UVILEX 390 | 0,177 | 8.192 | 32.768 |
| Glühlampe + dichroitischer Filter | 0,165 | 8.788 | 35.152 |
| gedimmte Glühlampe | 0,181 | 8.011 | 32.044 |
| PAR38 (Pressglas) ungedimmt | 0,185 | 7.838 | 31.352 |
| Glühlampe + Glas 3 mm | 0,220 | 6.591 | 26.364 |
| Glühlampe + MICROGUARD Protect | 0,196 | 7.397 | 29.588 |

[1] Die angegebenen Lux-Werte sind nur im Zusammenhang mit diesen Strahlungsfunktionen der Lampen gültig.

Ausgangspunkt für diese Berechnungen ist eine Schwellenbestrahlung von $H_{s,dm} = 290$ Wh/m$^2$. Wie bereits aus Gleichung 1.13 in Kapitel 1.2.4 zu erwarten war, bringt die Vierteilung der Beleuchtungsstärke eine vierfache schädigungsfreie Ausstellungszeit. Bei Verwendung von Pressglas-Glühlampen (PAR38) statt normaler Glühlampen kann das Kunstwerk länger ohne Gefahr durch Schädigung gezeigt werden. Bei gefilterten Glühlampen wird gegenüber ungefilterten Glühlampen die Schwellenbestrahlungsdauer um ca. 26 % verlängert.

Aus den Beispielen sind folgende Maßnahmen zum Schutz von Ausstellungsstücken zu erkennen:

- spektrale Filterung mit hochwertigen, speziell angepassten Filtern
- Dimmen von Glühlampen und Halogen-Glühlampen
- bevorzugter Einsatz von Pressglas-Glühlampen statt normaler Glühlampen

Eine sinnvolle Kombination resultierend aus den Berechnungsbeispielen ist der Einsatz einer gedimmten PAR38 Glühlampe mit dichroitischem Filter. Gegenüber einer ungedimmten Glühlampe bei 2500 K und unveränderter Beleuchtungsstärke von 50 lx kann die Expositionsdauer um ca. 14.500 h verlängert werden. Bei Temperaturstrahlern ist zusätzlich der hohe Anteil infraroter Strahlung abzuschwächen. Dafür können entweder IR-Filter oder sog. Kaltlichtreflektoren herangezogen werden.

**Tabelle 1.8:** Konservatorische Maßnahmen am Beispiel einer ausgewählten LED

| **Schwellenbestrahlung** $H_{s,dm} = 290(\mathrm{Wh/m^2})$ | **Schädigungspotenzial** $P_{dm}(\mathrm{mW/m^2 \cdot lx})$ | **Expositionsdauer** $t_s$(h) bei 200 lx [1] | $t_s$(h) bei 50 lx [1] |
|---|---|---|---|
| Selux CITYLIGHTS 70 LED | 0,180 | 8.055 | 32.222 |

[1] Die angegebenen Lux-Werte sind nur im Zusammenhang mit diesen Strahlungsfunktionen der Lampen gültig.

Tabelle 1.8 zeigt ein geringes Schädigungspotenzial bei der aufgeführten LED. Bei LEDs ist das Spektrum und die Lichtfarbe direkt von der Technologie und der Fertigung abhängig. Bei allen LED-Typen ist die IR-Strahlung und bei den meisten auch die UV-Strahlung zu vernachlässigen.

# Kapitel 2

# Analyse derzeit verwendeter Maßzahlen zur Erfassung der Beleuchtungssituation im Museum

Bereits 1997 zeigte Padfield, dass die spektralen Funktionen der Empfindlichkeit des Auges und der objektschädigenden Bestrahlungsstärke nur eine sehr kleine Schnittmenge aufwiesen. Daher steht jeder Kurator oder Direktor bei der Bestimmung der Beleuchtungsstärke eines Kunstwerkes vor dem Problem, die Schädigung zu minimieren und gleichzeitig die Farbwiedergabe zu optimieren. Im Folgenden werden die Vorgaben der Normung und deren Messverfahren überprüft und rechnerische sowie technische Modelle vorgestellt.

## 2.1 Bestehende Normen und Richtlinien

Für die Planung und Bewertung der Beleuchtung in Museen und Galerien existieren diverse Normen und Richtlinien. Da es sich bei Ausstellungsräumen im weitesten Sinne um Innenräume handelt, können zusätzlich Normen aus der Allgemeinbeleuchtung und Richtlinien zur Energieeffizienz herangezogen werden. Diese Vorschriften lassen sich im Wesentlichen in folgende Gruppen unterteilen:

- Normen des Erhalts des kulturellen Erbes
- Normen der Allgemeinbeleuchtung
- Vorschriften zur Messung und Bewertung der Beleuchtung

Ergänzt werden diese Normen und Richtlinien durch konservatorische Maßnahmen und Vorgaben.

**Normen des Erhalts des kulturellen Erbes**

Die DIN EN 15898:2009 „Allgemeine Begriffe zur Erhaltung des kulturellen Erbes“ liefert einführende Begriffsdefinitionen zur Erhalt des kulturellen Erbes. Die Norm DIN EN 16163:2010 „Beleuchtung von Ausstellungen des kulturellen Erbes“ ist der Teil dieser umfangreichen Normenreihe, welcher die Wirkung des Lichtes betrachtet. Neben „Regeln visueller Ergonomie für Ausstellungsbeleuchtung“ und „Eigenschaften von Lichtquellen“ werden auch „Durch optische Strahlungen verursachte Schäden an Kulturgut“ beschrieben. Zum Thema „UV-Schutz“ wird angegeben:

> *„Es gibt verschiedene Verfahren zum Ausschluss der UV-Strahlung. Für neue Gebäude ist laminiertes Glas eine Lösung, für alte Gebäude sind UV-Schutzfolien und UV-Schutzharze (Lacke) für den Schutz vor Tageslicht erhältlich. Für elektrische Beleuchtung sind UV-freie Lichtquellen und verschiedene Arten von UV-Filtern erhältlich - aus Kunststoff für Leuchtstofflampen und gläserne für andere Lichtquellen, insbesondere Halogenmetalldampflampen (HMI).“* DIN EN 16163:2010

Auf die unterschiedliche Wirkung der UV-Spektralbereiche wird nicht näher eingegangen. Ebenfalls fehlt eine Bewertung des, an den UV-Bereich angrenzenden, sichtbaren Spektralbereiches.

Weitere Normen dieser Reihe sind DIN EN 15759:2008 „Spezifikation und Kontrolle des Raumklimas“ und DIN EN 15757:2008 „Vorgaben für Temperatur und relative Feuchte zur Reduzierung von klimabedingter mechanischer Beschädigung in organischen hygroskopischen Materialien“ befassen sich mit den Grenzwerten und Verfahren zum Erhalts des kulturellen Erbes. DIN EN 15946:2009 „Verpackungsmethoden“ gibt Empfehlungen und listet Anforderungen an die Verpackung von Kulturerbe beim Transport auf. Die Folgedokumente beschreiben lediglich die Mess- und Prüfmethoden bezogen auf die Temperatur und Luftfeuchte, sowie die Messung und Protokollierung farblicher Veränderungen.

**Normen der Allgemeinbeleuchtung**

Für die Beleuchtung können mehrere DIN-Normen herangezogen werden. Die Normen DIN 5035:2006 „Beleuchtung mit künstlichem Licht“ und DIN 5034:1999-2007 „Tageslicht in Innenräumen“ liefern eine grundlegende Übersicht und geben eine erste Orientierung für die Lichtplanung. In gewissen Grenzen, jedoch nicht in jedem Fall, kann die DIN EN 12464:2011 „Beleuchtung von Arbeitsstätten“ herangezogen werden, da die Sehaufgaben zur Durchführung spezieller Arbeitsschritte mit dem Sehaufgaben beim Betrachten eines Kunstwerkes bzw. Kulturgutes weitestgehend Parallelen aufweisen. In dieser Norm ist die Tabelle „Verkehrszonen und allgemeine Bereiche innerhalb von Gebäuden“ zu finden. Es werden für den jeweiligen

Anwendungsfall die mittlere Beleuchtungsstärke und die Farbwiedergabe angegeben. Für den Bereich der Museen fehlen diese Angaben. Es ist lediglich ein Verweis enthalten:

> *„Die Beleuchtung wird hauptsächlich von den Ausstellungsanforderungen bestimmt.“*DIN EN 12464:2011

**Vorschriften zur Messung und Bewertung der Beleuchtung**

Zur Überprüfung der beleuchtungstechnischen Vorgaben und Grenzwerte können DIN EN 13032:2012 „Licht und Beleuchtung. Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten“ bzw. die nationale Norm DIN 5035-6:2006 „Beleuchtung mit künstlichem Licht - Messung und Bewertung“ herangezogen werden. Die Messung strahlungsphysikalischer Größen wird in DIN 5030-3:1984 „Spektrale Strahlungsmessung“ beschrieben. Wie bereits erwähnt, beziehen sich diese Normen nur auf die allgemeine photometrische bzw. radiometrische Messung.

**Konservatorische Maßnahmen und Vorgaben**

Die „Butterworth Series on Conservation in the Arts, Archaeology and Architecture“ [Thomson, 2000] empfiehlt, seit der ersten Auflage 1978, die Reduzierung der Beleuchtungsstärke am Objekt. Hierbei wird sich auf folgende Institutionen bezogen:

- U.K. Illuminating Engineering Society
  [Illuminating Engineering Society, 1970]
- French National Committee of ICOM
  [ICOM & Chatelain, 1971]
- International Centre of Conservation in Rome
  [International Center for Conservation, 1975]
- U.S.S.R. Ministry of Culture [Crollau & Knoring, 1975]
- Canadian Conservation Institute [Lafontaine & MacLeod, 1976]

Es wurden vier Beleuchtungsstärkeniveaus bezüglich der Lichtempfindlichkeit von Objekten festgelegt. Tabelle 2.1 zeigt die Einteilung der Beleuchtungsstärken.

**Tabelle 2.1:** Vorgeschlagene maximale Beleuchtungsstärkeniveaus

| Ausstellungsobjekte | maximale Beleuchtungsstärke (lx) |
|---|---|
| Restaurationen, Technische Ausstellungen, Photographien | 1000 |
| nicht lichtempfindliche Objekte (z. B. Metall, Stein, Keramik, Juwelen) | 300 |
| Öl und Tempera Gemälde, Leder, Knochen, Elfenbein | 150 |
| sensitive Objekte (z. B. Textilien, Wasserfarben, ...) | 50 |

Die Prevart GmbH beschreibt 2008 in der Reihe „Konzepte für die Kulturgütererhaltung“ im Band „Grundlagen für die Lichtplanung in Museen“ folgende Grenzwerte:

- sehr heikle Objekte: 50-80 lx
- heikle Objekte: 100-150 lx
- weniger empfindliche Objekte: 150-300 lx
- max. UV-Einstrahlung 25 $mW/m^2$

Darüber hinausgehend liefert die Fördergemeinschaft Gutes Licht [Dezember 2006] eine Erklärung zur „Strahlung und ihr Schädigungspotenzial“. Beide Quellen geben Hinweise auf die Komplexität der Messung und Bewertung der Beleuchtung in Museen und Galerien.

## 2.2 Bestehende Messverfahren

Zum Erhalt des kulturellen Erbes ist eine Berücksichtigung bei der Planung der Beleuchtung sowie eine regelmäßige Kontrolle der schädigenden Strahlung notwendig. Darüber hinaus sind raum- und klimatechnische Daten zu erfassen bzw. gegebene Grenzwerte einzuhalten.

Die Messung der Beleuchtungsstärke am Objekt (z. B. vertikale Beleuchtungsstärke bei Gemälden) ist allgemein praktiziertes Mittel zur Kontrolle der optischen Strahlung. Für die Grenzwerte der Beleuchtungsstärke gibt es nur sehr grobe Unterteilungen (vergleiche Abschnitt 2.1). Ein weiteres praktiziertes Mittel zur Messung der Schädigung eines Kunstwerkes ist der „Blue Wool Standard“. Im Rahmen des EU geförderten Programms „LiDo“[1] wurde der „LightCheck“ entwickelt. Dieser umfasst unterschiedlich

[1] http://www.echn.net/conservation/lido/lidonews.aspx; August 2009

blaue Streifen, die im gleichen Maß wie das Exponat, der Strahlung ausgesetzt werden. Dessen Farbveränderung soll Aufschluss über die Schädigung geben. DIN EN 15886 „Prüfmethoden - Farbmessung von matten Oberflächen“ beschreibt die Messung der Oberflächenfarbe eines Kunstwerkes. Die Ergebnisse können mit früheren Messungen verglichen und der Farbabstand als Maß der Schädigung berechnet werden. Es wird jedoch weder die objektschädigende Bestrahlungsstärke gemessen, noch gibt es vorgeschriebene Zeitintervalle, in denen diese Messwerte überprüft werden.

## 2.3 Spektrale Fehlbewertung bei der Messung der Beleuchtungstärke im Museum

Bezieht man die Beleuchtungsstärke $E$ auf die wirksame Bestrahlungsstärke $E_{dm}$, nach CIE157 aus Abschnitt 1.2.1, unter Berücksichtigung unterschiedlicher Tageslichtphasen, so ergibt sich die Abweichung der photometrischen Größen zu realen wirksamen radiometrischen Größen. Um den Fehlerfaktor $\gamma_f$ zu bestimmen, werden vergleichbare Strahlungsfunktionen benötigt. Daher wird die Beleuchtungsstärke zur Normierung der Strahlungsfunktionen herangezogen. Es entsteht:

$$\gamma_f = P_{dm}^{-1} = \left.\frac{E}{E_{dm}}\right|_{E=1\ \mathrm{lx}} \tag{2.1}$$

Bei genauerer Betrachtung dieses Verhältnisses ergibt sich:

$$E = K_m \cdot \int_{\lambda} V(\lambda) \cdot E_{e,\lambda} \cdot d\lambda = 1\ \mathrm{lx} \tag{2.2}$$

$$E_{dm} = \int_{\lambda} s_{dm,rel}(\lambda) \cdot E_{e,\lambda} \cdot d\lambda \tag{2.3}$$

In Tabelle 2.2 sind die einzelnen Werte $\gamma_f$ für verschiedene Tageslichtspektren, das Spektrum einer Leuchtstofflampe mit einer Farbtemperatur $T_{cp} = 6400\ K$ und die Normlichtart A dargestellt. Daraus ist deutlich zu erkennen, dass die ausgewiesenen Werte der Beleuchtungsstärke in einer Spannweite von 1,1 bis zu 3,9 mal größer sind, als die Werte der wirksamen Bestrahlungsstärke. Demzufolge kann kein direkter Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke und wirksamer Bestrahlungsstärke gegeben werden. Die Werte für Leuchtstofflampe und LED werden nur beispielhaft für ein gemessenes Spektrum herangezogen. Dies führt zu einer maximalen Abweichung der Messwerte von ±363%.

Die Betrachtung der gleichen Verhältnisse unter Berücksichtigung von Mischlicht mit einem prozentualen Anteil künstlicher Beleuchtung sind in Tabelle 2.3 und Abbildung 2.1 zu sehen.

**Tabelle 2.2:** Bezug der Beleuchtungsstärke auf die wirksame Bestrahlungsstärke unterschiedlicher Tageslichtphasen ($D_{45}$ bis $D_{75}$, einer Leuchtstofflampe (LL), einer LED und der Normlichtart A (NLA))

| | $D_{45}$ | $D_{55}$ | $D_{65}$ | $D_{75}$ | LL | LED[1] | NLA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\gamma_f$ [lm/mW] | 2,04 | 1,60 | 1,27 | 1,06 | 2,51 | 3,85 | 2,69 |
| | | | | | | | $E$ = konstant = 1 lx |

[1] Selux; CITYLIGHTS 70 LED Pendel

Es berechnet sich die Mischlichtart $E_{e,lambda}$ aus den spektralen Bestrahlungsstärken der Einzellichtarten:

$$E_{e,\lambda} = (1 - x) \cdot E_{1,\lambda} + x \cdot E_{2,\lambda} \quad \forall x \in \mathbb{R} \quad 0 \leqslant x \leqslant 1 \tag{2.4}$$

Bedeutung der Symbole:

$E_{e,\lambda}$: spektrale Bestrahlungsstärke (hier des Mischlichtes)

$E_{1,\lambda}$: spektrale Bestrahlungsstärke der Lichtquelle 1

$E_{2,\lambda}$: spektrale Bestrahlungsstärke der Lichtquelle 2

$x$: Anteil der jeweiligen Lichtquelle an der resultierenden spektralen Bestrahlungsstärke

**Tabelle 2.3:** Bezug der Beleuchtungsstärke auf die wirksame Bestrahlungsstärke unterschiedlicher Tageslichtphasen ($D_{45}$ bis $D_{75}$ bzw. beispielhaft einer Leuchtstofflampe (LL), einer LED und deren Mischung mit der Normlichtart A (NLA)

| $\gamma_f$ [lm/mW] | $D_{45}$ | $D_{55}$ | $D_{65}$ | $D_{75}$ | LL | LED |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 % NLA | 2,17 | 1,76 | 1,43 | 1,22 | 2,58 | 3,63 |
| 40 % NLA | 2,33 | 1,96 | 1,64 | 1,43 | 2,67 | 3,44 |
| 50 % NLA | 2,41 | 2,08 | 1,77 | 1,56 | 2,71 | 3,35 |
| 60 % NLA | 2,50 | 2,21 | 1,93 | 1,72 | 2,76 | 3,26 |
| 80 % NLA | 2,71 | 2,53 | 2,33 | 2,18 | 2,85 | 3,10 |
| | | | | | | $E$ = konstant = 1 lx |

Es wird deutlich, dass mit photometrischen Messmitteln 1,2 bis 3,6 fach höhere Werte im Vergleich zu den Werten der wirksamen Bestrahlungsstärke gemessen werden. Dies führt zu einer maximalen Abweichung der Messwerte von ±297%. Je nach Tageslichtphase und Mischungsverhältnis mit anderen

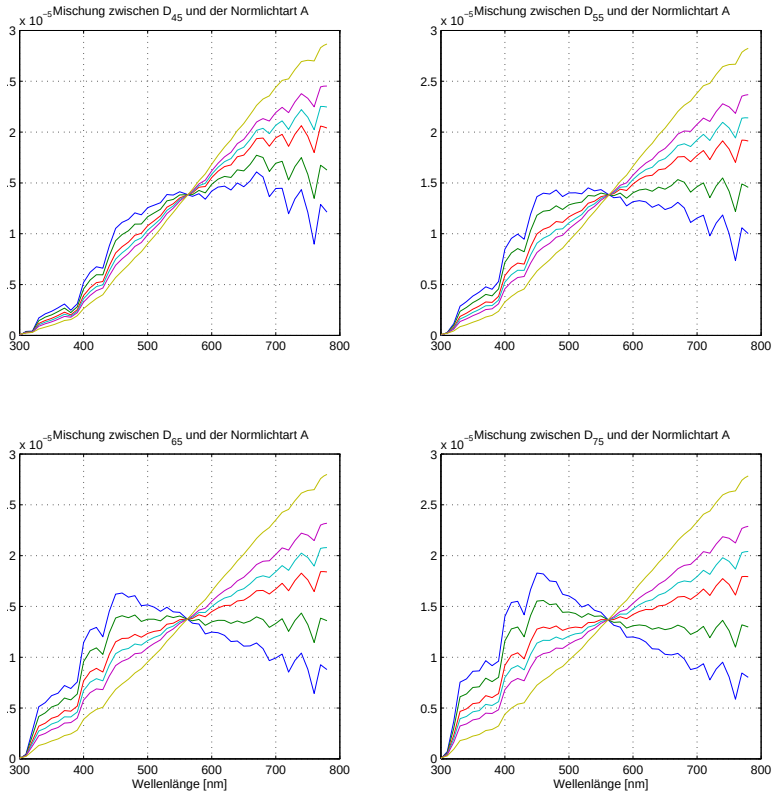



**Abbildung 2.1:** rel. spektrale Strahlungsfunktionen bei Mischlicht zwischen Tageslicht $D_{45}$, $D_{55}$, $D_{65}$, $D_{75}$ und Normlichtart A normiert auf gleiche Beleuchtungstärke

Lichtarten ergeben sich weitere Korrekturfaktoren. Da jedoch auf das Mischungsverhältnis sowie auf die Tageslichtphasen kein Einfluss genommen werden kann, ist ohne Erfassung der wirksamen Spektralanteile eine objektive Bewertung der Schädigung der musealen Objekte nicht möglich.

## 2.4 Folgerung der Notwendigkeit einer neuen Messtechnik

Wie zu erkennen ist, kann eine genaue Bestimmung der schädigenden Strahlung ausschließlich für nicht-dynamische Beleuchtungssysteme getroffen werden. Sobald eine Lichtquelle zeitlich veränderliche Spektren aufweist, kann keine aktuelle Schädigung über die Messung der Beleuchtungsstärke berechnet werden. Folglich sollte ein Sensor, der schädigende Strahlung im Museum detektiert, die gleiche spektrale Empfindlichkeit zeigen, wie die der Strahlung ausgesetzten Objekte. Es werden optische Sensoren gesucht, deren spektrale Empfindlichkeit dem relevanten Spektralbereich, oder Teilen davon, entsprechen. Um die spektrale Empfindlichkeit weiter anzupassen, werden optische Filter eingesetzt. Diese können Anteile der optischen Strahlung schwächen, indem sie die Strahlung teilweise bzw. komplett absorbieren. Auf diese Weise ergibt sich eine spezielle spektrale Empfindlichkeit des Gesamtmesskopfes (ab Kapitel 3).

## 2.5 Folgerung der Notwendigkeit eines Monitoringsystems

Liegt eine Messtechnik, wie im Kapitel 2.4 beschrieben, vor, kann eine permanente Überwachung der Kunstwerke gewährleistet werden. Die Anforderungen an ein solches Monitoringsystem sind:

- geringe Größe, damit der Blick des Betrachters nicht gestört wird
- hohe Verträglichkeit des Systems mit der Umwelt im Museum. Es sollten keine zusätzlichen Schadstoffe eingebracht werden
- einfache Installation und Administration
- lange Lebensdauer der Komponenten
- Installation vieler Messpunkte
- Zuverlässigkeit und Ausfallsicherheit

Die geringe Größe und die einfache Installation und Administration deuten, wie in Kapitel 6.2 näher erläutert, auf ein funk-gekoppeltes System hin. Die Anwendungsmöglichkeiten von Funkmodulen sind vielfältig. Da diese einzeln oder vernetzt arbeiten und verschiedenste Daten erfassen und verarbeiten können, ergeben sich sehr viele praktisch nutzbare Anwendungen. Zudem kann mit Hilfe der Funkmodule auch eine angepasste Regelung der Beleuchtung an die aktuell in dem Raum vorhandenen Beleuchtungsstärken durchgeführt werden. Somit ist es möglich die Beleuchtungsanlagen in den

Räumen gezielt ein- und abzuschalten oder zu dimmen und daher auch an die eintreffende Sonnenstrahlung anzupassen. Besonders bei Neubauten kann ein solches System schnell und einfach ausgebracht werden.

Mit einem Monitoringsystem ist es nicht nur möglich die aktuelle Beleuchtungssituation der einzelnen Kunstwerke zu erfassen, sondern auch die Bestrahlung zu protokollieren. Darüber hinaus können durch eine regelmäßige Messung starke Schwankungen in der Beleuchtung der Objekte einfacher erfasst und Gegenmaßnahmen gezielter erarbeitet werden (Ab Kapitel 5).

## 2.6 Folgerung der Notwendigkeit einer speziellen Lichtplanung und Simulation

Die Erstellung eines Lichtkonzeptes für Neubauten oder Renovierungen in Museen fängt bei der Planung der Beleuchtung an. Computergestützte Lichtplanungssoftware wie z. B. RELUX®, DIALux® und Radiance berechnen die räumlichen Lichtverteilungen auf Grundlage der LVK[2]. Diese ist das Ergebnis einer goniophotometrischen Messung der Leuchte oder ggf. der Lampe. Da der Messkopf eines Goniophotometers entsprechend der $V(\lambda)$-Funktion angepasst ist, können in diesen Simulationstools alle errechneten Werte nur photometrische Größen repräsentieren. Wie bereits im Kapitel 2.3 beschrieben, kann die Beleuchtungsstärke stark von der schädigenden Bestrahlungsstärke abweichen. Folglich ist neben der Simulation der Beleuchtungsstärken eine Simulation der schädigenden Bestrahlungsstärken für eine Beleuchtungsplanung in Museen unerlässlich.

Als Empfehlung müssten zusätzlich zur LVK die Spektren der Leuchten verzeichnet werden, um das Schädigungspotenzial auch bei Verwendung von Filtern berechnen zu können.

Die Komplexität der Notwendigkeit einer speziellen Lichtplanung impliziert die Komplexität der Integration in bereits bestehende Lichtplanungssoftware. Diese Integration wird im Weiteren nicht näher betrachtet. Vielmehr beschränken sich diese Ausführungen auf die erwähnte Strahlungsmesstechnik aus den Kapiteln 2.4 und 2.5.

[2] **L**ichtstärke-**V**erteilungs **K**urve

# Kapitel 3

# Voruntersuchungen Teil 1 bezüglich der Messung der objektschädigenden Stahlung

Vor der Konzeption eines neuen Messsystems ist die beschriebene spektrale Objektempfindlichkeit nach [CIE157, 2004] zu verifizieren. In den folgenden Kapiteln sind Untersuchungen zu diversen Kombinationen von Untergründen (Leinwand, Pappe, ...) und deren Farbaufträge (Pastel, Öl, ...) beschrieben.

Neben der spektralen Anpassung der Radiometer ist die Richtungsabhängigkeit für einen Bestrahlungsstärkeempfänger ausschlaggebend. Hierbei wurde der Festlegung der Richtungsabhängigkeit für Beleuchtungsstärkeempfänger nach DIN 13032 gefolgt.

## 3.1 Umbau der Bestrahlungsanlage von Krochmann und Aydinli

Um eine Aussage über die Schädigung an Kunstwerken und gegebenenfalls auftretender Wechselwirkungen zu erhalten, bedarf es Bestrahlungsuntersuchungen mit aktinischen Lichtquellen ausgewählter Wellenlänge bzw. Wellenlängenbereiche. Zwei Möglichkeiten der Untersuchung der Farbveränderung durch optische Strahlung sind denkbar:

1. Differenzverfahren: Mittels Kantenfilter unterschiedlicher Wellenlänge werden Bereiche der Strahlungsquelle ausgeschlossen. Unterschiede der bestrahlten Felder untereinander weisen auf die spektrale Abhängigkeit in diesem Bereich hin.

2. Integralverfahren: Dabei werden fest definierte, sehr kleine Spektralbereiche (meist nur wenige nm) mittels Filterung durch Bandpassfilter

für die Bestrahlung der Proben herangezogen. Jedoch ist die Bestrahlungsstärke bei dieser Methode erheblich geringer.

Aus Gründen der höheren Bestrahlungsstärke und der, daraus resultierend, kürzeren Bestrahlungszeit wird im Weiteren das Differenzverfahren verwendet.

Für die Bestrahlungen wurde ein bestehender Aufbau überarbeitet und weiterentwickelt. Der Aufbau ist bereits von Aydinli et al. [1983] zur Untersuchung des „Blue Wool Standards“ und diverser Farb- und Stoffproben benutzt worden. Im Zentrum der Anlage ist eine Xenon-Höchstdruck-Entladungslampe mit einer elektrischen Anschlussleistung von 1600 W.

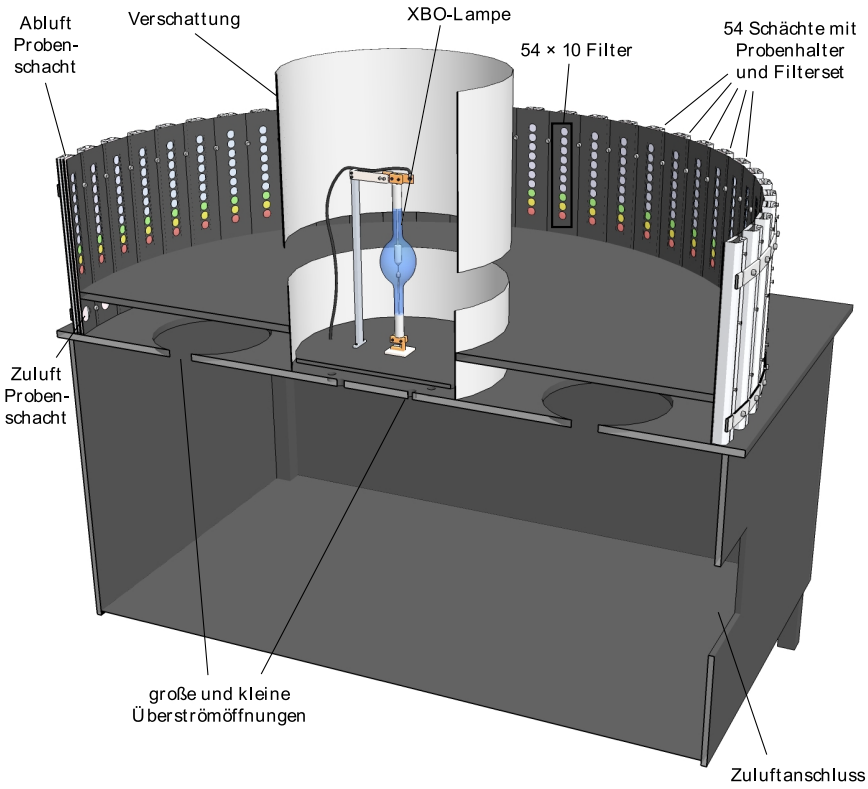



**Abbildung 3.1:** Vertikaler Schnitt durch die Bestrahlungsanlage

In dieser Anlage können bis zu 54 Materialproben in vertikaler Ausrichtung kreisförmig mit einem Abstand von 81 cm um eine Gasentladungslampe angeordnet werden. Einen Schnitt durch die Anlage zeigt Abbildung 3.1. Die Materialproben werden dazu auf Blechstreifen befestigt, welche von oben in senkrecht angeordnete Schächte eingeführt werden und dort jeweils durch drei Schrauben zu fixieren sind. Die Anlage beruht auf dem Prinzip der Überlagerung der Wellenlängenanteile bei der Schädigung der zu untersuchenden Objekte. An jedem Schacht können bis zu zehn verschiedene Filter

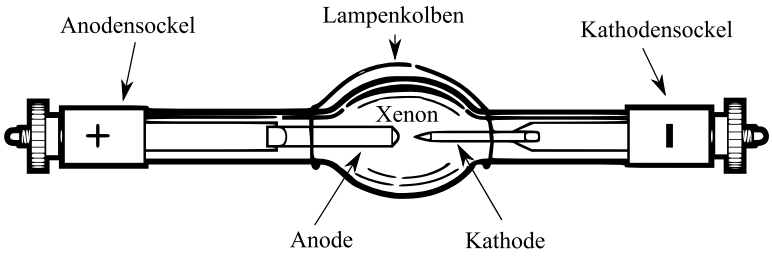



**Abbildung 3.2:** Xenon-Kurzbogenlampe, Typ Osram XBO 1600

eingebracht werden, sodass jede Probe an zehn Stellen mit jeweils unterschiedlichem Spektralanteilen bestrahlt werden kann. Um den Streulichtanteil so gering wie möglich zu halten, ist die Anlage vollständig schwarz lackiert. Die Verschattung schützt den Versuchsdurchführenden vor schädlicher UV-Strahlung.

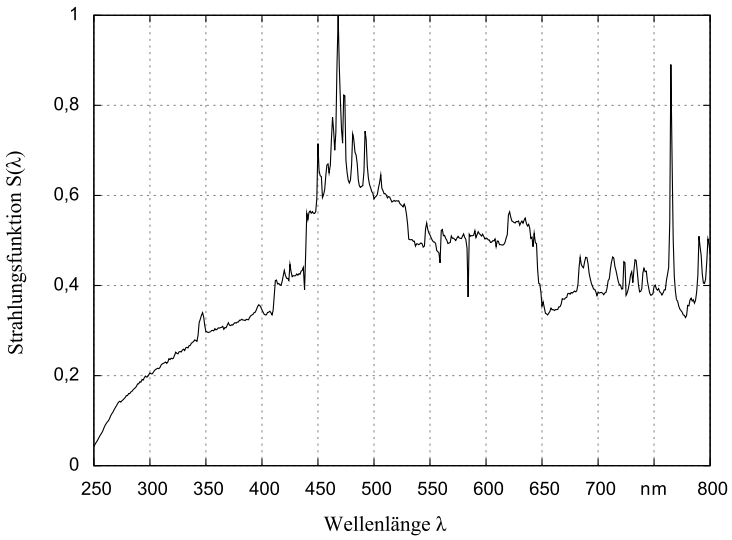



**Abbildung 3.3:** Normiertes gemessenes Spektrum der XBO-Lampe

Als Strahlungsquelle wird eine Xenon-Kurzbogenlampe verwendet (Abbildung 3.2). Diese nach dem Höchstdruck-Entladungsprinzip wirkende Lampe eignet sich darüber hinaus infolge der ähnlichen spektralen Verteilungen hervorragend für die Simulation der direkten Sonnenstrahlung [Pedrotti, Bausch, Pedrotti & Schmidt, 2005]. Weiterhin zeichnet sich die XBO-Lampe durch eine sehr gleichmäßige Lichtstärkeverteilung über einen großen Raumwinkel aus [Osram GmbH, 2010]. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Bestrahlungsstärke an den Öffnungen der Probenhalter (siehe Abbildung 3.4) vor der Filterung gleich ist. Zur Bestimmung der spektralen Bestrahlungsstärke auf den Proben wird, am Probenort im Spektralbereich

vom 290 nm bis 780 nm, die Strahlungsfunktion der Lampe gemessen. Das Ergebnis der Messung ist in Abbildung 3.3 zu sehen. Sie repräsentiert die relative spektrale Verteilung des Strahlungsflusses, nicht jedoch die absolute Bestrahlungsstärke auf der Probe. Es ist davon auszugehen, dass sich die spektrale Ausstrahlung der Quelle nicht ändert. Daher kann eine Bestimmung der absoluten Bestrahlungsstärke über die Beleuchtungstärke auf der Probenebene durchgeführt werden.

Für diese Untersuchung wurde der Ring aus 54 Probenhaltern in vier Quadrante unterteilt. In jedem Quadrant wurden repräsentativ die Beleuchtungsstärken an allen Bestrahlungsöffnungen eines Probenhalters gemessen. Aus diesen Werten wurde die mittlere Beleuchtungsstärke und die Standardabweichung ermittelt. (Tabelle 3.1).

**Tabelle 3.1:** Beleuchtungsstärke an 40 repräsentativen Bestrahlungsöffungen in der Probenebene der Bestrahlungsanlage der TU Berlin

| $E$ (lx) | Feld 1 | Feld 2 | Feld 3 | Feld 4 | Feld 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Pos. 1 | 8610 | 8620 | 8560 | 8680 | 8800 |
| Pos. 2 | 9040 | 9051 | 8990 | 9110 | 9240 |
| Pos. 3 | 8180 | 8190 | 8130 | 8250 | 8360 |
| Pos. 4 | 8550 | 8640 | 8700 | 8870 | 8870 |
| | Feld 6 | Feld 7 | Feld 8 | Feld 9 | Feld 10 |
| Pos. 1 | 8870 | 8870 | 8700 | 8640 | 8550 |
| Pos. 2 | 9310 | 9310 | 9135 | 9072 | 8980 |
| Pos. 3 | 8430 | 8430 | 8270 | 8210 | 8120 |
| Pos. 4 | 8800 | 8680 | 8560 | 8620 | 8610 |
| Arithmetischer Mittelwert $\overline{x}_{arithm}$ | | | | 8690 lx | |
| Standardabweichung $\sigma_{\overline{x}}$ | | | | 3,8 % | |

Der Skalierungsfaktor ist der Quotient aus der vertikalen Beleuchtungsstärke $E_v$ und der mit $V(\lambda)$ gewichteten und über den sichtbaren Spektralbereich integrierten spektralen Bestrahlungsstärke der Lampe $E_{e,\lambda}$.

$$C = \frac{E_v}{K_m \int\limits_{380\ \text{nm}}^{780\ \text{nm}} E_{e,\lambda} \cdot V(\lambda)\ d\lambda} \tag{3.1}$$

Durch die Skalierung der gemessenen spektralen Bestrahlungsstärke $E_{e,\lambda}$ mit dem Faktor $C$ aus Gleichung 3.1 lässt sich die spektrale Bestrahlungsstärke $E'_{e,\lambda}$ auf der Probe bestimmen.

$$E'_{e,\lambda} = C \cdot E_{e,\lambda} \tag{3.2}$$

Die daraus ermittelten Bestrahlungsstärken $E_e$ sind in Tabelle 3.2 zu finden. Jeder Probenhalter ist mit neun Filtern ausgestattet, sodass die oberste der zehn Öffnungen unbestückt bleibt und auf dieses Messfeld ungefilterte Strahlung trifft (Abbildung 3.4). Es handelt sich um Kantenfilter verschiedener Grenzwellenlängen des Herstellers Schott. Die spektralen Transmissionsgrade sind in Abbildung 3.5 dargestellt. Aus den spektralen Bestrahlungsstärken $E_{e,\lambda}$ der Lampe lassen sich die Bestrahlungsstärken $E_{e,\tau}$ hinter den Filtern über $\int_\lambda E_{e,\lambda} \cdot \tau(\lambda) d\lambda$ berechnen. Tabelle 3.2 zeigt die verwendeten Filter nebst ihrer Grenzwellenlänge und der resultierenden Bestrahlungsstärke.

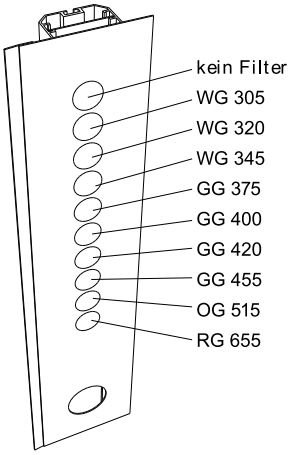



**Abbildung 3.4:** Standard-Filterkonfiguration der Anlage

**Tabelle 3.2:** Filter in der Standard-Konfiguration, Bestrahlungsstärke $E_{e,\tau}$ hinter den Filtern im Bereich von 290 nm bis 780 nm und deren Grenzwellenlänge $\lambda_G$

| Filter | $\lambda_G$ (nm) | $E_e$ und $E_{e,\tau}$ (W/m$^2$) |
|---|---|---|
| kein | – | 49,5 |
| WG 305 | 305 | 44,6 |
| WG 320 | 320 | 43,7 |
| WG 345 | 345 | 41,3 |
| GG 375 | 375 | 40,6 |
| GG 400 | 400 | 38,4 |
| GG 420 | 420 | 37,6 |
| GG 455 | 455 | 33,7 |
| OG 515 | 515 | 26,2 |
| RG 655 | 655 | 11,2 |

Der Tisch, auf dem die Anlage steht, dient gleichzeitig als Kühlluftverteiler. Ein Ventilator befördert einen Volumenstrom von 800 m$^3$/h aus dem Raum in den Innenraum des Tisches. Durch vier große Überströmöffnungen mit einem Durchmesser von 300 mm gelangt ein Teil des Luftstroms in die Probenschächte, wodurch eine zu starke Erwärmung der Proben verhindert

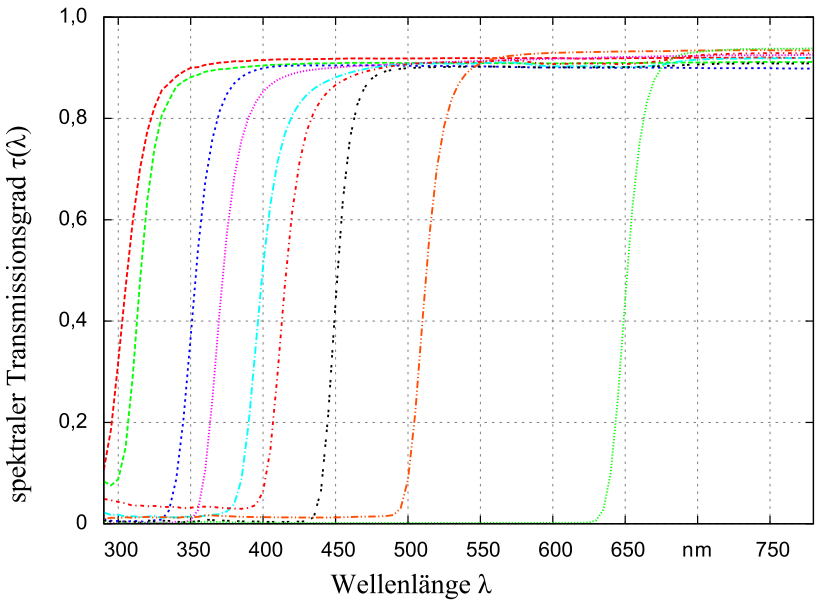



**Abbildung 3.5:** Spektrale Transmissionsgrade der Standardkonfiguration der Kantenfilter

werden kann. Der restliche Luftstrom kann durch 22 kleinere Öffnungen mit einem Durchmesser von 20 mm die Lampe passieren, sodass auch dort ein Wärmestau vermieden wird. Um die klimatischen Bedingungen im gesamten Raum nicht zu verändern, ist dieser zusätzlich klimatisiert. Es werden sowohl Temperatur als auch Luftfeuchte während der Untersuchung nach DIN EN 15757:2008 konstant gehalten.

## 3.2 Festlegung des Formfaktors $b$ der relativen spektralen Objektempfindlichkeit

Der genaue Zusammenhang zwischen Objektschädigung und optischer Strahlung – und somit auch für das Schädigungspotenzial des Lichtes – ist bereits in Kapitel 1.2.1 beschrieben. Dort wurde die relative spektrale Objektempfindlichkeit $s(\lambda)_{dm,rel}$ eingeführt.

$$s(\lambda)_{dm,rel} = e^{[-b(\lambda-300)]}$$

Diese Funktion ist auf 300 nm normiert, so ergibt sich eine relative Schädigung von 1 bei dieser Wellenlänge. Wie bereits im Kapitel 1.2.1 erwähnt, ist der Faktor $b$ im Exponenten der Gleichung 1.8 vom jeweiligen Material abhängig. Einige Werte sind in Tabelle 1.4 im Kapitel 1.2.1 benannt. Dieser Faktor hat direkten Einfluss auf die spektrale Objektempfindlichkeit. Für eine nicht spektral aufgelöste Messmethode ist daher ein sinnvoller Wert

für den Faktor $b$ im Exponenten der Gleichung 1.8 festzulegen. Saunders und Kirby und CIE157 benennen einen typischen Wert der Konstante $b$ mit 0,0115. Das bedeutet, dass alle 200 nm sich die spektrale Objektempfindlichkeit um den Faktor 10 ändert. Dies bestätigen auch weitere Untersuchungen (vgl. Kapiteln 1.1.1). Es ist eine Tendenz für den Wert dieses Formfaktors $b$ zu erkennen. Für alle weiteren Untersuchungen und Entwicklungen wurde der Formfaktor der spektralen Objektempfindlichkeit auf den Wert $b = 0,012$ gesetzt.

## 3.3 Voruntersuchung aktueller Lichtquellen und Leuchten für Museen und Galerien

Für eine Abschätzung der zu erwartenden optischen Strahlung, hervorgerufen durch künstliche Beleuchtung, sind spektrale Messwerte notwendig. In Zusammenarbeit mit dem Rathgen Forschungslabor Berlin (2010-2012) wurden 74 Messreihen unterschiedlicher Leuchten aufgenommen. Alle Leuchten wurden für den Einsatz in Museen und Galerien konzipiert. Dabei handelte es sich um 35 Messreihen von LED Leuchten, 36 Messreihen Leuchten mit Halogen Einsatz und 3 Messreihen anderer Leuchten. Insgesamt wurden 44 unterschiedliche Leuchten in 4 Lichtfarben und 2 Dimmstufen[1] von 15 Herstellern hinsichtlich folgender Maßzahlen untersucht:

- Spektrale Strahlungsverteilung
- Farbort (aus spektraler Strahlungsverteilung berechnet)
- Farbwiedergabe (aus spektraler Strahlungsverteilung berechnet)
- Schädigungspotenzial (aus spektraler Strahlungsverteilung berechnet)

**Aufbau**

Die Spektrale Strahlungsverteilung wurde auf einer optischen Bank mit einem Array-Spektrometer im Bereich von 300 - 780 nm in einem Abstand von 4 m zur Lichtquelle gemessen. Die Lampen wurden 15 min eingebrannt. Zur Verringerung des Streulichtes wurden 3 Blenden unterschiedlicher Durchmesser der Öffnungen zwischen Lichtquelle und Spektrometer angebracht. Für weitere Berechnungen wurde die gemessene spektrale Strahlungsverteilung auf die Peak-Wellenlänge normiert.

**Spektrale Strahlungsverteilung**

Die Spektrale Strahlungsverteilung ist abhängig von der Art der Erzeugung des Lichtes. Während von den Halogen-Glühlampen 14 Niedervolt-Reflektorlampen und 4 IRC Halogenlampen zum Einsatz kamen, waren es

[1] sofern möglich

bei den LEDs 14 blau angeregte weiße LEDs, 6 RGB LEDs und 3 Weiße LEDs mit einer zusätzlichen roten LED. Beim Dimmen wurde erwartungsgemäß eine spektrale Veränderung bei den Glühlampen und keine spektrale Veränderung bei den LEDs gemessen. Nachträglich wurden die spektralen Messwerte auf eine Beleuchtungsstärke von 200 lx aus Gründen der Vergleichbarkeit der Messwerte normiert. Der Wert 200 lx ist daher vom Rathgen Forschungslabor vorgegeben worden da dies die maximale erlaubte Beleuchtungsstärke in den Museen der SMPK (Staatliche Museen Preussicher Kulturbesitz) ist.

**Farbort**

Die spektrale Veränderung beim Dimmen der Glühlampen hat eine Verschiebung des Farbortes der Lichtfarbe zur Folge. Erwartungsgemäß befand sich der Farbort sehr nah an dem Kurvenzug des Planckschen Strahlers, da es sich um einen Temperaturstrahler handelt. Der Farbort bei LEDs wird entweder für weiße LEDs durch die Auswahl des Leuchtstoffes oder durch die Mischung unterschiedlicher farbigen LEDs bestimmt. Oft lag der Farbort weit entfernt vom Kurvenzug des Planckschen Strahlers, was zu einer Schwächung der Farbwiedergabe führte.

**Farbwiedergabe**

Die Farbwiedergabe befand sich bei den Glühlampen erwartungsgemäß im Bereich zwischen $95 \leq R_a \leq 99$. Bei den LEDs lag der allgemeine Farbwiedergabeindex im Bereich zwischen $32 \leq R_a \leq 98$. Weiterhin war auffällig, dass die speziellen Farbwiedergabeindizes $R_9$ bis $R_{12}$, zur Bewertung der gesättigten Farben, bei den LEDs sehr stark schwankten (vergleiche Tabelle 3.3).

| Index | Bereich |
|---|---|
| $R_9$ | -137 – 94 |
| $R_{10}$ | 10 – 98 |
| $R_{11}$ | -45 – 98 |
| $R_{12}$ | 3 – 90 |

**Tabelle 3.3:** Spezielle Farbwiedergabeindizes bei der Untersuchung von LED-Strahlern

**Schädigungspotenzial**

Das Schädigungspotenzial bei den Glühlampen konnte im Bereich von $0,15\ \text{mW/lm} \leq P_{dm} \leq 0,25\ \text{mW/lm}$ aus dem Spektrum berechnet werden.

Bei den LEDs wurden vergleichbare Werte zwischen $0,14$ mW/lm $\leq P_{dm} \leq 0,26$ mW/lm berechnet.

Bei den Einzelbetrachtungen zeigte eine LED-Leuchte mit geringer Schädigung ($P_{dm} = 0,14$ lm/W) eine, mit Halogen-Glühlampen vergleichbare, hohe Farbwiedergabe von $R_a = 98$ und $R_9 = 92$. Hierbei handelte es sich um eine blau angeregte LED mit gelbem Leuchtstoff ($T_{cp} \approx 3000$ K). Die schlechteste LED im Test hatte ein ähnliches Schädigungspotenzial $P_{dm} = 0,19$ lm/W, jedoch bei einer Farbwiedergabe von $R_a = 35$ und $R_9 = -85$. Hierbei handelte es sich um einen RGB-LED Strahler.

## 3.4 Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass die herkömmliche Lichtmesstechnik im Museum nur sehr begrenzt aussagekräftig ist. Messgeräte aus anderen Anwendungen mit der benötigten spektralen Anpassung sind nicht bekannt. Zur Erlangung höherer Aussagekraft ist eine Messtechnik zu entwerfen, die sich von der herkömmlichen unterscheidet. Aus den Kapiteln 3.2 bis 3.3 ergeben sich für die, in Kapitel 2 geforderte, neue Messtechnik folgende Randbedingungen:

- Spezielle spektrale Anpassung der Sensorik an die nach CIE Report 157:2004 veröffentlichten relativen spektralen Objektempfindlichkeit zur direkten Erfassung der Strahlung am Objekt.
- Zusätzliche Messung der Beleuchtungsstärke am gleichen Ort, zur Bestimmung des Schädigungspotenzials.
- Räumliche Anpassung der Messköpfe für die Bewertung der Einstrahlungsrichtung.

Eine mögliche Lösung für diesen Einsatzzweck sind Spektralradiometer im Wellenlängenbereich zwischen 300 und 1.000 nm. Diese besitzen den Vorteil, dass unterschiedliche spektrale Empfindlichkeiten nachträglich auf die spektralen Messwerte angewendet werden können. Auch Messwerte für den sichtbaren Spektralbereich und deren Anpassung nach $V(\lambda)$ sind aus spektralen Bestrahlungsstärken anzugeben. Nachteile bei der spektralen Messung ergeben sich durch die Messabweichungen. Diese sind:

- Spektrale Messunsicherheiten. Diese führen zu einer Verschiebung der Bewertung der jeweiligen spektralen Bestrahlungsstärken.
- Absolute Messunsicherheiten. Die spektrale Strahlungsleistung ist aufgrund der Zerlegung, um mehrere Größenordnungen, kleiner als die Gesamtstrahlungsleistung. Dies führt zur Verringerung des Signal-Rausch-Abstandes im Messgerät und zur Erhöhung der Messunsicherheit.

- Streuungen in den Spektrometern. Gestreute Strahlung in Spektralradiometern kann nicht verhindert werden. Dies führt zur Verfälschung der spektralen Strahlungsleistung auf dem Sensor.

Darüber hinaus ist für tragbare Anwendungen eine solche Lösung nicht geeignet. Gründe dafür sind der hohe Anschaffungspreis, die aufwendige Kalibrierung, die Größe und die meist langen Messzeiten[2], in denen die Beleuchtungssituation konstant sein muss. Etabliert sind in diesem Bereich der Messtechnik mit Filtern angepasste optische Empfänger. Deren spektrale Systemempfindlichkeit ist mit den Filtern möglichst nahe der spektralen Zielfunktion nachzubilden. Dieser Aufbau wird auch für diese Messtechnik bevorzugt.

Mit einem Messkopf oben genannter Eigenschaften ist ein langfristiges Monitoring nach Kapitel 2 direkt am Kunstwerk möglich. Hierfür sind weitere Randbedingungen zu berücksichtigen.

- Einsatzfähigkeit in allen drei Stadien (Exponiert, Expediert, Magaziniert).
- dezentrale Erfassung der Messwerte und zentrale Datenhaltung
- Messintervall zur Verringerung der Anzahl der Messdaten in Kombination mit der Einhaltung der Messgenauigkeit sollte 1 Minute betragen.
- Speicherung der Daten zur Auswertung und Berechnung der Gesamtbelastung des Kunstwerkes in der Vergangenheit.

Mit diesen Randbedingungen kann eine Messtechnik für die kontinuierliche Messung objektschädigender Strahlung in Museen erstellt werden. Die hohe Skalierbarkeit eines dezentralen Monitoringsystems erlaubt dem Kurator bzw. Restaurator einen gezielten Einsatz der Überwachung der Strahlung im Museum bzw. direkt am Objekt.

[2] kann einige Sekunden bis zu mehreren Minuten dauern

# Kapitel 4

# Neue Messtechnik zur Erfassung der objektschädigenden Strahlung

Nach eingehenden Betrachtungen der Schädigung an Sammlungsgut ist ein Sensormodul nötig, um die in Museen und Galerien herrschende Strahlung zu detektieren. Dieses Sensormodul kann in Form eines Handmessgerätes vorliegen, kann aber auch fest, z. B. direkt an einem Gemälde, installiert werden (Kapitel 6.1). Hierdurch kann die aktuelle strahlungsabhängige Schädigung und das Schädigungspotenzial der Beleuchtung bestimmt werden.

## 4.1 Technische Konzeption

Das Konzept ist ein Sensormodul zur Messung objektschädigender Strahlung im Wellenlängenbereich von 300 - 1.000 nm, gekennzeichnet durch mindestens zwei lichtempfindliche Sensorelemente mit jeweils einem oder mehreren Filtern zur spektralen Anpassung, wobei die verschiedenen Sensorelemente mit den jeweiligen Filtern zum einen die objektschädigende Bestrahlung und zum anderen die Beleuchtungsstärke abdecken. Weiterhin besteht das Messsystem aus einem Modul, dessen Aufgabe die Umwandlung der Photoströme in digitale Werte ist. Nachfolgend werden aus diesen das Schädigungspotenzial einer aktuellen schädigenden Bestrahlungsstärke sowie die aktuelle Beleuchtungsstärke berechnet.

## 4.2 Messtechnische Umsetzung

Das Konzept sieht eine Messung der Beleuchtungsstärke und der objektschädigenden Bestrahlungsstärke mit jeweils einem Sensor vor. Aus technischer Sicht ist es sinnvoller, den Spektralbereich der objektschädigenden Bestrahlungsstärke über mehrere Einzelsensoren zu verteilen. Dabei ist zu beachten, dass die eintreffende Strahlungsleistung in den niedrigen Wellenlängenbereichen sehr klein ist. Deren Bewertung nach der relativen spektralen Empfindlichkeit jedoch hoch. Bei einem Sensor für den gesamten Spektralbereich steigt daher die Messunsicherheit bei kleinen Wellenlängen an. Werden die Spektralbereiche zu oft geteilt, ist die eintreffende Strahlungsleistung zu gering und der Signal-Rausch-Abstand sinkt, daher und aus Konstruktionsgründen wird der Einsatz von drei Einzelsensoren zur Messung der objektschädigenden Strahlung gewählt.

### 4.2.1 Auswahl der Sensoren

Die Spektralempfindlichkeit einer Kombination aus Sensor und Filtern $s(\lambda)_{komb}$ ist das Produkt von der spektralen Empfindlichkeit des Sensors $s(\lambda)$ und dem gesamten spektralen Transmissionsgrad der Filterkombination $\tau(\lambda)_{komb}$.

$$s(\lambda)_{komb} = s(\lambda).\tau(\lambda)_{komb} \tag{4.1}$$

Der gesamte spektrale Transmissionsgrad $\tau(\lambda)_{komb}$ ergibt sich als Produkt von den Transmissionsgraden der einzelnen Filter.

$$\tau(\lambda)_{komb} = \tau_1(\lambda).\tau_2(\lambda)...\tau_n(\lambda) = \prod_{i=1}^{n} \tau_i(\lambda) \tag{4.2}$$

Werden die Spektralempfindlichkeiten mehrerer Sensor-Filter-Kombinationen wellenlängenabhängig summiert, ergibt sich die gesamte Spektralempfindlichkeit eines Empfängers $s(\lambda)$ aus der Formel 4.3. Das Signal jeder einzelnen Kombination wird durch einen Gewichtungsfaktor $G_n$ multipliziert, um den Anteil zur Gesamtempfindlichkeit im jeweiligen Spektralbereich anzupassen. Diese Gewichtungsfaktoren sind ausschlaggebend für die Gesamtempfindlichkeit des Messkopfes.

$$s(\lambda) = \sum_{n=1}^{x} G_n \cdot s_n(\lambda).\tau_n(\lambda)_{komb} \tag{4.3}$$

Die Berechnung der Faktoren $G_n$ geschieht iterativ über die Minimierung der Fehlanpassung der Summenfunktion $s(\lambda)$ zur Sollfunktion $s(\lambda)_{dm,rel}$.

$$f_s = \left[ \int_{\lambda} |s(\lambda)_{dm,rel} - s(\lambda)| \, d\lambda \right]_{min} \tag{4.4}$$

#### 4.2.1.1 Sensor SIC01S und Filter N-WG280

Wie aus der relativen spektralen Objektempfindlichkeit $s(\lambda)_{dm,rel}$ folgt (vergleiche Kapitel 1.2.1) ist die kurzwellige Strahlung besonders objektschädigend. Zur Begrenzung der Spektralempfindlichkeit des Sensors im Bereich unter 300 nm wird deshalb der Langpassfilter N-WG280 der Firma Schott mit einer Dicke von 1 mm $\pm$ 0,01 mm ausgewählt. Als Sensor kommt der SIC01S, der sich durch seine stark abfallende spektrale Empfindlichkeit im Bereich von 290 - 400 nm auszeichnet. Die spektrale Gesamtempfindlichkeit der Kombination aus Sensor und Filter ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass eine sehr hohe Empfindlichkeit bei 300 nm erreicht wird. Weiterhin ist eine hohe Empfindlichkeit im Bereich von 255 bis

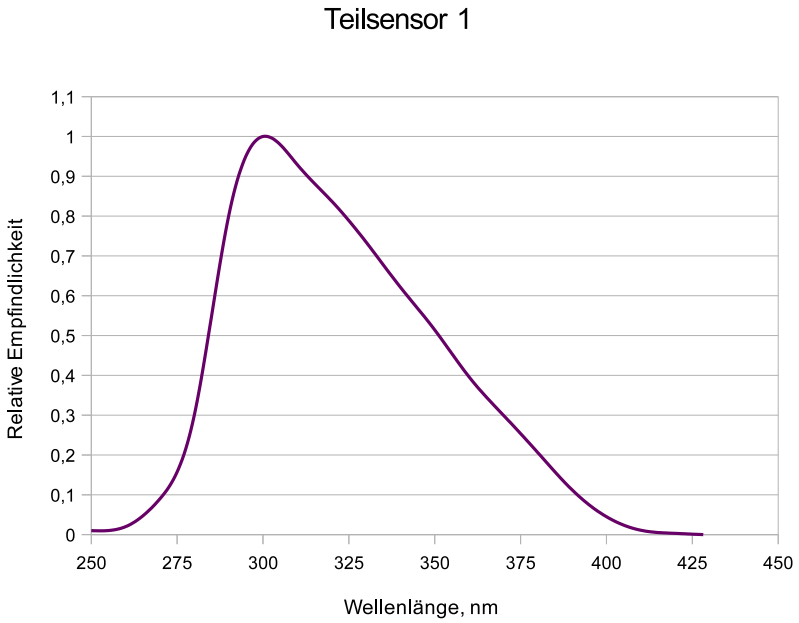



**Abbildung 4.1:** Teilsensor 1; Sensor-Filter Kombination SIC01S und N-WG280

299 nm zu erkennen, welche eine große Abweichung von $s(\lambda)_{dm,rel}$ in dem Bereich ausmacht. Da aber derart kurzwellige Strahlung auf der Erde kaum vorhanden ist [Sandmann, 2002], wird diese Abweichung von $s(\lambda)_{dm,rel}$ als vernachlässigbar betrachtet. Das Signal wird mit einem berechneten Gewichtungsfaktor $G_1$ von 0,9 zur Gesamtempfindlichkeit des Schädigungssensors hinzugefügt (Vergleiche Tabelle 4.1).

#### 4.2.1.2 Sensor EPD-440 und Filter UG5

Im ersten Teilbereich bis 385 nm ergänzt die Sensor-Filter-Kombination den fehlenden Anteil des Signals. Im zweiten Teilbereich von 385 nm bis 530 nm liefert die Kombination aus Sensor und Filter den Hauptanteil des Signals. Eingesetzt wird der Filter UG5 der Firma Schott und der Sensor EPD-440 der Firma Epigap. Von 400 bis 450 nm ist der Sensor jedoch empfindlicher, als es zur Realisierung des Gesamtempfängers notwendig ist. Damit in diesem Bereich keine große Abweichung der spektralen Empfindlichkeit von der relativen spektralen Objektschädigung zu verzeichnen ist, wird der UV-Bandpassfilter UG5 mit einer Dicke von $0,5\ \text{mm} \pm 0,01\ \text{mm}$ eingesetzt. Optimal wäre eine Dicke von 0,28 mm, jedoch ist eine Fertigung der Filter, aufgrund der Genauigkeit der Fertigungsanlagen, nur ab 0,5 mm in 0,1 mm Schritten möglich. Abbildung 4.2 zeigt die Empfindlichkeit der Sensor-Filter-Kombination. Aufgrund der Durchlässigkeit des Filters im Spektralbereich von 300 bis 380 nm trägt dieser Sensor zum Signal des ersten Teilsensors bei. Zur Anpassung des Anteils am Gesamtsignal des Schädigungssensors wurde ein Gewichtungsfaktor $G_2$ von 0,44 berechnet (Vergleiche Tabelle 4.1).

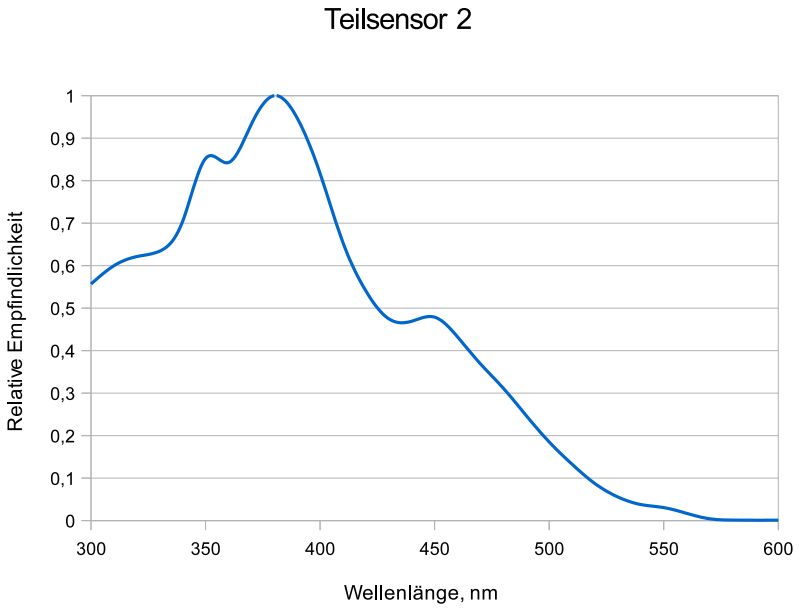



**Abbildung 4.2:** Teilsensor 2; Sensor-Filter Kombination EPD-440 und UG5

Da diese Sensor-Filter-Kombination eine spektrale Empfindlichkeit bis ca. 550 nm aufweist und eine relative spektrale Objektschädigung auch oberhalb dieser Grenze vorhanden ist, wird im langwelligen Bereich noch eine weitere Sensor-Filter-Kombination benötigt.

#### 4.2.1.3 Sensor S5973-02 und Filter BG42

Der spektrale Empfindlichkeitsbereich des Sensors ist sehr breit. Aufgrund der Tatsache, dass der Bereich der Funktion $s(\lambda)_{dm,rel}$ bis 350 nm mit den anderen bereits genannten Teilsensoren abgedeckt wurde, wird die Empfindlichkeit des Sensors im kurzwelligen Bereich begrenzt. Oberhalb von 830 nm bis 1000 nm muss die Empfindlichkeit ebenfalls herabgesetzt werden. Dies erfolgt durch den Bandpassfilter BG42 mit einer Dicke von $0,5$ mm$\pm 0,01$ mm. Die spektrale Empfindlichkeit der Sensor-Filter Kombination ist in der Abbildung 4.3 zu sehen. Zur Anpassung des Anteils am Gesamtsignal des Schädigungssensors wird ein berechneter Gewichtungsfaktor $G_3$ von 0,1 verwendet (Vergleiche Tabelle 4.1).

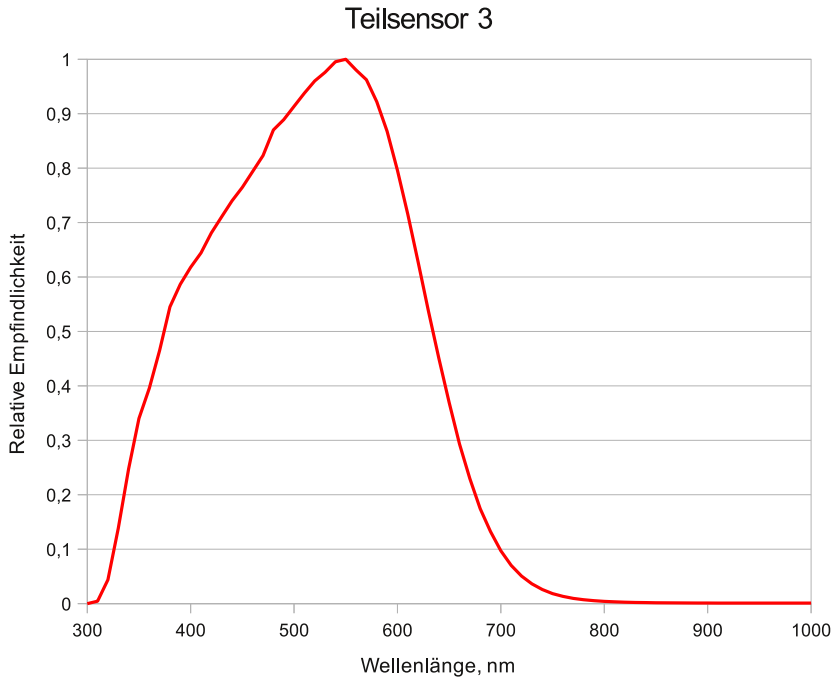



**Abbildung 4.3:** Teilsensor 3; Sensor-Filter Kombination S5973-02 und BG42

#### 4.2.1.4 Gesamtsensor zur Erfassung objektschädigender Strahlung

Wie bereits in Kapitel 4.2.1 beschrieben, setzt sich der Messwert für die schädigende Beleuchtungsstärke aus den Teilsensoren 1 bis 3 zusammen. Zu beachten ist, dass alle Einzelsensoren in unterschiedlichen Spektralbereichen wirksam werden. Eine Summierung der Messwerte der Einzelsensoren zu einem Gesamtsignal ist somit möglich. Alle Sensor-Filter-Kombinationen sind in Tabelle 4.1 aufgeführt. Zusätzlich sind darin die spektral wirksamen (aktiven) Bereiche der Sensor-Filter-Kombinationen und deren Gewichtungsfaktoren enthalten. Aus produktionstechnischen Gründen konnten die Filter-

**Tabelle 4.1:** Zusammenfassung der verwendeten Sensoren, Filter und Gewichtungsfaktoren

| Sensor | aktiver Bereich (nm) | Filter | | Gewichtungs- | aktiver Bereich (nm) |
|---|---|---|---|---|---|
| | $s(\lambda) > 1\ \%$ | Name | Dicke [mm] | faktor G | $s(\lambda)_{komb} > 1\ \%$ |
| SIC01S | 200 - 405 | N-WG280 | 1 | 0,9 | 245 - 405 |
| EPD-440 | 200 - 585 | UG5 | 0,5 | 0,44 | 225 - 545 |
| S5973-02 | 295 - 1.040 | BG42 | 0,5 | 0,1 | 325 - 720 |

dicken ausschließlich in Intervallen von 0,5 mm $\pm 0,1$ mm gefertigt werden. Dies führt zu einer leichten Erhöhung der spektralen Abweichung der Anpassung. Auf die Messungenauigkeit dieser Anordnung wird in Kapitel 4.3 näher eingegangen.

Die folgenden Abbildungen zeigen:

1. Die gewichtete spektrale Empfindlichkeit der Einzelsensoren im Vergleich zur Zielempfindlichkeit (Abbildung 4.4)

2. Die spektrale Empfindlichkeit des Summensignals der Einzelsensoren im Vergleich zur Zielempfindlichkeit (Abbildung 4.5)

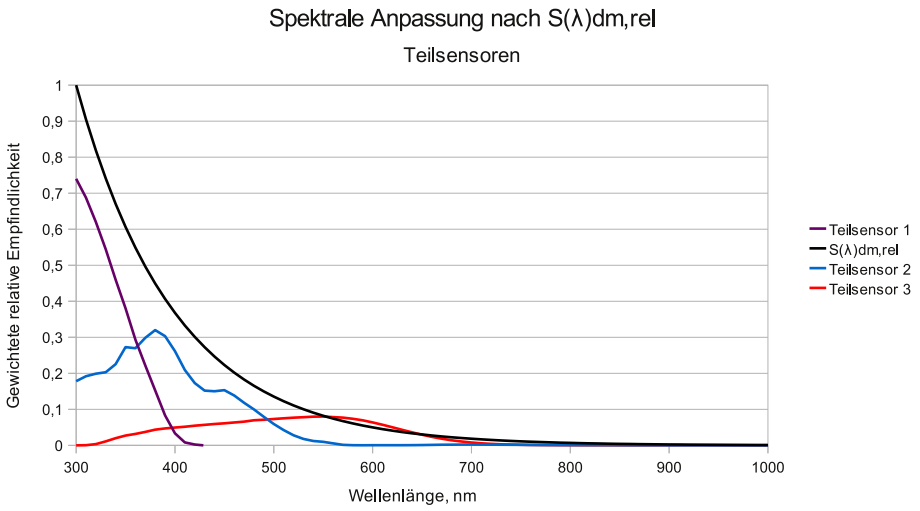



**Abbildung 4.4:** Spektrale Empfindlichkeit der gewichteten Teilsensoren als Vorbereitung für die Berechnung des Gesamtsignals

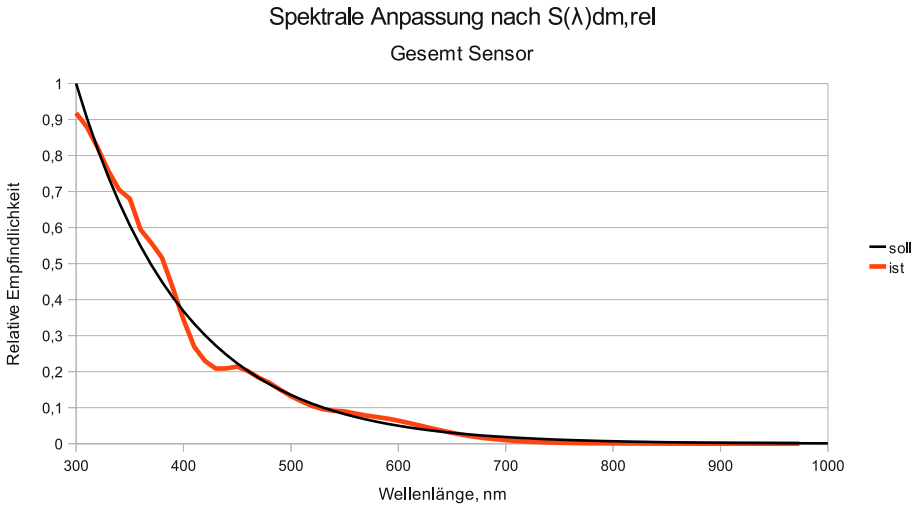



**Abbildung 4.5:** Spektrale Empfindlichkeit des Gesamtmesskopfes

#### 4.2.1.5 Sensor zur Messung der Beleuchtungsstärke

Der vierte Sensor ist das Photometer. Er erfasst die Beleuchtungsstärke. Zunächst wurde der Sensor S1087 der Firma Hamamatsu [Hamamatsu Photonics, 2010] mit einem optischen Plexiglasfilter GS703 einer Dicke von $0,42\ \text{mm} \pm 0,01\ \text{mm}$ versehen. Der Empfänger wurde spektral vermessen. Die Abbildung 4.6 stellt die spektrale Anpassung dar. Die spektrale Fehlbewertung $f_1^{'}$ beschreibt nach DIN EN 13032 [2012] die mittlere Abweichung der relativen spektralen Empfindlichkeit des Empfängers $s(\lambda)_{empf,rel}$ zur relativen spektralen Hellempfindlichkeitsgrad des menschlichen Auges für Tagessehen $V(\lambda)$. Nach DIN EN 13032 beträgt die $f_1^{'}$ Abweichung für den o.g. Sensor 22,3 % (vgl. Kapitel 4.3.1).

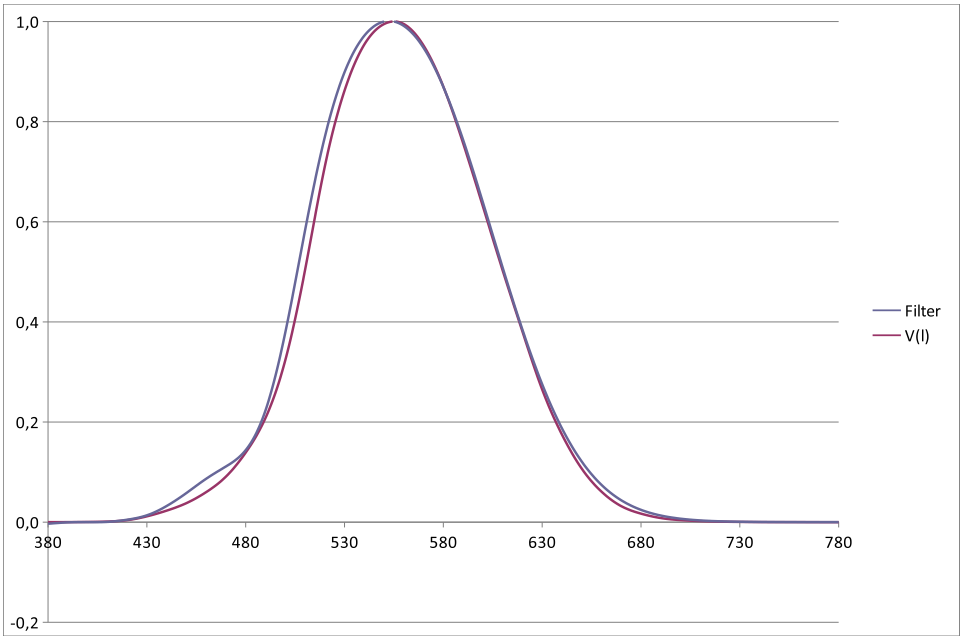



**Abbildung 4.6:** Spektrale Anpassung nach $V(\lambda)$

Eine Klassifizierung nimmt DIN 5032 Teil 7 vor. Demnach liegt dieser Wert außerhalb der Klasse C für Photometer. Ermittelt man jedoch die Aktinität erhält man eine relative Messabweichung von 4,4 % für die Kalibrierlichtart Normlichtart A und einer zu messenden Lichtart $D_{65}$.

Um die spektrale Fehlbewertung weiter zu verringern wurde ein vorgefertigter $V(\lambda)$-Filter der Firma LMT eingesetzt. Die $f_1^{'}$ Abweichung beträgt 3 % und liegt somit innerhalb der Grenzen für die Klassifizierung nach Kategorie $A$ für Photometerköpfe. Die erhöhte Genauigkeit bei der spektralen Bewertung nach $V(\lambda)$ hat sehr großen Einfluss auf die Genauigkeit des Schädigungspotenzials $P_{dm}$.

### 4.2.2 Hardware zur Photostromwandlung

Die Kennlinie eines Photoelementes ist definiert durch seine Leerlaufspannung $U_L$ und den Kurzschlussstrom $I_K$. Daraus ergibt sich die Kennlinie dieses Photoelementes bei einer konstanten Einstrahlung. Es existiert der Zusammenhang, dass die Leerlaufspannung nicht proportional zur Einstrahlung ist, der Kurzschlussstrom jedoch schon [Budde, 1983]. Daher muss ein Photoelement möglichst nahe dem Kurzschlussstrom betrieben werden. Dies gilt auch für Strahlungsempfänger, da die Entstehung des Photostromes identisch ist.

Zur Verwendung der Sensoren mit der restlichen Hardware müssen die teilweise sehr kleinen Photoströme in Spannungen umgewandelt werden. Für eine spätere A/D-Wandlung wird eine positive Ausgangsspannung benötigt. Hierfür kommt die Empfängerschaltung in Form einers Transimpedanzverstärkers zum Einsatz. Transimpedanzverstärker mit änderbaren Verstärkerstufen gibt es bereits am Markt, z. B. die mehrkanaligen programmierbarem Transimpedanzverstärker MTI04 Bx-BF und MTI04CS/MTI04CQ der Firma MAZeT GmbH. Diese sind besonders gut geeignet zum Messen der sichtbaren Strahlung mit Sensoren derselben Firma, wie der integrale Dreibereichs-Farbsensor MCSIAT/BT. Diese Tatsache und die, dass die Größen der Rückkoppelwiderstände nicht frei wählbar, sondern fest definiert sind, machen den Einsatz eines der beiden fertigen Transimpedanzverstärker unmöglich. Zudem weisen o.g. Verstärker eine große Temperaturabhängigkeit auf.

Der Grundbaustein eines Transimpedanzverstärkers ist der Operationsverstärker (OPV). Wie in der Abbildung 4.7 a) zu erkennen ist, besteht die Schaltung aus einer Rückkopplung des Ausgangs auf den Eingang des OPV. Dabei ist der Rückkoppelwiderstand maßgeblich für den Verstärkungsfaktor verantwortlich. Somit fließt der komplette generierte Photostrom $I_{PH}$ des Empfängers über den negativen Eingang des OPV nach Masse ab. Bei der Auswahl des OPV ist daher darauf zu achten, dass der Eingangswiderstand sehr klein ist ($R_e \to 0$), um den gesamten Kurzschlusstrom zu erfassen.

Zur Vergrößerung des Dynamikumfangs des Transimpedanzverstärkers kann die Schaltung um weitere Empfindlichkeitsbereiche erweitert werden. Dies erfolgt über einen Transimpedanzverstärker mit mehrfacher, schaltbarer Rückkopplung und somit ist ein, in der Größe änderbarer, Rückkoppelwiderstand notwendig (vergleiche Abbildung 4.7 b).

Der OPV LTC 6244 [Linear Technology Corporation, 2010] der Firma Linear Technology ist speziell für Transimpedanzschaltungen entwickelt worden. Er arbeitet mit max. 6 V Versorgungsspannung. Somit ist der LTC6244 als Grundelement der zu entwickelnden Schaltung sehr gut geeignet. In erster Linie muss das Verstärkungsvermögen des OPV überprüft werden. Die Schaltung in Abbildung 4.8 zeigt die allgemeine Schaltung eines Transimpedanzverstärkers.

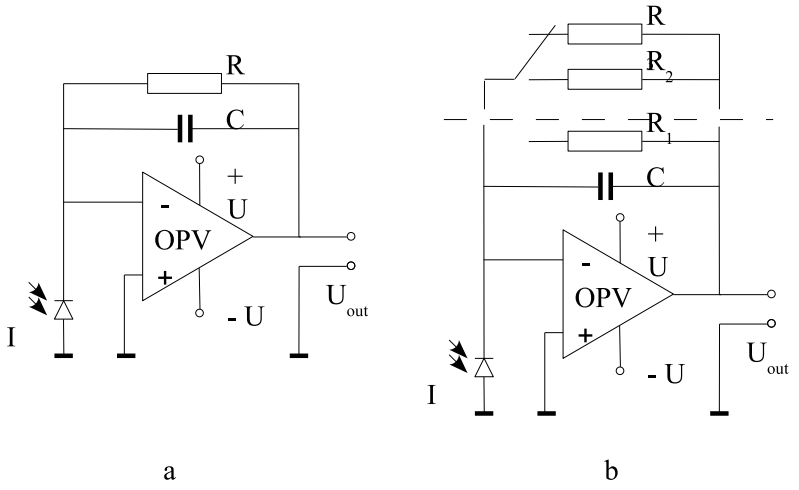



**Abbildung 4.7:** Transimpedanzverstärker a) Einstufig; b) Mehrstufig

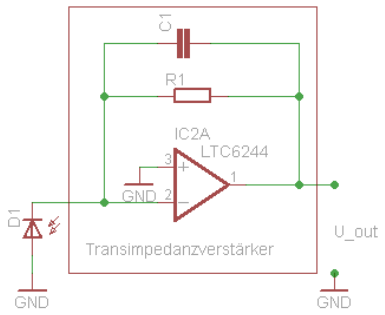



**Abbildung 4.8:** Transimpedanzverstärker allgemein

Für die Ausgangsspannung gilt:

$$U_{out} = -I \cdot R_1 \tag{4.5}$$

Da der negative Eingang des OPV verwendet wird, verhält sich die Ausgangsspannung antizyklisch zum Photostrom. Die Kapazität $C_1$ dient der Frequenzgangkompensation. Zur Realisierung der in Gleichung 4.5 beschriebenen Ausgangsspannung ist der OPV mit einer symmetrischen Spannung $\pm V_{DD}$ zu versorgen. Ist dies nicht möglich, kann die Schaltung in Abbildung 4.9 verwendet werden. Durch den Tausch der Pole der Photodiode wird ein negativer Strom in den OPV eingekoppelt. Dies bewirkt eine positive Ausgangsspannung. Zu beachten ist, dass bei einigen Bauformen mit Metallgehäuse die Anode der Photodiode mit dem Gehäuse verbunden ist. Erhält das Gehäuse eine Verbindung zu Masse (GND), erzwingt dies einen Kurzschluss.

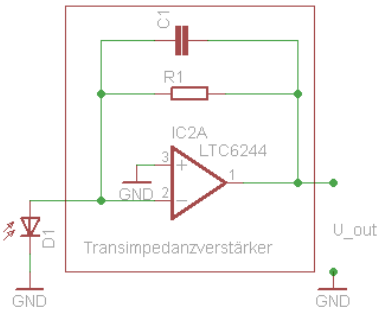



**Abbildung 4.9:** Transimpedanzverstärker mit invertiertem Eingangsstrom

Abbildung 4.10 zeigt dieselbe Transimpedanzwandler-Schaltung wie Abbildung 4.8, mit dem Unterschied, dass eine weitere Verstärkerstufe – ein Inverter – hinzu geschaltet wurde. Damit wird am Ausgang eine positive Spannung erzeugt.

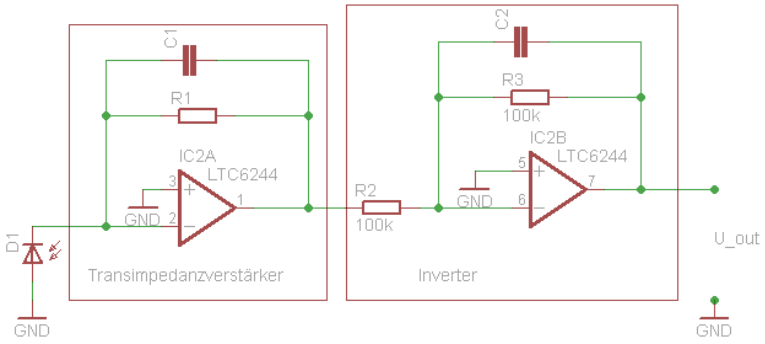



**Abbildung 4.10:** Transimpedanzverstärker mit invertierter Ausgangsspannung

Der Nachteil dieser Schaltung für die Verwendung in einem Photometer, ist die Geschwindigkeit des OPV. Es ist durchaus möglich, dass pulsierende oder schwingende Lichtquellen – z. B. LED, Leuchtstofflampe – Einfluss auf die Ausgangsspannung haben. Zwar kann die Kapazität $C_2$ sehr groß gewählt werden, um etwaige Schwingungen zu unterdrücken, jedoch ist eine Übersteuerung der ersten Verstärkerstufe dadurch nicht mehr erkennbar. Die Schaltung in Abbildung 4.11 beinhaltet einige leichte Verbesserungen. Sie arbeitet immer noch im Transimpedanz-Modus. Der Verstärkungsfaktor wird durch den Widerstand $R_5$ definiert. Der Photostrom wird am nichtinvertierenden Eingang der ersten Stufe umgewandelt. Die Invertierung der Ausgangsspannung findet erst in der zweiten Stufe statt. Durch die Nutzung dieser nichtinvertierenden Konfiguration wird die Eingangskapazität minimiert. Der Rückkoppelkondensator $C_3$ übernimmt die Aufgabe der Frequenz- bzw. Pulsglättung und ist für beide Stufen wirksam. Ein weiterer Inverter wandelt

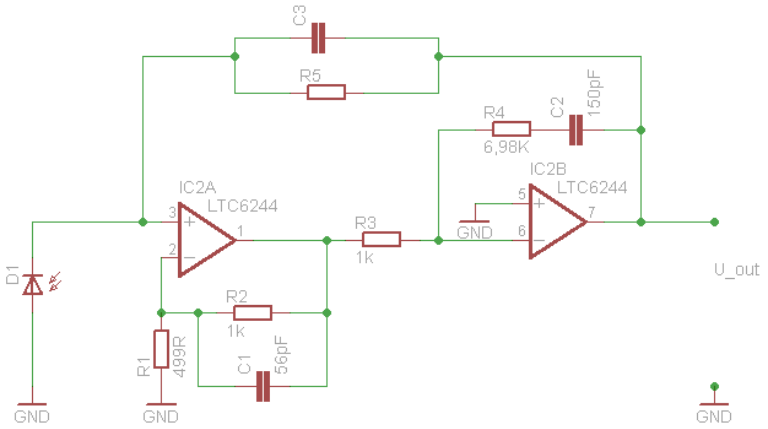



**Abbildung 4.11:** Transimpedanzverstärker Pulsfest

die Spannung in eine positive Ausgangsspannung für den A/D-Wandler.

Nachdem die Grundbauelemente für den Transimpedanzverstärker ausgewählt sind, werden die Größen der Rückkoppelwiderstände ermittelt. Über eine Abschätzung der zu erwartenden Photoströme werden vier Verstärkerstufen benötigt. Die Widerstände sind $R_N = 1$ MΩ, $R_N = 10$ MΩ, $R_N = 100$ MΩ und $R_N = 1$ GΩ groß. Da die Spannungsversorgung für die Schaltung $\pm 3,3$ V ist, kann die Ausgangsspannung einen maximalen Wert von knapp 3,3 V nicht überschreiten.

Mit den vier Rückkoppelwiderständen ist die Schaltung theoretisch in der Lage, Ströme von 3,3 nA bis 3,3 $\mu$A zu messen. Tabelle 4.2 zeigt die Ausgangspannungen $U_{out}$ bei verschiedenen Empfindlichkeitsstufen und Größen des Photostroms $I_{ph}$ der Einzelsensoren.

**Tabelle 4.2:** Empfindlichkeitsbereich der Schaltung

| | E-Stufe 1 $R_N = 1$ GΩ | | E-Stufe 2 $R_N = 100$ MΩ | | E-Stufe 3 $R_N = 10$ MΩ | | E-Stufe 4 $R_N = 1$ MΩ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $I_{ph}$ | 1 pA | 3,3 nA | 1 nA | 33 nA | 10 nA | 330 nA | 100 nA | 3,3 $\mu$A |
| $U_{out}$ | 1 mV | 3,3 V | 0,1 V | 3,3 V | 0,1 V | 3,3 V | 0,1 V | 3,3 V |

### 4.2.3 Kalibrierung

Beleuchtungsstärke-Messgeräte werden mit einer Lichtstärke-Normallampe bekannter Lichttemperatur (zumeist Normlichtart A: 2856 K) oder einem Normalempfänger kalibriert. Wird zur Kalibrierung eine Lichtstärkenormallampe verwendet, bezeichnet man den Vorgang als quellengestützte Kalibrierung. Kommt ein Normalempfänger zum Einsatz, bezeichnet man dies

als empfängergestützte Kalibrierung. Bei beiden Methoden ist die Beachtung der photometrischen Grenzentfernung (Mindestabstand zwischen Lampe und Empfänger) erforderlich. Die photometrische Grenzentfernung ergibt sich aus dem photometrischen Entfernungsgesetz [DIN 5032, 1999-2008]. Für das photometrische Entfernungsgesetz müssen die Voraussetzungen eines punktförmigen Strahlers und eines punktförmigen Empfängers (beleuchteter Punkt P) erfüllt sein. Da reale Strahler und Empfänger eine endliche Ausdehnung haben, entsteht bei der Anwendung des photometrischen Entfernungsgesetzes immer eine Messungenauigkeit. Die photometrische Grenzentfernung definiert sich daher als die Entfernung zwischen Lichtquelle und Empfänger, bei der eine vorgegebene Messungenauigkeit, verursacht durch die endliche Ausdehnung von Lampe und Empfänger, nicht überschritten wird. Dieser Fehler hängt u.a. von folgenden Faktoren ab:

- größte Ausdehnung der Lichtquelle
- größte Ausdehnung der lichtempfindlichen Fläche des Empfängers
- Lichtstärkeverteilung der Lichtquelle
- örtliche Leuchtdichteverteilung der Lichtquelle
- richtungsabhängige Bewertung der Strahlung durch den Empfänger

Für genaue photometrische Messungen sollte die Abweichung bei Anwendung des photometrischen Entfernungsgesetzes $< 0,25$ % aufweisen. Es gilt für einen kreisförmigen Lambertstrahler als photometrische Grenzentfernung $r$ ein Abstand, der in etwa 10 mal so groß wie der Durchmesser der Lichtquelle ist [DIN 5032-1; S.6].

Um aus den Photoströmen eines beliebig spektral angepassten Si-Elementes auf deren absolute Bestrahlungsstärke zu schließen, muss das Element spektral mit einem *Normal* abgeglichen werden. Die einfachste Methode ist die empfängergestützte Kalibrierung. Bei dieser Methode ist die spektrale Verteilung der Strahlungsquelle nicht ausschlaggebend. Es sollte jedoch sichergestellt werden, dass die Strahlungsleistung der Quelle im benötigten empfindlichen Spektralbereich größer als die Rauschgrenze des Empfängers ist.

Die Herausforderung bei der Kalibrierung des Empfängers objektschädigender Strahlung liegt in der Aufteilung der spektralen Empfindlichkeit in drei Teilbereiche. Es ist eine Kalibrierung in zwei Schritten nötig.

1. spektrale Kalibrierung der Einzelempfänger
2. Bestimmung des Anteils am Gesamtsignal
   (Gewichtungsfaktoren $G_1$ bis $G_3$ aus Kapitel 4.2.1.4)

Der Beleuchtungsstärke-Empfänger wurde nach DIN 5032:1999-2008 kalibriert.

### 4.2.4 Ermittlung des aktuellen Bestrahlungsniveaus

Aus dem Aufbau der Messtechnik folgen die zu messenden bzw. zu berechnenden licht- und strahlungstechnischen Größen:

- Beleuchtungsstärke $E$ (gemessen)
- objektschädigend wirksame Bestrahlungsstärke $E_{dm}$ (gemessen)
- Schädigungspotenzial $P_{dm}$ (berechnet)

Zunächst ist eine Berechnung der Beleuchtungsstärke $E$ aus den gemessenen Photoströmen $I_{ph}$ des Photometerkopfes über einen Kalibrierfaktor $s$ erforderlich. Es ergibt sich:

$$E(\mathrm{lx}) = I_{ph}(\mathrm{A}) \cdot s(\mathrm{lx/A})$$

Umfangreicher ist die Bestimmung der objektschädigenden Bestrahlungsstärke aus den Sensorwerten. Da jeder Teilsensor eine Beitrag zum Gesamtsignal liefert, besitzen diese jeweils einen eigenen Kalibrierfaktor. Untereinander müssen die Sensoren in Bezug auf das Gesamtsignal gewichtet werden.

$$E_{dm} = I_{ph1} \cdot \underbrace{G_1 \cdot s_1}_{s_1^*} + I_{ph2} \cdot \underbrace{G_2 \cdot s_2}_{s_2^*} + I_{ph3} \cdot \underbrace{G_1 \cdot s_3}_{s_3^*}$$

Die Kalibrierfaktoren $s_1$ bis $s_3$ können mit den Gewichtungsfaktoren zu einen neuen Faktor $s_1^*$ bis $s_3^*$ zusammengefasst werden. Aus den beiden vorhergehenden Messwerten der Beleuchtungsstärke und der objektschädigenden Bestrahlungsstärke kann das Schädigungspotenzial $P_{dm}$ berechnet werden.

$$P_{dm} = \frac{E_{dm}}{E}$$

Nähere Erläuterungen zum Schädigungspotenzial erfolgten im Kapitel 1.2.4.

## 4.3 Validierung des Messkopfes und der elektronischen Schaltung

Zur Bewertung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Messwerte ist die elektronische Schaltung zur Auswertung der Photoströme in Hinblick auf deren Messabweichung zu klassifizieren. Nach DIN EN 13032:2012 werden folgende Kenngrößen für die Messabweichung betrachtet:

- $f_1'$ $V(\lambda)$-Anpassung. Zur Berechnung der spektralen Fehlbewertung der Empfänger für die schädigende Bestrahlungsstärke, wird die spektrale Fehlbewertung nach DIN EN 13032:2012 geringfügig angepasst und führt zur Kenngröße $f_{1,dm}$.
- $f_2$ Cos-getreue Bewertung
- $f_3$ Linearität
- $f_4$ Abweichung des Anzeigegerätes

Die Gesamtabweichung $f_{total}$ ergibt sich nach DIN EN 13032:2012 aus der Summe der Einzelabweichungen. Zusätzlich wird das Signal-Rausch-Verhalten und deren Einfluss auf die Messgenauigkeit untersucht.

Weitere in der Norm DIN EN 13032:2012 beschriebene Kenngrößen werden, aufgrund des Verhältnisses der Abweichung gegenüber oben genannten Kenngrößen, vernachlässigt. Eine Aufzählung der Abweichungen und die Begründung zu deren Vernachlässigung, ist in der Tabelle 4.3 zu finden.

Zur Ermittlung der spektralen und richtungsabhängigen Fehlbewertung für Strahlungsempfänger nach DIN EN 13032:2012-1 wurde ein Goniometer-Messplatz aufgebaut. Wie in Abbildung 4.12 zu erkennen ist, besteht dieser

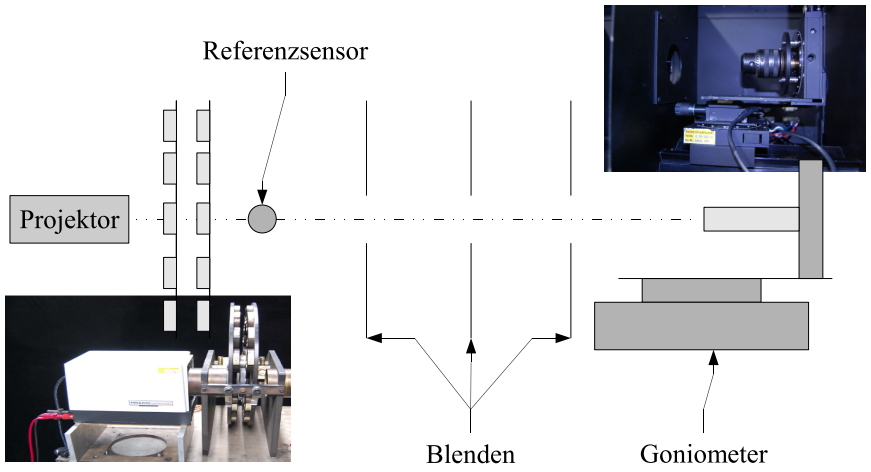



**Abbildung 4.12:** Schematischer Aufbau eines Messplatzes zur Kalibrierung von Strahlungsempfängern

**Tabelle 4.3:** Weitere Kenngrößen für Beleuchtungsstärkemessgeräte nach DIN EN 13032:2012

| Kenngröße | Symbol | Begründung zur Vernachlässigung |
|---|---|---|
| Kalibrierunsicherheit | $u_{cal}$ | Direkte Kalibrierung durch 64 Bit Kalibrierfaktor. |
| UV-Empfindlichkeit | $u$ | Beschreibt die UV-Empfindlichkeit von Photometerköpfen. Diese sollte so klein wie möglich sein. |
| IR-Empfindlichkeit | $r$ | Beschreibt die IR-Empfindlichkeit von Photometerköpfen. Diese sollte so klein wie möglich sein. |
| Ermüdung | $f_5$ | Es wurden ausschließlich langzeitstabile Sensoren eingesetzt. |
| Temperaturabhängigkeit | $f_6$ | Temperatur-schwankungen sind im Museum nicht zu erwarten. |
| Moduliertes Licht | $f_7$ | Modulationen sind durch den Aufbau Unterdrückt. |
| Ungleichmäßige Ausleuchtung | $f_9$ | Es wurden nur sehr kleine Öffnungen für den Lichteintritt gewählt. |
| Messbereichs-umschaltung | $f_{11}$ | Im resultierendem Messaufbau nicht vorhanden. |

aus einem Filtermonochromator mit Projektor zur Strahlungserzeugung, einem kalibrierten Referenzsensor und einem zweiachsigen Goniometer. Es ist eine dreidimensionale Betrachtung der Empfindlichkeit über dem Sensorkopf möglich.

### 4.3.1 Spektrale Fehlbewertung der Empfänger

Die Berechnung der spektralen Fehlbewertung des Empfängers für Beleuchtungsstärke erfolgte nach DIN EN 13032:2012. Demnach ergibt sich für die spektrale Fehlbewertung der Beleuchtungsstärke eine Abweichung von $1,5$ %. Betrachtet man die aktinische Messabweichung dieses Empfängers beispielhaft für die Kalibrierung mit Normlichtart $A$ im Vergleich zur Normlichtart $D_{65}$, ergibt sich eine spektrale Fehlbewertung von $f_{akt} = 0,7$ %.

Äquivalent zur spektralen Fehlbewertung, kann die Fehlbewertung für die Anpassung eines Strahlungsempfängers an beliebige Spektren berechnet werden. Es ist die spektrale Bandbreite auf die Bandbreite des zu betrachtenden Empfängers anzupassen. Bezogen auf die Funktion $s(\lambda)_{dm,rel}$ wird ein erweiterter Spektralbereich mit der Bandbreite von 300 bis 1000 nm festgelegt. Im Bezug auf die Nomenklatur nach CIE 157 wird die berechnete spektrale Abweichung mit $f_{1,dm}$ bezeichnet.

$$f_{1,dm} = \frac{\int_{300}^{1000} |s^*_{dm}(\lambda) - s(\lambda)_{dm,rel}| \cdot d\lambda}{\int_{0}^{\infty} s(\lambda)_{dm,rel} \cdot d\lambda} \cdot 100\ \% \tag{4.6}$$

$$s^*_{dm}(\lambda) = \frac{\int_{300}^{1000} S_{\lambda,A} \cdot s(\lambda)_{dm,rel} \cdot d\lambda}{\int_{300}^{1000} S_{\lambda,A} \cdot s(\lambda)_{rel} \cdot d\lambda} \cdot s(\lambda)_{rel} \tag{4.7}$$

Bedeutung der Symbole:

$s^*(\lambda)$: Spezielle Zwischenfunktion zur Absolutanpassung, gewichtet mit der Normlichtart $A$

$s(\lambda)_{rel}$: relative spektrale Empfindlichkeit des gefilterten Empfängers

$S_{\lambda,A}$: Strahlungsfunktion der Normlichtart $A$ ($T_V = 2856\ K$)

$s(\lambda)_{dm,rel}$: Schädigungsfunktion nach CIE 157

Für den Gesamtempfänger der objektschädigenden Strahlung wurde eine spektrale Fehlanpassung von $11,33$ % ermittelt.

### 4.3.2 Richtungsabhängige Fehlbewertung der Empfänger

Photometerköpfe zur Messung der Beleuchtungsstärke und Radiometer zur Messung der Bestrahlungsstärke müssen eine Abhängigkeit der gemessenen

Werte gegenüber der Einfallsrichtung, in Bezug zur optischen Achse, aufweisen. Zur Darstellung der richtungsabhängigen Empfindlichkeit kann im Messprogramm des oben vorgestellten Messplatzes die Winkeldarstellung gewählt werden. Der DIN EN 13032:2012 entsprechend, muss ein Photometerkopf für Beleuchtungstärkemessgeräte eine kosinusförmige räumliche Bewertungsfunktion besitzen. In der Abbildung 4.13 ist ein Schnitt der Win-

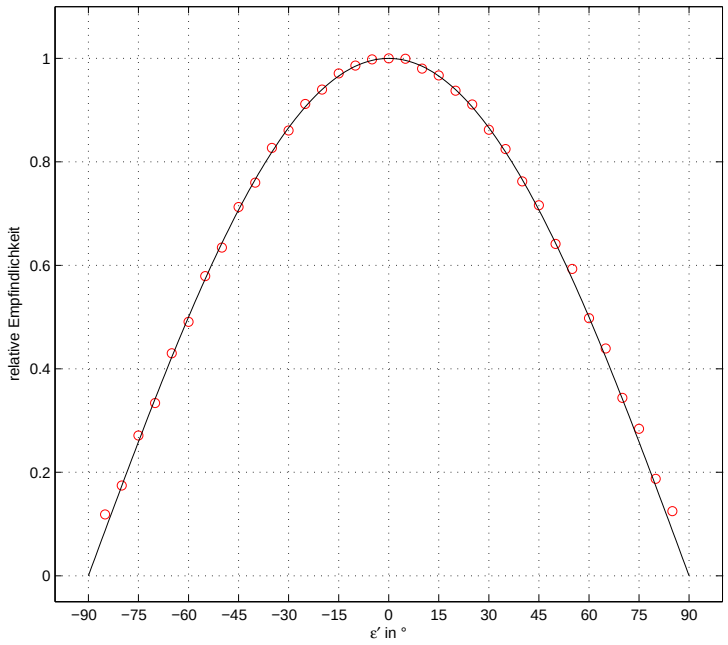



**Abbildung 4.13:** richtungsabhängige Empfindlichkeit bei $\phi = 0°$

kelabhängigkeit für $\phi = 0°$ bei Bestrahlung ohne Filter und mit eingezeichnetem Kosinusverlauf dargestellt. Die roten Kreise kennzeichnen die Messpunkte und der schwarze Graph stellt die Kosinusfunktion als Zielfunktion dar.

Für den gegebenen Empfänger konnte eine winkelabhängige Messabweichung von $f_2 = 1,9\,\%$ ermittelt werden.

### 4.3.3 Linearität gegenüber der Bestrahlung

Ein lineares Verhältnis zwischen der Ausgangsspannung $U_{out}$ der Messchaltung und der zu messenden Größe ist sehr wichtig (bei Beleuchtungsstärkemessköpfen kann die Beleuchtungsstärke $E$ herangezogen werden). Erst wenn dies gegeben ist, können den Messdaten einer lichttechnischen Größe über eine Kalibrierung zugeordnet werden. Die europäische Normung beschreibt dies in der DIN EN 13032:2012-1 mit der Kenngröße $f_3$. Die Linearität der Schaltung wurde bereits erfolgreich mit der Software LTspace IV simuliert. Dennoch sollte dies unter realen Bedingungen mit den ausgewählten Bauteilen überprüft werden. Es gilt weiterhin festzustellen, ob das Schalten mit den Transistoren praktisch gelingt.

Zur Kennzeichnung der Linearitätsabweichung $f_3$ einzelner Messwerte nach DIN EN 13032-1 dient die Funktion:

$$f_3(Y) = \frac{Y}{Y_{max}} \cdot \frac{X_{max}}{X} - 1$$

Bedeutung der Symbole:

$Y$: Ausgangsgröße bei Beleuchtung des Photometerkopfes mit der Eingangsgröße $X$

$X_{max}$: Eingangsgröße, die beim Maximalwert der Ausgangsgröße $Y_{max}$ (größter Wert im Messbereich) erreicht wird

$Y_{max}$: Ausgangsgröße, die durch Beleuchtung des Photometerkopfes mit der Eingangsgröße $X_{max}$ erreicht wird.

Zur Kennzeichnung der Linearitätsabweichung in den verschiedenen Messbereichen dient die Kenngröße $f_3$, deren Wert dem Maximalwert des Betrages der Funktion $f_3(Y)$ innerhalb des jeweiligen Messbereiches entspricht:

$$f_3 = \max[|f_3(Y)|]$$

Für die Messung wurde eine Prototyp-Platine angefertigt. Die Schaltung besaß einen Transimpedanzverstärker mit zwei Rückkopplungen. Die Widerstände hatten Größen von 20 MΩ und 1 GΩ. Diese Widerstände führen zu einem Messbereich von 0-250 nA bei 20 MΩ und 0-5 nA bei 1 GΩ. Somit liegen die Messbereiche innerhalb der erwarteten Photoströme der Sensoren. Die Messung erfolgte im schwarzen Labor. Als Lichtquelle kam eine Radium/Halogen ACL/QT 32 Lampe zum Einsatz. Damit die Schwankungen des elektrischen Netzes keinen Einfluss auf die Messung haben, wurde die Lampe durch das Vorschaltgerät SPS Itzenberger Pies Viechtach Power Amplifier betrieben. Dieses Gerät liefert einen konstanten Strom und hat zwei Ausgangsstufen. Zur Erfassung der Beleuchtungsstärke wurde das Luxmeter Pocket-Lux 2 der Firma LMT verwendet. Der Schaltungsprototyp wurde mit 5 V durch ein Vorschaltgerät Laboratory Power Supply versorgt. Die Erfassung der Ausgangsspannung der Transimpedanzwandler erfolgte mit

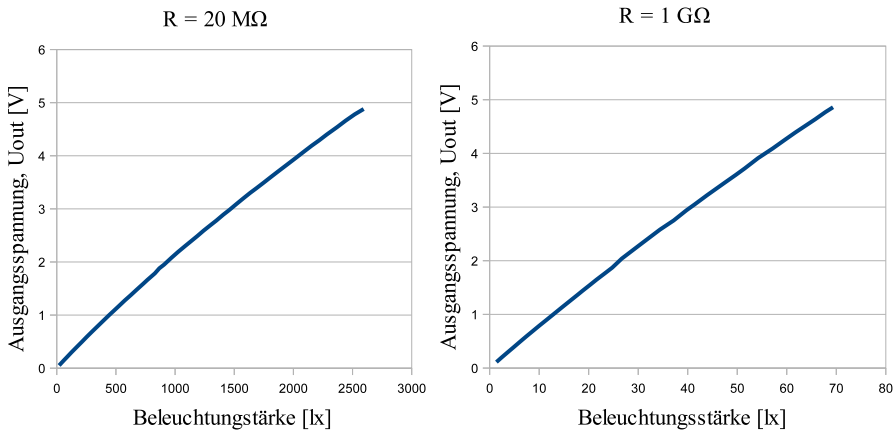



**Abbildung 4.14:** Prüfung der Linearität

dem Multimeter Kontron Elektrik DMM 3020 Digital Multimeter. Für den Messbereich mit der größten Linearitätsabweichung wurde für die Kenngröße $f_3$ ein Wert von 0,17 % festgestellt. Diese Messung zeigte erfolgreich, dass sich die Ausgangsspannung linear zu der Beleuchtungsstärke verhält (vergleiche Abbildung 4.14). Die Transistoren können als Schalter benutzt werden und wirken sich nicht negativ auf die Linearität der Schaltung aus. Somit bestätigt sich die Simulation der Schaltung. Dieser Transimpedanzwandler erweist sich als geeignet für das zu entwickelnde System.

### 4.3.4 Signal – Rausch – Verhalten

Das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) ist ein Maß für die technische Qualität eines aus einer Quelle stammenden Nutzsignals, das von einem Rauschsignal[1] überlagert ist. Allgemein ist das SNR beschrieben über das Verhältnis der vorhandenen mittleren Signalleistung $P_{Signal}$ zur vorhandenen mittleren Rauschleistung $P_{Rauschen}$. Im Fall der Photoströme der Einzelsensoren führt das Verhältnis $P = U \cdot I$ zu folgendem Zusammenhang:

$$\text{SNR} = \frac{I_{ph}}{I_{ph,0}}$$

Als Rausch-Standardabweichung kann eine genaue Messung des Dunkelstromes $I_{ph,0}$ herangezogen werden. Je größer das SNR desto geringer ist der Einfluss der Störgröße auf die Messwerte. Für die zu erwartende Messab-

[1] Rauschsignal – z. B. thermisches Rauschen

**Tabelle 4.4:** Berechnung des SNR der eingesetzten Sensoren

| Sensor | Dunkelstrom $I_{ph,0}$ | Nutzsignal $I_{ph,max}$ | SNR |
|---|---|---|---|
| SIC01S | 1 fA | 50 nA | $5 \cdot 10^7$ |
| EPD 440 | 10 pA | 1,55 $\mu$A | $1{,}55 \cdot 10^5$ |
| S5973-02 | 1 pA | 0,09 $\mu$A | $9 \cdot 10^4$ |
| S1087 | 10 pA | 0,16 $\mu$A | $1{,}6 \cdot 10^4$ |

weichung kann der kleinste SNR-Wert herangezogen werden. Für eine Bestimmung des SNR wurden die verwendeten Sensoren mit einem kalibrierten Photostrommeter der Firma LMT erfasst. Diese sind in Tabelle 4.4 zu finden. Es resultiert eine Messabweichung von $6,25 \cdot 10^{-3}$ %. Damit liegt das Rauschen unter der Auflösung der A/D-Wandler (vgl. Kapitel 4.3.5 und Tabelle 4.9) und braucht nicht in der Messunsicherheitsbetrachtung berücksichtigt werden. Da ausschließlich Sensoren mit sehr geringem Eigenrauschen verwendet wurden, waren diese Werte zu erwarten.

### 4.3.5 Quantisierungsgenauigkeit

Quantisierungsabweichungen entstehen bei der Analog-Digital-Umsetzung von Signalen. Während analoge Signale dem Wertebereich der reellen Zahlen genügen, werden in der digitalen Darstellung bei linearer Quantisierungskennlinie ganzzahlige Vielfache der kleinsten Schrittweite verwendet.

Zunächst müssen die zu erwartenden Bestrahlungsstärken ermittelt werden, um Bezug auf die Abweichung durch eine Quantisierung zu schließen. Zur Abschätzung der Bereiche der Bestrahlungsstärke, die durch die Kombination aus Sensor und Vorverstärker messbar sind, wird zunächst von einer spektralen Verteilung der Lichtart $D_{65}$ ausgegangen. Die Werte der Bestrahlungsstärke $E_e$ sind vergleichbar mit denen des Tageslichtes bei einer Farbtemperatur von $T_{cp} = 6.500$ K. Als Kalibrierlichtart kann auch die Normlichtart A herangezogen werden. Die UV-Bestrahlungsstärke ist jedoch bei der Normlichtart A kleiner, als bei der Normlichtart $D_{65}$. Für einen absoluten Bezug der Strahlungsgrößen wird eine maximal messbare Beleuchtungsstärke von 20.000 lx angenommen. Tabelle 4.5 zeigt im Vergleich zur Tabelle 4.2 auf Seite 59 die maximal zu erwartenden Bestrahlungsstärken der einzelnen Verstärkerstufen an. Die eingeklammerten Werte liegen über den zu erwartenden Bestrahlungsstärken für diese Anwendung.

Mit der Umsetzung der analogen Signale in digitale Werte ist eine Rundung verbunden. Die entstehende Abweichung ist die Quantisierungsabweichung. Gemäß Definition der Messabweichung ist sie die Differenz aus der gestuften Näherung und dem (unverfälschten) Originalsignal. Die statisti-

**Tabelle 4.5:** Maximale Bestrahlungsstärken der Verstärkerstufen bezogen auf eine maximale Gesamtbeleuchtungsstärke von 20.000 lx der Normlichtart $D_{65}$

| | E-Stufe 1 | | E-Stufe 2 | | E-Stufe 3 | | E-Stufe 4 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| W/m$^2$ | $E_{e,min}$ | $E_{e,max}$ | $E_{e,min}$ | $E_{e,max}$ | $E_{e,min}$ | $E_{e,max}$ | $E_{e,min}$ | $E_{e,max}$ |
| SIC01S | 0 | 17,7 | 17,7 | 176,7 | 176,7 | (1767) | (1767) | (17670) |
| EPD 440 | 0 | 0,07 | 0,07 | 0,7 | 0,7 | 7,0 | 7,0 | 69,8 |
| S5973-02 | 0 | 0,07 | 0,07 | 0,7 | 0,7 | 7,1 | 7,1 | 71,3 |

schen und spektralen Eigenschaften der Quantisierungsabweichung hängen auch vom Originalsignal ab, werden aber zur Vereinfachung meistens als weißes Rauschen angenommen. Aufgrund der Anbringung des A/D-Wandlers nach den Verstärkerstufen, besitzt jede Stufe eine unterschiedliche absolute Auflösung der Messwerte. Tabelle 4.6 zeigt die absolute Auflösung der

**Tabelle 4.6:** Auflösung der Photoströme der Vorverstärker

| | E-Stufe 1 | E-Stufe 2 | E-Stufe 3 | E-Stufe 4 |
|---|---|---|---|---|
| | $0 - 4,8$ nA | $0 - 48$ nA | $0 - 480$ nA | $0 - 4,8$ $\mu$A |
| 8 Bit | 12,9 pA | 129 pA | 1,29 nA | 12,9 nA |
| 10 Bit | 3,2 pA | 32,2 pA | 0,32 nA | 3,2 nA |
| 12 Bit | 0,8 pA | 8 pA | 80 pA | 0,8 nA |
| 16 Bit | 50 fA | 0,5 pA | 5,0 pA | 50,3 pA |

Photoströme nach der A/D-Wandlung. Die minimalen und maximalen Eingangswerte der Verstärkerstufen wurden aus der Impedanzwandlerschaltung über den Zusammenhang

$$U_a = -R \cdot I$$

errechnet und zur Kontrolle in SPICE simuliert. Die Rückkoppelwiderstände wurden der Tabelle 4.2 aus Kapitel 4.2.2 entnommen.

Rückschlüsse der Photoströme auf die zugehörigen Bestrahlungsstärken können mit den selben Vorgaben wie bei den Berechnungen in Tabelle 4.5 getroffen werden. Tabelle 4.7 zeigt die Auflösung der Bestrahlungsstärken für 4 A/D-Wandler Typen und die eingesetzten Sensoren.
Die bereits in Tabelle 4.5 ausgeschlossenen Verstärkerstufen 3 und 4 für den Sensor SIC01S werden hier als „nicht benutzt“ (n.b.) angegeben.

Tabelle 4.5, 4.6 und 4.7 führen zur prozentualen Quantisierungsabweichung der A/D Wandler. Diese sind in Tabelle 4.8 dargestellt. Für mess-

**Tabelle 4.7:** Auflösung der Bestrahlungsstärke $E_e$ für $D_{65}$ bei 20.000 lx bei unterschiedlichen Quantisierungsgenauigkeiten

| Sensor | $I_{ph,max}$ ($\mu$A) $D_{65}$ bei 20.000 lx | A/D Aufl. | Quantisierungsauflösung Stufe 1 $E_e$(mW/m$^2$) | Stufe 2 $E_e$(mW/m$^2$) | Stufe 3 $E_e$(mW/m$^2$) | Stufe 4 $E_e$(mW/m$^2$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| SIC01S | 0,0196 | 8 Bit | 69,0 | 690 | n.b. | n.b. |
| | | 10 Bit | 17,3 | 173 | n.b. | n.b. |
| | | 12 Bit | 4,3 | 43 | n.b. | n.b. |
| | | 16 Bit | 0,27 | 2,7 | n.b. | n.b. |
| EPD 440 | 4,98 | 8 Bit | 0,27 | 2,7 | 27,2 | 272 |
| | | 10 Bit | 0,07 | 0,68 | 6,8 | 68 |
| | | 12 Bit | 0,017 | 0,17 | 1,7 | 17 |
| | | 16 Bit | 0,001 | 0,01 | 0,1 | 1,0 |
| S5973-02 | 4,88 | 8 Bit | 0,28 | 2,8 | 27,8 | 278 |
| | | 10 Bit | 0,07 | 0,7 | 6,9 | 69,6 |
| | | 12 Bit | 0,017 | 0,17 | 1,7 | 17,4 |
| | | 16 Bit | 0,001 | 0,01 | 0,1 | 1,0 |

**Tabelle 4.8:** Quantisierungsabweichung in Abhängigkeit der digitalen Auflösung der A/D-Wandler

| Aufl. A/D | Abw. [%] |
|---|---|
| 8 Bit | 39,06 % |
| 10 Bit | 9,77 % |
| 12 Bit | 2,44 % |
| 16 Bit | 0,15 % |

technische Aufgaben können 8 und 10 Bit aufgelöste A/D-Wandler nicht eingesetzt werden, da die Gesamtmessabweichung zu hoch wäre. Bei einfachen messtechnischen Aufgaben können 12 Bit A/D-Wandler zum Einsatz kommen, wenn die geforderte Messgenauigkeit nicht unter 2,5 % liegt. Für alle anderen Messaufgeben ist ein A/D Wandler mit 16 Bit Auflösung zu empfehlen. Da nach der A/D-Wandlung nur noch digitale Werte verarbeitet werden, ist diese Messabweichung aquivalent zur in DIN EN 13032:2012 spezifizierten $f_4$ Kenngröße.

### 4.3.6 Statistische Messabweichungen

Ist $\mu$ der wahre Wert der physikalischen Messgröße, so ist $\overline{x}$ der arithmetische Mittelwert aus $n$ Einzelmessungen $x_i$. Im Idealfall ist $\overline{x} = \mu$. Die mittlere quadratische Abweichung der Einzelmessungen vom Mittelwert ist die Streuung, bzw. Standardabweichung $s$:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2}$$

Die Varianz ist $v = s^2$. Um zu bestimmen, wie sicher der Mittelwert $\overline{x}$ ist, betrachtet man die Standardabweichung des Mittelwertes:

$$m = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Die Standardabweichung gibt den Bereich an, in dem der wahre Wert der physikalischen Größe liegen muss. Dieser Vertrauensbereich hängt von $n$ ab und „verbessert“ sich mit der Zahl der Messungen ($n \Rightarrow \infty$) [Pfau, 2005]. Eine hohe Zahl von Messungen verbessert die „Qualität“ des Messergebnisses [Bronstein, 2008].

Folglich sollte zur Ermittlung eines Anzeigewertes eine Anzahl $n = 50$ Messungen, nach einer Einschwingzeit $t$, durchgeführt werden. Damit liegt die statistische Messabweichung unter der Auflösung der A/D-Wandler und brauch nicht in der Messunsicherheitsbetrachtung berücksichtigt werden.

### 4.3.7 Messunsicherheit

Mit der Ermittlung der Messunsicherheit soll nun eine Aussage über die Breite dieses Intervalls getroffen werden, in dem die Messwerte den wahren Werten einzuordnen sind. Ein vollständiges Messergebnis setzt sich nach der Norm DIN EN 13032:2012-1 zusammen aus:

$$\text{Messergebnis} \pm \text{Messunsicherheit}$$

Für die Messabweichung dieser Messtechnik werden, wie am Anfang des Kapitels erwähnt, nur einige, der in der DIN EN 13032-1 genannten Abweichungen, betrachtet:

$$f_{total} = f_1' + f_2 + f_3 + f_4 + SNR$$

Dabei ist zu unterscheiden zwischen der Gesamtmessunsicherheit $f_{total}^{E}$ des Beleuchtungsstärkemessgerätes und $f_{total}^{E_{dm}}$ des Messgerätes zur Objektschädigung.

Aus den vorangegangenen Kapiteln gingen folgende Messunsicherheiten hervor:

**Tabelle 4.9:** Zusammenfassung der einzelnen Messunsicherheiten

| | Beschreibung | $E$ in % | $E_{dm}$ in % |
|---|---|---|---|
| $f_1'$ | spektrale Abweichung | 1,5 | 11,3 |
| $f_{akt}$ | aktinische Abweichung[2] | 0,7 | - |
| $f_2$ | Cos-getreue Bewertung | 0,9 | 1,9 |
| $f_3$ | Linearität | 0,17 | 0,17 |
| $f_4$ | Quantisierung | 0,15 | 0,15 |
| SNR | Signal-Rausch-Verhalten | $6,25 \cdot 10^{-3}$ | $6,25 \cdot 10^{-3}$ |

Demnach ergibt sich eine Gesamtmessunsicherheit

- $f_{total}^{E}$ des Beleuchtungsstärkemessgerätes von 2,7 %
- und $f_{total}^{E_{dm}}$ des Messgerätes zur Objektschädigung von 13,5 %.

Beide Messköpfe sind nach DIN 5032-7 nicht für Messungen im Labor geeignet. Vielmehr ist der Messabweichung des Beleuchtungsstärkemesskopfes die Klassifikation $A$ zuzuordnen. Der Messkopf für die objektschädigende Bestrahlungsstärke liegt bei der Bewertung nach DIN 5032-7 außerhalb der Grenzen, da sich die Norm ausschließlich auf die Photometrie bezieht. Klassifikationen der Messungenauigkeiten für Strahlungsempfänger sind nicht vorhanden. Wie bereits in Kapitel 4.2.1.5 erwähnt, wurde ein handelsüblicher Sensor mit Filter und Streuscheibe der Firma LMT eingesetzt.

## 4.4 Fazit

Jegliche Exposition der Kunstwerke, in Museen und Galerien, gegenüber optischer Strahlung hat eine Veränderung der dem Licht ausgesetzten Oberfläche zur Folge. Abhängig vom Material benötigen diese Veränderungen unterschiedliche wirksame Bestrahlungen, deren Folge ein sichtbarer Schaden des Kunstwerkes bedeutet. Im Zuge dessen ist es zwingend notwendig, die wirksame Bestrahlungsstärke zu kennen, um die zukünftigen Schäden zu minimieren. Das hier diskutierte Messgerät zeigt eine Möglichkeit diese Bestrahlungsstärke zu erfassen. Die Messunsicherheit ist im Vergleich zu der Beleuchtungsstärkemessung höher. Den größten Anteil der Messunsicherheit bildet die Messunsicherheit der spektralen Anpassung $f_1^{'}$. Betrachtet man jedoch die aktinische Abweichung der Messwerte ergibt sich eine Messunsicherheit von 0,7 %, bei Kalibrierung mit Normlichtart $A$ und Messung von Tageslicht $D_{65}$[3]. Die Differenz zwischen der Messunsicherheit und der aktinischen Messunsicherheit folgt aus der Berechnung der Messabweichung für die

[3]Zwischen diesen beiden Lichtarten ist eine sehr große spektrale Verschiebung der Strahlungsanteile in den UV-Bereich vorhanden

Messung der objektschädigenden Bestrahlungsstärke aus Gleichung 4.6. Es wurde eine Erweiterung des Spektralbereiches, zu der in DIN EN 13032:2012 definierten Berechnung, vorgenommen.

Da jedoch weniger Strahlung in UV-Bereich als im sichtbaren Bereich der Strahlung in Museen und Galerien vorliegt, kommt es zu diesem Unterschied.

Dieses Messgerät ist zur Kontrolle der objektschädigenden Bestrahlungsstärke, zur Überprüfung neuer bzw. bestehender Beleuchtung und zur Risikoabschätzung geeignet.

# Kapitel 5

# Voruntersuchungen Teil 2 bezüglich des Monitorings schädigungsrelevanter Messgrößen am Kunstwerk

Bei Langzeitmessungen (sog. Monitoring) ist das Zeitintervall $\Delta t_m$ zwischen zwei Messungen von großer Bedeutung. Ist das Zeitintervall klein, sinkt die Laufzeit autonomer, Batterie betriebener Messsysteme. Ist das Zeitintervall zu groß, werden kurzzeitige Ereignisse nicht messtechnisch erfasst. Im folgenden werden extreme Licht- und Strahlungsverhältnisse untersucht, um eine Abschätzung des zu wählenden Zeitintervalls zu geben.

## 5.1 Untersuchung kurzzeitig auftretender Strahlungsereignisse im Hinblick auf die Gesamtbestrahlung der Kunstwerke

In Hinblick auf ein autonomes Messsystem, welches selbstständig in der Lage sein soll Messwerte zu erfassen und zu bewerten, ist nicht nur deren spektrale und richtungsabhängige Bewertung von großer Bedeutung, sondern auch deren zeitliche Auflösung. Da die Grundbeleuchtung über den Tag einigermaßen konstant gehalten wird, kommen im Hinblick auf Museen und Galerien zwei zu erfassende Beleuchtungssituationen in Frage.

1. Die kurzzeitige Einstrahlung direkter Sonne auf die Kunstwerke. Dies kann, verursacht durch teilweise bewölkten Himmel, sehr oft über den Tagesverlauf geschehen. Bei dieser Betrachtung ist, zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse, der Einfluss eines Tageslichtsystems auszuschließen. Im realen Anwendungsfall ist jedoch bei der Betrachtung

dieser Ereignisse zu unterscheiden, ob der Ausstellungsraum über einen Sonnenschutz verfügt oder nicht. Dies kann mindernd auf die Tageswerte der Bestrahlung eingehen.

2. Künstliche Strahlung, hervorgerufen durch das Blitzgerät einer Photokamera. Hierbei ist nicht nur der zeitliche Verlauf der Beleuchtungsstärke ausschlaggebend, sondern auch die spektrale Zusammensetzung der Lichtquelle. Darüber hinaus ist die Häufigkeit der Ereignisse signifikant für die Höhe der Schädigung.

Beide Ereignisse tragen zur Erhöhung der objektschädigenden Bestrahlung $H_{dm}$ bei. Zu klären ist, wie groß das Schädigungspotenzial und der prozentuale Anteil an der Gesamtbelastung der Kunstwerke ist.

### 5.1.1 Kurze Einstrahlung direkter Sonne bei unverändertem Sonnenschutz

Zur Quantifizierung des Einflusses der direkten Sonnenstrahlung auf die Kunstwerke wird von einem vereinfachten Modell ausgegangen. Ziel ist die Berechnung des größtmöglichen Einflusses. Es werden folgende Annahmen getroffen:

1. Vereinfachte Geometrie des Einfallswinkels auf das Objekt. Hier wird von einem 0° Einfallswinkel ausgegangen. Bei größeren Winkeln sind die berechneten Werte kleiner.

2. Bezug auf normierte Strahlungsfunktionen. Hierbei wird für die künstliche Beleuchtung im Museum die Normlichtart A verwendet, da diese ein sehr geringes Schädigungspotenzial besitzt. Als Sonnenspektrum wird die Normlichtart $D_{65}$ angesetzt, da diese eine gegebene Strahlungsfunktion der Sonne bei 6500 K darstellt.

3. Großer Unterschied der Beleuchtungsstärken. Es werden für die künstliche Beleuchtung das Maximum von 200 lx und für das Tageslicht maximal 3.000 lx[1] auf der Oberfläche des Kunstwerkes angesetzt.

4. Betrachtung diskreter Zeitintervalle von 1 bis 6 Minuten. Bezogen auf die zeitliche Änderung des Tageslichtes und der Messintervallgrenzen sind Zeitintervalle unter- bzw. oberhalb nicht sinnvoll.

5. Sonnenstrahlung außerhalb der betrachteten Zeitintervalle wird vernachlässigt.

Folglich ergeben sich aus der Berechnung der wirksamen Bestrahlung $H_{s,dm}$ die Werte in Tabelle 5.1. Durch den Einfluss kurzzeitiger Einstrahlung direk-

[1] worse case

**Tabelle 5.1:** Prozentualer Zusammenhang der wirksamen Bestrahlung bei kurzzeitiger Sonneneinstrahlung mit der künstlichen Beleuchtung am Beispiel $D_{65}$ ⇔ Normlichtart A (NLA)

| | NLA | Bestrahlungsdauer mit $D_{65}$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 12 h | 1 min | 2 min | 3 min | 4 min | 5 min | 6 min |
| $H_{s,dm}$ $(\frac{\mathrm{W\,s}}{\mathrm{m^2}})$ | 2922 | 142,2 | 284,4 | 246,6 | 568,8 | 714 | 852 |
| % von NLA | | 4,87 % | 9,74 % | 14,6 % | 19,5 % | 24,3 % | 29,2 % |

ter Sonnenstrahlung auf die wirksame Gesamtbestrahlung können Hinweise für das Zeitintervall einer kontinuierlichen Messung entnommen werden (weiteres in Kapitel 5.2 auf Seite 78).

### 5.1.2 Photoblitz während der Ausstellung

Hanlan [1970] untersuchte die Farbveränderungen von Proben durch ein elektronisches Blitzgerät für Fotoaufnahmen mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 6000 K. Saunders [1995] untersuchte abermals die Wirkung von Blitzlicht auf Farben. Er verglich die Größe der Farbveränderungen, die zwei gänzlich verschiedene Typen von Licht an Proben hervorrufen – das Licht eines Galerieraumes mit 80 lx bzw. 200 lx für ein Jahr und die äquivalente Dosis durch Photo-Blitzgeräte. Die Versuche zeigten, dass die schädigende Wirkung von Blitzlicht bei gleicher Dosis nur wenig stärker ist, als die einer kontinuierlichen Raumbeleuchtung.

Heutige Elektronenblitzgeräte arbeiten mit Xenon-gefüllten Blitzlampen, die zehntausendfach verwendet werden können. Beim Auslösen wird dabei ein zuvor auf einige 100 Volt aufgeladener Kondensator entladen, wodurch im Inneren der Blitzlampe eine sehr kurze, helle Gasentladung erzeugt wird. Die typische Leuchtdauer dieses Blitzes liegt je nach Leistung und Ansteuerung zwischen etwa 1/300 und 1/40.000 Sekunde. Abhängig von der Bauart und der Größe der Kamera kann der Lichtstrom der Blitzgeräte erhebliche Unterschiede aufweisen. Auch die Form des Reflektors ist ausschlaggebend für die resultierende Beleuchtungsstärke am Kunstwerk. Zur genaueren Bestimmung der Unterschiede wurden unterschiedliche Klassen von Blitzgeräten herangezogen. Deren zeitlicher Verlauf der Beleuchtungsstärke wurde in einer Entfernung von 2 m gemessen. Die daraus resultierenden maximalen Beleuchtungsstärken und deren berechnete Schädigungen sind in Tabelle 5.2 zu finden. Bei den untersuchten Blitzgeräten handelt es sich um Xenon-gefüllte Blitzlampen, welche mittels einer Hochspannung gezündet werden. Während der Gasentladung gibt das kurzzei-

tig unter hohem Druck stehende Füllgas Xenon Licht mit hohem Farbwiedergabeindex und einer Farbtemperatur ab, die etwa der des Tageslichts entspricht. Eine Ausnahme bildet das Blitzgerät der Mobiltelefone. Dort werden, durch die Beschränkungen geringer Energie des tragbaren Gerätes, LEDs als Lichtquelle eingesetzt. Die Bestrahlungswerte $H$ und $H_{dm}$ sowie die Schädigungspotenziale $P_{dm}$ wurden über die jeweiligen Spektren und den zeitlichen Verläufen der Beleuchtungsstärke berechnet. Die Messung der Beleuchtungsstärke über der Zeit des Blitzes erfolgte mit einem LMT SF 100 Blitzmessgerät in Verbindung mit einem USB-Speicheroszilloskop Agilent U2702A mit einer zeitlichen Auflösung von 0,16 $\mu s$/Messwert bzw. bei der LED von 1,6 ms/Messwert.

**Tabelle 5.2:** Untersuchung der Beleuchtungsstärken und Bestrahlungen der Photo-Blitzgeräte unterschiedlicher Klassen

| Blitzgerät | max. Beleuchtungsstärke $E$ in klx | Dauer $t$ in $\mu$s | Belichtung $H$ in lx · s | objektschädigende Bestrahlung $H_{dm}$ in Ws/m$^2$ |
|---|---|---|---|---|
| professionelles Blitzgerät | 127 | 133 | 6,28 | $6 \cdot 10^{-3}$ |
| professionelle Kamera mit Blitz Canon EOS 500D | 115 | 219 | 15,6 | $1{,}5 \cdot 10^{-2}$ |
| Digitalkamera der Mittelklasse Casio Exilim | 106 | 108 | 7,3 | $7 \cdot 10^{-3}$ |
| Digitalkamera der Mittelklasse Medion | 84 | 633 | 14,4 | $1{,}4 \cdot 10^{-2}$ |
| Blitzgerät eines Mobiltelefons mit eingebauter Kamera[1] | 0,045 | 500.800 | 19,2 | $3{,}5 \cdot 10^{-3}$ |

[1] mit LED Blitz

Zur Abschätzung des Gefährdungspotentials von Blitzgeräten kann aus diesen Messwerten eine maximale objektschädigende Bestrahlung von $H_{dm} = 1{,}5 \cdot 10^{-2}$ Ws/m$^2$ für einen Blitz festgelegt werden. Der Bezug des $N$-fachen dieses Wertes auf die objektschädigende Bestrahlung der Grundbeleuchtung, in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke am Objekt, ergibt den Anteil der Blitze $\mathcal{P}_{flash}$ an der Gesamtbestrahlung der Kunstwerke. Bei unterschiedlichen Beleuchtungsstärken ergibt sich ein indirekt proportionaler Zusammenhang der Beleuchtungsstärke $E$ zur Erhöhung der Objektschädigung durch Photoblitzlicht (Gleichung 5.1). Als Berechnungsgrundlage für die Beleuchtungsstärke wurde das Spektrum des Planck'schen Strahlers bei einer Temperatur von 3200 K angenommen. Ein Strahler dieser Temperatur

**Tabelle 5.3:** Prozentualer Anteil $\mathcal{P}_{flash}$ der Blitze an der Erhöhung der Gesamtbestrahlung bei unterschiedlichen Beleuchtungsstärken $E$ am Objekt für eine Beleuchtung mit ungedimmten Halogenlampen

| | $\mathcal{P}_{flash}$ (%) | Beleuchtungsstärke $E$ (lx) 50 | 100 | 200 | 300 | 500 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Blitzhäufigkeit (ppm)[1] | 1 | 1,75 | 0,87 | 0,44 | 0,29 | 0,17 |
| | 2 | 3,5 | 1,75 | 0,87 | 0,58 | 0,35 |
| | 3 | 5,24 | 2,62 | 1,31 | 0,87 | 0,52 |
| | 4 | 6,99 | 3,5 | 1,75 | 1,17 | 0,7 |
| | 5 | 8,74 | 4,37 | 2,19 | 1,46 | 0,87 |
| | 6 | 10,49 | 5,24 | 2,62 | 1,75 | 1,05 |
| | 7 | 12,24 | 6,12 | 3,06 | 2,04 | 1,22 |
| | 8 | 13,99 | 6,99 | 3,5 | 2,33 | 1,4 |
| | 9 | 15,73 | 7,87 | 3,93 | 2,62 | 1,57 |
| | 10 | 17,48 | 8,74 | 4,37 | 2,91 | 1,75 |
| | 20 | 34,97 | 17,48 | 8,74 | 5,83 | 3,5 |
| | 50 | 87,41 | 43,71 | 21,85 | 14,57 | 8,74 |
| | 60 | 104,9 | 52,45 | 26,22 | 17,48 | 10,49 |
| | 100 | 174,83 | 87,41 | 43,71 | 29,14 | 17,48 |

[1] ppm = Blitze (Peaks) pro Minute

besitzt das Schädigungspotenzial $P_{dm} = 0,26$ mW/lm [Aydinli, 1992][2].

$$E \sim \frac{1}{\mathcal{P}_{flash}} \tag{5.1}$$

Tabelle 5.3 zeigt den möglichen prozentualen Anteil der Erhöhung der Schädigung durch Photoblitzgeräte. Für die Beleuchtungsstärke $E$ wurden Werte von 50, 100, 200, 300 und 500 lx angenommen. Die Häufigkeit der Blitze $N$ wurde von 1 bis 100 Blitze pro Minute festgelegt. Aus Tabelle 5.3 geht hervor, dass die schädigende Bestrahlung sowohl von der allgemeinen Beleuchtungsstärke, als auch von der Häufigkeit des Auftretens der Blitzereignisse abhängt. Für sehr empfindliche Objekte bei einer Beleuchtungsstärke von $E = 50$ lx ist ein Photo-Verbot gleichfalls sinnvoll, wie für oft photografierte, unempfindliche Objekte bei einer Raumbeleuchtungsstärke von 500 lx.

## 5.2 Festlegung des Zeitintervalls $\Delta t_m$ für eine Langzeitmessung

Ausgehend von denen in Kapitel 5.1.1 und 5.1.2 beschriebenen Zusammenhängen kann ein Zeitintervall, für ein Monitoring der schädigenden Be-

[2] Das Spektrum der Glühlampen, besonders der Halogen-Glühlampen, ähnelt stark den Spektrum des Planck'schen Strahlers mit geringen Abweichungen

strahlungsstärke und der Beleuchtungsstärke am Objekt, abgeschätzt werden. Bei Langzeitmessungen ist eine Reduzierung der Messergebnisse zwingend notwendig. Ausschlaggebender Faktor ist das Zeitintervall zwischen den Messwerten. Dieses bestimmt die Anzahl der Messwerte in einem festgelegten Zeitraum. Für die Langzeitmessung im Rahmen eines Monitoringsystems für museale Objekte ist von einem Zeitraum von mehreren Jahren bzw. Jahrzehnten auszugehen. Ein sehr hohes Zeitintervall ist daher praktikabel. Die Messabweichung ist ebenfalls vom Zeitintervall beeinflusst. Diese wird, entgegengesetzt zur Anzahl der Messwerte, größer je länger das Zeitintervall ist. Kleine unvorhergesehene Strahlungsereignisse können nicht mehr erfasst werden.

Aus diesen Überlegungen und der Forderung einer hinreichend hohen Erfassung kurzzeitig auftretender Strahlungsereignisse ist ein Zeitintervall eines Monitoringsystems für die Messung in Museen von 1 Minute ratsam.

## 5.3 Klassifizierung nach unterschiedlichen Messbedingungen

Bei der Auseinandersetzung mit den einzelnen Stadien eines Kunstwerkes sind nicht die Zerfallstadien gemeint. Hier wird differenziert nach der Art der Beleuchtung. Somit kommen drei Stadien in Frage:

- Exponierte Kunstwerke – Kunstwerke, die an einem festen Ort untergebracht sind, mit vorherbestimmten Beleuchtungsbedingungen.
- Expedierte Kunstwerke – Kunstwerke, die in jeglicher Form ortsungebunden sind.
- Magazinierte Kunstwerke – Kunstwerke, die unter möglichst geringer Schädigung aufbewahrt werden.

### 5.3.1 Erwartete Strahlung exponierter Kunstwerke

Exponierte Kunstwerke im Innenraum können diversen spektralen Strahlungsverteilungen ausgesetzt sein. Neben dem Tageslichtanteil, der durch Fenster und ggf. Screens[3] transmittiert wird, spielt der Anteil der künstlichen Beleuchtung eine erhebliche Rolle. Abbildung 5.1 zeigt beispielhaft einige im Museum gemessene Strahlungsfunktionen des Tageslichtanteils und der künstlichen Beleuchtung. Es ist deutlich zu erkennen, dass je nach Wahl der Lichtquellen große Unterschiede in der spektralen Zusammensetzung vorliegen. Daraus resultieren unterschiedliche Lichtfarben, Farbwiedergabe-Werte und Schädigungspotenziale.

[3] Stoffe, die im Innenraum vor die Fenster gezogen werden, um die Beleuchtungsstärke zu minimieren und das direkte Sonnenlicht zu streuen.

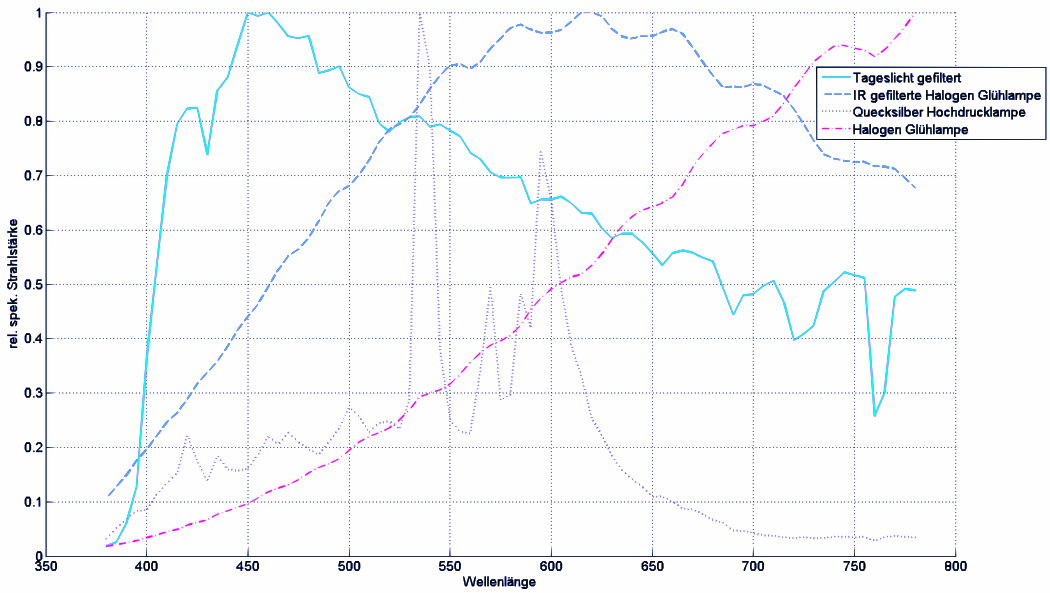



**Abbildung 5.1:** Gemessene Spektralfunktionen im Museum

Bei im Freien ausgestellten Kunstwerken ist der Tageslichtanteil wesentlich höher. Der Anteil des künstlichen Lichtes ist sehr gering, meist nur in den Abendstunden, und trägt zur Gesamtbelastung kaum bei. Im Freien ausgestellte Kunstwerke sind oder sollten generell lichtunempfindlich sein.

### 5.3.2 Erwartete Strahlung expedierter Kunstwerke

Im Gegensatz zu im Innenraum exponierten Kunstwerken können expedierte Kunstwerke gleichen Strahlungsanteilen wie im Freien exponierte Kunstwerke ausgeliefert sein. Zusätzlich kann es bei expedierten Kunstwerken zu einer Bestrahlung unbekannter Stärke und spektraler Zusammensetzung durch unbeabsichtigtes Öffnen der Transportboxen kommen. Berechnungsbeispiele verschiedener Strahlungsquellen sind in Kapitel 1.4 aufgeführt. Aus konservatorischer Sicht ist eine permanente Messung der schädigenden Strahlung sowie der Temperatur und Luftfeuchte während des Transports notwendig. [DIN EN 16163, 2010]; [DIN EN 15757, 2008]

### 5.3.3 Erwartete Strahlung magazinierter Kunstwerke

Bei magazinierten Kunstwerken steht die Sichtbarkeit nicht im Vordergrund. Bei den Grafiken und Gemälden sind keinerlei Farbveränderungen bei Abwesenheit optischer Strahlung beobachtet worden. Trotz alledem auftretende Farbveränderungen sind meist auf chemische Substanzen in der umgebenden Luft bzw. auf thermische oder Feuchtigkeitsschäden zurückzuführen. Grenz-

werte und Vorgaben sind in der Normenreihe der DIN „Erhalt des kulturellen Erbes“ zu finden. Diese werden im Kapitel 2.1 näher beschrieben. Einige Substanzen bzw. Oberflächen verändern sich jedoch unter Ausschluss optischer Strahlung. Elfenbein ist ein natürliches Material, bei dem Vergilbungen an der Strahlung abgewandten Seiten zu beobachten sind. Derzeit wird Elfenbein unter ständiger Bestrahlung gelagert. Es ist jedoch weder definiert, wie hoch die Bestrahlungsstärke, noch wie die spektrale Zusammensetzung der Strahlung sein soll.

## 5.4 Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass die herkömmliche Lichtmesstechnik im Museum nur sehr begrenzt aussagekräftig ist. Messgeräte aus anderen Anwendungen mit der geforderten spektralen Anpassung sind nicht bekannt. Zur Erlangung höherer Aussagekraft ist eine Messtechnik zu entwerfen, welche sich von der herkömmlichen Messtechnik unterscheidet. Aus den Kapiteln 5.1 bis 5.3 ergeben sich für die in Kapitel 2 geforderte neue Messtechnik folgende Randbedingungen:

- Spezielle spektrale Anpassung der Sensorik an die, nach CIE Report 157:2004 veröffentlichte, relative spektrale Objektempfindlichkeit zur direkten Erfassung spektral unbekannter Strahlung am Objekt.
- Zusätzlich zur Messung der objektschädigenden Bestrahlungsstärke, Erfassung der Beleuchtungsstärke am gleichen Ort zur Bestimmung des Schädigungspotenzials.
- Räumliche Anpassung der Messköpfe für die Bewertung der Einstrahlungsrichtung.

Optimal für diesen Einsatzzweck sind Spektralradiometer im Wellenlängenbereich zwischen 300 und 1000 nm. Diese besitzen den Vorteil, dass sämtliche spektrale Empfindlichkeiten nachträglich auf die Spektralmessung angewandt werden können. Für mobile Messgeräte und größtenteils Laborgeräte ist jedoch eine solche Anwendung nicht geeignet. Gründe dafür sind:

- der hohe Anschaffungspreis
- die aufwendige Kalibrierung (jede Wellenlänge einzeln)
- die Größe
- die meist langen Messzeiten – kann einige Sekunden bis zu mehreren Minuten dauern – , in denen die Beleuchtungssituation konstant sein muss

Etabliert für die integrale Messung sind mit Filtern angepasste optische Empfänger. Deren spektrale Systemempfindlichkeit ist mit den Filtern möglichst nahe der spektralen Zielfunktion nachzubilden. Dieser Aufbau wird auch für diese Messtechnik bevorzugt.

Mit einem Messkopf – oben genannter Eigenschaften – ist ein langfristiges Monitoring nach Kapitel 2 direkt am Kunstwerk möglich. Hierfür sind folgende weitere Randbedingungen zu berücksichtigen.

- Einsatzfähigkeit in allen drei Stadien (exponiert, expediert, magaziniert)
- dezentrale Erfassung der Messwerte und zentrale Datenhaltung
- Messintervall sollte, unter den Bedingungen der Verringerung der Messdatenanzahl und der Einhaltung der Messgenauigkeit, 1 min betragen
- Speicherung der Daten zur Auswertung und Berechnung der Gesamtbelastung des Kunstwerkes

Mit diesen Randbedingungen kann eine Messtechnik für die kontinuierliche Messung objektschädigender Strahlung in Museen entwickelt werden. Die hohe Skalierbarkeit eines dezentralen Monitoringsystems erlaubt dem Kurator bzw. Restaurator einen gezielten Einsatz zur Überwachung der Strahlung im Museum bzw. direkt am Objekt.

# Kapitel 6

# Monitoringsystem zur permanenten Überwachung der optischen Strahlung an Sammlungsgut

Ein Großteil der Kunstwerke weltweit ist in Dauerausstellungen untergebracht. Dort sind sie im optimalen Fall immer denselben Strahlungsbedingungen ausgesetzt. Eine Aussage über die zu erwartende Schädigung kann getroffen werden. In Tageslichtmuseen bzw. Museen mit Wechselausstellungen und während des Transportes von Kunstwerken können zum Teil erheblich abweichende Strahlungsbedingungen auftreten. Kapitel 1.2.7 und 3 beschreiben einen ausgewählten Auszug der zu erwartenden Strahlung. Bei nicht vorhersehbar veränderlichen Strahlungsbedingungen ist die zu erwartende Schädigung schwer abzuschätzen. Um Änderungen der Strahlung zu protokollieren, sind Reihenmessungen mit bestimmten Zeitintervall nötig. Seit 1980 wird an sogenannten Sensornetzen geforscht. Mit den Projekten *Distributed Sensor Networks* und *Sensor Information Technology* der Militäragentur Defense Advanced Research Projects Agency der Vereinigten Staaten wurde der Einsatz erprobt. Zurzeit sind Sensornetze im Entwicklungsstadium, praktische Anwendungen gab es bislang nur zu Versuchs- und Demonstrationszwecken. Industrielle Anwendungen sind bereits geplant. Der kleinste, existierende Sensorknoten hat einen Durchmesser von einem Millimeter [Hsu, Kahn & Pister, 1998], das bis dato größte Sensornetz deckte mit etwa 1000 Sensorknoten eine 1300 auf 300 Meter große Freilandfläche ab [Forschergemeinschaft USA, 2004]. Sensornetze sind speziell für die Aufnahme und das Monitoring vieler Objekte prädestiniert. Dieser Ansatz im Zusammenspiel mit der im Kapitel 4 spezifizierten Strahlungsmesstechnik bietet neue Möglichkeiten der Überwachung der Kunstwerke.

## 6.1 Technische Konzeption

In diesem Kapitel werden Software- und Hardwareansätze beleuchtet, die für den Einsatz als autonomes Moniotoringsystem in Frage kommen. Diese Technologien bilden die Grundlage für den weiteren Entwurf. Die Rahmenbedingungen der Anwendung werden durch die Auswahl der verwendeten Technologien gesetzt.

### 6.1.1 Hardwarekonzept Embedded Systems

Ursprünglich waren mit einem Embedded System (engl. eingebettetes System) Hardwaresysteme gemeint, die direkt in Geräten des Alltags verbaut sind, wie zum Beispiel PC-Hardware für Fernseher, Videorecorder, Flugzeugsteuerung, Waschmaschinensteuerung etc. Mittlerweile umfasst dieser Begriff alles, was mit begrenzten Ressourcen arbeiten muss. Die hier verwendeten Mikrocontroller klassifiziert man daher als Embedded System.

#### 6.1.1.1 Mikrocontroller

Als Mikrocontroller werden Halbleiterchips bezeichnet, die neben dem Prozessor weitere grundlegende Bausteine auf einem Chip vereinen. Oft sind dabei auch der flüchtige und der nicht-flüchtige Speicher auf dem Chip integriert. Es befinden sich auf den Mikrocontrollern – auch One-Chip-Computersysteme genannt – grundlegende Peripheriefunktionen wie CAN®[1], LIN®[2], USB®[3], I²C®[4], SPI®[5], serielle oder Ethernet-Schnittstellen.

#### 6.1.1.2 Adhoc-Netze

Als Adhoc-Netze werden alle Netze bezeichnet, die sich ohne großen Konfigurationsaufwand, nicht-leitungsgebunden und in der Regel über Funkwellen miteinander vernetzen. In diese Kategorie fallen PANs[6], wie zum Beispiel Bluetooth®, Wireless USB sowie ZigBee®, aber auch WLANs[7]. Sie dienen alle dem Zweck, in einem lokal begrenzten Raum[8] eine Netzwerkverbindung für eine Gruppe von Netzwerkknoten aufzubauen, ohne durch eine Serverinstanz gesteuert zu werden, wie es z. B. bei DHCP[9]-basierten Netzwerken der Fall ist. [Mesut, 2004]

[1] Controller Area Network
[2] Local Interconnect Network
[3] Universal Serial Bus
[4] InterIntegrated Circuit
[5] Serial Peripheral Interface
[6] Personal Area Network
[7] Wireless Local Area Network
[8] PAN: ∼ 10-100 m, WLAN: ∼ 100 m
[9] Dynamic Host Configuration Protocol

#### 6.1.1.3 Multi-Hop Adhoc-Netze (MANET) oder MeshNetzwerke

Als Multi-Hop Adhoc-Netze werden Netze bezeichnet, in denen jede Netzwerkkomponente als Server und Client fungiert [Mesut, 2004]. Dabei sind alle Komponenten dieses Netzes sowohl Nutznießer der Informationen als auch Weitervermittler für andere Knoten. Multi-Hop Adhoc-Netze müssen leicht konfigurierbar sein bzw. sich im besten Fall selbst konfigurieren. Bei Multi-Hop Adhoc-Netzen darf es nicht erheblich sein, ob der Netzwerkknoten fest installiert oder beweglich ist. Sie haben die Eigenschaft ihre Netzwerktopologie[10] ständig zu verändern. Die Benutzer von Multi-Hop Adhoc-Netzen erwarten dieselben Anwendungen nutzen zu können, wie in bisherigen Rechnernetzen. Alle gewohnten Anwendungsprotokolle müssen daher transparent weitergeleitet werden. Durch diese Parameter sind große Herausforderungen an die Routing-Protokolle gestellt. In der Regel sind mobile Netzwerkknoten klein und haben daher eine begrenzte Rechen- und Speicherkapazität. Trotzdem müssen sie die Struktur des Netzwerks, in dem sie sich bewegen, komplett kennen, um eine Aussage darüber zu treffen, ob ein Verbindungsaufbau zum Zielknoten möglich ist. Das heißt, ob überhaupt Nachbarknoten zur Verfügung stehen und ob diese, wenn sie nicht Adressat der Anfrage sind, weitere Nachbarknoten zur Verfügung stellen, um die Anfrage weiterzuleiten. Mit steigender Zahl der Netzwerkknoten erhöht sich die Komplexität dieses Netzes und mehrere Wege eröffnen sich zum Erreichen des Zielknotens. Daher sollten Multi-Hop Adhoc-Netze immer den optimalen Weg zum Zielknoten ermitteln. Da dies eine sehr komplexe Berechnung[11] ist, kann der Aufbau einer Netzwerkverbindung für einen Anwender unerträglich lang sein. Eine Lösung wäre, die Topologie im Speicher vorzuhalten und ständig zu aktualisieren. Mobile Geräte haben aber in der Regel nur eine batteriegestützte Stromaufnahme. Durch diese Einschränkung können sie eine Aktualisierung der sie umgebenden Netzwerktopologie nur sporadisch durchführen, da ihre Betriebsdauer sonst stark sinken würde. Eine zu kurze Lebensdauer würde die Akzeptanz dieser Systeme aber stark minimieren. In Multi-Hop Adhoc Netzen muss die sogenannte Schleifenfreiheit gelten. Es muss vermieden werden, dass ein Datenpaket eine Gruppe von Netzwerkknoten nicht verlassen kann und das Paket niemals sein Ziel erreichen kann.

Es gibt eine Vielzahl von Routing-Algorithmen für Multi-Hop Adhoc-Netze, die jeweils optimal für ein gewisses Anwendungsszenario ausgerichtet sind. Zur Übersicht werden die bekanntesten Verfahren im folgenden Abschnitt kurz erläutert. Genauer wird auf den *Adhoc On Demand Distance Vector Routing-Algorithmus* eingegangen, da dieser in den meisten Java basierten Systemen angewandt wird.

[10] Struktur des Netzwerks: Lage der Netzwerkknoten und die Beziehung zu ihren Nachbarn

[11] Dijkstra-Algorithmus

#### 6.1.1.4 Routing in Multi-Hop Adhoc-Netzen

Man kann alle Mesh-Routingprotokolle grob in drei Klassen unterscheiden [Mesut, 2004]:

- Proaktiv
  - Destination Sequenced Distance Vector Routing
  - Fisheye State Routing
  - Optimized Link State Routing Protocol, etc.
- Reaktiv
  - Adhoc On Demand Distance Vector Routing
  - Dynamic Source Routing
  - Ant Routing Algorithm, etc.
- Hybrid
  - Zone Routing Protocol
  - ZoneBased Hierarchical Link State Routing
  - Distributed Dynamic Routing Algorithm, etc.

Proaktive Verfahren werden auch als tabellenbasierte Verfahren bezeichnet. Diese Algorithmen versuchen in einem vordefinierten Intervall alle Verbindungskombinationen zu den anderen Netzknoten vorzuhalten und den dazugehörigen Tabelleneintrag zu aktualisieren. Bei diesen Verfahren wird zur Sendezeit nur in der eigenen Tabelle nachgeschaut, welcher Pfad der optimale zum Zielknoten ist. Proaktive Verfahren erzeugen durch die ständige Aktualisierung der Routinginformationen einen dauerhaften Netz-Overhead, können aber kurzfristig auf eine Anfrage reagieren. Reaktive Verfahren versuchen, im Gegensatz zum proaktiven Verfahren, erst zur Sendezeit zu ermitteln, wie der optimale Pfad zu dem gewünschten Knoten ist. Diese auch als On-Demand-Routing bezeichneten Verfahren schonen damit im Ruhezustand sämtliche Ressourcen des Systems. Der Nachteil dieses Verfahrens ist, dass die Ermittelung des Routings ein sehr aufwändiger Prozess ist und sich die Sendezeit kritisch erhöhen kann. Zusätzlich kann es bei vielen Sendeanfragen ebenfalls zu einer unnötigen Netzwerk- und Prozessorbelastung kommen, da für jedes gesendete Paket der optimale Weg ermittelt wird. In Untersuchungen zeigte sich, dass die Performance von reaktiven Verfahren im Mittel günstiger ist. Grund dafür ist der dauerhafte Overhead der proaktiven Verfahren. Zusätzlich sind viele Tabelleneinträge schnell veraltet und verlängern den Aufruf der Routinginformationen. Hybride Verfahren sind Mischvarianten zwischen reaktiven und proaktiven Verfahren. Dabei sind die entstehenden Algorithmen sehr komplex und versuchen die Vorteile der Algorithmen zu verbinden und die Nachteile zu unterdrücken. [Mesut, 2004]

#### 6.1.1.5 Adhoc On Demand Distance Vector Routing (AODV)

Das **A**dhoc **O**n Demand **D**istance **V**ector-Routing (AODV) ist ein Protokoll zum Routen in **M**obile **A**dhoc **Net**work (MANETs) und wurde im RFC 3561 schriftlich festgehalten. Dieses IPv6-fähige Protokoll stellt eine Erweiterung des *Destination-Sequenced-Distance-Vector* (DSDV)-Routingprotokolls dar. DSDV ist im Gegensatz zu AODV ein proaktives Verfahren das sämtliche Routinginformationen in einer Tabelle speichert. AODV ver-

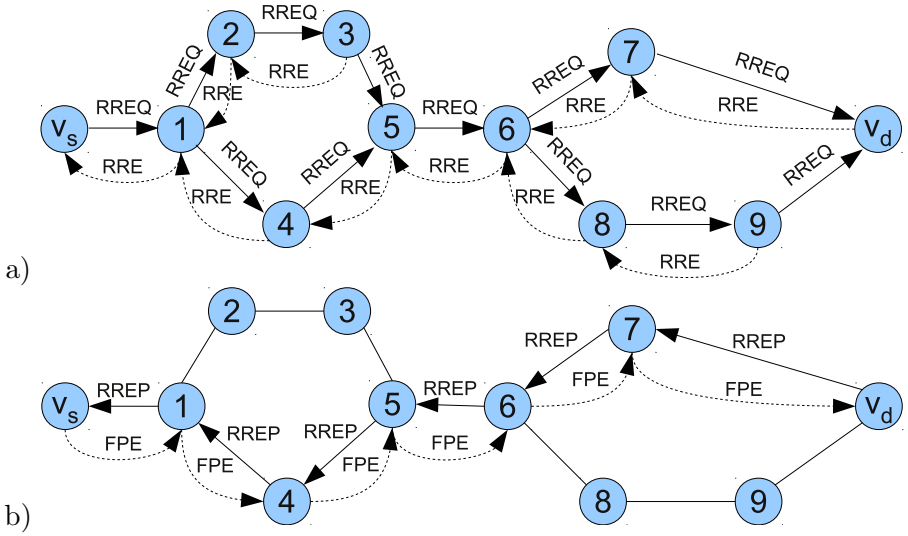



**Abbildung 6.1:** ODV-Routing in einem Multi-Hop Netzwerk [Mesut, 2004]

bessert dieses System dahingehend, dass nur noch lokale Knotenänderungen gespeichert werden, insofern diese eine bestehende Datenverbindung betreffen. Dabei besitzen alle Routingeinträge eine Lebensdauer, die immer dann zurückgesetzt wird, wenn die bestehende Verbindung wieder aufgebaut werden konnte. Nach Ablauf der Lebenszeit wird die Verbindungsinformation aus der Tabelle entfernt; dies kann man als Schwellenwertverfahren bezeichnen. Dabei kann man den Ablauf des AODV-Algorithmus in zwei Phasen unterteilen: Die Pfadsuche und die Pfadpflege. Dabei ist die Pfadpflege die Rücksetzung der Lebenszeit eines vorhandenen Eintrags bei Weiterbestehen der Route bzw. der Neueintrag eines gefunden Pfades. Die Pfadsuche ist das Ermitteln einer neuen Route. Der Ablauf der Pfadsuche ist dabei in Abbildung 6.1a) angezeigt. Dabei sendet der Quellknoten ($v_s$) ein **R**oute **Req**uest Paket (RREQ). Dies wird von jedem Knoten an alle nachstehenden Nachbarn weitergeleitet. Jedes RREQ-Paket wird mit einer Sequenznummer indiziert. Ein Vermittlungsknoten kann bei mehrmaligem Erhalt derselben Sequenznummer die zweite Nachricht verwerfen und davon ausgehen, dass die Nachricht des ersten Senders die schnellere Route bereitstellt (Abbildung 6.1a) an den Knoten 3, 4 und 5). Für diesen wird ein **R**everse **R**oute

**E**ntry (RRE) in der eigenen Routing-Tabelle hinterlegt. Durch den Einsatz einer Sequenznummer wird zusätzlich eine Schleifenfreiheit gewährleistet. So kann dasselbe Paket nicht zweimal von einem Knoten weitergeleitet werden. Bei Erreichen des Zielknotens wird, wie in Abbildung 6.1b) angezeigt, der kürzeste Pfad rückabgewickelt. Dies geschieht anhand eines **F**orward **P**ath **E**ntry Paketes (FPE). Jeder der beteiligten Knoten speichert dabei diese Informationen und erhält damit implizit einen Tabelleneintrag für den Zielknoten. [Mesut, 2004]

#### 6.1.1.6 Sensornetzwerke

Ein Sensornetz (von engl. wireless sensor network) sind Multi-Hop Adhoc-Netze mit dem Ziel, ihre Umwelt zu erfassen. Jeder Netzteilnehmer besteht aus einem Sensorknoten, der entweder in einem infrastrukturbasierten (Basisstationen) oder in einem sich selbst organisierenden Adhoc-Netz zusammenarbeitet, um die gewünschten Werte aufzunehmen und über das Netzwerk zu kommunizieren. Alle Sensorknoten können per Funk kommunizieren und ihre Umgebung mittels Sensoren überwachen. Die Größe der Sensorknoten reicht von relativ groß (10 x 10 x 10 cm) bis sehr winzig (1 x 1 x 1 mm). Die anvisierte Größe zukünftiger Sensorknoten machte die Idee unter dem Schlagwort Smart Dust (engl. intelligenter Staub) bekannt.

Sensornetze wurden als militärisches Frühwarnsystem zur Überwachung von Pipelines und Landesgrenzen konzipiert. Charakteristisch ist der Gebrauch von batteriebetriebenen Sensoren, die drahtlos miteinander in Verbindung treten und so Adhoc-Netze bilden können. Typisch sind auch verhältnismäßig lange Horch- und Wartephasen der einzelnen Sensoren, sowie deren Einschränkungen in den Hardwaremöglichkeiten und der damit verbundenen Problemen in der Energieversorgung der Netzwerkknoten. Um die Sendeleistung der Funkmodule gering zu halten, wird für lange Übertragungsstrecken meist ein Multi-Hop Verfahren angewendet. Ziel eines solchen Sensornetzwerkes ist es, mit Hilfe von vielen sehr kleinen und billigen Knotenpunkten ein möglichst anpassungsfähiges und selbstorganisierendes Netzwerk einzurichten, das zudem über lange Zeiträume hinweg funktionsfähig bleiben soll. [Baumgarten, 2006][Hahn & Neukum, 2004] Die moderne Forschung sieht sie jedoch auch als Ersatz für kostspielige Sensoranordnungen im Fahrzeugbau, Warenverwalter in Lagerhäusern und Überwacher von Naturgebieten auf Schadstoffe, Waldbrände und Tiermigrationen; die denkbaren Anwendungen sind ebenso vielfältig wie die verfügbaren Sensoren.

### 6.1.2 Softwarekonzept

Sämtliche Komponenten der Software-Architektur fußen auf der Programmiersprache Java. Diese gliedert sich in drei Plattformen:

- Java 2 Standard Edition (J2SE)
- Java 2 Micro Edition (J2ME)
- Java Enterprise Edition (JEE), früher Java 2 Enterprise Edition (J2EE)

Die Java 2 Standard Edition ist das originäre Framework der Java-Familie. Sie bildet auch die Grundlage für die beiden anderen. Verkürzt gesprochen kann man sagen, dass die Micro Edition eine reduzierte Variante der J2SE umfasst und die Enterprise Edition die J2SE erweitert. In der Sun Microsystems[12]-Philosophie ist J2SE das Desktop-Framework, die J2ME die Variante für Kleinstgeräte (engl. Embedded) und J2EE hat sein Einsatzgebiet auf Servern definiert. Das Softwarekonzept umfasst alle drei Plattformen. Ihre Verwendung wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

### 6.1.3 Embedded Programmierung mit der Java 2 Micro Edition

Die Java 2 Micro Edition (J2ME) ist die auf Kleinstgeräte zugeschnittene Variante des Java Frameworks. Sie beinhaltet einen reduzierten J2SE-Klassenbestand und erweitert ihr Portfolio um spezifische Komponenten für Kleinstgeräte. Dabei gibt es auch innerhalb des J2ME-Frameworks mehrere Ausprägungsvarianten. Man kann J2ME auf Handys, PDAs und TV Set-Top Boxen, DVD Playern, Maschine zu Maschine Infrastrukturen und ähnlichem verwenden. [Sun Oracle, 2008]

#### 6.1.3.1 Connected Limited Device Configuration (CLDC)

Die Minimalmenge aller Java Klassen, die ein J2ME Paket beinhalten muss, ist in der Connected Limited Device Configuration beschrieben. Sie ist also der fundamentale Teil einer J2ME Anwendung.

[12] Hersteller von Java

Die Version 1.1, die in der Java Specification Release JSR-139[13] veröffentlichte Konfiguration, definiert dabei auch die Minimalanforderungen an physikalischem Speicher und Prozessorleistung, die auf diesen Geräten gewährleistet sein muss [Eschweiler, 2003]:

- 16 Bit oder 32 Bit Prozessor mit 16 MHz
- 160 kB nichtflüchtiger Speicher für die CLDC-Bibliotheken
- 192 kB flüchtiger Speicher
- geringe Stromaufnahme, in der Regel batteriebetrieben
- netzwerkfähig

In der CLDC sind nur die folgenden Pakete der Java 2 Standard Edition beschrieben:

| Paket | Beschreibung |
|---|---|
| `java.io` | Implementiert Klassen zur Ein- und Ausgabe durch DataStreams |
| `java.lang` | Fundamentale Klassen der Programmiersprache Java |
| `java.lang.ref` | Paket zur Auflösung schwacher Referenzen |
| `java.util` | Zusammenfassung nützlicher Klassen: Collections, Date |

Diese Pakete sind zwar auch in der J2SE vorhanden, hier erhält man aber nur eine Teilmenge der Klassen. Vor allem rechenintensive Klassen sind entfernt worden, da die CLDC nur eine Minimalkonfiguration für Kleinstgeräte darstellt. Alle weitergehenden Konzepte sollten gerätespezifisch eingebunden werden. Vor der Version CLDC 1.1 existierte bereits die CLDC 1.0, die unter JSR-30 veröffentlicht wurde. Die wesentliche Neuerung der hier verwendeten Version ist der Einsatz der Gleitkommarithmetik. Zusätzlich zu den J2SE Paketen hat die CLDC Klassen in dem Package `javax.microedition` gebündelt. Dies sind Klassen, die in allen J2ME Anwendungen Verwendung finden. Für dieses Konzept sind die Implementierungen der Maschine zu Maschine Kommunikation sehr interessant und werden im folgenden Abschnitt noch eingehender betrachtet.

#### 6.1.3.2 Generic Connection Framework

Die CLDC implementiert in dem Paket `javax.microedition.io` ein standardisiertes Verfahren zum Zugriff auf Netzwerkressourcen. Alle Verbindungskomponenten sollten dabei die Interfaces[14] dieses Paketes implemen-

[13] Ordnungszahl von Suns Java-Software-Veröffentlichungen
[14] Java: Vorgeschriebene Funktionen ohne genauen Inhalt

tieren. Somit ist gewährleistet, dass unabhängig von den technischen Details in den spezifischen Geräten, ein einheitlicher Zugriff auf das jeweilige Verbindungsprotokoll gegeben ist. So sollte zum Beispiel eine Datagram-Verbindung das Interface `DatagramConnection` implementieren. Damit ist das Verwenden dieser Klasse durch das Generic Connection Framework immer einheitlich: Beim GCF wird das Entwurfsmuster Fabrikmethode verwendet. Im konkreten Fall des GCFs ist die Verwaltungsinstanz die Klasse `javax.microedition.io.Connector`. Diese stellt die Methode `open(String Connection)` zur Verfügung. Diese Fabrikmethode kann mit dem String Parameter des Verbindungsprotokolls aufgerufen werden und erhält als Rückgabewert eine Implementierung des gewünschten Interfaces [Eschweiler, 2003]:

```
DatagramConnection conn = (DatagramConnection);
  Connector.open("radiogram://<Address>:<port>");
```

**Algorithmus 6.1:** Beispiel Connector-Klasse

#### 6.1.3.3 Mobile Information Device Profile (MIDP)

Als Profile werden APIs[15] bezeichnet, die eine CLDC um gerätespezifische Funktionen erweitern. Jedes dieser Pakete besitzt auf den Anwendungsfall zugeschnittene Klassen. So besitzt zum Beispiel die für Handys zugeschnittene J2ME Variante GUI Elemente[16] im Standard Repertoire. Der Lebenszyklus, also das Starten, Stoppen und Pausieren einer J2ME Anwendung, wird auf Basis der CLDC nicht definiert. Viele Anwendungen nutzen aber das Verfahren, wie es bei dem Mobile Information Device Profile (MIDP) definiert ist. Diese nutzt einen Lebenszyklus, der sich an den von Applets aus der J2SE Plattform anlehnt. Eine derartige Anwendung nennt sich dann MIDlet. Ein MIDlet kann dabei wie unten abgebildet drei Zustände annehmen:

- gestartet
- pausierend
- beendet oder zerstört

Der Ablauf des Lebenszyklus kann dabei wie in der Abbildung 6.2 erfolgen. Jede Anwendung, die den MIDlet Lebenszyklus verwendet, muss auch

[15] Application Programming Interface
[16] Graphical User Interface (Grafische Benutzerschnittstelle)

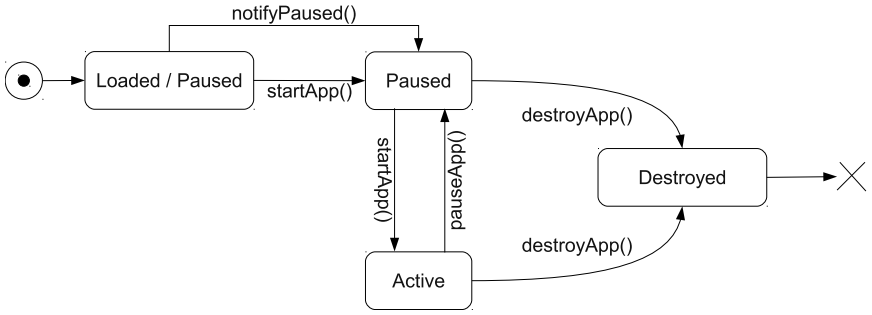



**Abbildung 6.2:** Der MIDlet-Lebenszyklus

die entsprechenden Methoden implementieren und die jeweiligen Zustände definieren:

- `startApp()`
- `pauseApp()`
- `destroyApp()`

Bei den Sun SPOT Mikrocontrollern muss zwar die Methode `pauseApp()` definiert werden, dieser Zustand kann aber nur programmatisch erreicht werden, da ein dazugehöriger Pause-Knopf an den Mikrocontrollern nicht vorhanden ist. Daher wird diese Methode zwar definiert, aber nicht implementiert. Die Methode `startApp()` ist der Einstiegspunkt einer MIDlet konformen Anwendung. Die `destroyApp()`-Methode kann verwendet werden, um Anwendungen sicher zu schließen. Dabei können abschließend noch Daten gesichert und Systemressourcen wieder freigegeben werden [Eschweiler, 2003].

### 6.1.4 Sicherheit

Der Zugriff auf ein Softwaresystem sollte über alle Eingangskanäle auf bestimmte Nutzer beschränkt sein. Die Java Enterprise Edition integriert dafür ein Paket mit dem Namen **J**ava **A**uthentication and **A**uthorization **S**ervice (JAAS). Es bietet grundlegende Containerbased Security-Funktionen. Dabei wird die Zugriffsschutzverwaltung an den Container abgegeben. Ein autorisierter User wird bei Zugriff in der Session abgelegt und bleibt bis zu deren Löschung erhalten. Somit ist gewährleistet, dass alle Zugriffe durch den Container geschützt werden, ohne die Sicherheitsabfrage bei jedem Aufruf durchzuführen. JAAS bietet dazu ein rollenbasiertes System, in dem man Nutzern bzw. Nutzergruppen in Rollen definierte Rechte zuweisen kann. Die Fachtermini in diesem Zusammenhang sind Subject, Principal und Role. Dabei bildet das Subject den Nutzer. Dieser Nutzer kann dabei eine oder mehrere Benutzerkennungen (Principals) haben und dem Principal können eine oder

mehrere Rollen (Role) zugewiesen werden. Die Verantwortung der Security-Funktionalitäten auf den Container zu verlagern, verfolgt das Ziel, dass sich Softwareingenieure nur auf den Kern der Arbeit konzentrieren können, ohne dabei auf Sicherheitskriterien Rücksicht zu nehmen. Es findet dadurch keine Vermischung von Zuständigkeiten statt. Das Potenzial für ein umständliches Softwaredesign an der Kernfunktionalität vorbei wird gesenkt. [Sun Oracle, 2002]

Jedoch kann jede Kommunikation per Funk immer abgehört werden. Da ein frei zugängliches Medium zur Kommunikation genutzt wird, ist eine Manipulation darüber hinaus nicht ausgeschlossen. Bei sehr sensiblen Daten ist von einer Funk-Lösung abzuraten.

## 6.2 Standortbestimmung für ein Monitoring unterschiedlicher Ausstellungsgegenstände

Zunächst muss festgelegt werden, welche Technik im jeweils vorliegenden Fall zum Einsatz kommt. Unterschieden werden vier Szenarien:

- Kabelgebundenes Netzwerk aus Einzelmesspunkten. Alle Messpunkte werden zentral angekoppelt und müssen zentral administriert werden. Vergleiche Abbildung 6.3 auf Seite 94.
- Adhoc Funk-Netzwerk. Das Netzwerk administriert sich selbst. Alle Sensorknoten sind autark. Vergleiche Abbildung 6.4 auf Seite 94.
- Zentralisiertes Funk-Netzwerk (Point to Point). Alle Sensorknoten sind zentral an einen Hauptknoten gebunden und Kommunizieren nur mit diesem. Vergleiche Abbildung 6.5 auf Seite 95.
- Temporär zentralisiertes Funk-Netzwerk. Wie zuvor. Eine Datenkommunikation liegt nur vor, wenn ein Datenempfänger sich im Netz befindet. Vergleiche Abbildung 6.6 auf Seite 95.

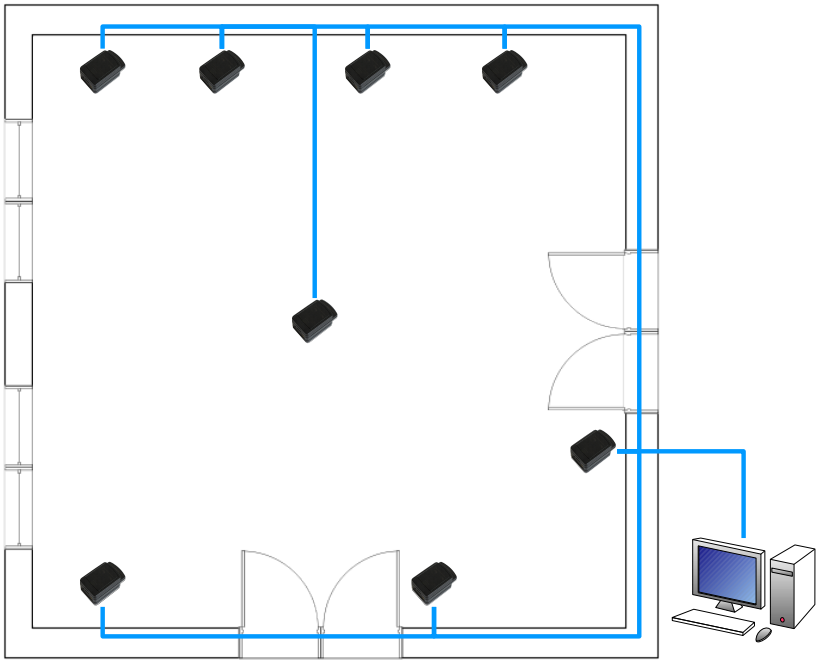


**Abbildung 6.3:** Kabelgebundenes Netzwerk

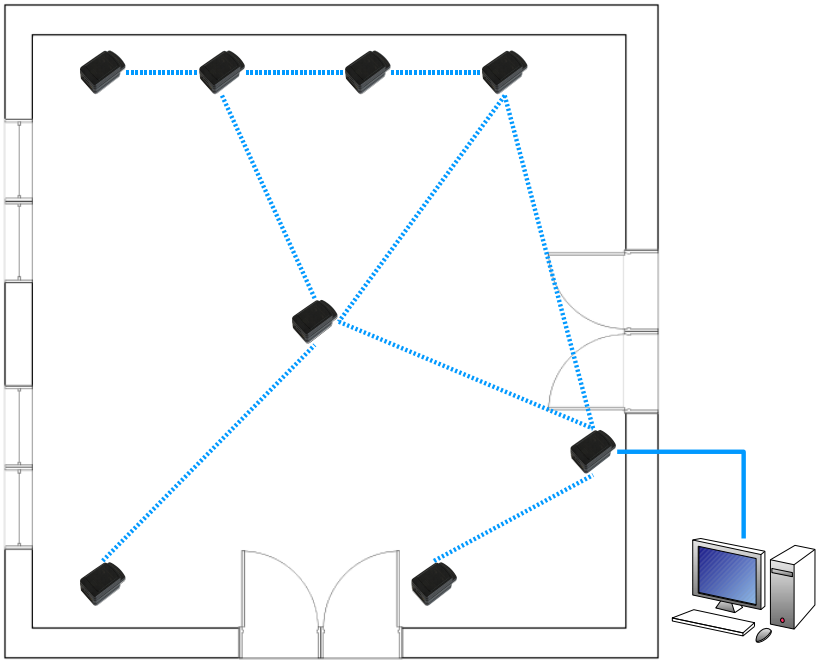


**Abbildung 6.4:** Adhoc Netzwerk: gestrichelte Linie = Funkverbindung; durchgezogene Linie = Kabelverbindung

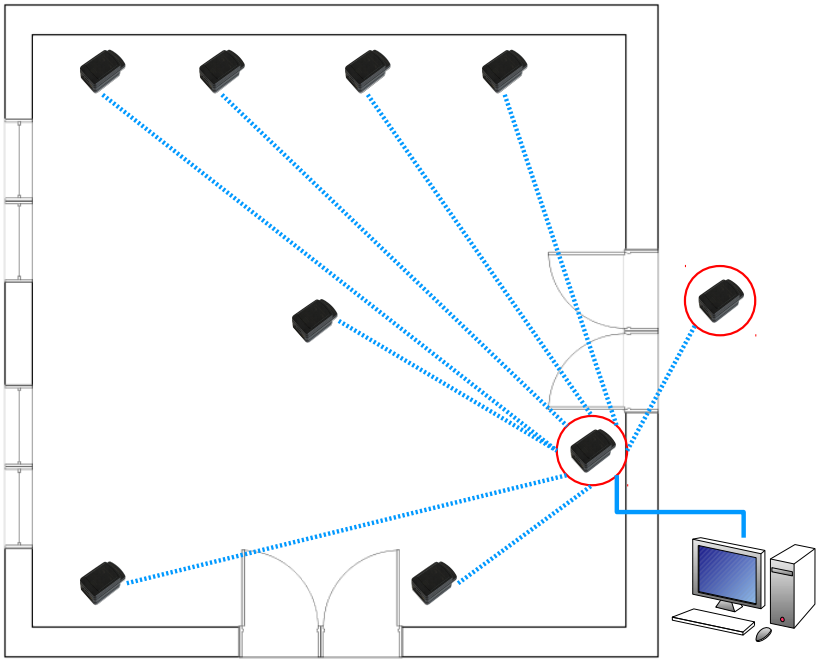


**Abbildung 6.5:** Zentralisiertes Netzwerk: gestrichelte Linie = Funkverbindung; durchgezogene Linie = Kabelverbindung

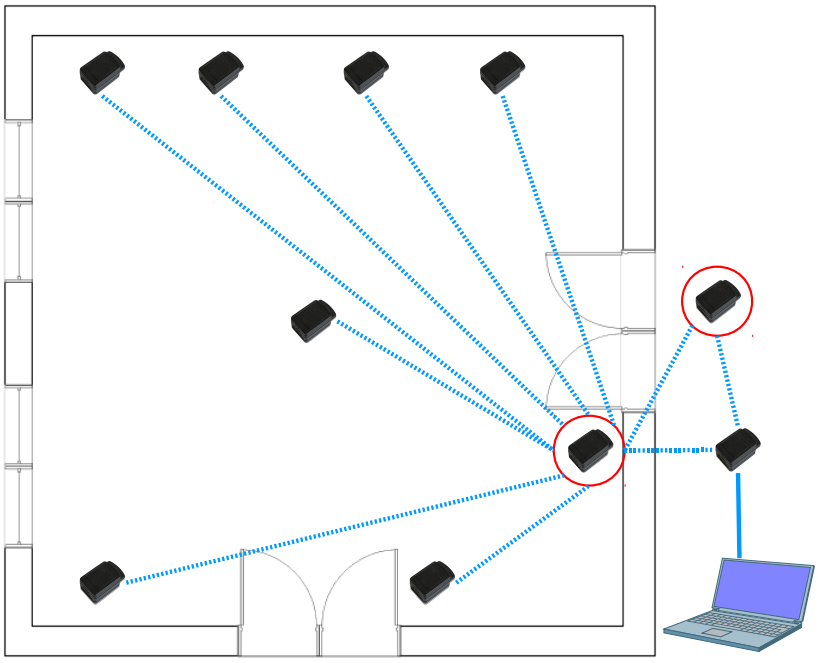


**Abbildung 6.6:** Temporäres zentralisiertes Netzwerk: gestrichelte Linie = Funkverbindung; durchgezogene Linie = Kabelverbindung

**Szenario 1 - Kabelgebundenes Netzwerk:** Bei dieser Art von Netzwerk (Abbildung 6.3) können sowohl vorhandene Netzwerkkomponenten im Gebäude als auch zusätzliche Komponenten benutzt werden. Meist erfolgt die Anbindung über Ethernet, USB oder einer Kombination aus beiden[17]. Proprietäre Kabelverbindungen sind möglich, welche exakt auf die Bedürfnisse der Datenübertragung zugeschnitten werden. Ein gravierender Nachteil dieser Technologie ist der zusätzliche Aufwand bei der Installation eines solchen Netzwerkes. Offensichtlicher Vorteil ist die Sicherheit und die geringe Wartung, da die Sensoren nicht Batterie betrieben werden, sondern die benötigte Energie aus dem Netzwerk erhalten.

**Szenario 2 - Adhoc Netzwerk oder auch Mesh Netzwerk:** Eine im Kapitel 6.1.1.2 beschriebene Variante des selbstorganisierten Netzwerkes (Abbildung 6.4). Die Kommunikation findet über Funk statt, wobei jeder Knoten seine in Funkreichweite liegenden Nachbarn kennt. Die Nachteile sind:

- vergleichsweise komplexes Routing
- speichern von Routing-Tabellen in jedem Endgerät
- jedes Endgerät arbeitet als Router und ist demnach oft aktiv
- die Endgeräte sollten möglichst eingeschaltet bleiben
- höherer Energieumsatz am Netzwerkknoten

Da diese Knoten meist batteriebetrieben sind, ist eine lange Betriebsdauer nicht zu erwarten. Die Vorteile sind:

- sicherste Variante eines Netzwerkes
- bei Ausfall eines Knotens ist durch Umleitung die Datenkommunikation weiterhin möglich
- sehr leistungsfähig
- gute Lastverteilung

**Szenario 3 - Zentralisiertes Funknetzwerk:** Eine für die Applikation in Museen abgeänderte Variante des Adhoc-Netzwerkes stellt das zentralisierte Netzwerk dar (vergleiche Abbildung 6.5). Dabei wird unterschieden zwischen batteriebetriebenen Sensorknoten und permanent energieversorgten Netzwerkknoten (roter Kreis). Die Sensorknoten haben die Aufgabe, Daten aufzunehmen und direkt an einen Netzwerkknoten zu übergeben. Dabei sollte die Batterie so wenig wie möglich belastet werden. Nach Abschluss der Datenaufnahme ist der Sensorknoten, bis zur nächsten Datenaufnahme

[17] z. B. Eutrac Net Composer (Quelle: www.eutrac.de)

in einen energetisch niedrigen Zustand zu versetzen. Die permanent versorgten Netzwerkknoten haben keine Energieproblematik und können somit ein Adhoc-Netz zu anderen Netzwerkknoten aufrecht erhalten, als Zeitgeber arbeiten oder synchronisieren direkt mit einer Basisstation.

**Szenario 4 - Temporär zentralisiertes Funknetzwerk:** Dies ist eine Weiterentwicklung des zentralisierten Funknetzwerkes. Es werden die Gruppen der Netzwerkknoten weiter unterteilt in Organisationsknoten und Basisstationen (Abbildung 6.6). Die Aufgabe der Sensorknoten entspricht der aus Szenario 3. Die Organisationsknoten übernehmen die Aufgabe der Aufrechterhaltung des Adhoc-Netzes und der Definition der Zeit im Netzwerk. Die Datenübergabe an einen Rechner übernimmt ausschließlich die Basisstation. Somit ist eine Trennung zwischen Sensornetzwerk und dahinter liegender Peripherie möglich, ohne Messdaten zu verlieren oder die Kommunikation zu stören.

Zur Bewertung der Szenarien, werden vier Kriterien für die Entscheidung des Einsatzes eines Monitoringsystems aufgestellt:

- Installationsaufwand
- Wartungsaufwand
- Flexibilität
- Sicherheit

In Tabelle 6.1 sind diese Kriterien den o.g. vier Szenarien gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass kein Szenario allen Anforderungen entspricht. Vielmehr muss fallbezogen das optimale Szenario ausgewählt werden. Meist ist die Entscheidung zwischen Sicherheitsanforderungen und Installationsaufwand ausschlaggebend. Einzig Szenario 4 scheint einen Großteil der Kriterien abzudecken.

Im Weiteren wird ausschließlich ein Netzwerk betrachtet, welches das Szenario 4 erfüllt. Grund für diese Auswahl ist die hohe Flexibilität, der geringe Installationsaufwand und die geringe Energieumsatz der Sensorknoten.

**Tabelle 6.1:** Gegenüberstellung der vier Szenarien für ein Monitoring

| Kriterium | Kabel-gebundenes Netzwerk | Adhoc-Netzwerk | Point-to-Point-Netzwerk | Temporäres Point-to-Point-Netzwerk |
|---|---|---|---|---|
| Installations-aufwand | ☹ | ☹ | 😐 | ☺ |
| Wartungs-aufwand | 😐 | ☹ | 😐 | 😐 |
| Flexibilität | ☹ | ☹ | 😐 | ☺ |
| Sicherheit | ☹ | ☹ | 😐 | ☺ |

## 6.3 Integration der Sensorknoten am Kunstwerk

Lichttechnische Messungen in Räumen sind stark vom Ort abhängig an dem sich ein Messkopf befindet. Eine Integration der Sensorik im Kunstwerk würde einer Zerstörung gleichgesetzt werden und ist damit nicht möglich. Zusätzlich ist zur Ausbringung der Sensorik das Gesamtkunstwerk und dessen Historie genauer zu betrachten. Dabei sind die im Kapitel 5.3 erwähnten Stadien eines Kunstwerkes und die restauratorischen Einschränkungen gleichermaßen zu gewichten. Abbildung 6.7 zeigt einen Entscheidungsbaum für

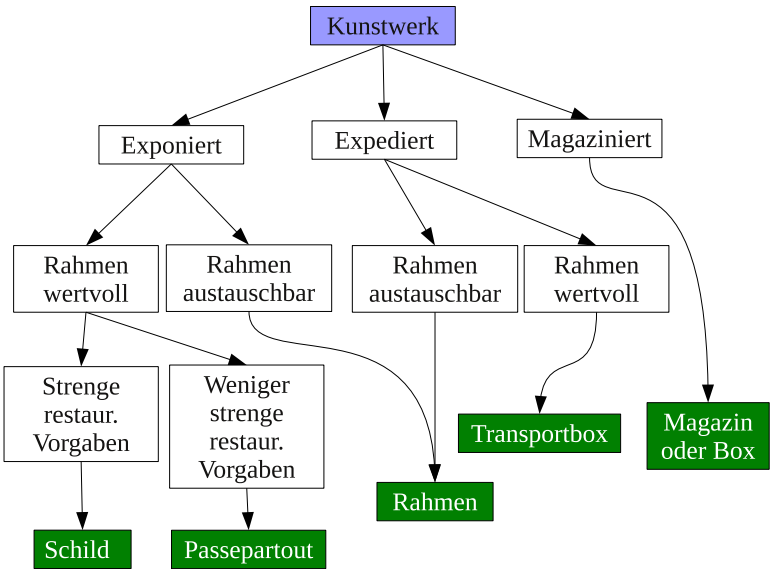



**Abbildung 6.7:** Auswahl der Integration der Elektronik am Kunstwerk

die Ausprägung und Unterbringung der Sensorik. Ausgehend vom Kunstwerk (lila) sind die o.g. Stadien von großer Bedeutung. Grundsätzlich kann eine grobe Einteilung in Betrachtung der Exposition vorgenommen werden. Exponierte Kunstwerke sollten eine räumlich sehr nahe Verbindung zueinander haben, um die Eigenschaften der Ausstellungsbeleuchtung möglichst exakt zu erfassen. Nicht exponierte Kunstwerke – expedierte bzw. magazinierte Kunstwerke – können räumlich weiter von der Sensorik entfernt werden. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass nicht nur die Stadien eines Kunstwerkes[18], sondern auch die mögliche Einzigartigkeit des Rahmens und die restauratorischen Vorgaben großen Einfluss auf den Ort der Unterbringung der Sensorik haben. Letztendlich sind fünf Orte für die objektbezogene Protokollierung der schädigenden Bestrahlungsstärke möglich:

- Magazin oder Box
- Transportbox
- Rahmen
- Passepartout
- Schild

Eine Platzierung der Sensoren bei nicht exponierten Kunstwerken ist sehr einfach. Es müssen keine künstlerischen und betrachterabhängige Einschränkungen beachtet werden. Wichtig ist nur, dass eine Nähe zwischen dem Objekt und der Sensorik besteht. Schwieriger ist die Unterbringung an exponierten Kunstwerken. Zwei Fälle – die Anbringung im Rahmen bzw. Passepartout und die Integration im Schild – sollen hier näher betrachtet werden.

Unkritisch ist die Integration im Schild, da es sich nicht um ein Kunstwerk handelt, sondern nur das Kunstwerk erklären oder beschreiben soll. Diese Schilder sind meist reproduzierbar und unterliegen nicht strenger restauratorischer Vorgaben. Abbildung 6.8 zeigt eine mögliche Integration des gesamten Monitoringsystems im Schild des Kunstwerkes. Um den Betrachter nicht zu irritieren und vom Kunstwerk abzulenken, sollte der sichtbare Teil des Messsystems so gering wie möglich gehalten werden. Mit einer sehr kleinen Optik auf der Vorderseite des Schildes ist eine Einkopplung der objektschädigenden Strahlung in die Messtechnik möglich. Eine Einkopplung mittels Faseroptik ist auch denkbar, wobei die spektrale Transmission des optischen Wellenleiters berücksichtigt werden muss. Aufgrund der Größe des Schildes können die Verarbeitung, Übertragung und Energieversorgung auf der Rückseite platziert werden. Der Nachteil dieser Anordnung ist die zum Teil große Entfernung zum Kunstwerk und die dabei entstehende Messabweichung.

[18] Exponiert, Expediert, Magaziniert

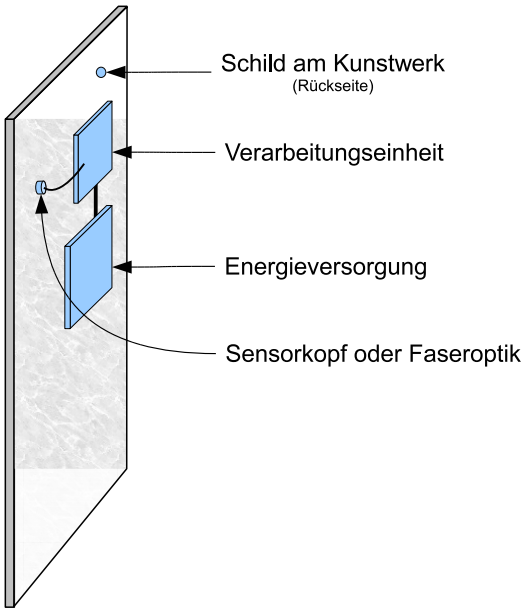



**Abbildung 6.8:** Integration der Elektronik im Schild zur Beschreibung des Kunstwerkes

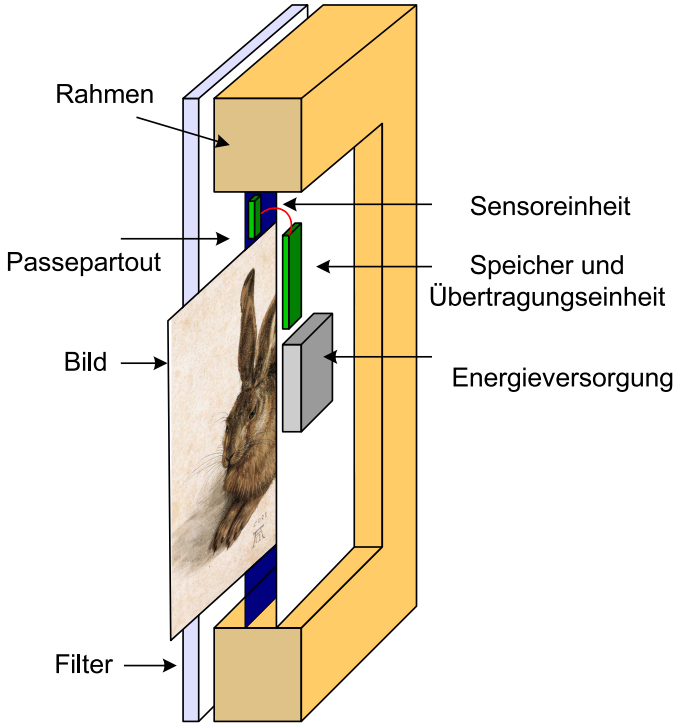



**Abbildung 6.9:** Integration der Sensorik im Passepartout und der Elektronik direkt hinter dem Kunstwerk

Schwieriger ist die Unterbringung am Kunstwerk direkt. Exemplarisch soll hier die Integration in ein Passepartout eines Gemäldes beschrieben werden. Abbildung 6.9 zeigt eine mögliche Variante. Dabei ist darauf zu achten, dass die Nähe zum Kunstwerk ausgenutzt wird, jedoch das Kunstwerk durch das Monitoringsystem nicht mechanisch, chemisch oder thermisch beschädigt wird. Auch hier ist darauf zu achten, den Betrachter nicht zu irritieren und vom Kunstwerk abzulenken. Mit einer sehr kleinen Optik auf der Vorderseite des Passepartouts kann ausreichend Strahlung eingekoppelt werden.

## 6.4 Zusätzliche Spezialsensoren

Neben den Empfängern zum Monitoring der objektschädigenden Strahlung können zusätzliche Informationen über den Ausstellungsraum gewonnen werden. Zwei implementierte zusätzliche Sensoren werden in den folgenden Kapiteln näher erklärt. Dabei handelt es sich um:

- Sonnenscheindetektor
- Temperatur - Luftfeuchte Sensor

### 6.4.1 Sonnenscheindetektor zur Anbringung an der Fassade eines Gebäudes

Für eine effektive Nutzung des Tageslichtes in Innenräumen ist es von großer Bedeutung den aktuellen Himmelszustand zu erfassen, um eine optimale Nutzung der angebotenen Strahlung zu gewährleisten. Prinzipiell kann zwischen bedeckten und klaren Himmelszuständen, respektive diffuser und direkter Sonnenstrahlung, unterschieden werden. Sonnenschein ist von der World Meterological Organization definiert als das Vorhandensein einer Bestrahlungsstärke der Sonne mit einem direkten Anteil von mehr als 120 $W/m^2$ auf einer senkrecht zur Sonne stehenden Ebene. Dieser Wert steigt an klaren Tagen auf über 1000 $W/m^2$. Um Sonnenschein sicher zu erkennen, muss die Bestrahlungsstärke aus Richtung der Sonne gemessen und die übrige Himmelsstrahlung ausgeblendet werden. In Wetter- bzw. Tageslichtmessstationen werden für diesen Zweck Pyrheliometer eingesetzt. Diese erfassen die direkte Bestrahlungsstärke (in $Wm^{-2}$) aus der Sonnenrichtung. Strahlungsleistung wird dabei von einem Thermoelement, einer schwarzen Thermosäule oder einem schwarzen Hohlraumkörper absorbiert und in Wärmeleistung umgewandelt, die zu einer Temperaturerhöhung führt, welche proportional zur Strahlungsleistung ist. Systeme zur absoluten Messung vergleichen die absorbierte Strahlungsleistung mit der elektrischen Heizleistung mit welcher der Absorber auf gleiche Temperatur gebracht wird. Ein gravierender Nachteil der genannten Messmethode ist die Komplexität der Messgeräte und

deren Größe. Bedingt durch den kleinen Öffnungswinkel und der Definition des Sonnenscheins müssen die Messköpfe ständig der Sonne nachgeführt werden. Dies erfordert neben einer exakten Bestimmung der Position und der Ortszeit ein präzises Positioniersystem. Pyrheliometer sind darauf ausgelegt, die absolute Sonnenbestrahlungsstärke zu erfassen, welche in vielen Anwendungsbereichen nicht benötigt wird. Vielmehr reicht es aus, zwischen bedecktem und klarem Himmel zu unterscheiden. Man ist damit in der Lage, ein Tageslichtlenksystem zu regeln oder bereits existierende Systeme in Hinblick auf deren Funktion zu überprüfen. Neben Pyrheliometern existieren einfache Tageslichtmessköpfe für die Steuerung von Jalousiesystemen. Sie verfügen meist nur über einen photoelektrischen Sensor, mit dem eine Unterscheidung zwischen direkter und indirekter Himmelsstrahlung nicht möglich ist. Photoelektrische Sensorsysteme umfassen meist mehr als vier Sensoren und müssen zudem für eine Bestimmung des Himmelszustandes nach Süden ausgerichtet werden. Für die meisten Regelungsprobleme ist der Himmelszustand an dem jeweiligen Fassadenseitenteil ausreichendes Kriterium für die Steuerung des Tageslichtsystems. Folglich benötigt man einen sehr kleinen, feststehenden, spektral und Himmelsrichtung unabhängigen Fassadensensor, der mit einer hohen Wahrscheinlichkeit direkten Sonnenschein auf der Fassade erkennen kann. Die erwartete Funktionsweise des Sensors bestimmte eine Mindestsensoranzahl von drei Sensoren um die geforderte Genauigkeit zu erreichen. Bei direkter Sonneneinstrahlung sollte immer mindestens ein Sensor verschattet werden, unabhängig vom Sonnenstand. Besonders wichtig ist daher die Anordnung und Abgrenzung der Sensorflächen zueinander. Das Ergebnis ist ein Detektor, der aus drei einzelnen Photoelementen besteht, welche in einem fest definierten Winkelverhältnis zueinander angeordnet sind. Aufgrund der kleinen Bauweise und der Verwendung handelsüblicher Miniatursensoren sind die Kosten für die Herstellung des Sonnenscheindetektors gering.

Der Sonnenscheindetektor besteht aus drei gleichen Si-Photoelementen S1087 der Firma Hamamatsu, die auf einem Sensorhalter untergebracht sind und speziell für die Anbringung an einer Fassade entwickelt wurden. In der Abbildung 6.10 sind drei Ansichten des Sensors zu sehen, deren Größe und Form durch vier Winkel eindeutig definiert ist. Der Öffnungswinkel der Blenden, den maximalen Höhenwinkel der Sonne am Standort, den Anstellwinkel der Sensoren und den Winkel zwischen Blende und dem Mittelpunkt der Photoelemente. Der maximale Höhenwinkel in Berlin beträgt ca. 63°. Zusammen mit dem Winkel zwischen Schatter und der imaginären Linie von Sensormittelpunkt zur Außenkante des Schatters in der horizontalen Ebene ist die Ausdehnung des Gesamtsensors festgelegt. Der Anstellwinkel ist die Winkelhalbierende des maximalen Höhenwinkels. Dabei ist es nicht notwendig, den gesamten Azimutwinkelbereich abzudecken. Bei exakter Südausrichtung reicht eine Öffnung des Sensors von Ost nach West (180°). Daraus berechnen sich die Öffnungswinkel der Sensoren mit jeweils

60°. Um ein über einen großen Messbereich lineares Verhalten der Senso-

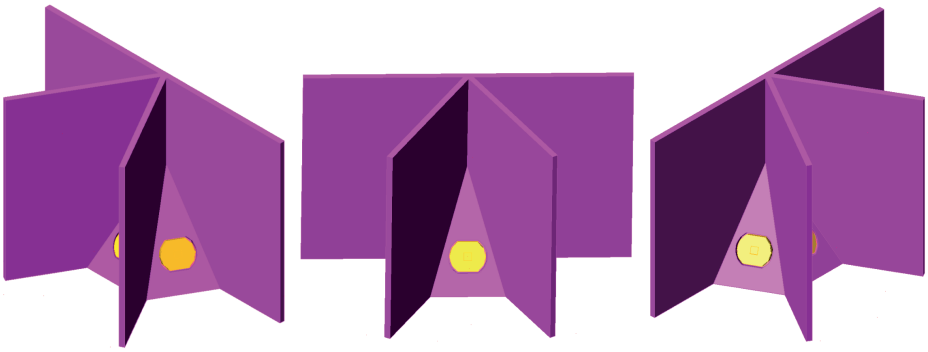


**Abbildung 6.10:** Sonnenscheinsensor mit der Ausprägung für Breitengrade größer 52°

ren zu erreichen, wurden Silizium-Photodioden als Photoelemente betrieben. Der resultierende Photostrom ist über mehrere Größenordnungen linear zur Bestrahlungsstärke und kann ohne weitere Beschaltung über einen A/D-Wandler in einen digitalen Wert umgewandelt werden. Da das Verhältnis der Bestrahlungsstärke der Einzelsensoren Aufschluss über die Wahrscheinlichkeit eines bedeckten bzw. klaren Himmel liefert, ist es wichtig die Abweichung untereinander zu minimieren. Dies kann über eine separate Auswahl eines Triplets, unterschiedliche Anpassungen der Verstärkungsfaktoren der Photoelemente oder eine softwareseitige Korrektur der Sensorwerte realisiert werden. Liegen die gemessenen Werte $E_{S1}$, $E_{S2}$, $E_{S3}$ der Sensoren vor, kann eine Aussage des Himmelszustandes mit

$$P_{Sonnenschein} = \max(x_1, x_2, x_3) - \tfrac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^{3} x_i$$

$$\text{mit } x_1 = \tfrac{E_{S1}}{E_{S2}},\ x_2 = \tfrac{E_{S2}}{E_{S3}},\ x_3 = \tfrac{E_{S3}}{E_{S1}}$$

getroffen werden. Der erste Term bestimmt über das Maximum der Quotienten der Bestrahlungsstärken die Hauptwahrscheinlichkeit des Sonnenscheins. Der zweite Term ist für die Anpassung an kleine Bestrahlungsstärken und die Verringerung der Streuung verantwortlich. Ist der Wert für $P_{Sonnenschein}$ größer als 1, ist dies ein Hinweis auf eine hohe Wahrscheinlichkeit für einen klaren Himmelszustand.

Diffuse Strahlung eines bedeckten Himmels erzeugt keinen Schatten, die gemessenen Bestrahlungsstärken haben deshalb bei unverbautem Himmel für alle Richtungen ähnliche Werte. Bei klarem Himmel hingegen unterscheiden sich die Bestrahlungsstärken stark voneinander. Abbildung 6.12 zeigt, bei der Korrelation der direkten normalen Solarbestrahlungsstärke (Öffnungswinkel 5°, Tageslichtmessplatz, TU Berlin) eines kalibrierten Pyrheliometers mit 2200 Messwerten, ein eindeutiges Verhalten. Die aus der

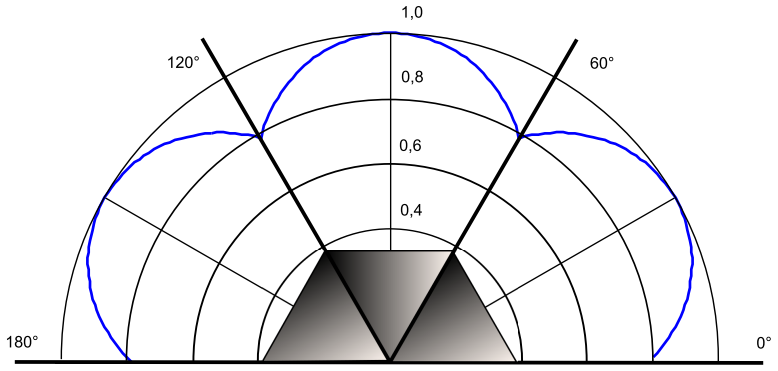



**Abbildung 6.11:** Richtungsabhängigkeit des Sonnenscheinsensors

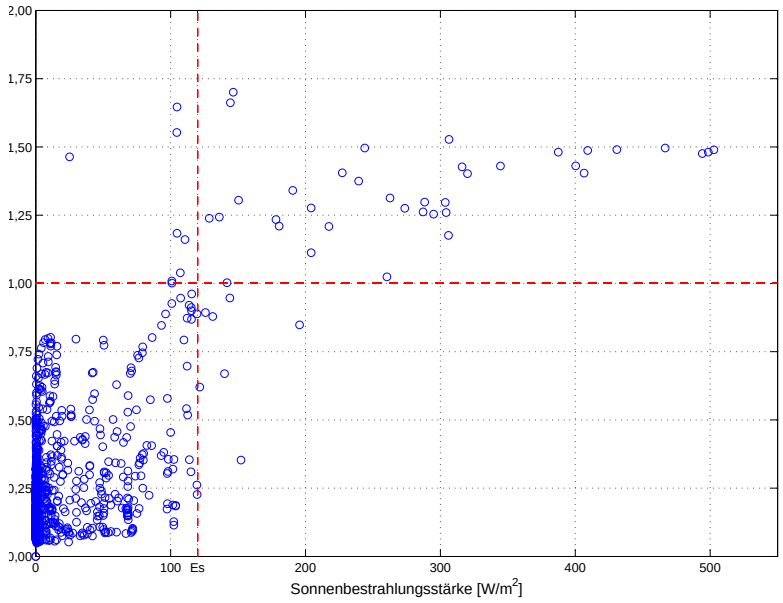



**Abbildung 6.12:** Vergleich zwischen Sonnenwahrscheinlichkeit und normaler Solarbestrahlungsstärke

Berechnungsvorschrift resultierenden Wahrscheinlichkeiten $P_{Sonnenschein}$ liegen, ab einer normalen Solarbestrahlungsstärke von 120 $Wm^{-2}$, oberhalb des Schwellwertes. Im Bereich um 120 $Wm^{-2}$ sind Unsicherheiten der Sonnenscheindetektion zu erkennen. Die relative Gesamtunsicherheit liegt bei 0,6 % aller Messwerte.
Neben der Berechnung und der Funktion des Sonnenscheindetektors ist auch eine Betrachtung der richtungsabhängigen Bewertung und deren Einfluss auf die Genauigkeit von Bedeutung. Eine Messung der Winkelabhängigkeit der Sensoren in Bezug auf den Detektor ergab die erwartete Zusammenschaltung der Einzelempfindlichkeiten. In Abbildung 6.11 ist die Zeichnung des Sensorsystems über die richtungsabhängigen Empfindlichkeit gelegt, um den direkten Bezug der Gesamtempfindlichkeit auf die Sensoren zu verdeutlichen.

Bei vollständig bedecktem Himmel sind die Messwerte vergleichbar und damit die Quotienten $x_n$ nahe dem Wert 1. Bei klarem Himmel ist mindestens ein Sensor verschattet und ein Sensor direkt bestrahlt, sodass der Wert eines Quotienten steigt. Bei einer richtungsabhängigen Einstrahlung sind die Sensorwerte demzufolge divergent und beeinflussen nicht die Genauigkeit des Detektors.

### 6.4.2 Temperatur – Luftfeuchte – Sensor

Die SHT11 ist ein Single-Chip Multisensor-Modul zum Erfassen der relativen Feuchte und Temperatur mit einem kalibrierten Digitalausgang (Abbildung 6.13). Die Anwendung der industriellen CMOS-Prozesse mit der patentierten Micro-Bearbeitung (CMOSens® Technologie) sorgt für höchste Zuverlässigkeit und exzellente Langzeitstabilität. Das Gerät beinhaltet ein kapazitives Polymer-Sensorelement für relative Feuchte und einen Bandlücken-Temperatursensor. Beide sind nahtlos mit einem 14 Bit A/D-Wandler und einer seriellen Schnittstelle auf dem gleichen Chip gekoppelt. Dies führt zu einer besseren Signalqualität, einer schnellen Reaktionszeit und einer Unempfindlichkeit gegenüber externen Störungen (EMV). Jeder SHT11 ist einzeln in einer Feuchtekammer kalibriert. Die Kalibrierkoeffizienten sind in den OTP-Speicher einprogrammiert. Diese Koeffizienten werden intern bei der Messung verwendet, um die Signale von den Sensoren zu kalibrieren. Die 2-Draht-Schnittstelle und die interne Spannungsregelung ermöglicht eine einfache und schnelle Systemintegration. Mit seiner geringen Größe und geringen Stromverbrauch ist es für den Einsatz in Senornetzen besonders gut geeignet. Das Gerät wird als oberflächenmontierbares LCC [19] oder als steckbare 4-Pin-Single-Inline-Typ Paket geliefert. Hier kommt die LCC-Variante zum Einsatz.

[19] **L**eadless **C**hip **C**arrier

**Abbildung 6.13:** Kombinierter Temperatur-Luftfeuchte-Sensor SHT11 von Sensirion

## 6.5 Technische Umsetzung

Die Kopplung der Sensorik an die Hardware ist bereits im Kapitel 4.2.2 ausführlich beschrieben. Darüber hinaus ist für das Monitoringsystem ein spezieller Funk – Netzwerkknoten auszuwählen, der sowohl die Anbindung der Sensoren gewährleistet, als auch die Übertragung der Daten zur Basisstation. Wie bereits erläutert sind die Sensorknoten per Batterie versorgt. Auf diese wird im Kapitel 6.5.2 näher eingegangen.

### 6.5.1 Sensorknoten

Für den Funktionstest und den Nachweis der Machbarkeit wurde sich für ein Consumer Produkt der Firma Sun entschieden.

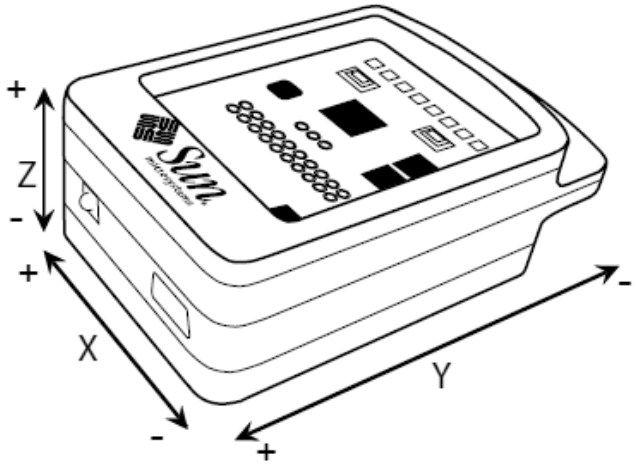



**Abbildung 6.14:** Schematische Darstellung der Hardware, Quelle: SunSpot Owners Manual

Sun Microsystems veröffentlichte als Forschungsobjekt die Java Sun SPOTs-Microcontroller (Sun™Small Programmable Object Technology - Sun SPOT).

Diese Microcontroller besitzen von Hause aus mehrere integrierte Sensoren:

- Strahlungsempfänger
- Temperatursensor
- 3-Achsen-Beschleunigungsmesser

Auf den Geräten sind acht dreifarbige LEDs verbaut, die ein 16-Bit-Farbspektrum mischen können. Zusätzlich bieten die Sun SPOTs einen Anschluss für selbstgebaute Hardwareboards über sechs Input Pins, fünf Input/Output-Pins und vier Hochleistungsoutput-Pins. Analoge Spannungen können von 0 bis 5 V mit 10 Bit Auflösung erfasst werden. Aus diesem Grund eignet sich diese Hardware besonders für eine Prototyp-Plattform. Jeder Sun SPOT hat einen 180 MHz 32 Bit ARM920T Prozessor mit 512 kB RAM. Sie besitzen einen nichtflüchtigen Speicher mit 4 MB Flash Speicherkapazität. Die Sun SPOTs nutzen die CLDC 1.1 und das MIDP 1.0. Sie implementieren das IEEE 802.15.4 Protokoll (Low rate PAN protocol) und können daher Funkverbindungen zu ihren Nachbarn aufbauen. Der Funkchip arbeitet mit einer Frequenz von 2,4 GHz bis 2,4835 GHz. Das Funkprotokoll nutzt dabei das bereits in Kapitel 6.1.1.4 erläuterte AODV-Routing-Verfahren. Daher ist der Aufbau einer Infrastruktur kostengünstig und selbstkonfigurierend. Jeder der Sun SPOTs ist dabei über eine 64 Bit IEEE MAC-Adresse adressierbar und kommuniziert über das Generic Connection Framework. Die MAC-Adresse ist aus 4 Sets je vierstelligen Hexadezimalzahlen aufgebaut. Sie besitzen eine USB-Schnittstelle und die 3,7 V; 750 mAh LiIon Batterie wird darüber neu beladen. Ihr Energieverbrauch liegt bei 40-100 mA, der sich in einen Standby-Modus mit 30 $\mu$A *deep sleep mode* versetzen kann. Das Verteilen der Software für die Sun SPOTs ist auch über Funk möglich. Somit können Sun SPOTs einmalig an schwer zugänglichen Orten installiert und spätere Versionen aktualisiert werden. Sun SPOTs werden im Sun SPOT Java Development Kit vertrieben. Dabei enthält jedes Paket zwei normale Sun SPOTs und eine Sun SPOT Basisstation. Sie bildet den Anschlussknoten an einen handelsüblichen PC. Die Basisstation hat dabei sowohl Zugriff auf Klassen der J2ME, als auch auf Klassen der J2SE. So bildet sie sowohl auf der Seite der Software als auch auf der Hardwareseite die Schnittstelle zwischen den Sun SPOTs und den regulären IT-Infrastrukturen [Sun Oracle, 2007]. Sun bzw. Oracle liefert diese Hardware in einem Set aus drei Spots, wobei zwei bereits eine Batterie und externe Anschlüsse enthalten. Ein Spot ist ausschließlich als Basisstation zur Kommunikation mit dem PC gedacht. Sämtliche Software-Bibliotheken zum Betrieb dieser Hardwareplattform werden von Hersteller mitgeliefert.

### 6.5.2 Energieversorgung

Die Basisstation und die Teilstation werden entweder per USB oder Netzadapter versorgt. Für die Batterie versorgten Sensorknoten sind Lithium-Ionen-Akkus verbaut. Der Li-Ionen-Akku zeichnet sich durch hohe Energiedichte aus. Er ist thermisch stabil und unterliegt keinem Memory-Effekt [Rummich, 2008]. Wegen der Vielzahl an möglichen Materialien für Anode, Kathode und Separator ist es schwierig, allgemeingültige Aussagen für Li-Ion Akkus zu treffen. Hinzu kommt die fortwährende Verbesserung durch die Batteriehersteller, die in den letzten Jahren insbesondere auf den bekannten Problemfeldern wie Haltbarkeit und Sicherheit erhebliche Verbesserungen erzielen konnten. Die Energiedichte hingegen erhöhte sich nur vergleichsweise gering. Wegen der sehr geringen Selbstentladung ist der Li-Ionen-Akku besonders gut für langzeitbetriebene Geräte mit geringen Energieumsatz geeignet. „Die Lebensdauer ist stark abhängig von den verwendeten Materialien und deren Qualität, insbesondere deren Reinheit, sowie vom Umgang mit dem Akku. Sehr hochwertige Zellen verlieren auch nach mehreren Jahren im Einsatz und zigtausenden Lade- und Entladezyklen nur einen sehr geringen Teil ihrer Kapazität und Leistung und verhalten sich entsprechend.“[Rummich, 2008] Den hier eingesetzten Akku zeichnen folgende Kenndaten aus:

**Tabelle 6.2:** Eingesetzte Li-Ionen-Akkus in den Sensorknoten

| | Normale Variante | Langzeit-Variante |
|---|---|---|
| Spannung (V) | 3,7 | 3,7 |
| Energie (mAh) | 770 | 2600 |

## 6.6 Softwaretechnische Umsetzung

Neben der reinen technischen Umsetzung der Hardware trägt die Software einen großen Anteil am Gesamtsystem. Wie in Kapitel 6.6.4 beschrieben, ist der Workflow von drei unterschiedlichen Komponenten zu bedienen.

Basisstation: Die Basisstation übernimmt die Aufgabe des zentralen Zeitgebers und fungiert als Brücke zwischen der Datenbankapplikation und dem Netzwerk. Die Basisstation ist direkt mit Strom versorgt.

Teilstation: Die Teilstation übernimmt die Aufgabe des zentralen Zeitgebers, wenn keine Basistation erreichbar ist. Zusätzlich dient sie als weiterer Hop um die Entfernung zwischen Basisstation und Sensor zu erhöhen. Die Teilstation ist direkt mit Strom versorgt.

Sensorknoten: Der Sensorknoten ist ausschließlich zum Erfassen der Sensordaten konzipiert. Der Sensorknoten wird über eine Batterie versorgt. Daher sollte der Messzyklus so kurz wie möglich gehalten werden, um den Knoten danach wieder in einen energieschonenden Zustand zu versetzen.

Alle drei Teilkomponenten beruhen auf der Java Sun SPOT Hardware. Diese Hardware ist für erste Testumgebungen besonders leicht zu handhaben, da alle benötigten Komponenten bereits vorhanden sind. Für den endgültigen Einsatz in Museen ist jedoch ein neues Design mit den speziellen Ansprüchen an Größe, Leistungsfähigkeit und Lebensdauer anzufertigen.

### 6.6.1 Applikationsserver

Als Applikationsserver werden Server bezeichnet, die Dienste für andere Anwendungen zur Verfügung stellen. In der Regel sind dies Datenbank-, Transaktions- oder Verzeichnisdienste. Sie bilden damit eine zentrale Anwendungskomponente in einer dreischichtigen Architektur (three-tier; vergleiche Abbildung 6.15). Diese Schichten bestehen dabei aus Präsentation-,

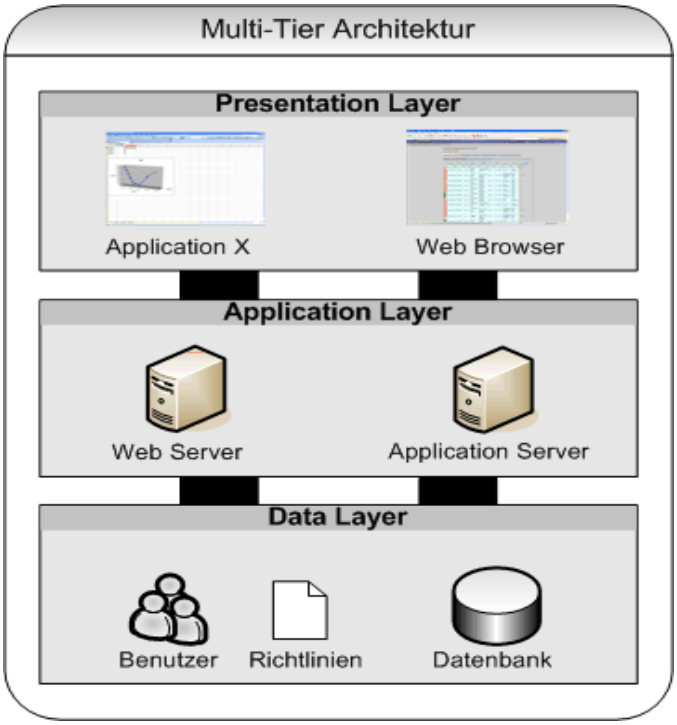



**Abbildung 6.15:** Drei-Schichten-Architektur der Server-Software

Anwendungslogik- und Datenhaltungsschicht. Sollte die Anwendungslogik dabei weiter zerteilt werden, spricht man hier von einer mehrschichtigen

Architektur (n-tier). Die Präsentationsschicht ist die Darstellung der Ergebnisse auf einem Client. Zu erwähnen ist dabei, dass in einer Webanwendung die Webseite die Präsentationsschicht darstellt. Die Anwendungslogik repräsentiert die Fachkonzepte der gewünschten Software. Sie stellt sämtliche Berechnungen für den Kontext, also die Intelligenz der Software, dar. Die Datenhaltungsschicht repräsentiert die persistente Speicherung von Daten; sie stellt einen Datencontainer für die Software bereit. In der Datenhaltungsschicht können somit zum Beispiel Datenbanken und andere Datenquellen enthalten sein. Ziel einer mehrschichtigen Architektur ist es, eine hohe Skalierbarkeit der Anwendung zu gewährleisten, ohne dabei die gesamte Anwendung verändern zu müssen. Dreischichtige Architekturen verbinden dabei die Vorteile von dezentralen und zentralen Lösungen. So kann z. B. die Anwendungslogik jederzeit verbessert werden, ohne neue Softwarepakete an alle Clients verteilen zu müssen. Dazu bieten Applikationsserver Schnittstellen an, die von Client-Anwendungen genutzt werden können. Beim Client erfolgen notwendige Berechnungen an zentraler Stelle, die Ausgaben werden dennoch benutzerspezifisch dargestellt. Beispiele für diese Applikationsserver sind zum Beispiel Java EE Server, .Net Server oder ein SAP NetWeaver Application Server.

### 6.6.2 Datenbankanbindung

Die Java Persistence API ist ein sogenannter objektrelationaler Mapper. Bei der Entwicklung von Datenbankanwendungen müssen die Entitäten der Datenbanktabellen auf entsprechende Java-Objekte transformiert werden. Da sich das verwendete Datenbanksystem im Laufe der Zeit ändern kann und somit Schnittstellenprobleme, wie zum Beispiel unterschiedliche Datentypen, Performanceeinbußen an der neuen Schnittstelle, sowie Abfragefehler durch verschiedene SQL[20]-Dialekte entstehen können, versucht die Java Persistence API all diese Probleme vor dem Entwickler zu verstecken. Dafür müssen lediglich die entsprechenden Tabellen und das entsprechende Tabellenattribut angeben. Der Zugriff auf die Datenbank erfolgt dann über das Java Persistence API eigene JPQL (Java Persistence Query Language). Diese sehr stark an SQL angelehnte Datenbankabfragesprache generiert den performanten SQL-Code. Dabei erfolgt keine direkte abfrage der Datenbanktabellen, sondern eine Abfrage der Klassennamen. Darüber hinaus steht es dem Entwickler frei, weiterhin performanten SQL-Code für die Abfragen zu verwenden. Das Erstellen von Datenbanktabellen ist nicht notwendig. Die Java Persistence API erzeugt diese implizit. Es ist möglich Vererbungsstrukturen der Java-Klassen in relationalen Datenbanken abzubilden. Auf die physische Struktur der Datenbank muss keine Rücksicht genommen werden, da sämtliche Abfragen klassenbasiert sind. So werden Hierarchien,

[20] SQL: Structured Query Language

die in einer Tabelle abgelegt sind durch ein Attribut unterschieden, welches automatisch als String in den resultierenden SQL Abfragen hinterlegt ist. Die JPA, die mit der Enterprise Java Beans Version 3.0 eingeführt wurde, verwendet die o. g. Java Annotationen. Eine zu mappende Klasse muss dann nur die Annotation `@Entity` erhalten und entsprechende Tabellenattribute an den Klassenattributen definieren. Dabei wird sie zu einer EJB Entity Bean und die Instanzen sowie die Klassen können mittels des Entity Managers in einer Datenbank als Datensätze persistiert werden. Auch ein umgekehrtes Erzeugen von Java-Objekten aus vorhandenen Datenbanktabellen ist möglich. Damit lässt sich in kurzer Zeit ein Objektmodell für Java zu einer bereits existierenden Anwendungslandschaft implementieren [Panda, Rahman & Lane, 2007].

### 6.6.3 Serviceorientierte Architekturen mit Web Services

Web Services oder auch Webdienste werden durch URIs[21] eindeutig im Internet identifiziert. Sie stellen Systemschnittstellen als XML-Artefakte[22] zur Verfügung. Sie bieten damit Client-Anwendungen den entfernten Zugriff auf Prozeduren und den programmiersprachneutralen Zugriff auf Objekte über Rechnergrenzen hinweg. Diese als Remote Procedure Call (RPC) bezeichnete Technik wird hier mit textbasierten Mechanismen realisiert. Web Services bilden oft die Grundlage in serviceorientierten Architekturen (SOA). Sie abstrahieren den Zugriff auf Systemressourcen über eine nach außen sichtbare Schnittstelle. Das dabei umgesetzte Fassade-Entwurfsmuster kann somit von beliebigen Programmiersprachen aufgerufen werden. Damit ergibt sich eine unternehmensweite Verwendung der Funktionalitäten, ohne Rücksicht auf die dahinterliegenden Programmiersprachen nehmen zu müssen. Erreicht wird dieses Ziel über die Registrierung von Serviceanbieter-Dateien. Die Methoden der dahinterliegenden Software bleiben verborgen und können jederzeit ausgetauscht werden. Damit entsteht im Gesamtsystem eine lose Kopplung und Systemkomponenten sind einzeln austauschbar, sofern die Serviceschnittstellen weiterhin eingehalten werden. Die Reihenfolge der Prozeduraufrufe ist durch diese Architektur nicht fest vorgegeben und kann beliebig kombiniert werden. Mit diesem Aufbau ist es für ein Unternehmen nicht mehr notwendig seine Ablauforganisation an die IT-Software zu binden. Vielmehr ist es möglich, die IT an die Bedürfnisse der Unternehmensstrategie anzupassen. Serviceorientierte Architekturen können somit den strategischen Aufbau einer Unternehmensanwendungslandschaft auf lange Sicht vereinfachen. Da der Aufbau einer programmiersprachneutralen Web-Service-Landschaft aber ein sehr komplexes Unterfangen darstellt, bieten die meisten Anbieter eine proprietäre Implementierung.

[21] **U**niform **R**esource **I**dentifier – eindeutig identifizierbare Internetadresse
[22] Teilkomponenten

Beispiele hierfür sind Suns Java Remote Method Invocation (RMI) oder Microsoft® mit DCOM oder .Net®. Die proprietären Lösungen sind in der Regel jedoch nicht miteinander kombinierbar.

### 6.6.4 Informationsbereitstellung für die Regelung der künstlichen bzw. Tageslichtbeleuchtung

Neben der exklusiven Datenaufnahme und Speicherung in einer Datenbank, können diese Messdaten nicht nur dem Benutzer angezeigt werden, vielmehr ist es sinnvoller, diese Daten zur Regelung der künstlichen bzw. tageslichtabhängigen Beleuchtung heranzuziehen. Die nötige Kommunikationsstruktur ist in Abbildung 6.16 dargestellt und bildet eine Teilmenge der gesamten Kommunikationsstruktur. Die Plattform kommuniziert nach außen nur über

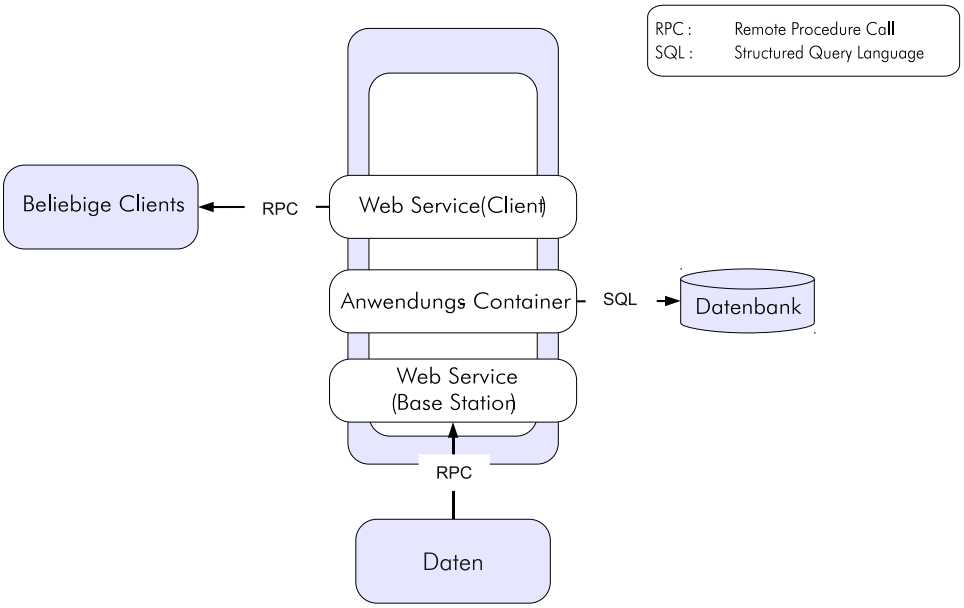



**Abbildung 6.16:** Kommunikationsstruktur der Informationsbereitstellung für die Regelung

standardisierte Protokolle. Somit ist eine Spezifizierung der Clients nicht notwendig – vielmehr können beliebige Clients mit unterschiedlichen Aufgaben und Zielen an das Hauptsystem gekoppelt werden. Weder Anzahl noch Komplexität der Clients sind begrenzt. Jedoch erhalten diese, aus Sicherheitsgründen, ausschließlich lesenden Zugriff auf die Datenbank (siehe auch Kapitel 6.1.4).

### 6.6.5 Netzwerk- und Verbindungsuntersuchungen

Eine wesentliche Aufgabe des Sensornetzwerkes ist neben der Erhebung von Messwerten deren zuverlässiger Transport zur Basisstation. Gewährleistet wird dieser durch eine geeignete Platzierung der Knoten und ein geeignetes Netzwerkprotokoll. Eine wichtige Voraussetzung für den flexiblen Einsatz des Sensornetzwerkes ist, neben der Gestaltung des Sensorboards, die systemseitige Unterstützung bei der Ausbringung der Knoten. Diese Unterstützung erfolgt durch Berücksichtigung bei der Gestaltung der Systemarchitektur und einer Methodologie für die Platzierung der netzbetriebenen Forwarder-Knoten (Teilstationen). Das Ziel ist die Konnektivität der Knoten sicher zu stellen und die Toleranz gegenüber Knotenausfällen zu erhöhen. Traditionell sorgt das Netz dafür selbst – bei gegebener Platzierung – durch die Bereitstellung geeigneter Transport-Layer-Protokolle. Allerdings ist das Hinzufügen neuer Protokolle oder die Erhöhung der Komplexität des Systems nicht immer gewünscht und der Aufwand in Verhältnis zu seinem Nutzen oft nicht gerechtfertigt. Ein geeigneterer Ansatz ist, den Ort der Knoten an die oben genannten Anforderungen anzupassen. Somit wird die operative Komplexität nicht erhöht und der Verarbeitungs-Overhead vermieden. Mit der Zeit können einige der Verbindungen unbenutzbar werden oder Teilstationen ausfallen. Die Platzierung sollte auch unter diesen Umständen (bis zu einem gewissen Ausmaß) in der Lage sein, die Daten von den Sensorknoten an die Basis zu liefern. Die Methode zur Ausbringung der Knoten ist ein iterativer Prozess. Zuerst wird ein initiales Deployment geschaffen. Anschließend werden Informationen über die Verbundenheit und Linkqualitäten des Netzwerkes gesammelt. Die Offline-Auswertung dieser Daten außerhalb des Netzwerks gibt Hinweise auf die Schwachstellen innerhalb des Netzwerkes. Mit diesem Ergebnis kann das Deployment entsprechend verbessert werden, indem Teilstationen hinzufügt, umgesetzt oder entfernt werden. Der Optimierungszyklus wird iterativ wiederholt und endet, wenn ein Deployment erreicht wird, bei der die Anforderungen an die Qualität optimal sind.

Wesentlicher Faktor bezüglich der Effektivität und Effizienz eines Netzwerkprotokolls ist die Wahl einer aussagekräftigen Metrik zur Bewertung der unterschiedlichen Wege. Während die Anzahl der Hops in Netzwerken – wie dem Internet – oft hinreichend gute Ergebnisse liefert, muss in drahtlosen Netzwerken zusätzlich die Qualität der einzelnen Links mit berücksichtigt werden. Weitere interessante Ansätze sind die Betrachtungen des Energiekonsums oder der verfügbaren Bandbreite. Diese werden hier jedoch nicht umgesetzt.

Die Evaluation des Netzwerkes erfolgte im Rahmen einer Testraumstudie zum Zweck des Gebäudemonitorings. Abbildung 6.17 zeigt die Konstellation der Testräume. Aufgrund der geringen Größe des Testraumes war ein netzbetriebener Knoten ausreichend um die Zeitsynchronistion zu erhalten. Die Evaluation konzentrierte sich daher auf das Netzwerkprotokoll. Die dabei

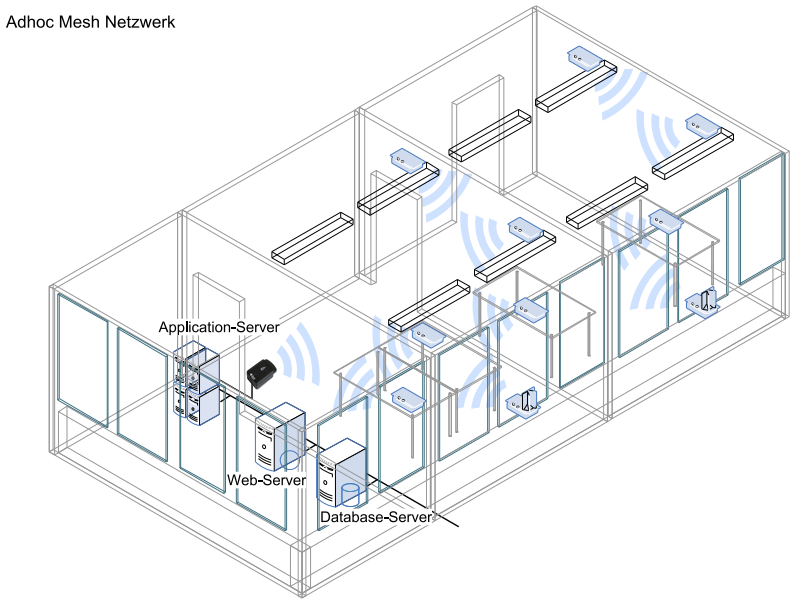



**Abbildung 6.17:** Adhoc Mesh Netzwerk in der Testkonfiguration

wichtigsten Metriken waren die Paketlieferrate und der reale Energieumsatz der batteriebetriebenen Knoten. Die Paketlieferrate ist in Abbildung 6.18 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass eine Übertragung der Daten bei einma-

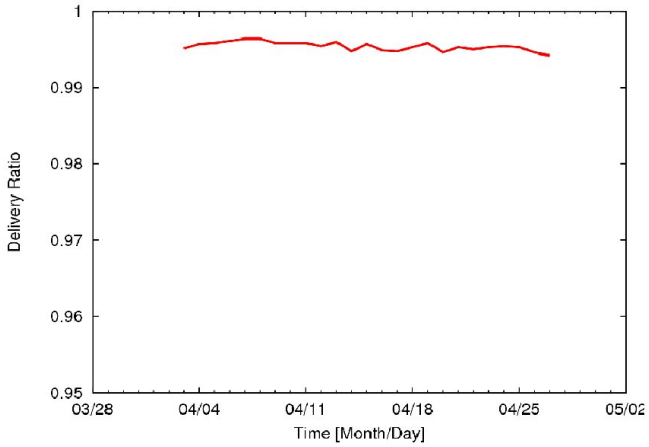



**Abbildung 6.18:** Paketlieferrate während der Testraumstudie

ligem Senden mit über 99 % Erfolg verläuft. Um nicht übertragene Pakete nicht zu verlieren, ist das Sendeprotokoll so ausgelegt, dass diese nach einer gewissen Wartezeit erneut gesendet werden.

### 6.6.6 Administrations- und Managementwerkzeuge

Zur Administration und Management des Netzwerkes wurde ein Werkzeug entwickelt (Abbildung 6.19) das auf der einen Seite die Anforderungen der Hardware und deren Ausbringung der Software beinhaltet und auf der anderen Seite die Anforderungen, in Bezug auf die Zeitsynchronisation und dem Setzen von Systemeinstellungen – wie z. B. Messintervall des Monitorings beachtet. Über die Bibliotheken und Treiber des Herstellers können die angeschlossenen SunSpots lokalisiert und angesprochen werden. Damit wird das Aufspielen neuer Software und das Setzen von Systemvariablen unterstützt. Zusätzlich ist es möglich die Firmware auszutauschen. In Abbildung 6.19a) ist die Oberfläche zur Softwareadministration dargestellt. Diese Oberfläche bietet zusätzlich die Möglichkeit des Speichermanagements und der Einstellung der Systemparameter wie z. B. das Messintervall. Abbildung 6.19b) zeigt eine Historie der bereits erfolgreich gekoppelten Sensorknoten, zur Kontrolle der eingestellten Parameter. In Abbildung 6.19c) sind die Einstellungen zur Systemzeit und zum Aktualisieren der Firmware der Sensorknoten zu sehen.

### 6.6.7 Realisierung der Software

Die Software ist so gestaltet, dass unabhängig von der Verwendung alle Sensorknoten mit dem gleichen Software-Image arbeiten, mit welchem sie vor der Ausbringung programmiert wurden. Jedem Knoten wird dabei eine Identifikationsnummer (Sensor-ID) zugeordnet. Diese setzt sich wie folgt zusammen:

- zweistellige Dezimalzahl zur Identifizierung des Treibers
- fünfstellige Dezimalzahl als laufende Nummer zur Identifizierung des angeschlossenen Boards und deren Kalibrierfaktoren.

Der Knoten kann die Treiber für die externe Hardware aus dieser Sensor-ID über die ersten beiden Ziffern selbständig bestimmen und bereitstellen. Neben der Sensor-ID verfügt jeder Netzwerkknoten über eine eigene, eindeutige, 256 byte ID. Aus der Kombination der beiden IDs sind folgende Eigenschaften abzuleiten:

- Unterscheidung zwischen Sensorknoten und Netzwerkknoten[23]
- Spezifizierung der Sensorhardware
- Zuordnung der Kalibrierwerte
- Position des Knoten (sofern vermerkt)

[23] Forward, bzw. Basistation

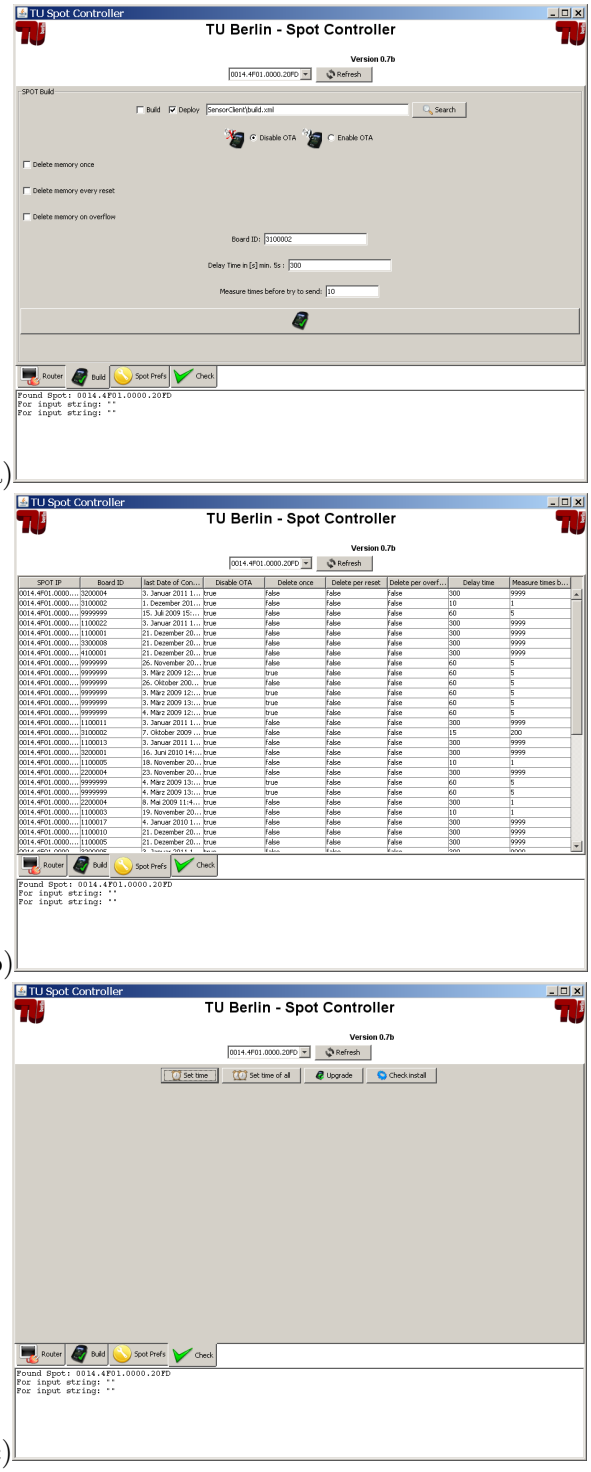



**Abbildung 6.19:** Administrations- und Managementwerkzeuge

Dieses Vorgehen vereinfacht die Erstellung der Knotensoftware und den Umgang mit einer u.U. größeren Anzahl von Sensorknoten. Die Kalibrierung der Sensoren erfolgt mit der Ausbringung. Die dabei erhobenen Kalibrierdaten und Positionen werden in der Datenbank zentral hinterlegt, was den Umgang mit diesen Daten insbesondere bei nachträglichen Anpassungen erleichtert.

Kommunikationsstruktur des Gesamtsystems

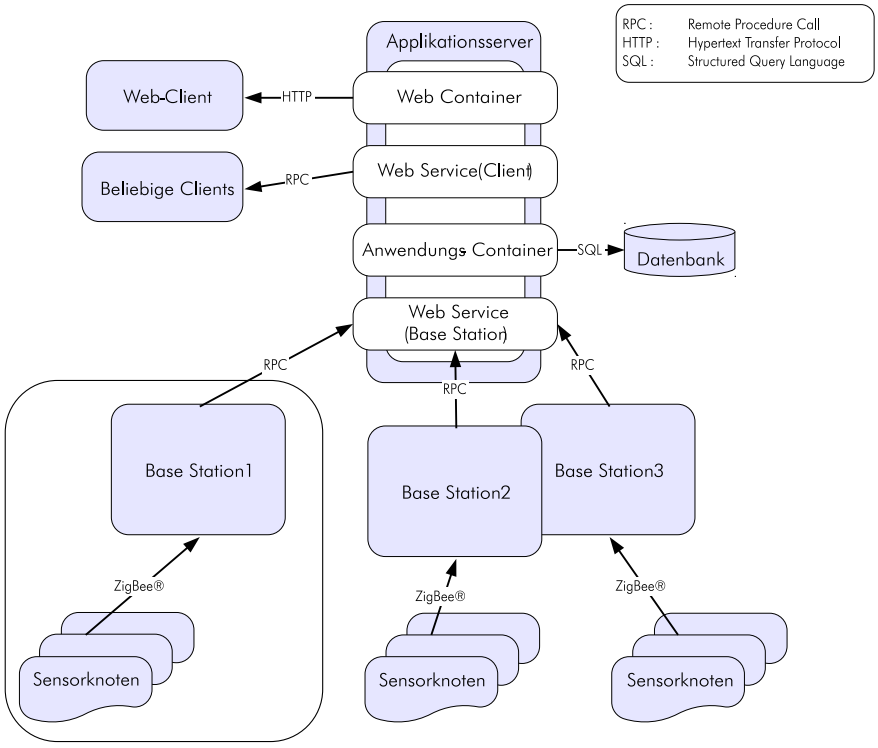



**Abbildung 6.20:** Workflow und Datenbereitstellung des Gesamtsystems

Alle Sensoren sollen periodisch zu einer vorgegebenen Zeit synchron, innerhalb von einer Sekunde ausgelesen werden. Daher ist eine Synchronisierung der Knoten in periodischen Abständen durchzuführen. Die aktuelle Zeit wird über die Bestätigung der empfangenen Daten gesendet. Grundsätzlich wird der Datentransport ausgelöst, sobald alle Sensoren ausgelesen wurden. Damit diese Periodizität nicht zu entsprechend periodischen Lastspitzen im Netzwerk führt, können die Knoten die Daten über eine definierte Anzahl von Zyklen zwischenspeichern. Dies führt zu einer Glättung der Lastkurve, erhöht jedoch die Verzögerung mit der die Daten die Basistation erreichen.

Abbildung 6.19 zeigt die Möglichkeiten des Deployments der Software, das Setzen des Messintervalls, das Setzen der Messintervalle ohne Sendezyklus und der Zeitsetzung.

# Kapitel 7

# Schlussfolgerung

## 7.1 Résumé der Ergebnisse

In den letzten Kapiteln konnte gezeigt werden, dass eine spezielle Anpassung, der zur Messung in Museen und Galerien verwendeten Messtechnik, nicht nur unverzichtbar, sondern auch möglich ist. Mit einer Gesamtabweichung von 13,5 % konnte ein Messgerät entwickelt werden, welches Restauratoren und Kuratoren Aufschluss über die Wirkung spektraler Strahlung auf Kunstwerke liefert. Darüber hinaus wurde ein Monitoringsystem vorgestellt, das aus mehreren der eben erwähnten Messgeräten besteht, welche kontinuierlich Bestrahlungsdaten aus der Umgebung der Kunstwerke sammelt, um eine spätere Auswertung der schädigenden Gesamtbestrahlung durchzuführen. Protokollierte Bestrahlungsdaten führen zu einer genauen Historie der schädigenden Belastung der Kunstwerke durch Beleuchtung. Diese Messtechnik kann nicht nur dem Kurator und Restaurator hilfreich sein, Lichtplaner, Architekten sowie Hersteller von Museumsbeleuchtungssystemen zeigen in gleicher Weise Interesse an einer genaueren Messtechnik.

## 7.2 Erweiterungsvorschläge

Das in dieser Arbeit gezeigte Vorgehen ist nur der Anfang der Metrik der schädigenden Strahlung. Vergleichbar mit der Photometrie kann eine adäquate Messtechnik für Labor- und Freifeldmessungen aufgebaut werden. Eine genauere spektrale Anpassung scheint möglich zu sein, ist jedoch mit erheblich größerem Aufwand verbunden. Eine Miniaturisierung des Messkopfes ist verbunden mit der Integration einer anderen Einkoppeloptik und führt zu Systemgrößen, die für den Betrachter unsichtbar am Kunstwerk untergebracht werden können. Darüber hinaus kann eine Integration der objektschädigenden Bestrahlungsstärke in Lichtplanungssoftware dem Lichtplaner einen genaueren Überblick über die zu erwartende Schädigung im Museum geben. Somit kann präventiv der Schädigung realer Kunstwerke vorgebeugt werden.

In den Normen ist eine genaue Definition der Grenzwerte der schädigenden Bestrahlungsstärke zu integrieren. Dazu sind weitere Bestrahlungsversuche an bisher nicht berücksichtigten Materialien durchzuführen und die Grenzwerte in den Normenausschüssen zu diskutieren. Als Roadmap für die Umsetzung dieser Aufgaben kann folgendes angenommen werden:

1. Festsetzung der relativen spektralen Schädigungsfunktion $s_{dm,rel}$ in der Normung, verbunden mit einer Definition der Grenzen der Kennwerte der Messabweichung von Messköpfen für schädigende Bestrahlungsstärke.

2. Integration der Messtechnik objektschädigender Bestrahlungsstärke in die bereits vorhandene photometrische Messtechnik in Museen, bei Lichtplanern und im Wissenschaftsbereich.

3. Mit Hilfe der Labormesstechnik ist ein Bezug der Strahlungsparameter über Hersteller der Leuchten möglich. Diese Daten können für die Simulation in Lichtplanungssoftware weiter verwendet werden.

4. Miniaturisierung der Messoptik und Unterbringung der Messtechnik direkt am Kunstwerk zur ständigen Protokollierung der Strahlungsparameter und Abschätzung der zu erwartenden Schädigung am Kunstwerkes.

# Definitionen

## Erklärung der benutzten Formelzeichen

| Bezeichung | Formelzeichen | Einheit |
|---|---|---|
| Lichttechnische Größen | | |
| Lichtstärke | $I_v$ | cd |
| Leuchtdichte | $L$ | $\mathrm{cd} \cdot \mathrm{m}^{-2}$ |
| Lichtstrom | $\Phi$ | lm |
| Lichtmenge | $Q$ | $\mathrm{lm} \cdot \mathrm{s}$ |
| Beleuchtungsstärke | $E$ | lx |
| Belichtung | $H$ | $\mathrm{lx} \cdot \mathrm{s}$ |
| Photometrisches Strahlungsäquivalent | $K_m$ | $683\ \mathrm{lm} \cdot \mathrm{W}^{-1}$ |
| Radiometrische Größen | | |
| Strahlungsleistung | $\Phi_e$ | W |
| Strahldichte | $L_e$ | $\mathrm{W} \cdot \mathrm{m}^{-2} \cdot \mathrm{sr}^{-1}$ |
| Strahlstärke | $I_e$ | $\mathrm{W} \cdot \mathrm{sr}^{-1}$ |
| Strahlungsenergie | $Q_e$ | J |
| Strahlungsfluss | siehe Strahlungsleistung | |
| Bestrahlungsstärke | $E_e$ | $\mathrm{W} \cdot \mathrm{m}^{-2}$ |
| Bestrahlung | $H_e$ | $\mathrm{W} \cdot \mathrm{s} \cdot \mathrm{m}^{-2}$ |
| Dosis | siehe Bestrahlung | |
| Wirksame Bestrahlung | $H_{wirk}$ | $\mathrm{W} \cdot \mathrm{s} \cdot \mathrm{m}^{-2}$ |
| Schädigend wirksame Bestrahlung | $H_{dm}$ | $\mathrm{W} \cdot \mathrm{s} \cdot \mathrm{m}^{-2}$ |
| Schwellenbestrahlung | $H_{s,dm}$ | $\mathrm{W} \cdot \mathrm{s} \cdot \mathrm{m}^{-2}$ |
| Schädigungspotential | $P_{dm}$ | $\mathrm{W} \cdot \mathrm{lm}^{-1}$ |

*fortgesetzt auf nächster Seite*

*fortgesetzt aus vorheriger Seite*

| Bezeichnung | Formelzeichen | Einheit |
|---|---|---|
| Schutzpotential | $P_{prev}$ | – |
| Expositionsdauer | $t_s$ | s |
| **Spektrale Größen** | | |
| Wellenlänge | $\lambda$ | nm |
| spektrale Strahlungsleistung | $\Phi_e(\lambda)$ | $\mathrm{W \cdot nm^{-1}}$ |
| spektrale Bestrahlungsstärke | $E_e(\lambda)$ | $\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}}$ |
| Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges | $V(\lambda)$ | – |
| spektraler Transmissionsgrad | $\tau(\lambda)$ | – |
| spektraler Absorptionsgrad | $\alpha(\lambda)$ | – |
| spektrale Objektempfindlichkeit | $s(\lambda)_{dm,rel}$ | – |
| **Sonstige Größen** | | |
| Zeit | $t$ | s |
| Lichtgeschwindigkeit | $c$ | $3 \cdot 10^8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ |
| Planck'sches Wirkungsquantum | $h$ | $6,626 \cdot 10^{-34}$ Js |
| Avogadro Konstante | $N_A$ | $6,022 \cdot 10^{23}\ \mathrm{mol^{-1}}$ |
| Dissoziationsenergie | $E_{diss}$ | $\mathrm{J \cdot mol^{-1}}$ |
| Spannung | $U$ | V |
| Widerstand | $R$ | Ω |
| Strom | $I$ | A |
| Photostrom | $I_{ph}$ | A |

# Lichttechnische Größen und deren radiometrische Entsprechung

Lichttechnische Größen und deren radiometrische Entsprechung nach [DIN 5030-1, 1985] [DIN 5032, 1999-2008]

| Lichttechnische Größe | Einheit (Zeichen) | Radiometrische Entsprechung | Einheit (Zeichen) |
|---|---|---|---|
| Lichtmenge $Q$ | Lumen · Sekunde ($\mathrm{lm} \cdot \mathrm{s}$) | Strahlungsenergie $Q_e$ | Joule (J) |
| Lichtstrom $\Phi$ | Lumen (lm) | Strahlungsfluss oder Strahlungsleistung $\Phi_e$ | Watt (W) |
| Lichtstärke $I_v$ | Candela (cd) | Strahlstärke $I_e$ | Watt pro Steradiant ($\mathrm{W} \cdot \mathrm{sr}^{-1}$) |
| Spezifische Lichtausstrahlung $M$ | Lumen pro Quadratmeter ($\mathrm{lm} \cdot \mathrm{m}^{-2}$) | Spezifische Ausstrahlung $M_e$ | Watt pro Quadratmeter ($\mathrm{W} \cdot \mathrm{m}^{-2}$) |
| Beleuchtungsstärke $E$ | Lux (lx) | Bestrahlungsstärke $E_e$ | Watt pro Quadratmeter ($\mathrm{W} \cdot \mathrm{m}^{-2}$) |
| Leuchtdichte $L$ | Candela pro Quadratmeter ($\mathrm{cd} \cdot \mathrm{m}^{-2}$) | Strahldichte $L_e$ | Watt pro Quadratmeter und Steradiant ($\mathrm{W} \cdot \mathrm{m}^{-2} \cdot \mathrm{sr}^{-1}$) |
| Lichtstromdichte | Lux (lx) | Strahlungsflussdichte $\Psi$ | Watt pro Quadratmeter ($\mathrm{W} \cdot \mathrm{m}^{-2}$) |
| Belichtung $H$ | Lux · Sekunden ($\mathrm{lx} \cdot \mathrm{s}$) | Dosis oder Bestrahlung $H_e$ | Watt Sekunden pro Quadratmeter ($\mathrm{W} \cdot \mathrm{s} \cdot \mathrm{m}^{-2}$) |

# Literaturverzeichnis


Aydinli, S. [1992]. Museumsbeleuchtung: Was bringt die Filterung des kurzwelligen Strahlungsanteils. In *Tagungsband Licht 1992* (S. 384–399). Saarbrücken.

Aydinli, S., Hilbert, G. S. & Krochmann, J. [1983]. Über die Gefährdung von Ausstellungsgegenständen durch optische Strahlung. *Lichtforschung*(5), 35–48.

Baumgarten, U. [2006]. *Drahtlose Netzwerke – Technologien, Anwendungen, Management: Sensornetze / Smart Dust.*

Bronstein, I. N. [2008]. *Taschenbuch der Mathematik.* Frankfurt: Deutsch.

Budde, W. [1983]. *Optical Radiation Measurements: Physical Detectors of Optical Radiation* (Bd. 4). London: Academic Press.

Bunsen R, R. H. E. [1859]. *Photochemische Untersuchungen* (Bd. 108). Leipzig.

CIE. [2004]. *Colorimetry* (3. ed. Aufl.). Vienna: CIE Central Bureau.

CIE157. [2004]. *Control of damage to museum objects by optical radiation* (Bd. 157). Vienna: CIE Central Bureau.

Crollau, E. K. & Knoring, G. M. [1975]. *Standards of artificial light in museums of the USSR.* Venice.

D.B. Judd. [1953]. *Radiation Hazard of Museum Light Sources* (Nr. 2254). Washington.

DIN 4710. [2003]. *Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumlufttechnischen Anlagen in Deutschland.*

DIN 5030-1. [1985]. *Spektrale Strahlungsmessung.*

DIN 5030-3. [1984]. *Spektrale Strahlungsmessung.*

DIN 5032. [1999-2008]. *Lichtmessung.*

DIN 5034. [1999-2007]. *Tageslicht in Innenräumen.*

DIN 5035. [2006]. *Beleuchtung mit künstlichem Licht.*

DIN 5035-6. [2006]. *Beleuchtung mit künstlichem Licht – Messung und Bewertung.*

DIN EN 12464. [2011]. *Beleuchtung von Arbeitsstätten.*

DIN EN 13032. [2012]. *Licht und Beleuchtung. Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten.*

DIN EN 15757. [2008]. *Erhaltung des kulturellen Erbes - Vorgaben für Temperatur und relative Feuchte zur Reduzierung von klimabedingter mechanischer Beschädigung in organischen hygroskopischen Materialien.*

DIN EN 15759. [2008]. *Erhaltung des kulturellen Erbes – Spezifikation und Kontrolle des Raumklimas – Beheizung von Kirchen.*

DIN EN 15886. [2009]. *Erhaltung des kulturellen Erbes - Prüfmethoden - Farbmessung von matten Oberflächen.*

DIN EN 15898. [2009]. *Erhaltung des kulturellen Erbes - Allgemeine Begriffe zur Erhaltung des kulturellen Erbes.*

DIN EN 15946. [2009]. *Erhaltung des kulturellen Erbes – Verpackungsmethoden.*

DIN EN 16163. [2010]. *Erhaltung des kulturellen Erbes - Beleuchtung von Ausstellungen des kulturellen Erbes.*

Eschweiler, S. [2003]. *Das Einsteigerseminar Java 2 Micro Edition: [der methodische und ausführliche Einstieg ; über 350 Seiten Einsteiger-Know-how]* (1. Aufl. Aufl.). Bonn: bhv.

Fördergemeinschaft Gutes Licht. [Dezember 2006]. Museumsbeleuchtung: Strahlung und ihr Schädigungspotenzial. *2006.*

Forschergemeinschaft USA. [2004]. *Extreme Scale Wireless Sensor Networking.*

Genard, J. [1951]. Extrem ultraviolet radiation from tubular fluorescent lamps and its effect on museum lighting. *Museum*(5), 53–58.

Hahn, R. & Neukum, O. [2004]. *Sensornetzwerke.*

Hamamatsu Photonics. [2010]. *Datenblatt S1087.*

Hanlan, J. F. [1970]. The Effect of Electronic Photographic Lamps on the Materials of Works of Art. *Museums News Technical Supplement*(48), 10.

Harrison, L. S. [1953]. *Report on Deteriorating Effects of Modern Light Sources.* New York.

Herzberg, H., Aydinli, S. & Kaase, H. [2009]. Bewertung der Beleuchtung in Tageslichtmuseen. *Tageslicht*, *2009*(2), 68–72.

Hilbert, G. S. [1996]. *Sammlungsgut in Sicherheit* (2 Aufl.). Berlin.

Hsu, V. S., Kahn, J. M. & Pister, K. [1998]. *Wireless Communications for Smart Dust.*

ICOM & Chatelain, J. [1971]. *La lumière et la protection des objets et spécimens exposés dans les musées et galeries d'art.* Paris.

Illuminating Engineering Society. [1970]. *Lighting of art galleries and museums* (Nr. No. 14). London.

International Center for Conservation. [1975]. *Lighting* (Nr. No. 1). Roma.

Koesling, V. [2000]. *Vom Feuerstein zum Bakelit: Historische Werkstoffe verstehen* (Bd. 5/6). Stuttgart: Theiss.

Krochmann, J. [1987]. *Farbänderungen von museumstypischen Materialien unter dem Einfluß optischer Strahlung.* Berlin.

Lafontaine, R. H. & MacLeod, K. J. [1976]. *A statistical survey of lighting conditions and the use of ultraviolet filters in Canadian Museums,. Archives and Galleries.* Canada.

Linear Technology Corporation. [2010]. *Datenblatt: LTC6244 Dual 50MHz, Low Noise, Rail-to-Rail, CMOS Op Amp.*

Merz, H., Hansemann, T. & Hübner, C. [2007]. *Gebäudeautomation: Kommunikationssysteme mit EIB/KNX, LON und BACnet.* München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl.

Mesut, G. [2004]. *Routing und Adressierung in mobilen multi-hop Ad-hoc-Netzen.* Aachen.

Michalski, S. [1987]. Damage to museum objects by visible radiation (light) and ultraviolet radiation (uv). In The Museums Association (Hrsg.), *Lighting in museums, galleries and historic houses* (S. 3–16). London.

NBS. [1953]. *Protective Display Lighting of Historical Documents* (Nr. Circular 538).

Nordrhein-Westfahlen-Stiftung. [2001]. *Handbuch zur ehrenamtlichen Museumsarbeit: Leitfaden für die Praxis.* NRW.

Osram GmbH. [2010]. *Lichtprogramm.* Germany.

Padfield, T. [1997]. *The lux is an imperfect measure of photochemical potency.*

Panda, D., Rahman, R. & Lane, D. [2007]. *EJB 3 in action.* Greenwich and Conn.: Manning.

Patkus, B. L. [2007]. Protection from Light Damage: a good introduction into light, light sources, measuring and controlling light.

Pedrotti, F. L., Bausch, W., Pedrotti, L. S. & Schmidt, H. [2005]. *Optik für Ingenieure: Grundlagen* (3., bearbeitete und aktualisierte Auflage. Aufl.). Berlin and Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Pfau, T. [2005]. *Auswertung von Messungen: Fehlerrechnung.* Stuttgart.

Prevart GmbH. [2008]. *Grundlagen für die Lichtplanung in Museen.* Winterthur.

Ritter, J. W. [1801]. *Auszüge aus den Briefen an den Herausgeber* (Bde. Volume 7, Issue 4). Halle: Rengerschen Buchhandlung.

Ritter, J. W. [1803]. *Versuche über das Sonnenlicht* (Bde. Volume 12, Issue 12). Halle: Rengerschen Buchhandlung.

Rummich, E. [2008]. *Energiespeicher: Grundlagen - Komponenten - Systeme* (1 Aufl.). Renningen: expert.

Russel, W. J. & Abney, W. [1888]. *Action of Light on Water Colours: Report to the Science and Art Department of the Committee of Council on Education.* London.

Sandmann, H. [2002]. *Über die Verteilung der diffusen, im Himmelsgewölbe gestreuten ultravioletten Strahlung: Spektrale Messungen und Szenarien für eine medizinische Bewertung.*

Saunders, D. [1995]. Photographic Flash: Threat or Nuisance? *National Gallery Technical Bulletin*(16), 66–72.

Saunders, D. & Kirby, J. [1994]. *Wavelength-Dependent Fading of Artists' Pigments.*

Schwarzschild, K. [1899]. *Beiträge zur photographischen Photometrie der Gestirne.* Unveröffentlichte Dissertation, Universität München, München.

Sun Oracle. [2002]. *JAAS Tutorials.*

Sun Oracle. [2007]. *Small Programmable Object Technology: SunSPOT Owner's Manual.* Santa Clara (USA).

Sun Oracle. [2008]. *Java ME Technical Documentation.*

Thomson, G. [2000]. *The museum environment* (2. ed., reprinted. Aufl.). Oxford: Butterworth Heinemann [u.a.].

Waller, C. [11.08.2009]. *Long Life for Art.*

# Abbildungsverzeichnis


1.1 „Andachtsbild mit hl. Jakobus“; Freiburg, um 1785; Augustinermuseum Freiburg; Inv. Nr. K 35/3 . . . . . 2
1.2 Wiss. Untersuchungen im Bereich der Objektschädigung . . . 3
1.3 Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung objektschädigender Strahlung nach [CIE157, 2004] . . . . . 12
1.4 Lage und Grundriss des Bode Museums in Berlin . . . . . 19
1.5 Alpines Museum in München . . . . . 19
1.6 Lichtschutz durch überkragende Dächer . . . . . 21
1.7 Central Museum Utrecht a.) Markisen b.) Lamellengitter . . 22
1.8 Lichtschutz durch verfahrbare Blenden . . . . . 22
1.9 Tageslichtlenksystem a.) Außenansicht b.) Innenansicht . . . 22

2.1 rel. spektrale Strahlungsfunktionen bei Mischlicht zwischen Tageslicht $D_{45}$, $D_{55}$, $D_{65}$, $D_{75}$ und Normlichtart A normiert auf gleiche Beleuchtungstärke . . . . . 35

3.1 Vertikaler Schnitt durch die Bestrahlungsanlage . . . . . 39
3.2 Xenon-Kurzbogenlampe, Typ Osram XBO 1600 . . . . . 40
3.3 Normiertes gemessenes Spektrum der XBO-Lampe . . . . . 40
3.4 Standard-Filterkonfiguration der Anlage . . . . . 42
3.5 Spektrale Transmissionsgrade der Standardkonfiguration der Kantenfilter . . . . . 43

4.1 Teilsensor 1; Sensor-Filter Kombination SIC01S und N-WG280 50
4.2 Teilsensor 2; Sensor-Filter Kombination EPD-440 und UG5 . 51
4.3 Teilsensor 3; Sensor-Filter Kombination S5973-02 und BG42 . 52
4.4 Spektrale Empfindlichkeit der gewichteten Teilsensoren als Vorbereitung für die Berechnung des Gesamtsignals . . . . . 54
4.5 Spektrale Empfindlichkeit des Gesamtmesskopfes . . . . . 54
4.6 Spektrale Anpassung nach $V(\lambda)$ . . . . . 55
4.7 Transimpedanzverstärker a) Einstufig; b) Mehrstufig . . . . . 57
4.8 Transimpedanzverstärker allgemein . . . . . 57
4.9 Transimpedanzverstärker mit invertiertem Eingangsstrom . . 58
4.10 Transimpedanzverstärker mit invertierter Ausgangsspannung 58

4.11 Transimpedanzverstärker Pulsfest . . . . . 59
4.12 Schematischer Aufbau eines Messplatzes zur Kalibrierung von Strahlungsempfängern . . . . . 62
4.13 richtungsabhängige Empfindlichkeit bei $\phi = 0°$ . . . . . 65
4.14 Prüfung der Linearität . . . . . 67

5.1 Gemessene Spektralfunktionen im Museum . . . . . 80

6.1 ODV-Routing in einem Multi-Hop Netzwerk [Mesut, 2004] . . 87
6.2 Der MIDlet-Lebenszyklus . . . . . 92
6.3 Kabelgebundenes Netzwerk . . . . . 94
6.4 Adhoc Netzwerk: gestrichelte Linie = Funkverbindung; durchgezogene Linie = Kabelverbindung . . . . . 94
6.5 Zentralisiertes Netzwerk: gestrichelte Linie = Funkverbindung; durchgezogene Linie = Kabelverbindung . . . . . 95
6.6 Temporäres zentralisiertes Netzwerk: gestrichelte Linie = Funkverbindung; durchgezogene Linie = Kabelverbindung . . . . . 95
6.7 Auswahl der Integration der Elektronik am Kunstwerk . . . . 98
6.8 Integration der Elektronik im Schild zur Beschreibung des Kunstwerkes . . . . . 100
6.9 Integration der Sensorik im Passepartout und der Elektronik direkt hinter dem Kunstwerk . . . . . 100
6.10 Sonnenscheinsensor mit der Ausprägung für Breitengrade größer 52° . . . . . 103
6.11 Richtungsabhängigkeit des Sonnenscheinsensors . . . . . 104
6.12 Vergleich zwischen Sonnenwahrscheinlichkeit und normaler Solarbestrahlungsstärke . . . . . 104
6.13 Kombinierter Temperatur-Luftfeuchte-Sensor SHT11 von Sensirion . . . . . 106
6.14 Schematische Darstellung der Hardware, Quelle: SunSpot Owners Manual . . . . . 106
6.15 Drei-Schichten-Architektur der Server-Software . . . . . 109
6.16 Kommunikationsstruktur der Informationsbereitstellung für die Regelung . . . . . 112
6.17 Adhoc Mesh Netzwerk in der Testkonfiguration . . . . . 114
6.18 Paketlieferrate während der Testraumstudie . . . . . 114
6.19 Administrations- und Managementwerkzeuge . . . . . 116
6.20 Workflow und Datenbereitstellung des Gesamtsystems . . . . 117

# Tabellenverzeichnis


1.1 Relativer Schädigungsfaktor nach Judd (NBS 1953) . . . . . 4
1.2 Dissoziationsenergien einiger Verbindungsklassen bei Bildung von Radikalen [Koesling, 2000] . . . . . 5
1.3 Dissoziationsenergien der optischen Strahlung . . . . . 7
1.4 $b$-Formfaktoren der relativen spektralen Schädigungsfunktion in fünf Kategorien museumstypischen Materials nach CIE157 (2004) . . . . . 11
1.5 Schwellenbestrahlung $H_{s,dm}$ in fünf Kategorien museumstypischen Materials nach CIE157 (2004) . . . . . 13
1.6 Einteilung der Lichtbeständigkeit von Pigmenten nach Thomson . . . . . 14
1.7 Gegenüberstellung verschiedener konservatorischer Maßnahmen am Beispiel der Glühlampe . . . . . 27
1.8 Konservatorische Maßnahmen am Beispiel einer ausgewählten LED . . . . . 28

2.1 Vorgeschlagene maximale Beleuchtungsstärkeniveaus . . . . . 32
2.2 Bezug der Beleuchtungsstärke auf die wirksame Bestrahlungsstärke unterschiedlicher Tageslichtphasen ($D_{45}$ bis $D_{75}$, einer Leuchtstofflampe (LL), einer LED und der Normlichtart A (NLA)) . 34
2.3 Bezug der Beleuchtungsstärke auf die wirksame Bestrahlungsstärke unterschiedlicher Tageslichtphasen ($D_{45}$ bis $D_{75}$ bzw. beispielhaft einer Leuchtstofflampe (LL), einer LED und deren Mischung mit der Normlichtart A (NLA) . . . . . 34

3.1 Beleuchtungsstärke an 40 repräsentativen Bestrahlungsöffungen in der Probenebene der Bestrahlungsanlage der TU Berlin 41
3.2 Filter in der Standard-Konfiguration, Bestrahlungsstärke $E_{e,\tau}$ hinter den Filtern im Bereich von 290 nm bis 780 nm und deren Grenzwellenlänge $\lambda_G$ . . . . . 42
3.3 Spezielle Farbwiedergabeindizes bei der Untersuchung von LED-Strahlern . . . . . 45

4.1 Zusammenfassung der verwendeten Sensoren, Filter und Gewichtungsfaktoren . . . . . 53
4.2 Empfindlichkeitsbereich der Schaltung . . . . . 59
4.3 Weitere Kenngrößen für Beleuchtungsstärkemessgeräte nach DIN EN 13032:2012 . . . . . 63
4.4 Berechnung des SNR der eingesetzten Sensoren . . . . . 68
4.5 Maximale Bestrahlungsstärken der Verstärkerstufen bezogen auf eine maximale Gesamtbeleuchtungsstärke von 20.000 lx der Normlichtart $D_{65}$ . . . . . 69
4.6 Auflösung der Photoströme der Vorverstärker . . . . . 69
4.7 Auflösung der Bestrahlungsstärke $E_e$ für $D_{65}$ bei 20.000 lx bei unterschiedlichen Quantisierungsgenauigkeiten . . . . . 70
4.8 Quantisierungsabweichung in Abhängigkeit der digitalen Auflösung der A/D-Wandler . . . . . 70
4.9 Zusammenfassung der einzelnen Messunsicherheiten . . . . . 72

5.1 Prozentualer Zusammenhang der wirksamen Bestrahlung bei kurzzeitiger Sonneneinstrahlung mit der künstlichen Beleuchtung am Beispiel $D_{65} \Leftrightarrow$ Normlichtart A (NLA) . . . . . 76
5.2 Untersuchung der Beleuchtungsstärken und Bestrahlungen der Photo-Blitzgeräte unterschiedlicher Klassen . . . . . 77
5.3 Prozentualer Anteil $\mathcal{P}_{flash}$ der Blitze an der Erhöhung der Gesamtbestrahlung bei unterschiedlichen Beleuchtungsstärken $E$ am Objekt für eine Beleuchtung mit ungedimmten Halogenlampen . . . . . 78

6.1 Gegenüberstellung der vier Szenarien für ein Monitoring . . . 98
6.2 Eingesetzte Li-Ionen-Akkus in den Sensorknoten . . . . . 108