

# **Entwicklung einer Software zur Bestimmung der Beleuchtungsstärke in Gebäuden**

STUDIENARBEIT

für die Prüfung zur T2\_3100

des Studiengangs Informatik  
Studienrichtung Informationstechnik

an der

Dualen Hochschule Baden-Württemberg Karlsruhe

von

**Michaela Fleig**

Abgabedatum 10. Mai 2021

Matrikelnummer 8079678

Kurs tinf18b3

Ausbildungsfirma Baumer IVO GmbH & Co. KG, Villingen-Schwenningen

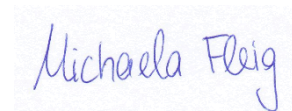
Gutachter der Studienakademie Prof. Dr. Kai Becher

## Erklärung

(gemäß §5(3) der „Studien- und Prüfungsordnung DHBW Technik“ vom 29. 9. 2015)

Ich versichere hiermit, dass ich meine Projektarbeit) mit dem Thema: „Entwicklung einer Software zur Bestimmung der Beleuchtungsstärke in Gebäuden“ selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Ich versichere zudem, dass die eingereichte elektronische Fassung mit der gedruckten Fassung übereinstimmt.

VS-Schwenningen, den 10.05.2021



---

Ort, Datum

Unterschrift

# Inhaltsverzeichnis

---

Inhaltsverzeichnis .....	i
Abbildungsverzeichnis .....	iii
Formelverzeichnis .....	v
Listingverzeichnis .....	vi
Abkürzungsverzeichnis .....	vii
1. Einleitung .....	1
2. Grundlagen .....	2
2.1. Bedeutung von Helligkeit .....	2
2.2. Bedeutung von Farbempfinden .....	5
2.3. Wohnraum und Lichteinfall .....	14
2.4. Europäische, Deutsche Standards DIN EN .....	26
2.5. KNX-Standard und vergleichbare Standards .....	26
3. Stand der Technik .....	35
3.1. Leuchtmittel .....	35
3.2. Steuerung der Beleuchtung .....	37
4. Anforderungen und Zielsetzung .....	40
5. Konzept .....	41
5.1. Anzahl der Lampen nach empfohlener Leuchtstärke im Raum berechnen .	41
5.2. Auswahl der Lampen ausgewählter Hersteller hinzufügen .....	42
5.3. Fenster im Raum hinzufügen .....	44
5.4. Darstellung des Raumes für den Benutzer mit Eingabe-Parametern .....	45
5.5. Implementierung einer Funktionalität zum Tageslicht-abhängigen Dimmen	47
6. Entwicklung und Implementierung .....	50
6.1. Anzahl der Lampen nach empfohlener Leuchtstärke im Raum berechnen .	50
6.2. Auswahl der Lampen ausgewählter Hersteller hinzufügen .....	52

6.3. Fenster im Raum hinzufügen .....	55
6.4. Darstellung des Raumes für den Benutzer mit Eingabe-Parametern .....	58
6.5. Implementierung einer Funktionalität zum Tageslicht-abhängigen Dimmen	60
6.6. Software-Architektur .....	61
7. Verifikation und Fazit.....	64
8. Ausblick.....	66
Literaturverzeichnis .....	69
Anhang .....	71

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1: Stromverbrauch der Haushalte in Deutschland .....	1
Abbildung 2: Verhältnis der Leuchtdichte zwischen Infeld und Umfeld.....	2
Abbildung 3: Die circadiane Wirkung.....	3
Abbildung 4: Darstellung der Farbräume RGB, CMYK und CIE-Lab.....	7
Abbildung 5: Farbtemperatur und Lichtquellen .....	10
Abbildung 6: Kruithoff'scher Behaglichkeitsbereich nach Farbtemperatur, Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke .....	11
Abbildung 7: Lichtstärkeverteilungskurve einer tief-/engstrahlenden Lichtquelle.....	13
Abbildung 8: Lichtstärkeverteilungskurve einer tief-/hochstrahlenden Lichtquelle ....	13
Abbildung 9: Helle Raumstimmung durch eine diffuse Grundbeleuchtung .....	14
Abbildung 10: Gedämpfte Raumstimmung durch eine punktuelle Beleuchtung .....	15
Abbildung 11: Vergleich von Lichteinfall, Material und resultierenden Kosten.....	18
Abbildung 12: Dunkle Bestuhlung gibt wenig indirektes Licht ab.....	21
Abbildung 13: Helle Bestuhlung gibt viel indirektes Licht ab.....	21
Abbildung 14: Farbspektrale Verteilung von Tageslicht.....	23
Abbildung 15: Lichtquelle mit niedriger Farbtemperatur .....	24
Abbildung 16: Lichtquelle mit hoher Farbtemperatur .....	25
Abbildung 17: Europa in der Nacht.....	25
Abbildung 18: Simulation einer geplanten Küche mit virtuellem Rundgang.....	31
Abbildung 19: Ansicht auf die Anwendung DIALux evo .....	32
Abbildung 20: Ansicht auf die Anwendung ReluxDesktop .....	33
Abbildung 21: Einsatzmöglichkeit von OLED im Wohnraum .....	36
Abbildung 22: Induktionslampe von Philips .....	37
Abbildung 23: Auswahl eines Lampen- oder Leuchten-Typs.....	43
Abbildung 24: Anteil des TQ im Raum bei $E_{\text{außen}} 20.000 \text{ Lux}$ .....	45
Abbildung 25: Angabe der Fenster nach Himmelsrichtung.....	45
Abbildung 26: Anwendungsfall von FreeCAD in der Gebäudearchitektur .....	46
Abbildung 27: Konzept zur Anzeige der generierten Steuerung .....	48
Abbildung 28: Exemplarische Darstellung der Charakteristiken einer LED .....	53
Abbildung 29: Eingabe der Maße und Position der Fenster .....	56
Abbildung 30: Schematische Schattenbildung im Raum mit zwei Fenstern .....	57
Abbildung 31: Exemplarisch erstellter Raum mit Fenstern und Möbeln einer Küche	59

Abbildung 32: Darstellung der Architektur nach Klassen .....	62
Abbildung 33: Ausschnitt der Aufruf-Hierarchie ab Main .....	63
Abbildung 34: TQ-Verlauf ohne Lichtumlenksystem .....	67
Abbildung 35: TQ-Verlauf mit Lichtumlenksystem .....	68
Abbildung 36: Reflexionsgrade verschiedener Materialien .....	71
Abbildung 37: Beispiel einer intelligenten Beleuchtungssteuerung mit KNX.....	72
Abbildung 38: Beispiel einer intelligenten Beleuchtungssteuerung mit DALI .....	73
Abbildung 39: Taster-Reihe für den manuellen Eingriff in das Gebäudeautomatisierungssystem .....	73
Abbildung 40: Ansicht auf das initiale Fenster der Anwendung .....	74

## Formelverzeichnis

---

Formel 1: Berechnung der Leuchtdichte.....	19
Formel 2: Berechnung des prozentualen TQs .....	44
Formel 3: Berechnung der Anzahl von Leuchtquellen im Innenraum .....	51
Formel 4: Berechnung der Tiefe des Einflusses von Sonnenlicht .....	55



## Listingverzeichnis

---

Listing 1: Statische Speicherung der Variablen für Küche und Arbeitszimmer.....	50
Listing 2: Berechnungsreihenfolge zur Anzahl der Leuchtmittel im Raum .....	51
Listing 3: Setzen der Eigenschaften der Glühlampe im Code.....	54
Listing 4: Übergabe der Parameter des gewählten Leuchtmittels .....	54
Listing 5: Berechnung der Lichteinfluss-Tiefe für die Nord-Seite.....	58

## Abkürzungsverzeichnis

---

UV	Ultraviolett, ultraviolettes Licht
IF	Infrarot, infrarotes Licht
TQ	Tageslichtquotient
cd	Candela, Einheit der Beleuchtungsstärke
lm	Lumen, Einheit der Leuchtdichte
W	Watt, Einheit der Stromleistung
LED	Light Emitting Diode
LVK	Lichtstärkeverteilungskurve
2D	Zweidimensionale Darstellung, Zweidimensional
3D	Dreidimensionale Darstellung, Dreidimensional
HES	Home Electronic System
V	Volt, Einheit der Spannung von Strom
EIB	Europäischer Installationsbus
LON	Local Operating Network
KNX	Konnex Bus
DALI	Digital Addressable Lighting Interface
IP	Integrale Planung
DALI	Deutsches Institut für angewandte Lichttechnik
OLED	Organische LED
EL	Elektrolumineszenz
CAD	Computer-Aided Design
ETS	Engineering Tool Software
ISP	Interface Segregation Principle
HTML	Hypertext Markup Language

### 1. Einleitung

Tageslicht ist ein wichtiger Bestandteil im alltäglichen Leben. Ohne Licht kein Leben [1, S. 8f.]. Licht ist für die Gebäude- und Raumgestaltung, für Sehaufgaben und die Umwelt notwendig.

Der amerikanische Architekt Raymond Hood (1881-1934) bezeichnete die Gestaltung mit Licht auch als klare Aussage moderner Gestaltung und die Eröffnung neuer Wege der architektonischen Gestaltung. Heute bildet die Lichtarchitektur eine anspruchsvolle Verbindung von Architektur und Licht, von Lichtträgern und Lichtausstrahlung zu einer künstlichen Einheit. Mithilfe des natürlichen und künstlichen Lichts können besondere architektonische Inszenierungen erschaffen werden, die ihre Funktion durch die Wirkung auf den menschlichen Organismus um das Sehen erweitert. [2, S. 8]

Sehen ist das Erkennen von Farben und Formen von Objekten. Es soll auch bei schlechten Lichtverhältnissen verfügbar sein, was den Einsatz von künstlicher Beleuchtung notwendig macht. Wo kein oder zu wenig Tageslicht vorhanden ist, muss auf den Einsatz von künstlichem Licht gesetzt werden. [1, S. 162f.]

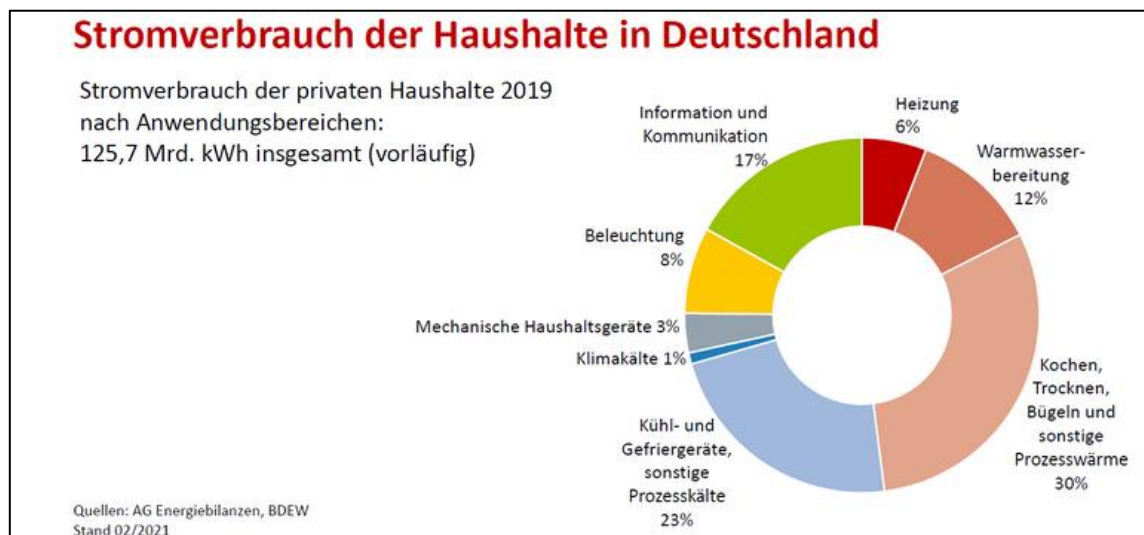


Abbildung 1: Stromverbrauch der Haushalte in Deutschland [3]

Beleuchtung bildet mit etwa 3.028 kWh pro Jahr (Stand 2019) bis zu acht Prozent des Stromverbrauchs deutscher Privathaushalte, wie aus dem Diagramm auf Abbildung 1 zu entnehmen ist. Dieser kann um 25 bis 58% eingespart werden, wenn Beleuchtung nur eingesetzt wird, um die Sehaufgabe bei nicht ausreichendem Tageslicht zu erfüllen, sowie durch den Einsatz moderner Elektroinstallationssysteme. [4, S. 56ff.]

## 2. Grundlagen

Mit den Grundlagen wird die Basis geschaffen, auf der ein Entwicklungsprojekt entstehen kann. Nachfolgend sollen die Bedingungen und Voraussetzungen der Anwendung dargestellt werden.

### 2.1. Bedeutung von Helligkeit

Helligkeit ist das vom Auge wahrgenommene, vorherrschende Lichtniveau, das als physikalisch gegebene Helligkeit in der Lichttechnik vorzufinden ist. Diese Größe wird relativiert und in hell oder dunkel quantifiziert. Es gibt keine numerische Skala mit Nullpunkt und Absolutvergleich. Um die Helligkeit dennoch als Messdaten in der Lichttechnik verwenden zu können, ist es erforderlich, ein subjektiv-empirisches Relativ auf ein objektiv-numerisches Relativ abzubilden. Dabei soll der physikalische Messvorgang auch die physiologischen Gesetzmäßigkeiten des menschlichen Auges berücksichtigen. [5, S. 13]

### Leuchtdichte

Die Leuchtdichte ist die wahrgenommene Helligkeit. Gemeinsam mit dem Reflexionsgrad einer Fläche ist diese für die Beleuchtungsstärke  $E$  entscheidend.  $E$  wird in Lux angegeben und bestimmt die effektive Helligkeit, die an einer Fläche in üblicherweise 0,8m über dem Boden ankommt (Nutzebene). Es wird empfohlen, eine Beleuchtungsstärke von 1.500 Lux zu halten, um eine Beleuchtungsstärke von 500 Lux auf Augenhöhe zu erhalten. Ein Lux entspricht einem Lumen [lm] pro Quadratmeter.

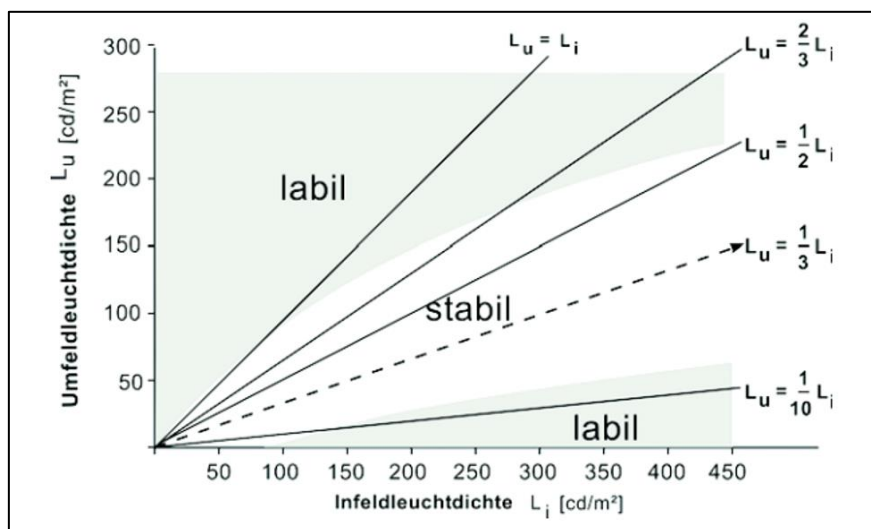


Abbildung 2: Verhältnis der Leuchtdichte zwischen Infeld und Umfeld [5, S. 145]

Abbildung 2 zeigt die Beziehung  $L_u$  in Candela [cd]/m<sup>2</sup>, die einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Lichtleistung der Infeldleuchtdichte  $L_i$  und der Umfeldleuchtdichte  $L_u$  herstellt. Um stabile Sehbedingungen zu schaffen, muss die Beziehung im ausgewogenen Verhältnis von Infeld und Umfeld liegen. Diese liegt bei etwa  $\frac{1}{2}$  oder  $\frac{1}{3}$  der Infeldleuchtdichte. [5, S. 145]

### Menschliches Auge

Ein Mensch erlebt unterschiedliche Empfindungen, die über das Auge Reize auslösen. Neben der Wahrnehmungskonstanz, dem visuellen Empfinden, der körperlichen Empfindung und der Hellempfindung, gehören auch die Adaptionfähigkeit und Farbempfindung zu den Eigenschaften des menschlichen Sehens. Die Wahrnehmungskonstanz beschreibt das Erkennen von vorhandenen Objekten und das Ergänzen von Fehlendem zu diesem Bild. So wird ein Objekt bei Tageslicht als auch bei Dämmerung erkannt, obwohl die Farbwiedergabe des Objektes nicht gleich ist. [1, S. 19f.] Das nachfolgende Kapitel soll in Bezug auf das Farbsehen weiter auf das menschliche Auge eingehen.

### Wirkungsbereiche

Licht hat drei Wirkungsbereiche: Sehen, biologische Wirkung, und Wohlbefinden. Die biologische Wirkung ist derzeit noch wenig erforscht. Durch Licht wird der circadiane Rhythmus des Menschen gesteuert, der in Abbildung 3 im Vergleich zu Tag- und Nachtsehen dargestellt ist.

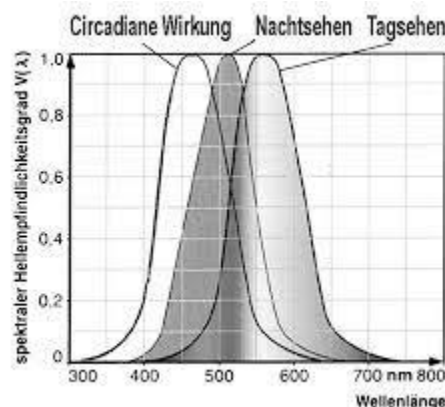


Abbildung 3: Die circadiane Wirkung [7]

Dieser Rhythmus reguliert die innere Uhr, die Synthese von Vitamin D und den Aufbau der Knochen. Menschen mit Depressionen und Demenz erfahren eine Linderung der

Symptome durch hohe Beleuchtungsstärken über einen längeren Zeitraum. Durch circadianes Licht kann der Schlaf-Wach-Rhythmus von Menschen mit Demenz stimuliert werden. Circadianes Licht beschreibt die Nachempfindung des künstlichen Lichtes nach dem natürlichen Tagesverlauf. [6, S. 202f.]

Die Hellempfindung ist eine lichtabhängige Empfindung, bei der sich das Auge automatisch an die aktuellen Helligkeitsverhältnisse anpasst. Sie ist individuell erlebbar, abhängig von der Sehschärfe des Menschen. Die Adaptionfähigkeit des Auges ist enorm. Sie wird ebenfalls individuell empfunden, sie lässt wie die Sehschärfe im Alter nach, wenn sich der Blickwinkel verringert. Die Farbempfindung ist sehr individuell. Durch die visuelle Empfindung ist das Unterscheiden von Licht und Farben, wodurch sich ein Objekt von seiner Umgebung abhebt. Die körperliche Empfindung wird durch Licht, besonders durch Ultraviolett [UV]- und Infrarot [IF]-Strahlen in großem Maße beeinflusst. Die Strahlungen wirken sich auf den gesamten Körper aus. Sie erwirken emotionale Auswirkungen und sind zeit-, umgebungs-, stimmungs- und personenabhängig erlebbar. Das bedeutet, ein Mensch kann mehr oder weniger durch einen dunkleren und regnerischen Tag in seiner Stimmung beeinträchtigt werden, wobei sich ein Tag mit strahlendem Sonnenschein mehr oder weniger positiv auf die Stimmung eines Menschen auswirkt. [1, S. 20f.]

### **Tageslicht**

Tageslicht ist ein Faktor, der für die Planung der Innenbeleuchtung viel variabler als künstliche Beleuchtung ist. Das natürliche Licht wird auch Belichtung genannt. [5, S. 8f.] Seine Größe im Raum ist von der Ausrichtung und Position des Gebäudes, von der Fenster- und Türöffnung im Raum, sowie dem Wetter abhängig. Es hat eine anders verteilte Lichtfarbe als das künstliche Licht. Dabei muss der Tageslichtquotient [TQ] D anteilig nach prozentualer Größe in die Lichtplanung einberechnet werden. Ab 12% wirkt der Raum offen und hell bis sehr hell. Das wird üblicherweise direkt am Fenster beobachtet. Zwischen drei und sechs Prozent öffnet sich der Raum. Die Stimmung wird dabei als gedämpft und mittelhell empfunden. Unter einem Prozent TQ wirkt der Raum nach außen hin abgeschlossen, er wird als dunkel erlebt. [1, S. 172]

### **Kombination**

Durch die Kombination von Tageslicht mit Beleuchtung kann künstliches Licht dosiert eingesetzt werden, wenn Tageslicht nicht ausreichend Helligkeit in den Raum bringt.

[1, S. 155f.] Helligkeit wird als invariante Größe betrachtet. Das Auge kompensiert unbewusst die Helligkeit und die Farbe, die durch Licht wirkt (Wahrnehmungskonstanz). Eine Kombination erfordert die Anpassung der Farbgebung und Helligkeit von Lampe oder Leuchte mit dem Tageslicht auf ein jeweils konstantes Niveau im Tagesverlauf. [5, S. 62]

### **Wohlbefinden**

Visuelle Informationen sind für das Leistungsvermögen und das allgemeine Wohlbefinden unentbehrlich. 90% der wahrgenommenen Informationen eines Menschen werden über das Sehen aufgenommen. [6, S. 112ff.] Dunkelheit verursacht Beklemmung und Orientierungslosigkeit. Subjektive Sicherheit und Wohlbefinden sind erst dann gegeben, wenn der Raum dem Betrachter ein prüfendes Erkundungsverhalten ermöglicht. Je mehr Klarheit und visuelle Fassbarkeit die Informationen aus der Umgebung besitzen, desto höher steigt die freie Verarbeitungskapazität des Gehirns und bleibt für andere, aufgabenbezogene Tätigkeiten unbelastet verfügbar. Im ungünstigen Fall führt das Erkundungsverhalten zu einer Ablenkung von der eigentlichen Tätigkeit. Bei Blendung beispielsweise sinkt das Leistungsvermögen, das Wohlbefinden und damit die Verarbeitungskapazität des Gehirns. [5, S. 171]

### **2.2. Bedeutung von Farbempfinden**

Unter Berücksichtigung der mittleren Helligkeit entstehen Farbeindrücke im menschlichen Gehirn. Diese entstehen durch die Farbkonstanzleistungen des Gehirns und entstehen im 3D-Farbraum. Eine Farbwahrnehmung ist erst ab einer bestimmten Helligkeit möglich und ist individuell erlebbar. Durch eine metamere Farbgleichheit können unterschiedliche spektrale Zusammensetzungen des jeweiligen Lichtes gleiche Farbreize bei verschiedenen Menschen auslösen. Dabei erscheinen gemischte Farben ähnlich wie eine reine Farbe. Dies ermöglicht das Nachbilden der Realität unter Tageslicht mit schmalbandigen Lichtquellen, die nur einzelne Farben wiedergeben. Die Farbe eines Objektes wird wie bereits beschrieben auch bei einer Änderung der Lichtverhältnissen als annähernd konstant erlebt. So wird durch eine leichte Verschiebung der Farbwahrnehmung im Auge eine gleiche Farbe bei Sonnenauf- und Sonnenabgang erkannt. Der Mensch hat nicht nur die Fähigkeit zur konstanten Wahrnehmung einer Farbe, er hat auch die Fähigkeit zur sogenannten Farb-Empfindung. Diese beschreibt die individuellen und situationsbedingten

Assoziationen, der Mensch mit dem Objekt hat. In der Psychologie existieren sogenannte Gedächtnisfarben. Damit werden gleiche Farben nur bedingt als gleich wahrgenommen. Diese Erinnerung der Assoziation des Objektes mit einer Farbe wird in der Farbmeterik als Problem angesehen. [1, S. 23f.] Dadurch entstehen Trends mit unterschiedlichen Farben. [6, S. 17f.]

### **Farbmodelle**

Es existieren verschiedene Farbmodelle, von denen jedes Modell Grundfarben definiert, auf deren Basis die einzelnen und gemischten Farben dargestellt werden. Einige bekanntere Farbräume sollen nachfolgend kurz dargestellt werden.

Die quantitative Darstellung bildet die Farben mithilfe von Zahlen ab. Hierbei wird jeder Farbe ein Punkt im Farbraum zugewiesen. Der maximale Umfang des Farbraums ist von der Reinheit der Grundkomponenten abhängig. Unterschiedliche Farbräume sind nicht deckungsgleich, können in Relation zueinander angegeben oder nicht ineinander umgerechnet werden. Dabei wird zur Referenz der Farbraum des CIE-Lab-Modells einbezogen. [1, S. 25]

Der RGB-Farbraum wird durch die Ur-Farben Rot, Grün und Blau definiert. Der Farbraum bildet ein additives Farbmodell. Daraus lassen sich acht Grundfarben mischen, unter anderem Rot, Grün, Blau, Rot und Blau gemeinsam als Magenta, Grün und Blau gemeinsam als Cyan. Er wird häufig für Anwendungen im Computer, der Darstellung auf einem Fernseher und für Lichtmischungen bei Farbspielen verwendet. [1, S. 25f., 2, S. 21ff.]

Der CYMK-Farbraum wird häufig in der Fotografie verwendet. Er stellt eine subtraktive Farbmischung dar, dessen Filterschichten Yellow (Gelb), Magenta und Cyan. Schwarz befindet sich im Zentrum des Farbraums. Durch das Überlappen der verschiedenen Filterschichten werden Farben gemischt. Der Farbraum ist für die Fotografie und die Druckindustrie wichtig, sehr wichtig ist hierbei Schwarz. Mit Schwarz kann ein Vierfarben-Druck entstehen.

Der CIE-Lab-Farbraum wurde von der Commission Internationale d'Eclairage, der internationalen Beleuchtungskonferenz abstrakt festgelegt. Seit 1931 ist der Farbraum ein internationaler Standard.



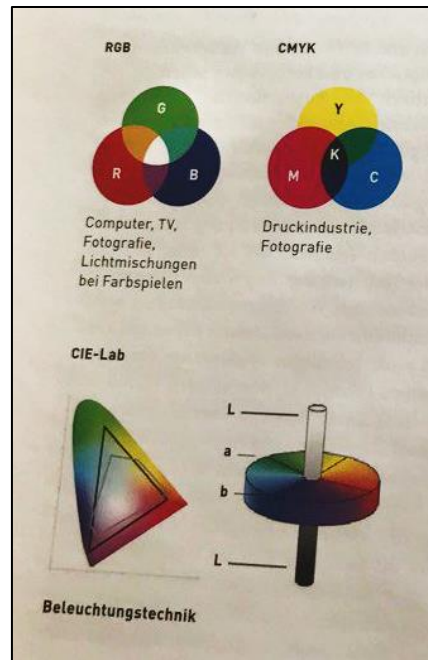


Abbildung 4: Darstellung der Farbräume RGB, CMYK und CIE-Lab [2, S. 22]

Er basiert auf dem 3D Lab-Farbraum, der sich nicht an physikalischen Messgrößen, sondern an physiologischen Eigenschaften der menschlichen Farbwahrnehmung, also der Buntheit und Helligkeit orientiert. Dabei entsprechen die geometrisch berechenbare Abstände zweier Farbkoordinaten den visuell wahrgenommenen Abständen. Dadurch ist eine visuelle Gleichbeständigkeit gegeben. Die Achsen des Lab-Raums entsprechen den wahrnehmbaren Eigenschaften der Farben. Der Farbraum steht symbolisch für alle, für das menschliche Auge wahrnehmbaren Farben. Er wird sehr oft in der Lichttechnik zur Erzeugung von Farben bei Lichtinszenierungen verwendet. [1, S. 25ff., 2, S. 21ff.]

Die drei vorgestellten Farbräume sind in Abbildung 4 dargestellt.

### Erkennen von Farben

Farben werden nur bei Licht wahrgenommen. Als Empfindung veranlasst es die Rezeptoren im Auge zu einer Nervenregung, die an das Gehirn weitergeleitet und dort als Farbe wahrgenommen und empfunden wird. Farbe betrifft nur die Wellenlängen, die zwischen UV- und IF-Licht liegen. Farben werden unterschiedlich wahrgenommen. Erst das Gehirn wandelt unter Berücksichtigung der mittleren Helligkeit und seiner Farbkonstanzleistung die Farbeindrücke in die Parameter um: Weiß oder Schwarz, Rot, Grün oder Blau, und Gelb. Der 3D-Farbraum des CIE-Lab kommt der subjektiven

menschlichen Wahrnehmung am nächsten. Die darin erhaltenen Farben werden von Menschen als die reinsten empfunden.

Die Hellempfindlichkeit und Wahrnehmung der Farbkonstanz wird in drei Sehvorgängen aufgeteilt. Diese Wahrnehmungskurven verschieben sich im Tagesverlauf und sollen nachfolgend kurz vorgestellt werden.

Das Fotopische Sehen stellt den Sehvorgang am Tag dar. Ab mehr als  $3,4 \text{ cd/m}^2$  wird das Farbsehen des Auges angeregt, um Licht in drei verschiedenen Wellenlängenbereichen wahrzunehmen. Das Empfindlichkeitsmaximum der Rezeptoren liegt bei der jeweiligen Wellenlänge Blau, Grün und Rot. Diese Bereiche überschneiden sich. Dadurch wird ein kontinuierliches, nicht lineares Sehen im gesamten spektralen Farbraum ermöglicht. Die höchsten Empfindungen des Menschen liegen bei  $638 \text{ lm pro Watt [W]}$ , das ist bei einer Wellenlänge von  $555 \text{ nm}$ , bei der Farbe Grün.

Das Skotopische Sehen beschreibt den Sehvorgang bei Nacht. Es werden nur die Rezeptoren des Auges angesprochen, die Sehen von Schwarz-Weiß ermöglichen. Der Empfindlichkeitsbereich der Rezeptoren zum Farbsehen lässt sie nachts stärker auf Blau ansprechen, während rotes Licht fast ausschließlich durch Fotopisches Sehen wahrgenommen wird.

Das Mesopische Sehen beschreibt die Konstanz der Sehleistung, die Farbe eines Objektes dennoch annähernd konstant wahrzunehmen. Das erfolgt durch eine leichte Verschiebung der Farbwahrnehmung im Auge. Die Spitze der Tageslichtkurve liegt bei  $550 \text{ nm}$ , im Bereich von Grün. Die Spitze der Nachtwahrnehmung liegt hingegen bei  $510 \text{ nm}$ , im Bereich von Blau bis Grün. Die Circadiane Hellempfindung weicht dabei noch stärker in Richtung Blau ab.

### **Farbwirkung**

Ein Objekt absorbiert einen Teil der empfangenen Lichtstrahlen. Mit dem Treffen des vom Objekt reflektierten Lichts auf das menschliche Auge entsteht der Farbeindruck. Dabei ist die farbspektrale Zusammensetzung des Lichts ein wichtiger Faktor für das Sehen.

Die Farbwirkung auf das Auge wird individuell wahrgenommen. Farben haben eine große Bedeutung, dabei werden sie oft als Symbole verstanden und empfunden.

Innerhalb und zwischen Farben bestehen veränderliche Kontraste, bei variabler Größe den optischen Eindruck verändern können. Je größer der Kontrast, desto höher ist die Leuchtdichte und desto schärfer ist der Eindruck des betrachteten Objekts. Je geringer der Kontrast, desto weniger Farbgrenzen sind mehr erkennbar.

Der Metamere Farbeindruck beschreibt die bereits beschriebenen unterschiedlichen spektralen Zusammensetzungen, die bei Menschen dieselben Farbeindrücke hervorrufen können. So können Rot und Blau, zwei Wellenlängen der auf der Skala gegenüber liegenden Farben denselben Eindruck wie ein rein violettes Licht erwecken.

Der Farbeindruck verändert sich ebenfalls mit dem Verwenden einer künstlichen Beleuchtung. Dabei emittieren die Leuchtmittel die Lichtfarben, die die Farben des Tageslichtes nachbilden sollen. Wichtig für die Lichtgestaltung ist das Variieren der Farbeindrücke. So sind beispielsweise Leuchtstofflampen und LEDs in verschiedenen Lichtfarben erhältlich. Das Tageslicht trifft mit all seinen Schattierungen die beste Lichtfarbe, es vereint alle Farben und erscheint damit als weißes Licht.

Die unterschiedlichen Farben haben verschiedene Wirkungen auf den Menschen. Darunter beispielsweise Rot als Farbe des Feuers, Ausdruck für Kraft und Wärme, wirkt reizend. Gelb hingegen symbolisiert die Sonne und wirkt beruhigend. Weiß steht für die Reinheit, die Neutralität, das Leere und das Licht.

Farben verändern sich im Licht, abhängig von Belichtung oder Beleuchtung. Die Empfindlichkeit des menschlichen Auges variiert mit der Wellenlänge des Lichtes. Eine grüne Lichtquelle erscheint viel heller als eine rote oder blaue mit derselben Leuchtdichte. Die Lichtquelle hat bei künstlichem Licht eine entscheidende Bedeutung. Sowohl die Lichtfarbe und die Art des Leuchtmittels sind wichtig. So haben Glühlampen eine andere Farbgebung als eine Leuchtstofflampe. Bei LEDs ist die Entstehung der Lichtgebung entscheidend, um die Lichtfarbe zu bestimmen.

Nicht jedes weiße Licht ist weiß. Es gibt ein gelbliches Weiß, rötliches Weiß, Weiß, bläuliches Weiß und grünliches Weiß. Jede hat eine unterschiedliche Wirkung auf den Organismus. [2, S. 21ff.]

### **Farbtemperatur**

Die Farbtemperaturen von Lampen sind dem Tageslicht nachempfunden: Morgens und abends sorgt warmrot für Entspannung, Blauanteile sorgen mittags für Aktivität.

[6, S. 202f.] Im Alter liegt die Anforderung an die Beleuchtungsstärke dreimal so hoch, wie in jungen Jahren. [6, S. 202f.]

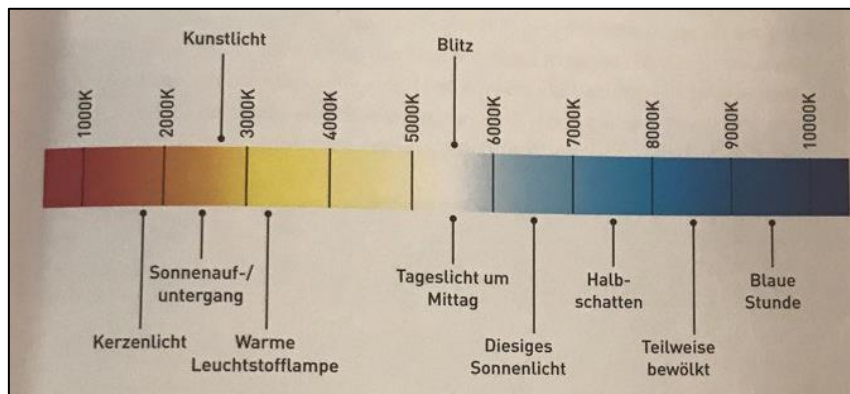


Abbildung 5: Farbtemperatur und Lichtquellen [8, S. 17]

Der Verlauf aller Farbtemperaturen in Abbildung 5 ordnet den skalaren Kelvin-Wert der Farbwiedergabe zu. Bei Sonnenauf- und -untergang liegt die Farbtemperatur bei etwa 2.500°K. Zur Mittagszeit liegt die Farbtemperatur mit dem Blitz einer Kamera auf und liegt bei etwa 5.500°K. [8, S. 17] Je höher die Farbtemperatur, desto kühler wirkt das Licht. Es sind mehr UV- und Blauanteile in der spektralen Zusammensetzung vorhanden.

Das Normlicht D65 wird von einer künstlichen Lichtquelle abgegeben und ein Licht ohne Farbstich. D65 steht für seine Farbtemperatur bei 6.500°K. Seine Strahlungsverteilung entspricht dem Tageslicht zur Mittagszeit bei bedecktem Himmel. Das Licht wird als Norm zum Vergleich von Farbabweichungen künstlicher Lichtquellen verwendet. [6, S. 37f.]

### Bedeutung der Leuchtmittelauswahl

Die Wahl der Lampen und Leuchten für den Innenraum ist von folgenden Gütekriterien abhängig:

- Absolute Beleuchtungsstärke
- Helligkeitsverlauf
- Ausgewogenheit der Leuchtdichteverhältnisse
- Strahlungscharakteristik
- Wirkungsgrad
- Lichtfarbe und Spektrum
- Thermisches Verhalten

- Betriebsmittel und Vorschaltgeräte
- Wirtschaftlichkeit durch Investitionskosten und Betriebskosten
- Blendungsbewertung [5, S. 211]

Es werden im Laufe der vorliegenden Arbeit die aufgezählten Aspekte in die Erstellung der Anwendung miteinbezogen.

Bei niedriger Farbtemperatur, wie von Glühlampen und Halogenleuchtstofflampenlicht, 2.800K bis 3.000K werden bereits Beleuchtungsstärken von 50-100 Lux als angenehm empfunden. Zu hohe Helligkeiten tendieren bei warmem Licht zu Unbehaglichkeit. Dies wird durch den Kruithoff'schen Behaglichkeitsbereich auf Abbildung 6 grafisch dargestellt. Ein niedriges Beleuchtungsniveau passt sich nach dem Farbton einer warmweißen Lichtquelle, wie Glühlampen oder Leuchtstoff-Lampen warm-weiß, besser an. Er wirkt behaglicher als tageslichtweiße Lichtquellen mit sehr hoher Farbtemperatur. Beleuchtungen durch Leuchtstofflampen mit einer Farbtemperatur von 4.000K bis 5.000K und einer hell-weißen bis tageslichtweißen Lichtfarbe müssen mindestens Beleuchtungsstärken von 300-400 Lux aufweisen, um als angenehm empfunden zu werden.

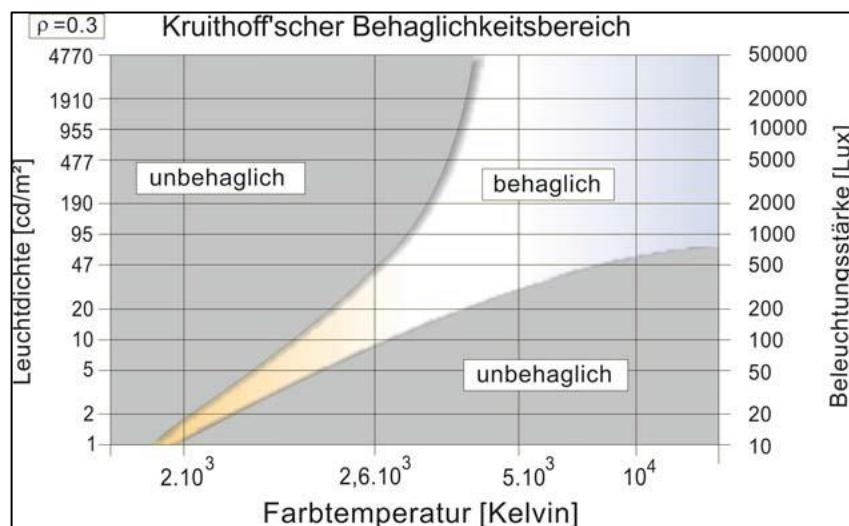


Abbildung 6: Kruithoff'scher Behaglichkeitsbereich nach Farbtemperatur, Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke [5, S. 46]

Mit zunehmendem Beleuchtungsniveau steigt die Leuchtdichte im Gesichtsfeld und die Farbtemperatur des Lichtes. Solche Kombinationen sind physiologisch harmonischer. Tageslicht weist sehr hohe Helligkeiten im Bereich von 5.000 bis 30.000 Lux bei bedecktem Himmel und bis zu 100.000 Lux bei klarem Himmel auf. Das weiße

Licht der Tageslichtlampen steht mit 4.000 bis 10.000 Lux sehr vielen Kunstlampen gegenüber, da der Mensch bei hohen Farbtemperaturen (Tageslicht) an viel Licht gewöhnt ist und biologisch daran angepasst ist.

Über die Farbwiedergabe kann bei einem weitestgehend kontinuierlichen Spektrum wie dem Tageslicht oft nicht mehr auf die eigentliche Lichtfarbe der Lichtquelle geschlossen werden. Versuche mit dem warm-rötlichen Licht einer Glühlampe wird beispielsweise als kalt empfunden, wenn es blendfrei auf eine graue Fläche strahlt und der Beobachter die Glühbirne nicht sieht. Umkehrt kann eine Leuchtstofflampe mit 5.000 Lux, einer hohen Farbtemperatur und einem tageslichtweißen Licht, die unter denselben Voraussetzungen eine gelbe Wand anstrahlt, als warm empfunden werden. Dies wird durch eine gerichtete Messung auf die Materialfarbe quantitativ und objektiv belegt. [5, S. 47]

Die Planung einer Beleuchtungsanlage muss aus den genannten Gründen auf die Interaktion der Lichtquellen mit den bestrahlten Oberflächen achten. Die Strahlungscharakteristiken der Lampen wird über die Struktur, Farben und Reflexionseigenschaften der bestrahlten Objekte beeinflusst, bevor die Strahlen das menschliche Auge erreichen. Nur durch das integrative Ineinandewirken der Eigenschaften von Lichtquellen und Materialien entsteht ein optisches Gesamtbild des Raumes, das als Milieu empfunden wird. [5, S. 47f.]

Die Aufgabe eines Lichtplaners ist sein großes Wissen und seine Erfahrung in die tätigkeitsspezifische und ökonomische Optimierung einer Beleuchtungsanlage einzubringen. Es existieren keine verbindlichen Regeln, da jeder Raum einzeln abzustimmen ist. [5, S. 48]

### **Charakteristik der Leuchten**

Während die Lichtstärke  $I$  das Verhältnis des Lichtstroms zum Strahlungswinkel der Lampe definiert, gibt die Lichtstärkeverteilungskurve [LVK] die räumliche Verteilung der Lichtstärke einer Lampe oder Leuchte an. Sie bezieht sich meistens auf einen Lampenlichtstrom von 1.000 lm. [5, S. 18, S. 22, S. 228]

Die Lichtstärke ist eine richtungsabhängige Größe, die in einer grafischen zweidimensionalen [2D] Darstellung in der jeweiligen Richtung im Raum als Länge aufgetragen wird. Die Lichtstärkeverteilung der Lichtquelle wird in Kugelkoordinaten

eingetragen. In der Praxis wird die räumliche Lichtstärkeverteilung als Strahlungscharakteristik einer Leuchte oder Lampe als LVK dargestellt.

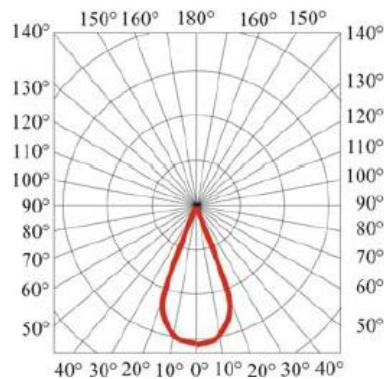


Abbildung 7: Lichtstärkeverteilungskurve einer tief-/engstrahlenden Lichtquelle [5, S. 22]

Die auf der LVK in Abbildung 7 eingeschlossene Fläche ist kein Maß für den ausgestrahlten Lichtstrom, sondern gibt an, in welche Richtung in Grad abgestrahlt wird. Der Lichtstromanteil beschreibt die Lichtstärke, den Lichtstrom pro Strahlungswinkel. Die Abbildung stellt eine Lichtquelle dar, die tief- und engstrahlend nach unten zum Boden gerichtet strahlt.

Abbildung 8 zeigt die LVK einer tief- und hochstrahlenden Lichtquelle. Sie hat direkte und indirekte Lichtanteile. Die direkten Lichtanteile werden über die untere Kurve dargestellt, nach unten gestrahlt, breiter strahlend als die Lichtquelle in Abbildung 7. Die indirekten Lichtanteile werden über die obere Kurve dargestellt, nach oben gestrahlt. Diese werden von der Decke oder einer Reflexionsfolie in der Leuchte reflektiert und werden mit einer schwächeren Lichtstärke in den Raum reflektiert.

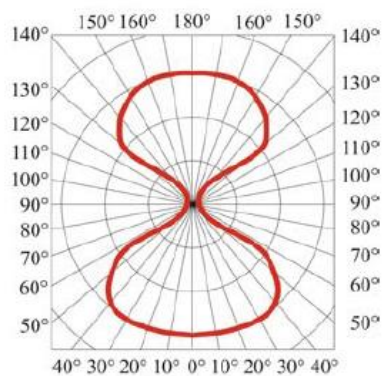


Abbildung 8: Lichtstärkeverteilungskurve einer tief-/hochstrahlenden Lichtquelle [5, S. 22]

### 2.3. Wohnraum und Lichteinfall

Licht bildet in einem Raum die vierte Dimension. Nur durch Licht entfaltet sich die Dreidimensionalität [3D].

Da jede Lichtgestaltung eigene Maßstäbe für die Farbgestaltung, die Sättigung und Helligkeit der Farbnuancen, die Hell-Dunkel-Verteilung im Raum und die Materialität der Farbe setzt, ist es wichtig, mit einer Raumstimmung eine wohnliche Aufwertung zu erreichen. [6, S. 99] Der visuelle Raum wird durch die ihn begrenzenden Oberflächen bestimmbar und wahrnehmbar. [6, S. 99, 5, S. 163]

#### Lichtgestaltung

Licht bewirkt zwei verschiedene Auswirkungen auf die Raumstimmung.

Mit der leichten, hellen Raum- und Tagesstimmung werden Denken und Erkennen assoziiert. Die Beleuchtung ist allgemein, nicht gerichtet und diffus angeordnet. Es entsteht nur sehr wenig Schatten, wie Abbildung 9 schematisch darstellt. Atmosphärisch wirkt die resultierende Farbigkeit als Eigenschaft, den Raum zu erleben.

Dem entgegen steht die gedämpfte, schwere Raum- und Nachtstimmung, die schematisch in Abbildung 10 dargestellt ist. Hierbei wird ein träumerisches Empfinden assoziiert. Die Beleuchtung muss diskret, punktuell und mit einer ausgeprägten Schattenbildung erfolgen. Durch seine Farbigkeit werden konkrete Eigenschaften von Objekten im Raum erlebt. [6, S. 99]



Abbildung 9: Helle Raumstimmung durch eine diffuse Grundbeleuchtung [9]





Abbildung 10: Gedämpfte Raumstimmung durch eine punktuelle Beleuchtung [9]

### Wohnraum

In der Lichtgestaltung muss zwischen den einzelnen Wohnräumen unterschieden werden. Die Beleuchtung eines Raumes ist von seinem Grundriss und seiner Nutzung abhängig. Eine ansprechende und ausreichende Beleuchtung sorgt für ein gutes Allgemeinbefinden und die vitale Gesundheit der Bewohner. Gute Beleuchtung hat die folgenden drei Funktionen: Die Grundbeleuchtung sorgt für eine Orientierung, eine Platzbeleuchtung unterstützt die Augen bei schwierigen Sehaufgaben, und schafft Atmosphäre im Raum.

Es werden drei Komponenten des Lichtes im Wohnraum unterschieden: Raum-, Zonen- und Stimmungslicht.

Raumlicht sorgt für eine gleichmäßige Ausleuchtung und schafft damit eine behagliche Atmosphäre. Es soll möglichst dimmbar sein und das Akzentlicht mit direktem, weichen Licht unterstützen. Durch die Vermeidung von starken Kontrasten wird dem Ermüden der Augen vorgebeugt. Breit und diffus strahlende Wand-, Decken- und Stehleuchten sind hierfür geeignet. Abbildung 9 ist ein Beispiel für das Raumlicht.

Zur Betrachtung bestimmter Tätigkeiten, wie Essen, Lesen oder Arbeiten soll Zonenlicht verwendet werden. Dieses akzentuierende Licht wird durch Stehleuchten, Pendelleuchten und Tischleuchten erzeugt, es wird an die Wand oder nach unten gerichtet abgestrahlt. Diese Lichtkomponente soll sich vom Raumlicht abheben, um eine Akzentuierung des Raumes zu schaffen.

Um eine außergewöhnliche Atmosphäre im Wohnraum zu schaffen, soll auf Stimmungslicht gesetzt werden. Dieses entfaltet seine Wirkung besonders am Abend. Es steht für Gemütlichkeit und Faszination. [6, S. 100f.]

Häufig werden im Wohnraum Mischformen verwendet. Akzentlichter bringen die Wandgestaltung zur Geltung, erkennbare Raumbegrenzungsflächen und Diffusionskomponenten formen Räume und Oberflächen durch inszeniertes Licht und zusätzlich Schlagschatten und direkte Sonne verwendet. [6, S. 99ff.]

Nachfolgend sollen die unterschiedlichen Anforderungen an den Raum und die Lichttechnik zeigen. Das erfolgt anhand der Wohnräume Arbeitszimmer, Bad und Küche.

Das Arbeitszimmer im Haus soll eine Arbeitsplatzbeleuchtung aufweisen, die eine Blendung des Arbeitenden und Schatten im Arbeitsbereich vermeidet. Zur Arbeit am Bildschirm müssen die beiden Norm-Reihen DIN 5035 (Beleuchtung mit künstlichem Licht) und DIN EN 12464-1 (Beleuchtung von Arbeitsstätten) herangezogen werden. Es wird hierbei eine Beleuchtungsstärke von 500 Lux und ein Farbwiedergabeindex von Ra 80-100 empfohlen. [6, S. 101]

Im Bad liegt die Mindestanforderung an gutes Licht durch die Wahl der Leuchtquellen in der Nähe des Spiegels. Ein harmonisches Licht- und Schattenspiel erzeugt durch die Betonung von Konturen und Oberflächen ein wohnliches Ambiente. Da das Bad ein Feuchtraum ist, müssen die Leuchten entsprechend der Norm DIN VDE 0100 Teil 701 (Anforderungen für Betriebsstätten, Räume und Anlagen besonderer Art) bestimmte Schutzmaßnahmen aufweisen. Nach DIN EN 12464-1 liegt die empfohlene Beleuchtungsstärke bei mindestens 200 Lux. Je heller die Flächen im Bad sind, desto mehr Licht wird von ihnen reflektiert und zusätzlich als indirektes Licht in den Raum zurückgegeben. Die verwendete Lampe muss mindestens ein Farbwiedergabeindex von Ra 80 aufweisen. Warm-weiße Lampen erzeugen eine behagliche Lichtstimmung. [6, S. 101f.]

Das Licht in der Küche ist von Grundriss und Ausrichtung der Arbeitsflächen abhängig. Durch die Vermeidung von Blendung ist die Basis einer guten Arbeitsbedingung sichergestellt. Die Beleuchtungsstärke auf Arbeitsflächen soll mindestens 500 Lux betragen. Die Lichtfarbe warm-weiß trägt zu einer wohnlichen Atmosphäre bei.

Brandvorschriften und Zulassungen der Leuchten müssen bei Unterbauanordnungen an Oberschränken beachtet werden. [6, S. 102]

Mit einer entsprechenden Anordnung des Inventars im Raum und der Fenster- und Türflächen kann der Einfall von Tageslicht im gesamten Gebäude bis zu 12% der Beleuchtungskosten einsparen. [10]

### **Farbgestaltung**

Um die Wirkung einer Farbe im Innenraum zu erschließen, muss die psychologische Wirkung einer Farbe erkannt werden. Sie soll eine positive Wirkung auf den Beobachter haben. Es gibt hierzu keine Vorschrift, denn jede Farbe löst einen bestimmten Reiz aus, auf den individuell reagiert wird. [6, S. 96]

Das Raumempfinden erfolgt ebenfalls individuell durch den Betrachter. Durch die eigene Körpergröße und Bewegung im Raum wird eine Einschätzung der räumlichen Dimensionen vorgenommen. Hierzu wirken Farbigkeit, Formenvielfalt, Einrichtungen und die Belichtung oder Beleuchtung auf das subjektive Empfinden ein. [6, S. 93]

Die Wirkung des Raumes wird durch seine Funktion, seine Architektur, sowie durch seine ästhetischen und Komfort-Eigenschaften bestimmt. Die soziale Wirkung beschreibt die seelischen und körperlichen Einflüsse auf die Farbe. So sollen die Farben Gelb, Orange und Weiß exemplarisch nachfolgend mit ihren Einflüssen auf die Psyche des Menschen dargestellt werden.

Gelb beschreibt, wie zuvor dargestellt, Licht und Heiterkeit, wirkt öffnend, beruhigend und strahlend. Im Innenraum steht sie als leuchtende Farbe für Wärme und Energie, Kreativität und Aktivität. Sie wirkt gesprächsfördernd und vergrößert kleine und dunkle Räume.

Orange beschreibt Heiterkeit, Wärme und Lebensfreude. Die Farbe wirkt ebenfalls gesprächsfördernd und trägt zu einem angenehmen Raumklima bei.

Weiß steht für Reinheit und Transparenz, Helligkeit und Einfachheit. Die Farbe ist sehr kombinationsfreundlich mit weiteren Farben, jedoch wirkt sie kontaktarm und freudlos. [6, S. 93ff., 9, S. 15]

Grundsätzlich sind Kombinationen verschiedener Farben für eine Raumwirkung immer möglich. Neben den Grundfarben können Akzente gesetzt werden, idealerweise wenn diese Farben sich im Farbkreis gegenüber stehen. Warme Farben machen den Raum

behaglich. Durch grüne und sandfarbene Töne kann eine frische Stimmung erzeugt werden, dem entgegen wird durch Grau und Beige Eleganz vermittelt. Bei der Gestaltung des Raumes muss seine Funktion und seine Orientierung an der Himmelsrichtung beachtet werden. Der Wohnbereich soll zum Wohlfühlen anregen, Kinderzimmer sollen anregend eingerichtet und bei der Küche muss unterschieden werden, ob der Raum nur zum Kochen verwendet wird oder auch zum Essen und Entspannen. [6, S. 97f.]

### Materialien und Oberflächen

Die Wahl und Komposition von Farben und Materialien im Raum sollen hinsichtlich ihrer lichttechnischen und optischen Wirkung erfolgen. Speziell bei durchsichtigen und durchscheinenden Materialien treten die drei folgenden Phänomene in unterschiedlichen Verhältnissen auf: Absorption, Reflexion und Transmission von Licht. Um eine bestimmte Helligkeit zu erzielen, muss eine relativ dunkle Fläche mit geringem Reflexionsgrad  $\rho$  mit wesentlich höheren Beleuchtungsstärken angestrahlt werden, als eine helle Fläche mit Reflexionsgrad. Der Reflexionsgrad wird in Prozent oder dezimaler Zahl angegeben.

Die nachfolgende Abbildung 11 veranschaulicht die Bedeutung von Energiekosten mit künstlichem Licht. Bei gleicher Beleuchtungsstärke  $E$  wird ein wesentlich höherer Anteil des Lichtes wieder reflektiert und steht dem Raum zu Verfügung. Bei gleicher Leuchtdichte  $L$  im Raum müssen wesentlich mehr Lichtquellen für die selbe resultierende Leuchtdichte aufgewendet werden. Das wirkt sich enorm in den Kosten für die Stromversorgung aus. [5, S. 145]

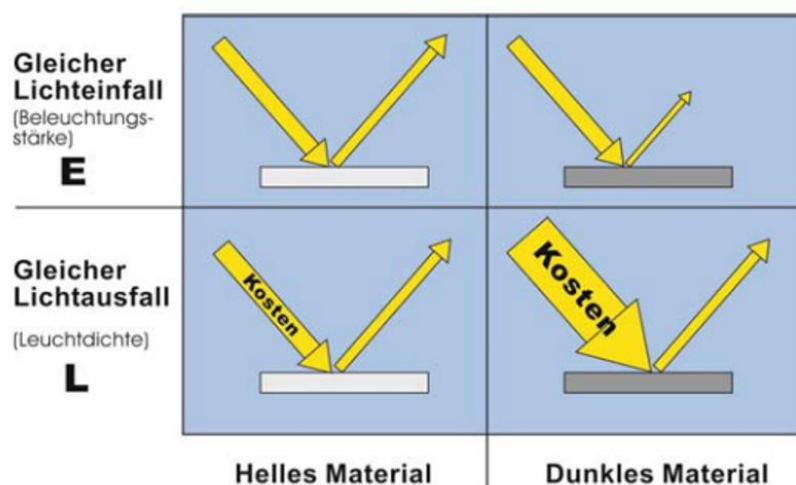


Abbildung 11: Vergleich von Lichteinfall, Material und resultierenden Kosten [5, S. 145]

Bei der Wahl von Farben, Materialien und Lichtquellen ist eine Aufteilung von gerichteter und diffuser Reflexion ein wichtiger Faktor für die Wahrnehmung. Auch die Effizienz lichttechnischer Systeme ist für den Einsatz von künstlichem Licht und Tageslicht entscheidend. Materialoberflächen können sehr unterschiedliche Reflexionen aufweisen. Im Anhang befindet sich Abbildung 36, sie zeigt die verschiedenen Reflexionsgrade von Materialien. Leuchtenbaustoffe besitzen teilweise mittlere bis sehr hohe Reflexionseigenschaften, Baukonstruktions-Materialien und Naturstoffe sehr geringe. Farbanstriche befinden sich nach Wahl der Farbe sehr variabel zwischen Reflexionswerten von 0,90 und 0,10. [5, S. 148]

Die Reflexionseigenschaft eines Materials gibt dem Betrachter darüber Aufschluss, wie seine Eigenschaften sind. Eine diffuse Oberfläche legt lichttechnisch und physikalisch fest, dass das Objekt mit der Oberfläche eine Festigkeit besitzt. Durch die zusätzliche Erfahrung weiß die Person, dass diffuse Oberflächen Sicherheit und Stabilität vermitteln. Diffuse Deckenflächen vermitteln hierbei eindeutige Begrenzungen des Raumes. Je heller die Farbe, desto höher ist sein Reflexionsgrad und desto höher wirkt der Raum. [5, S. 170, S. 193]

Die Oberfläche des Materials hat einen großen Einfluss auf die optische Wahrnehmung. Die Strahlung von Licht trifft wie bereits beschrieben mit einer bestimmten Beleuchtungsstärke an Oberflächen auf. Diese modulieren die Strahlen und treffen als reflektiertes Licht als Leuchtdichte  $L$  auf die Augen des Betrachters.

$$L = \frac{E * \rho}{\pi}$$

Formel 1: Berechnung der Leuchtdichte [2, S. 157]

Formel 1 beschreibt die Leuchtdichte  $L$  in  $\text{cd/m}^2$ . Sie wird als die Division des Produktes der Beleuchtungsstärke  $E$  in Lux mit dem Reflexionsgrad  $\rho$ , mit  $\pi$  definiert.

### **Ökologische Optik**

Die ökologische Optik beschreibt das Definieren eines visuellen Raumes, der durch seine begrenzten Oberflächen wahrnehmbar wird. Das Licht wird hierbei hauptsächlich als Informationsquelle für die visuelle Wahrnehmung betrachtet. [5, S. 163]

Licht wurde 1982 von James J. Gibson in drei Teilbereichen definiert:

- Als physikalische Energie, Licht als Strahlung

- Als Reiz zum Sehen, Licht als Empfindung
- Als Parameter der Umwelt, Licht als Information [5, S. 164]

### **Wahrnehmung**

Die Wahrnehmung über die Reizung der Augen des Betrachters ist eine hinreichende Bedingung, die zusätzlich von der Substanz und der Oberfläche des Objektes abhängig ist. Substanz beschreibt die innere Struktur des Materials, die Oberfläche beschreibt die charakteristische Textur und Form eines Objektes. Nach Gibson, ist die Oberfläche wichtiger als die Substanz des Objektes, da hier Licht reflektiert oder absorbiert wird. [5, S. 156]

Das charakteristische Raummilieu entsteht demnach durch die Eigenschaft und die lichtphysikalische Beschaffenheit der Materialoberfläche. So können helle oder dunkle Wände, stark reflektierende oder matte Oberflächen das Strahlungslicht in das milieubestimmende Raumlicht modulieren. Es ist die Summe aller singulären Erscheinungsfelder im Gesichtsfeld, die über die genannte Komposition aller Materialoberflächen zu einem ganzheitlichen Raumeindruck führt. [5, S. 191]

Durch die Verwendung heller Materialien kann die Helligkeit im Raum erhöht und Energiekosten niedrig gehalten werden.

Die beiden nachfolgenden Bilder zeigen anschaulich und eindrucksvoll in einer Modellstudie am Frankfurter Flughafen, wie sich die verwendeten Materialien auf das Raummilieu, die Beleuchtung und daraus resultierend in den Energiekosten des Primärlichts auswirkt.

Abbildung 12 zeigt die Bestuhlung im Raum mit schwarzen Stühlen. Der Raum wirkt düster. Bei gleichbleibender Bestrahlungsstärke wurden in Abbildung 13, als starken Kontrast zum vorherigen Test, weiße Stühle eingesetzt. Das Ergebnis führt zu einem einladender wirkenden Raummilieu, das ohne zusätzlichen Einsatz von Primärlicht den Raum deutlich erhellt. [5, S. 166f.]



Abbildung 12: Dunkle Bestuhlung gibt wenig indirektes Licht ab [5, S. 167]



Abbildung 13: Helle Bestuhlung gibt viel indirektes Licht ab [5, S. 167]

Eine geplante räumliche Anordnung erleichtert zusätzlich die Reduktion von künstlicher Beleuchtung, indem beispielsweise Arbeitsplätze in die Nähe von Fenstern und Zirkulationszonen mehr in den Innenbereich des Gebäudes oder Raumes verlegt werden. Bei einer solchen Kombination ist darauf zu achten, Zwielicht zu vermeiden, indem die Lichtfarbe des künstlichen Lichtes möglichst neutralweiß ist. [1, S. 155f.]

Erst durch Zusammenwirken von Licht und Farbe, von Materialien und Formen wird das Wohlbefinden des Menschen beeinflusst und kann, sinnvoll eingesetzt, auch zur Regeneration, Entspannung und Erholung beitragen. [6, S. 102]

### **Gestaltung**

Arbeitsplätze müssen ergonomisch ausgerichtet sein. Arbeit ist auf eine aktive, bewusste und zielgerichtete Informationsverarbeitung angewiesen. Diese Informationsquelle stellt ein strukturiertes Reizangebot für die Infeld-Umfeld-Hierarchie des Arbeitsplatzes dar. Das Infeld beschreibt das fokussierte Sichtfeld, der Sichtbereich, in dem sich die eigentliche Sehaufgabe befindet. Das Umfeld beschreibt den direkt dazu angrenzenden äußeren Bereich. In diesem soll darauf geachtet werden, einen möglichst geringen Einfluss auf das Infeld zu haben. Dies kann beispielsweise durch auffällige oder zu helle Kleidung geschehen. [5, S. 187]

Eine effiziente Lichtplanung soll auf die Sehaufgabe mit dem vorhandenen Licht abgestimmt sein. Dadurch wird der mentalen Belastung durch störungsfreie Beleuchtung entgegengewirkt. Durch den Ausgleich der Verhältnissen von Leuchtdichten im Raum wirkt diese strukturierte Beleuchtung der visuellen Monotonie und der frühzeitigen Ermüdung der Augen entgegen. Das führt zu Leistungsmotivation und –fähigkeit. [5, S. 186]

Das Theoretische Leuchtdichte-Modell beschreibt die Abstimmung der Helligkeitsproportionen zwischen Infeldern und Umfeldern. Damit sind belastungsfreie Wahrnehmungsbedingungen gewährleistet. [5, S. 188] Zur Bestimmung der Leuchtdichte im Infeld werden meistens Nennbeleuchtungsstärken für Sehleistungskriterien aus den Normen DIN 3053 Teil 1 und 2 herangezogen. Da die Länder sehr große Unterschiede in diesen Angaben der Normen haben, sind diese Vorgaben nur als Richtwerte zu sehen, konkrete und individuelle Lösungen sind nicht miteinbezogen.

### **Wahl der Leuchtmittel**

Tabelle 1 soll einen Überblick über typische Lampen im privaten Wohnraum geben. Die dabei angegebenen Werte sind nur Richtwerte und können nach Material und Herstellung variieren.

Tabelle 1: Übersicht Leuchtmittel und ihre Charakteristiken [nach 1, S. 84ff., 2, S. 51ff.]



Leuchtmittel	Licht- ausbeute	Farb- wiedergabe Ra	Farb- temperatur	Mittlere Lebensdauer
Glühlampe	10-12 lm/W	100	2.800°K	1.000 h
Halogenglühlampe	12-16 lm/W	100	2.800- 3.000°K	2.000 h
(Kompakt-)Leuchtstoff- lampen	50-100 lm/W	70-90	2.700- 6.500°K	8.000- 15.000 h
Energiesparlampen	45-66 lm/W	80	2.700°K	10.000- 15.000 h
Halogen- Metall dampflampen	67-120 lm/W	60-90	3.000- 6.000°K	8.000 h
Induktionslampen	65-80 lm/W	80	2.700- 4.000°K	60.000 h
LED	1-90 lm/W	80	2.700- 8.000°K	50.000- 100.000 h

Die Wahl der Leuchtmittel bestimmt das Raumklima. Am Arbeitsplatz des Wohnbereichs soll eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Farbspektrums vorhanden sein, an Orten der Entspannung soll das Licht eine wärmere Farbtemperatur aufweisen. Abbildung 14 zeigt eine die ausgeglichene Verteilung des Farbspektrums von Tageslicht, die für den Menschen ideal ist. Dem angeglichen soll die Beleuchtung über künstliche Lichtquellen im Innenraum erfolgen, um Gesundheit und Vitalität zu erwirken. [6, S. 112ff.]

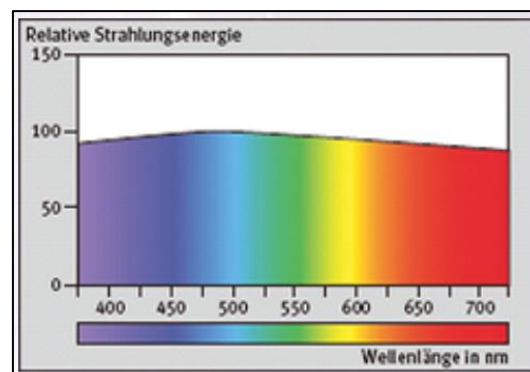


Abbildung 14: Farbspektrale Verteilung von Tageslicht [10]

Den Lampen werden durch die aufgezeigten Charakteristiken verschiedene Einsatzbereiche zugesprochen, die eine angenehme Auswirkung auf die Sehleistung und das Wahrnehmen haben. Auch diese Angaben sind ausschließlich Richtwerte.

LED-Lampen werden im Wohnbereich nur im Wohnzimmer empfohlen. Glühlampen können überall eingesetzt werden, außer in Kellerräumen und Garagen. Halogenglühlampen eignen sich besonders gut für den Wohnbereich, in Bereichen die gutes Sehen erfordern wie Bad oder Küche können sie als Zusatzbeleuchtung eingesetzt werden. Mit der Beachtung ihrer Farbwiedergabe können Leuchtstofflampen im gesamten Wohnbereich eingesetzt werden. Die Halogen-Metalllampen eignen sich keineswegs für den Einsatz im Wohnbereich. Sie bieten sich im Außenbereich zur Straßen- und in Gärten zur Wegbeleuchtung an. Energiesparlampen werden in der Industrie und im privaten Wohnraum nur als Ersatz für Glühlampen empfohlen. Grund hierfür ist ihre niedrige Farbtemperatur, die das Raummilieu abwertet. [10]

Die Farbtemperatur von künstlichen Lichtquellen kann nicht mit der konstanten Farbverteilung von Tageslicht gleich gestellt werden. Zwei Beispiele dazu stellen Abbildung 15 mit dem Farbspektrum einer Glühlampe der Farbtemperatur 2.300°K und Abbildung 16 mit dem Farbspektrum einer Leuchtstofflampe der Farbtemperatur 6.500°K dar.

Aus Abbildung 15 wird ersichtlich, dass die Glühlampe ein rötliches Licht emittiert. Die Lichtquelle in Abbildung 16 weist drei dominante Farben auf. Es wird eine eher blaue Lichtfarbe abstrahlen. [5, S. 41]

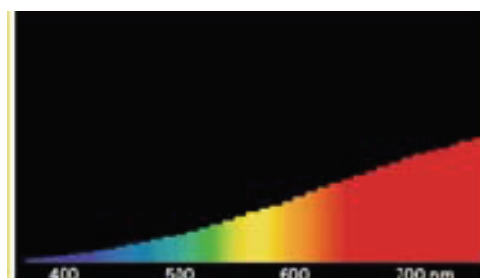


Abbildung 15: Lichtquelle mit niedriger Farbtemperatur [5, S. 41]

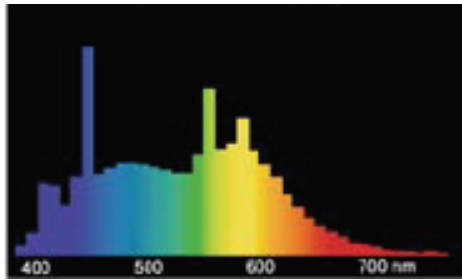


Abbildung 16: Lichtquelle mit hoher Farbtemperatur [5, S. 41]

### Lichtverschmutzung

Durch den Einsatz von künstlicher Beleuchtung kommt es zu Lichtemissionen in der Atmosphäre. Das lange unauffällige Phänomen beginnt mit Licht, das unnötigerweise in die Dunkelheit vordringt. Das stört nicht nur die Umwelt und den Naturhaushalt, sondern ist auch eine unnötige Emission von Energie.

Immer mehr Menschen fühlen sich durch künstliches Licht gestört. Zugvögel verlieren beispielsweise die Orientierung durch Licht-Laser und hell erleuchtete Gebäude in der Nacht. Beleuchtete Straßen und Gebäude sind für nachtaktive Insekten, Reptilien und Amphibien gefährlich. Licht bedeutet für sie Nahrung. Dadurch begeben sich diese Tiere oft selbst in Gefahr. Das Wachstum von Pflanzen kann sich durch das Wegfallen oder Verringern von Nachtruhen verschlechtern, für Menschen wird der Biorhythmus gestört und kann zu Krankheiten führen.



Abbildung 17: Europa in der Nacht [10]

Die Lichtverschmutzung nimmt jährlich etwa sechs Prozent zu. Abbildung 17 zeigt die künstliche Beleuchtung von Europa in der Nacht aus dem Weltall betrachtet.

Internationale Organisationen wie die International Dark Sky Assoc. USA und Dark Skypes Deutschland setzen sich für die Reduktion der Lichtemissionen ein. Ansätze sind die Reduktion von Beleuchtungsstärken, das Abschalten von Schaufenster-Beleuchtungen bei Nacht und der Einsatz eines Beleuchtungsplans für die Stadt. [1, S. 218ff., 2, S. 128ff., 10]

### **2.4. Europäische, Deutsche Standards DIN EN**

Für die Entwicklung einer Anwendung zur Beleuchtung im privaten Innenraum müssen die nachfolgenden Normen herangezogen werden. Diese geben Richtwerte an und entsprechen keiner verpflichtenden Angabe.

DIN 5035-1 Beleuchtung mit künstlichem Licht, Teil 1: Begriffe und allgemeine Anforderungen, seit 2002 durch DIN EN 12665 ersetzt

DIN 5035-2 Beleuchtung mit künstlichem Licht, Teil 2: Richtwerte für Arbeitsstätten in Innenräumen und im Freien, seit 2003 durch DIN EN 12646-1 ersetzt

DIN 5035-3 Beleuchtung mit künstlichem Licht, Teil 3: Beleuchtung im Gesundheitswesen

DIN 5035-7 Beleuchtung mit künstlichen Licht, Teil 7: Beleuchtung von Räumen mit Bildschirmarbeitsplätzen.

DIN EN 12646-1 Licht und Beleuchtung, Beleuchtung von Arbeitsstätten, Teil 1: Arbeitsstätten im Innenraum

DIN EN 12665 Licht und Beleuchtung, Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung [6, S. 205ff.]

### **2.5. KNX-Standard und vergleichbare Standards**

Eine Gebäudesteuerung kann zur Erhöhung des Wohnkomforts dienen und leistet damit einen Beitrag zur Einsparung von Energiekosten. Dies kann über verschiedene Maßnahmen in der Lichtsteuerung realisiert werden. So ist es sinnvoll, die Beleuchtung im Raum erst dann einzuschalten, wenn sich jemand im Raum befindet. Außenjalousien sollen im Winter automatisch die Wärme der Sonnenstrahlen in die Wohnräume lassen, im Sommer sollen sie das Gebäude kühl halten. Über Smart

Metering wird herausgefunden, wo und wann Energie verbraucht oder verschwendet wird. [4, S. 56ff.]

### **Grundlagen zur Gebäudeautomatisierung**

Heute muss ein Gebäude Komfort, Flexibilität, eine intelligente Verknüpfung von Systemen, sowie eine Minimierung von Energie- und Betriebskosten bieten. [11, S. 8]

Für den Einsatz von einer Beleuchtungssteuerung muss ein System vorhanden sein, das befehlsgebende und befehlsempfangende Geräte, also Sensoren und Aktoren besitzt. Die Wahl eines solchen Systems basiert auf den folgenden Kriterien:

- Flexibilität
- Zentrale oder dezentrale Steuerung
- Verkabelungsaufwand
- Funktionalität und Funktionsweisen
- Herstellerneutrales oder herstellerabhängiges System

Mit einem herstellerneutralen System werden weltweit offene Standards verwendet. Dabei liegt die Auswahl verschiedener Gebäudeautomatisierungen für Zweck- und Wohnbauten vor. Zunächst muss ein Installationsbus gewählt werden, auf dem das Automatisierungssystem läuft. Der Bus bildet die Schnittstelle zur Übertragung über das Medium. [11, S. 8f.]

Nachfolgend sollen ausgewählte Installationsbusse vorgestellt werden, die unterschiedliche Übertragungsmedien verwenden.

### **Installationsbus**

Das Home Electronic System [HES] wurde speziell für das private Wohnhaus entwickelt. Es verläuft über eine separate Twisted-Pair-Verkabelung. HES bietet eine vollständige Automatisierung durch Heizungs-, Beleuchtungs-, Jalousiesteuerungen und vielen weiteren Überwachungsfunktionen.

Powerline überträgt die Kommunikation mit seinen Endgeräten vollständig über die vorhandene 230 Volt [V] Installationsleitung. Kommt besonders bei einer nachträglichen Integration, aber auch bei Neuinstallation zum Einsatz.

EIB-Funk [Europäischer Installationsbus] stellt die Übertragung über Funk dar. Hierbei kommunizieren Sensoren und Aktoren ohne Verdrahtung miteinander. Busteilnehmer

besitzen eine Batterieversorgung. Besonders bei Renovierungen, der Erweiterung bestehender Systeme und bei Neuinstallationen, häufig bei schwierigen Einbausituationen ist der EIB-Funk favorisiert. [11, S. 9]

Der EIB-Bus wurde ursprünglich für Zweckbauten entwickelt. Heute ist er in vielen Anwendungen enthalten, wie in Schaltern, Lichtsteuerungen und Jalousiesteuerungen. Die Dachorganisation des offenen Standards ist EIBA mit Sitz in Brüssel. Verfügbare Geräte und Software-Werkzeuge zur Programmierung sind für die Zertifizierung von Anwendungen nach dem EIB-Standard wichtig. [11, S. 7] Der Bus hat eine hierarchische Topologie. Dabei können klein geplante Anlagen in kleinen Schritten ausgebaut und veränderten Anforderungen angepasst werden. Störungen der Anlage betreffen nur kleinere Bereiche, nicht das gesamte System. Durch die dezentrale Steuerung, bei der jeder Sensor und Aktor einen Mikroprozessor enthält, kann die Intelligenz der Anlage mit der Anzahl der Komponenten gesteigert werden. [11, S. 11f.]

Der Local Operating Network [LON]-Bus stellt ein universelles Werkzeug der Automatisierung dar. Es wird seltener im privaten Wohnbereich als vielmehr in Zweckbauten zur Gebäudeautomation, Maschinensteuerung und in der Telekommunikation eingesetzt. Die grundlegende Technologie ist die LON-Works-Technologie, von der Firma Echelon Corporation entwickelt. Sie wird von Firmen wie Motorola und Toshiba in Lizenz hergestellt und ist frei verfügbar. Der Bus hat eine freie Topologie und besitzt ebenfalls eine dezentrale Steuerung. [11, S. 19f.] Mithilfe einer Neuron-ID können die Netzwerkkomponenten entweder manuell über Barcodes oder mit einer Service-Pin über die Konfigurationssoftware identifiziert werden. [11, S. 22]

Das Homeputer-Netzwerk zeichnet sich durch seine einfache Bedienbarkeit und geringen Kosten aus. Durch eine zentrale Steuereinheit sollen unterschiedliche Komponenten im Haushalt verknüpft werden. Sie verwenden als Übertragungsmedium das 230V Wechselstromnetz.

Der Local Control Netzwerk [LCN]-Bus arbeitet wie EIB und LON dezentral. Die Übertragung erfolgt über eine zusätzliche Ader der Stromversorgung. Dadurch können klassische Verbraucher wie ein Lichtschalter auf einfache Weise durch ein LCD-Endgerät wie einen LCD-Lichtschalter ausgetauscht werden. Damit ist es möglich bis zu 60 Lichtszenen pro Ausgang zu schalten und mehrere zeitabhängige Szenen zu bedienen. [4, S. 101ff., 11, S. 33ff.]

Der Konnex [KNX]-Bus ist auf Anwendungen in der Gebäudeautomation spezialisiert und ermöglicht eine Vielzahl an Funktionalitäten. Die Übertragung erfolgt über verschiedene Medien und Verfahren:

- KNX TP [Twisted Pair], meist über EIB-Leitungen
- KNX PL [Powerline], über die 230-V Stromversorgung
- KNX RF [Richtfunk], Funkübertragung über die Luft
- KNX IP [Internet Protocol], Übertragung über Ethernet
- KNX IF [Infrarot], Übertragung über Infrarot
- KNXnet, über das Ethernet-basierte Local Area Network [LAN]

KNX kann durch die variable Topologie als Stern, Linie, Baum oder Bus wesentlich mehr Busteilnehmer als die bereits vorgestellten Protokolle verwalten. Als technischer Nachfolger von EIB ist er zu diesem kompatibel. [4, S. 101ff.]

Digital Addressable Lighting Interface [DALI] ist ein standardisiertes Protokoll zur Ansteuerung von Betriebsgeräten der Beleuchtungstechnik und wurde von der International Electrotechnical Commission [IEC] spezifiziert. DALI ist wie LON ein System mit verteilter Intelligenz. DALI ist mit vielen Steuerungen kompatibel. So ist es möglich, den Standard mit KNX zu verknüpfen. [4, S. 167ff.]

Im Anhang befindet sich ein Beispiel einer Beleuchtungssteuerung mit KNX, das in Kombination mit DALI verwendet wird.

Dabei stellt Abbildung 37 einen Ausschnitt einer intelligenten Beleuchtungssteuerung dar. Das Modul auf der linken Seite „TGA200“ von Hager ist eine Spannungsversorgung für 14 V. Auf der rechten Seite befindet sich das Modul „TJA670“ und ist der Konfigurationsserver zur Integration weiterer Busse und Anwendungen.

Abbildung 38 zeigt die Integration des Protokolls DALI in die bestehende KNX-Umgebung. DALI wird in diesem System für die Steuerung der Lampen und Leuchten verwendet, KNX steuert die Kommunikation zwischen den Sensoren von Fenstern, Jalousien und Wetterstation zu den Leucht-Aktoren von DALI.

Abbildung 40 stellt die Taster-Reihe dar, über die manuell in das KNX-System eingegriffen werden kann. In diesem System werden mehrere Fenster, Jalousien und

Lichtbänder miteinander in Verbindung gebracht und über mehrere Sensoren gesteuert. Das System wird in einem Unternehmen der Industrie eingesetzt.

Drahtlose Bussysteme wie KNX-Funk (KNX RF) und Funkbus-Systeme bieten einen einfachen Einstieg in die Heimautomatisierung. Durch die Nutzung des Kurzstreckenfunks im reservierten Frequenzbereich 868 bis 870MHz ist eine störungsfreie Übertragung gewährleistet. Vorteile dieses Systems ist das Wegfallen von Steuerleitungen, die einfache und schnelle Installation und seine hohe Flexibilität. Die Endgeräte werden batteriebetrieben und reduzieren den Installationsaufwand zur Nachrüstung auf ein Minimum. Das offene System hat zum einen den Nachteil, durch ein breitbandigen Störsender von außerhalb des Gebäudes außer Betrieb geschaltet werden zu können, zum anderen sind die Aktoren und Sensoren derzeit vergleichsweise teuer. [11, S. 44ff.]

Für schwer erreichbare Stellen, die wartungsfreie Betriebsmittel erfordern, bietet der Standard EnOcean des Unternehmens EnOcean GmbH aus Deutschland mit batterieloser Funktechnik und Energy Harvesting ein innovatives Alleinstellungsmerkmal im Bereich der intelligenten Gebäudesteuerung an. Mit einer Stern- oder Mesh-Topologie und einem minimalen Energieverbrauch von 50  $\mu$ Ws hat der IEC einen neuen Funk-Standard ratifiziert. EnOcean erlaubt die Interoperabilität zu weiteren Protokollen wie KNX. Mit einer verteilten Intelligenz ist der Standard eine häufig genutzte Funktechnologie für Gebäudeautomatisierungen. [4, S. 195ff.]

### **Integrale Planung [IP]**

Die IP ist die Voraussetzung, zur Realisierung einer Heimautomatisierung. Durch die interdisziplinäre Konzeptionsphase mit allen Beteiligten des Hausbaus und der Renovierung können für die aktuellen Anforderungen ideale Systemlösungen gefunden und Möglichkeiten für zukünftige Anpassungen gelassen werden. Hierzu müssen nicht nur Gebäude- und Innenarchitekten, Elektrofachkräfte, der Bauherr und alle weiteren Vertreter der im Haus vorzufindenden Gewerke dabei sein, sondern auch der Systemadministrator, der anschließend das System zu betreuen hat.

Zunächst müssen alle bestehenden und hinzukommenden Gewerke im Haus erfasst werden. Dazu zählen nicht nur Telekommunikations- und Multimedia-Technik-Leitungen, sondern auch Wasser-, Gas- und Schwachstromgewerke vom Keller bis zum Dachboden. Nur so können Investitionskosten und Nutzungskosten auf lange



Sicht niedrig gehalten werden. [11, S. 97ff.] Es muss am Ende der Planung und der Realisierung ein Dokument zur Verfügung stehen, das die Installation schriftlich und verständlich zusammenfasst. [11, S. 98ff.]

Zur IP gehören auch softwareseitige Planungsmöglichkeiten. Der Einsatz von freien, plattformunabhängigen Anwendungen wie Freemind und Inkscape, miniDraw und iThoughts HD können zur Skizzierung von Ideen verwendet werden.

Das Angebot zur simulationsbasierten, digitalen Planung, die vom Bauherr selbst durchgeführt werden kann, hat sich in den letzten Jahren erhöht. [11, S. 106ff.] Ein Beispiel für die Erstellung des Bades oder der Küche bietet der Hersteller Compusoft Group aus Großbritannien an. Wie in Abbildung 18 exemplarisch dargestellt, können diese beiden Räume online erstellt werden und ein anschließender virtueller Rundgang über den Windows-basierten Computer durchführen. [12] Hierbei kann der Bauherr selbst Kreativität und Eigenleistung miteinbringen.



Abbildung 18: Simulation einer geplanten Küche mit virtuellem Rundgang [12]

Weitere Anwendungen sind „DIALux evo“ [13] und „ReluxDesktop“ [14]. Beide Programme bieten die Möglichkeit der Lichtplanung, wie sie für die Realisierung der vorliegenden Arbeit vorgesehen sind. Bei DIALux evo sowie ReluxDesktop steht die Beleuchtung im Fokus der Raumplanung.

DIALux evo ist eine kostenfreie und offene Software zur Planung, Berechnung und Visualisierung von Licht für Einzelräumen und Gebäuden, aber auch für Außenanlagen

und Tageslicht. Sie wird vom Deutschen Institut für angewandte Lichttechnik [DIAL] entwickelt, das im Gebiet der Lichtplanung und Gebäudeautomatisierung agiert. [13]

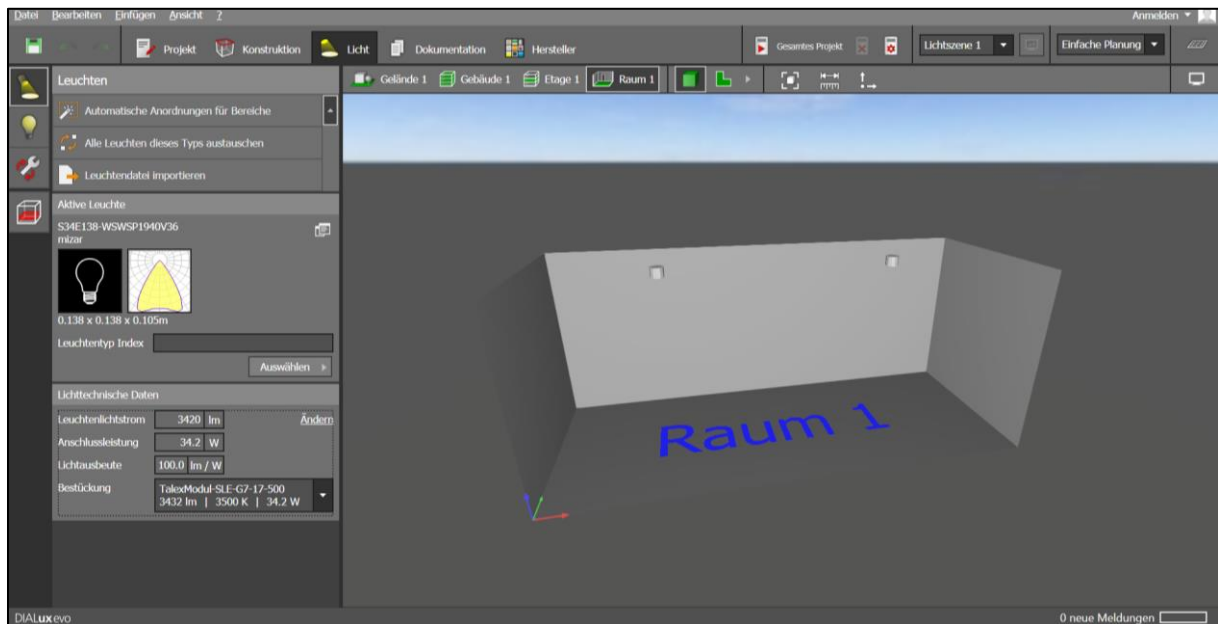


Abbildung 19: Ansicht auf die Anwendung DIALux evo [13]

Abbildung 19 zeigt die Ansicht auf die Anwendung DIALux evo. Es wurde ein exemplarischer Raum „Raum 1“ erstellt, dem zwei Leuchten hinzugefügt wurden. Es ist möglich, die Leuchten auszuwählen, vom Programm automatisch anordnen zu lassen und sich eine Dokumentation aus dem konstruierten Raum erstellen zu lassen.

ReluxDesktop ist ebenfalls eine Anwendung zur Lichtplanung, die von Relux Informatik AG in der Schweiz entwickelt wird. Das Unternehmen hat sich auf die Entwicklung von Lichtplanungs- und Produktpräsentationssoftware spezialisiert. [14]

Abbildung 20 zeigt die Ansicht auf die Anwendung ReluxDesktop mit der Leuchtdichtevertellung ohne Einbezug des Tageslichtes. Es wurde ein exemplarischer Raum erstellt, der die Anforderung von 200 Lux im gesamten Raum hatte. ReluxDesktop erlaubt das Einbinden von Möbeln. Sensoren und Leuchten können aus der Online Datenbank ReluxNet ausgewählt werden, auf welche die Anwendung verweist. Das Programm ermöglicht weitere Ansichten auf den Raum, die Generierung einer Dokumentation und die Berechnung, wie viele Leuchten vom gewählten Typ notwendig sind, um den vom Benutzer angegebenen Anforderungen an den Raum zu entsprechen.

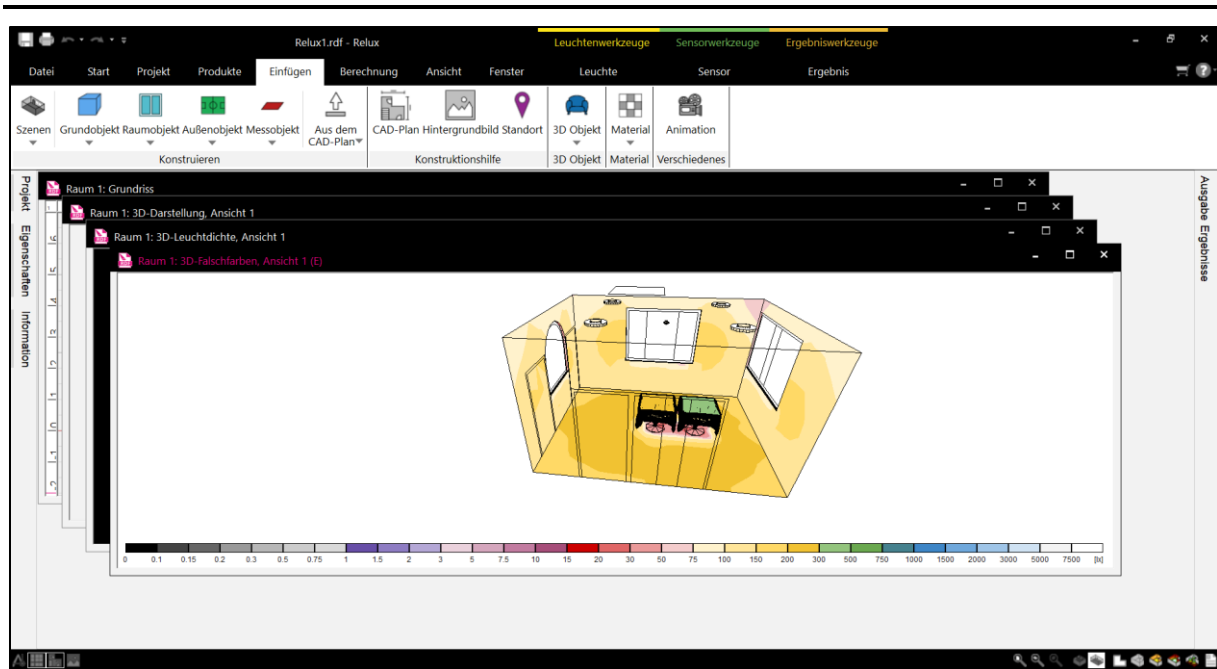


Abbildung 20: Ansicht auf die Anwendung ReluxDesktop [14]

## Elektrosmog

Elektrosmog beschreibt die Verschmutzung der Umwelt durch elektrische und magnetische Felder mit unterschiedlichen Frequenzen. Jedes Kabel verursacht ein elektrisches Feld, jedes stromdurchflossene Kabel erzeugt ein magnetisches Feld. Höhere Frequenzen erzeugen permanent elektrische und magnetische Felder. Beispiele dafür sind alle elektrischen Geräte und Transformatoren, wie:

- Sendeanlagen wie für Radio und Fernsehen
- Sendemasten wie für Mobilfunk
- Computer und Unterhaltungselektronik wie Mobiltelefone und Funkgeräte
- Einwirkungen am Arbeitsplatz wie am Flugplatz, in Krankenhäusern und in der Industrie

Die gesundheitlichen Auswirkungen von Elektrosmog sind wissenschaftlich umstritten. Er hat thermische und athermische Auswirkungen auf den Organismus. Thermische Wirkungen sind der Einfluss Nerven und Muskeln ab gewissen Stromstärken. Athermische Wirkungen beschreiben die Erhöhung des Krebsrisikos, den Eingriff in das Nervensystem und die Beeinflussung von Stoffwechselfunktionen.

Durch Materialien mit niedrigem Potenzial sollen Abschirmfolien und –farben, abgeschirmte Kabel, sowie intelligente oder zeitgesteuerte Netzfreischalter über

Protokolle wie KNX die Ausbreitung von Elektromog reduzieren und verhindern. [11, S. 124ff.]

### **Wann rechnet sich der Einsatz?**

Wenn der Einbau ausgereifter Systeme wie LON, LCN oder EIB direkt mit dem Neubau begonnen werden, da teilweise zusätzliche Leitungskabel verlegt werden müssen, lohnt sich der Einsatz. Dabei entspricht die Elektroinstallation nur zwei bis drei Prozent der gesamten Baukosten. Powerline und Funk-EIB oder ein proprietäres System lassen sich gut für Nachrüstungen einsetzen. [11, S. 129]

Wichtig ist das Zusammenspiel des gesamten Systems. Es können durch die Verknüpfung von Gebäudeinstallationen mit der Informationstechnik neue Anwendungen erschlossen werden. Nur durch diese Verknüpfung darf die Steuerung intelligent bezeichnet werden. Unter anderem sind folgende Nutzen für den Bewohner möglich, besonders durch den Einsatz von intelligenter Lichttechnik:

- Effizienter Energieeinsatz
- Sicherheit für Bewohner für Haus und Geräte
- Fernzugriff für die Anzeige und Bedienung der Haustechnik
- Erhöhter Komfort für den Bewohner
- Flexible Installation

Durch eine einfache und intuitive Bedienung der Geräte werden Komfort und Sicherheit für den Bewohner erhöht. [11, S. 129ff.]

### **3. Stand der Technik**

Leuchtmittel entwickeln sich kontinuierlich weiter. Die Produkte erhalten immer weitere Eigenschaften, die für den privaten Wohnraum lohnenswert erscheinen. Nachfolgend sollen im Hinblick auf die zu erstellende Anwendung verschiedene zukunftsweisende Leuchtmittel vorgestellt werden, deren Einsatz sich positiv auf das Raumklima auswirken kann.

#### **3.1. Leuchtmittel**

##### **LEDs**

Moderne Beleuchtungstechnik hilft Energie zu sparen. LED werden als das Leuchtmittel der Zukunft gesehen. Ihr Wirkungsgrad liegt mit 30% weit über dem von Glühbirnen, die bei fünf Prozent liegen. Sie strahlen fast keine Wärme ab und sind durch ihre kleine Baugröße überall einsetzbar. Leseleuchten, leuchtende Möbel und Lichtinstallationen sind mit LEDs realisierbar. Sie sind unempfindlich gegen mechanische Stöße im Vergleich zum Glühwendel einer Glühbirne und haben keinen Hohlkörper. LEDs können homogen weißes Licht liefern. Durch die Farbwiedergabe lässt sich die Flächenbeleuchtung verbessern. Eine gezielte Ansteuerung der einzelnen LEDs ermöglicht die Steuerung von Helligkeit und Farbwiedergabe in einem Raumbereich. LEDs liefern einen wichtigen Beitrag zur Energieeinsparung. [11, S. 137f.]

LEDs geben sofort helles Licht und behalten ihre Lichtfarbe während der gesamten Lebensdauer. Durch die Abgabe von monochromem Licht ohne UV- und IF-Strahlung fördern sie das Erlebnis Raummilieu. Sie erfordern jedoch den gekonnten Umgang und Einsatz, können ohne Vorsatzlinse blenden und sind relativ teuer in der Anschaffung. [1, S. 112ff.]

##### **OLEDs**

Organische LEDs [OLED] bestehen auf Basis organischer Kristallen. Ihre enorme Leuchtkraft, die hohe Farbbrillanz und ihr niedriges Gewicht sind nur wenige ihrer Eigenschaften, die sie für den Einsatz von flexiblen Anzeigeflächen geeignet machen. Ihre geringe Lebensdauer und hohe Fertigungskosten sind der Grund, wieso die OLED-Technologie derzeit nur in kleineren Displays wie von Mobiltelefonen, Kameras und Rasierern zu finden sind. [11, S. 139f.]



Abbildung 21: Einsatzmöglichkeit von OLED im Wohnraum [27]

Für eine Einsparung von Energie und CO<sub>2</sub> sind die ökonomisch und ökologischen OLEDs eine vielversprechende Technologie, die flächiges Licht abgeben und damit für ganze Lichtwände oder als leuchtende Tapete eingesetzt werden können, wie Abbildung 21 exemplarisch darstellt. Tagsüber können sie Sonnenlicht in den Raum durchlassen, abends leuchten sie selbst. Im Vergleich zu anorganischen LEDs weisen sie eine geringere Strom- und Leuchtdichte auf. [1, S. 119f.]

### **Elektrolumineszenz-Folien**

Lumineszenz ist die Eigenschaft bestimmter Substanzen, die in Folge der Bestrahlung von Tages-, UV-, Röntgen- oder Elektronenstrahlen die absorbierte Energie teilweise oder ganz abstrahlen. Elektrolumineszenz [EL] beschreibt die direkte Lumineszenz-Anregung durch die Einwirkung eines elektrischen Feldes. EL-Zellen können dabei als Leuchtpigmente in transparentes, organisches oder keramisches Material eingebettet werden, um als Gesamtobjekt als sogenannter Leuchtkondensator zu wirken.

EL-Folien geben praktisch keine Wärme ab, als Flächenleuchten wirken sie mit einer annähernd homogenen Leuchtkraft über die gesamte Folie. Mit einer Lebensdauer von etwa 10.000 Stunden liegen sie weit unter LEDs, aber mit einem sehr geringen Energieverbrauch und ihrer Fähigkeit dimmbar zu sein, liegen sie auf einer Höhe mit den LEDs und OLEDs. [1, S. 118f.]

## **Temperatur-Strahler**

Glühlampen sollen bis 2016 vollständig aus dem Verkauf in Deutschland entfernt sein. Energiesparlampen dürfen nur noch in der Energieeffizienzklasse A verkauft werden. [2, S. 25, S. 84f.] Als Ersatz für die Glühlampe wird die Halogenglühlampe in den Glaskolben eingesetzt. Diese hat ähnliche Eigenschaften wie die Glühlampe, weist jedoch die doppelte Lebensdauer auf. [1, S. 84ff.]

## **Induktionslampen**

Induktionslampen werden derzeit nur von zwei Herstellern angeboten: Philips und Osram. Abbildung 22 stellt das Lampenmodell von Philips dar. Es werden elektrodenfrei Strahlungen abgegeben. Die Stromübertragung erfolgt über Magnetfelder. Wartungsfrei weisen sie eine Lebensdauer von 60.000 Stunden auf. Mit einer guten Farbwiedergabe und dem Fehlen der Möglichkeit zum Dimmen, ist der Einsatz der teuren Induktionslampen nur an schwer erreichbaren Räumlichkeiten einzusetzen. [1, S. 100]



Abbildung 22: Induktionslampe von Philips [1, S. 100]

### **3.2. Steuerung der Beleuchtung**

Für die Steuerung der Beleuchtung gibt es verschiedene Ansätze, die nachfolgend kurz vorgestellt werden.

### **„Do It Yourself“**

Eine attraktive Lösung für den Hobby-Bastler. Mit günstiger Elektronik und preiswert vernetzbaren Computern können verständliche Lösungen erstellt werden, bei denen der Ersteller, möglicherweise der Bauherr selbst, den Aufbau seines vernetzten Wohnraums kennt. Damit sind individuelle Möglichkeiten gegeben, die mit einer Automationslösung von Herstellern nicht gegeben sind, da diese allgemein für viele Anwendungsfälle entwickelt werden. [15, S. 5] Über einen Raspberry Pi oder Arduinio-Board können viele Projekte realisiert werden, die teilweise auch schon als quelloffene Programme verfügbar sind. [15, S. 201] Über das Betriebssystem Android lassen sich ebenfalls eigene Lösungen implementieren. Mit der Android@Home-Initiative von Google unterstützt es Hersteller und Entwickler von Unterhaltungstechnik, das Betriebssystem Android als Basistechnologie für das Smart Home System zu verwenden. [15, S. 16f.]

### **Proprietäre Lösung**

Proprietäre Automationslösungen sind Black Boxes, fertige Anwendungen, deren interne Arbeitsweise nur dem Hersteller bekannt ist. Sie stehen im Gegensatz zu den „Do It Yourself“-Lösungen. Dennoch bestehen viele Geräte im Haushalt aus proprietären Lösungen, was die Kommunikation über ein gemeinsames Netz erschwert. Beispiele dafür sind Wecker oder Rauchmelder.

Kommerzielle Hersteller wie X10, CEBus und Insteon haben verschiedene Lösungsansätze, dennoch konnte sich bisher keine durchsetzen. Ein möglicher Grund ist das sogenannte Henne-Ei-Problem. Dabei sind Hersteller teilweise daran gehindert, Lösungen zu schaffen, da entweder Haushaltsgeräte mit entsprechenden Schnittstellen oder Protokolle für die Kommunikation fehlen. [15, S. 4f.]

### **Standardisierte Lösung**

Eine standardisierte Lösung stellt nicht nur die Interoperabilität verschiedener Hersteller sicher, sondern ermöglicht auch das Teilnehmen neuer Hersteller und das Aufteilen einer komplexen Lösung in Teilbereiche, die über Schnittstellen miteinander kommunizieren. [15, S. 4]

Mit der Wahl eines Standards bietet sich ein professionelles System an, das eine bewährte Technologie ist. Durch die Herstellerunabhängigkeit können Investitionen in



die Zukunft geschützt werden, es ist jederzeit ein Wechsel des Endgerätes möglich, insofern es den Standard unterstützt.

KNX stellt einen weltweiten Standard mit großer Herstellervielfalt und mehr als 7.000 zertifizierten Produkten dar, der auch mit anderen Standard-Technologien sinnvoll kombinierbar ist. Solche Standard-Technologien sind beispielsweise DALI, DMX, 1-Wire und EnOcean. [4, S. 52f.]

#### **4. Anforderungen und Zielsetzung**

Um einen energieeffizienten privaten Haushalt zu führen und dennoch die notwendige Sehleistung erbringen zu können, ist eine geschickte Anordnung der Lampen und Leuchten im Raum notwendig. Um eine passende Beleuchtungsstrategie für den Raum zu finden, müssen einige grundlegende Aspekte im Raum beachtet werden. Das sind die Lage des Raumes im Gebäude, die Nutzungszonen im Raum, der Einfall und die Stärke von Tageslicht, sowie die Maße des Raumes. [5, S. 13ff.]

Die Wahl der Leuchten und Lampen bestimmt in der Kombination von Farben und Materialeigenschaften maßgeblich das individuelle Erlebnis im Raum. [6, S. 115]

Die Anforderung an die zu entwickelnde Anwendung ist die Konzeption und Entwicklung einer Software zur Steuerung von Beleuchtungsstärken im privaten Wohnraum. Dazu sollen zunächst ausgewählte Räume und Leuchten verfügbar sein, um die Entwicklungsarbeit zu erleichtern.

Um die Aufgabenstellung zu erfüllen, soll die Implementierung in mehreren Teilschritten erfolgen:

1. Anzahl der Lampen nach empfohlener Leuchtstärke im Raum berechnen
2. Auswahl von Lampen ausgewählter Hersteller hinzufügen
3. Fenster im Raum hinzufügen
4. Darstellung des Raumes für den Benutzer mit Eingabe-Parameter
5. Implementierung einer Funktionalität zum Tageslicht-abhängigen Dimmen

Die einzelnen Implementierungsschritte erfolgen nach der agilen Entwicklungsmethode. Dabei muss ein Schritt vollständig realisiert und funktionsfähig sein, bevor der nächste angefangen wird, da jede Iteration auf der vorherigen aufbaut.

Nachfolgend werden zuerst das Konzept, dann die Entwicklung der Anwendung nach der Reihenfolge der Iterationen beschrieben. Dabei soll auf Gründe für die Realisierung und aufgetretene Probleme eingegangen werden.

## 5. Konzept

Um die gestellten Anforderungen zu realisieren, muss zunächst ein Gesamtkonzept erstellt werden, auf welchem die Entwicklungsarbeit basiert. Es sollen iterativ Funktionalitäten gemäß der agilen Software-Entwicklung hinzugefügt werden. Dabei wird mit jeder Iteration eine neue Anforderung realisiert und getestet. Damit soll der Fokus auf der Entwicklung statt auf dem Finden einer abstrakten Software-Architektur liegen. [30, S. 166f.] Zunächst müssen die Konzepte für jeden Schritt festgelegt werden. Nachfolgend sollen diese kurz vorgestellt werden.

### 5.1. Anzahl der Lampen nach empfohlener Leuchtstärke im Raum berechnen

In einem ersten Schritt soll die Anzahl der benötigten Lampen auf Grundlage der empfohlenen Leuchtstärken im Raum berechnet werden. Dazu sind die folgenden Parameter zu beachten:

- Raumgröße (Länge, Breite)
- Wahl der Lampen
  - o Strahlungswinkel
  - o Leuchtleistung pro Lampe
  - o Emittierte Leuchtdichte

Es soll zunächst davon ausgegangen werden, dass im gesamten Raum die gleichen Lampen verwendet werden. Um die Raumgröße zu berechnen, muss die Benutzeroberfläche eine Möglichkeit zur Eingabe aufweisen. Um es dem Benutzer einfacher zu machen, sollen die Maße „Länge“ und „Breite“ einzeln eingegeben werden können. Hierbei wird davon ausgegangen, dass der Raum rechteckig ist.

Die Wahl der Lampen soll zunächst vorgegeben werden. Es werden Glühlampen verwendet, die einen 120° Strahlungswinkel aufweisen. Damit wird ein Lichtbereich von 3,5m in der Arbeitshöhe von 0,8m ab Boden erhellt.

Auf Basis dieser Angaben können die Anzahl der benötigten Leuchten, die daraus resultierende Lichtmenge bei mittlerer Leuchtdichte und mittlerem Reflexionsgrad der Objekte im Raum, sowie die aufzuwendende Energie für die Lichtleistung bestimmt werden. Diese sollen nach der Berechnung auf der Benutzeroberfläche ausgegeben werden. Damit wird eine gleichmäßige Helligkeit im Raum gewährleistet. [9]

Der erste Anwendungsfall soll eine Küche sein. Diese hat die Empfehlung der Lichtfarben von 827 bis 930 empfohlen. Damit soll die Farbwiedergabe  $R_a$  zwischen 80 und 90 liegen, die Farbtemperatur soll zwischen 2.700 und 3.000°K liegen.

Der zweite Anwendungsfall soll ein Arbeitszimmer sein. Dieser hat die Empfehlung der Lichtfarbe von 827 bis 840. Damit soll  $R_a$  bei etwa 80 liegen, die Farbtemperatur kann mit 2.700 bis 4.000°K eine höhere Variation aufweisen als in der Küche. Damit ist ein gutes Erkennen und Wahrnehmen der geforderten Sehleistung gegeben. [1, S. 99]

Die Berechnung der Leuchtdichte  $L$  wird wie bereits in Formel 1 beschrieben über den Reflexionsgrad  $\rho$  der direkten Umgebung, der geforderten Leuchtstärke  $E$  und der Zahl  $\pi$  berechnet.

### **5.2. Auswahl der Lampen ausgewählter Hersteller hinzufügen**

Es soll dem Benutzer möglich sein, über die Anwendung einen Lampen- oder Leuchten-Typ hinzuzufügen. Dieser wird im gesamten Raum verwendet. Dazu sollen zunächst zwei Modelle verfügbar sein. Diese werden über eine Schaltfläche in einem eigenen Fenster angezeigt. Der Benutzer kann sich hier die Charakteristiken der jeweiligen Lampe einsehen. Diese Benutzeroberfläche ist nachfolgend in Abbildung 23 schematisch dargestellt.

Über die Auswahl Schaltfläche links oben soll der Benutzer das Leuchtmittel auswählen. Nach der Auswahl werden rechts die Eigenschaften dargestellt, mit einer Ansicht der Leuchte oder der Lampe und ihrer LVK.

The screenshot shows a window titled "LampenWahl" with a standard Windows interface (minimize, maximize, close buttons). Inside the window, there is a form with the following elements:

- A dropdown menu labeled "Wähle Lampe / Leuchte" with a downward arrow.
- A series of labels on the left side of the form, each followed by an input field:
  - Leuchten-/Lampen-Name
  - Artikel-Nummer
  - Farbtemperatur
  - Leuchtfarbe
  - Systemleistung
  - Dimmbar
  - Farbwiedergabeindex
  - Nutzlichtstrom
  - Hersteller
  - Webseite
- At the bottom left, there are two buttons: "Übernehmen" and "Abbrechen".

Abbildung 23: Auswahl eines Lampen- oder Leuchten-Typs [16]

Es soll eine klassische Glühlampe mit den in Tabelle 2 dargestellten Charakteristiken auszuwählen sein.

Tabelle 2: Charakteristiken der zu wählenden Leuchtmittel der Anwendung

Leuchtmittel	Licht-temperatur	Farbwiedergabe Ra	Lichtfarbe	Nutzlichtstrom	Dimmbar
Glühlampe	2.300°K	100	extra warm weiß	40 lm/W	Ja
LED	3.000°K	80	weiß	640 lm/W	Keine Angabe

Eine LED soll als moderne Alternative auswählbar sein. Damit soll einerseits der Unterschied zwischen den Eigenschaften einer Glühlampe zu einer LED deutlich

aufgezeigt, andererseits auch zwei verschiedene Alternativen geboten werden. Die LED soll die in Tabelle 2 dargestellten Charakteristiken aufweisen.

Beide Lampen erfüllen die Anforderungen an die beiden vordefinierten Räume Küche und Arbeitszimmer. [1, S. 110f.]

### **5.3. Fenster im Raum hinzufügen**

Über Fenster gelangt Licht von außen in den Innenraum. Tageslicht hat wie bereits erwähnt einen sehr positiven Einfluss auf den menschlichen Organismus. Auch zur Verbesserung des Raumklimas ist Tageslicht einzusetzen. Damit sollen Fenster mit in die Lichtplanung miteinbezogen werden. Dabei muss bei der Beurteilung von Tageslicht die tages- und jahreszeitliche Beleuchtungsstärke beachtet, während die Beurteilung von Kunstlicht auf der örtlichen Beleuchtungsstärke im Raum abhängig ist. [5, S. 27]

Um ein repräsentatives Beleuchtungsmodell erstellen zu können, wird üblicherweise ein sogenannter mittlerer Himmel angenommen. Dieser berücksichtigt tages- und jahreszeitliche Mittelwerte der Beleuchtungsstärke der Sonne und die Bewölkung. Er wird aus meteorologischen Beobachtungsdaten ermittelt. [5, S. 27]

Über den TQ wird die Menge und der Verlauf von Tageslicht in einem Raum mit Fensteröffnungen beschrieben. Es wird der prozentuale Anteil der Außenbeleuchtungsstärke an einem Messpunkt im Innenraum wiedergegeben. Dazu wird die in Formel 2 dargestellte Gleichung verwendet:

$$TQ = \frac{E_{\text{innen}}}{E_{\text{außen}}} * 100[\%]$$

Formel 2: Berechnung des prozentualen TQs [5, S. 29]

Über das Verhältnis der Innenbeleuchtungsstärke  $E_{\text{innen}}$  zur Außenbeleuchtungsstärke  $E_{\text{außen}}$  soll der TQ im Innenraum an einem bestimmten Punkt berechnet werden. [5, S. 29]

Mit einer Annahme, dass die Außenbeleuchtungsstärke  $E_{\text{außen}}$  einen Wert von 10.000 Lux hat, soll sichergestellt werden, dass nicht zu wenig Licht in den Raum dringt. Mit Abbildung 24 kann die Innenbeleuchtungsstärke  $E_{\text{innen}}$  errechnet werden. Sobald der TQ unter den Schwellwert von drei Prozent gelangt, ist nicht genug Tageslicht für das

Arbeiten im Raum vorhanden. Spätestens ab hier soll eine künstliche Leuchtquelle für genügend Licht sorgen. [5, S. 29f.]

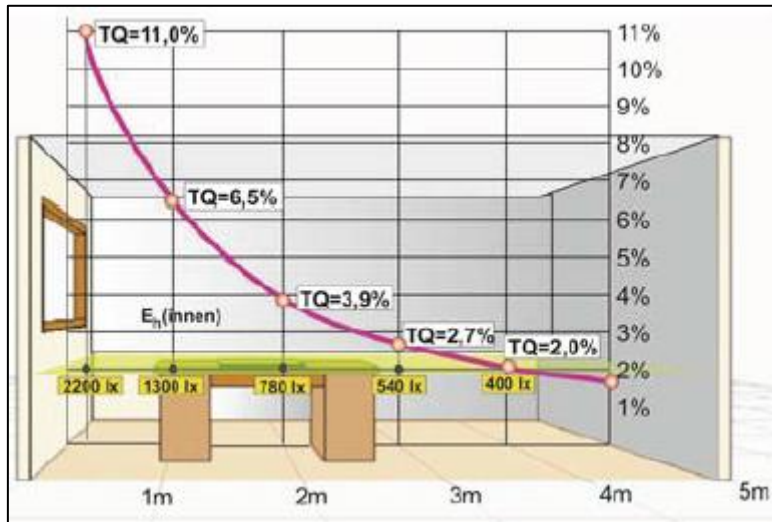


Abbildung 24: Anteil des TQ im Raum bei  $E_{\text{außen}}$  20.000 Lux [5, S. 29]

Die Eingabe soll über eine Eingabemaske möglich sein, um die Ansicht und Nutzung der Anwendung einfach zu halten. Abbildung 25 stellt diese Ansicht dar. Mit der Länge, der Breite, der Höhe ab Boden und der Angabe auf welcher Seite des Raumes sich das Fenster befindet, soll es möglich sein, den TQ optimal zu berechnen.

Ausrichtung des Raumes

☐ Nord-Seite ☐ Ost-Seite ☐ Süd-Seite ☐ West-Seite

Länge  m

Breite  m

Höhe ab Boden  m -> Ohne Fensterhöhe!

Abbildung 25: Angabe der Fenster nach Himmelsrichtung [16]

### 5.4. Darstellung des Raumes für den Benutzer mit Eingabe-Parametern

Damit die Ansicht nicht nur zahlenbasiert ist, sondern auch grafisch dargestellt wird, soll es ein Modell des Raumes geben, anhand dessen der Benutzer das Ergebnis seiner Eingaben visualisiert erhält. Es sollen der Raum, die Leuchten und die Fenster dargestellt werden.

Die Angaben sollen an eine externe Anwendung übergeben werden. Diese soll den Raum mit den Abmaßen und den Leuchten visualisieren.

Die externe Anwendung soll mit dem parametrischen 3D Computer-Aided Design [CAD] Programm „FreeCAD“ realisiert werden. Es ist eine quelloffene Anwendung für Maschinenbau, Architektur und Produktdesign. Sie läuft auf Betriebssystemen wie Linux/Unix, Windows und Mac OSX in einem einheitlichen Design. FreeCAD ist mit proprietären Anwendungen wie Catia, SolidWorks oder Solid Edge zu vergleichen und kompatibel mit diesen. Über eine Python-basierte Schnittstelle kann FreeCAD Parameter und anwendungsspezifische Befehle übernehmen und darstellen. [17]

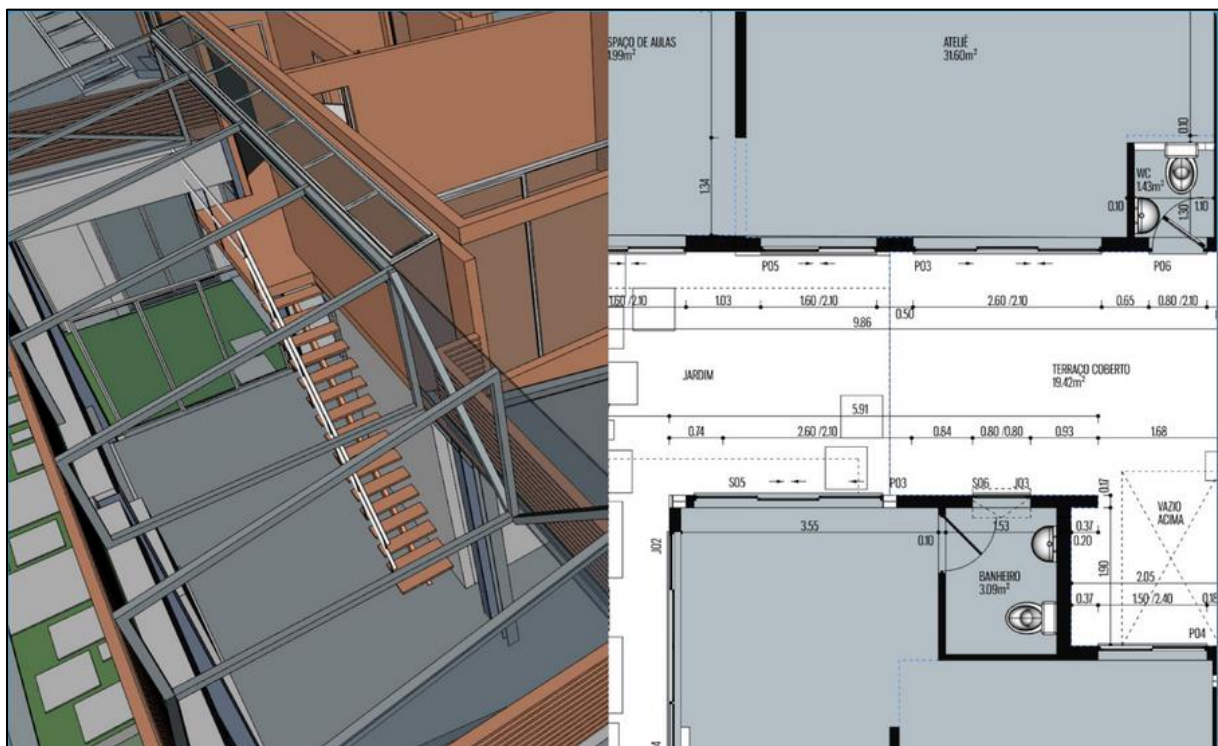


Abbildung 26: Anwendungsfall von FreeCAD in der Gebäudearchitektur [17]

Abbildung 26 zeigt einen exemplarischen Anwendungsfall von FreeCAD. Im Fall einer Gebäudearchitektur ist es möglich, Bemaßungen und 2D Pläne, sowie eine 3D Ansicht zu erstellen.

Mit der Verwendung eines Python-basierten Skriptes soll es der Hauptanwendung möglich sein, Parameter an FreeCAD zu übergeben und dem Benutzer das Modell seines Raumes darzustellen.



---

## **5.5. Implementierung einer Funktionalität zum Tageslicht-abhängigen Dimmen**

Eine energieeffiziente Erweiterung der Beleuchtung von Innenräumen ist die Schaltung der Leuchten über eine intelligente Gebäudesteuerung. Die vorliegende Arbeit soll eine standardisierte Lösung unterstützen. Durch diesen Ansatz soll es dem Benutzer jederzeit möglich sein, mit den erzeugten Daten auf die Gebäudesteuerung eines offenen Standards umzusteigen, ohne dort erneut alle Parameter eingeben zu müssen.

Damit der Wechsel auf eine etablierte Gebäudesteuerung möglich ist, die außer der Beleuchtung noch weitere Anwendungsfelder hat, wie die Jalousiesteuerung oder Kontaktsteuerung an Fenstern und Türen, soll ein weit verbreiteter und gut getesteter Standard gewählt werden.

Der Standard KNX erfüllt diese Anforderungen vollständig. Das Übertragungsprotokoll ist quelloffen. Damit soll es möglich sein, die entsprechenden Werte zur Steuerung der Beleuchtung in einem Raum mitzugeben, wenn entsprechende KNX-Endgeräte verwendet werden.

KNX bietet die Anwendung „Engineering Tool Software“ [ETS] als herstellerunabhängige Konfigurations-Software in unterschiedlichen Versionen an, um Steuerungen für intelligente Gebäude zu erstellen. Das Programm ist Windows-basiert und kostet versionsabhängig zwischen 150 und 1.000 Euro. [18]

Mit der vorliegenden Arbeit sollen diese Kosten zunächst vermieden werden. Erst mit der Erweiterung der bestehenden Gebäudesteuerung auf eine vollständige oder erweiterte Lösung mit weiteren Gewerken oder Geräten im Gebäude soll es notwendig sein, auf eine standardisierte Software zur Integration der Endgeräte umzusteigen. Erst wenn beispielsweise eine Wetterstation in die Beleuchtungssteuerung integriert werden soll, kann die vorliegende Arbeit keine intelligente Lösung bieten. Der Wechsel auf einen Standard der Gebäudeautomation, wie KNX ist nun notwendig.

Zur Erstellung einer KNX-basierten Steuerung der Leuchten in einem Raum soll die Anwendung zwei Möglichkeiten bieten:

- Generierte Steuerung der Beleuchtung
- Steuerung der Beleuchtung durch den Benutzer

Mit der generierten Steuerung über das Programm soll es dem Benutzer eine mögliche Lösung zur Regulierung der Helligkeit im Raum, basierend auf dem TQ anbieten. Die Leuchten sollen in dem Teil des Raumes eingeschaltet werden, in dem das örtliche Helligkeitsniveau nicht ausreichend ist. Das ist wie bereits angegeben, bei unter drei Prozent der Beleuchtungsstärke  $E_{\text{innen}}$ .

Mit dem Angebot, dass der Benutzer selbst eine Lösung erstellen kann, kann eine genauere Lichtsteuerung erstellt werden, die auf die Nutzung und Gewohnheiten des Bewohners abgestimmt ist.

Diese Möglichkeiten sollen über zwei Schaltflächen dem Benutzer zugänglich sein. Beide sollen ein eigenes Fenster öffnen, über die der Benutzer die Ausgabe der generierten Lösung sieht und die Eingabe der eigenen Lösung ermöglicht. Abbildung 27 stellt diese Visualisierung schematisch Ausgabe dar.

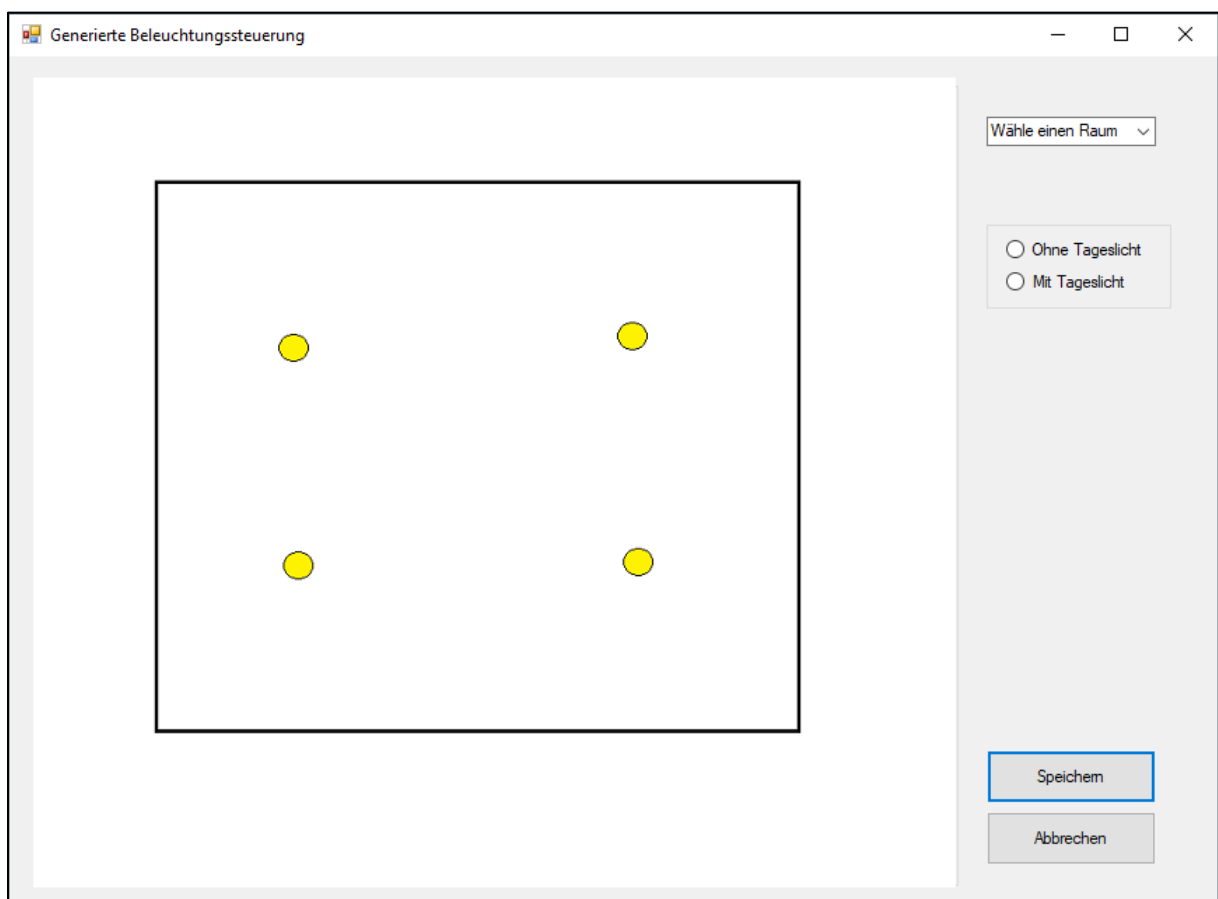


Abbildung 27: Konzept zur Anzeige der generierten Steuerung [16]

Es soll eine Ansicht aus der Vogelperspektive auf den 2D Raum geben, der über eine Schaltfläche auf der rechten Seite ausgewählt werden kann. Das erfordert die

Speicherung von erstellten Räumen in der Hauptansicht der Anwendung. Es soll auch ausgewählt werden, ob die Steuerung mit oder ohne Tageslicht generiert werden soll. Über die beiden Schaltflächen „Speichern“ und „Abbrechen“ soll die Lösung übernommen und das Fenster geschlossen oder nur geschlossen werden. Der Raum soll ebenfalls mit FreeCAD erstellt und angezeigt werden.

Dazu soll eine Funktion zum Export der auf dem KNX-Protokoll basierten Steuerung über die Anwendung möglich sein. Dieses Format muss mit ETS kompatibel sein, um es dort nachfolgend importieren zu können.

## 6. Entwicklung und Implementierung

Die Entwicklung soll nach dem zuvor erstellten Konzept erfolgen. Das Konzept enthält die grobe Struktur der Entwicklungsidee, die als Ansatz für die Implementierung in der konkreten Programmierumgebung dienen soll. Für die Erstellung der Anwendung wurde die Programmiersprache C#, das .NET Framework 4.7.2 und die Entwicklungsumgebung Visual Studio 2019 von Microsoft verwendet. Nachfolgend soll der Entwicklungsweg nach den Iterationen dargestellt werden.

### 6.1. Anzahl der Lampen nach empfohlener Leuchtstärke im Raum berechnen

Um die Anzahl der Lampen im Raum zu berechnen, ist die empfohlene Leuchtstärke für den entsprechenden Innenraum heranzuziehen.

Für die Küche soll eine Innenbeleuchtungsstärke  $E_{\text{innen}}$  von 300 Lux gleichmäßig im Raum vorzufinden sein. Für das Arbeitszimmer soll ebenfalls ein Wert für  $E_{\text{innen}}$  von 500 Lux gleichmäßig im Raum vorzufinden sein, um stabile Sehverhältnisse zu gewährleisten. [5, S. 191, 28]

Beide Anforderungen sollen in einer eigenen statischen Variablen gespeichert werden, um während der Berechnung jederzeit auf den Wert zugreifen zu können. Listing 1 stellt diese Speicherung der beiden Räume Küche und Arbeitszimmer exemplarisch dar.

```
public static int Raum_Küche_Lichtmenge      = 300; // in Lux
public static int Raum_Arbeitsplatz_Lichtmenge = 500; // in Lux
```

Listing 1: Statische Speicherung der Variablen für Küche und Arbeitszimmer

Der Benutzer soll über die Oberfläche der Anwendung die folgenden Parameter eingeben:

- Länge und Breite des Raumes
- Art des Raumes
- Auswahl des Leuchtmittels
- Bestätigung der Eingaben zum Start der Berechnung

### Berechnung der Leuchtdichte im Raum

Die Berechnung der Leuchtdichte ist vom Winkel der Strahlung des Leuchtmittels abhängig. Für eine LED soll ein Strahlungswinkel von  $38^\circ$  angenommen werden.

Damit hat das Leuchtmittel eine Strahlungsweite von etwa 1,3m<sup>2</sup> bei einer durchschnittlichen Einbauhöhe von 1,5m bis zum Boden [2, S. 87ff., 19]. Für eine Glühlampe soll ein Strahlungswinkel von 120° angenommen werden. Der Wert basiert auf der Annahme, dass eine Glühlampe meistens in einen Schirm eingedreht wird und damit in ihrem Strahlungswinkel eingeschränkt wird. Basierend auf dem Strahlungswinkel des gewählten Leuchtmittels wird die benötigte Anzahl im gegebenen Raum nach Formel 3 berechnet. Die beiden Werte zu Raumgröße und Strahlungsbreite werden in m<sup>2</sup> angegeben.

$$\text{Anzahl Leuchten} = \frac{\text{Raumgröße}}{\text{Strahlungsbreite}}$$

Formel 3: Berechnung der Anzahl von Leuchtquellen im Innenraum [19]

Listing 2 gibt zusammenfassend die Berechnungsfolge wieder, die zur Ausgabe der notwendigen Anzahl von gegebenen Leuchtmitteln führt.

```
void Berechne_Lichtmenge_AnzahlLeuchten_LeistungLeuchten(double neuerRaum)
{
    Calculation myCalc = new Calculation();
    double reflexionOberfläche = 0.6;
    int raumBeleuchtungsstärke = Storage.Raum_Küche_Lichtmenge;

    /* 1. Berechne notwendige Lichtmenge im Raum */
    int leuchtdichte =
        myCalc.LeuchtdichteBerechnen(reflexionOberfläche, raumBeleuchtungsstärke);

    /* 2. Berechne notwendige Anzahl Lampen im Raum */
    int anzahlLeuchten = Berechne_Leuchtdichte_Im_Raum(neuerRaum);
    this.tb_RoomCountLights.Text = anzahlLeuchten.ToString();

    /* 3. Berechne notwendige Leistung im Raum */
    this.tb_RoomCountPower.Text =
        myCalc.LeistungAllerLeuchtenBerechnen(Storage.Leuchtmittel_Watt,
        anzahlLeuchten).ToString();

    return;
}
```

Listing 2: Berechnungsreihenfolge zur Anzahl der Leuchtmittel im Raum

Zunächst werden die notwendigen Parameter initialisiert. Die Klasse „Calculation“ beinhaltet Methoden für explizite Berechnungen. Darunter die Berechnung der Leuchtdichte, die die Leuchtdichte im Raum in Lux zurückgibt (1). Die notwendige Anzahl der Leuchten wird basierend auf den gegebenen Maßen des Raumes wie zuvor beschrieben berechnet und auf der Benutzeroberfläche

ausgegeben (2). Die durch alle Leuchten benötigte Leistung in Watt wird anschließend über eine Methode der Klasse „Calculation“ berechnet und ausgegeben (3).

Die Leuchtdichte wird über die in Formel 1 angegebene Gleichung berechnet. Für den Reflexionswert  $\rho$  der Wände und Möbel im Innenraum soll an dieser Stelle ein mittlerer Wert von 0,6 angenommen werden, welcher der Reflexion von Holz, Textilien oder hellen Farben entspricht. [5, S. 198]

Auf der Benutzeroberfläche werden die Ergebnisse der folgenden Parameter ausgegeben:

- Anzahl der Lampen
- Leistung aller Lampen im Raum in W

Die Benutzeroberfläche soll einfach gehalten und intuitiv zu verwenden sein. Es sind die notwendigen Werte und Schaltflächen auf der Benutzeroberfläche zu sehen. [20]

### **6.2. Auswahl der Lampen ausgewählter Hersteller hinzufügen**

Um die Lampen auswählen zu können, muss eine Schaltfläche aus der Hauptansicht bei Anklicken auf ein neues Fenster verweisen. Das erfolgt über die Schaltfläche „Wähle Lampe/Leuchte“, welche auf dem Screenshot der Anwendung auf Abbildung 40 im Anhang zu sehen ist.

Das sich nun öffnende Fenster ermöglicht die Auswahl einer Lampe oder Leuchte. Es werden die bereits im Konzept festgelegten Leuchtmittel und Charakteristiken verwendet. Exemplarisch für die auswählbare LED stellt Abbildung 28 die Ausgabe der Eigenschaften für den Benutzer dar. Die LED „LED Einbau-Deckenleuchte“ des Herstellers „Brumberg“ weist die in der Abbildung dargestellten Eigenschaften auf. Eine Ansicht der realen Leuchte ist rechts unten dargestellt, ihre LVK zeigt eine gerichtete Abstrahlung nach unten. [21]

**LampenWahl**

LED Einbaustrahler ▼

Leuchten-/Lampen-Name	LED Einbau-Deckenleuchte
Artikel-Nummer	38363023
Farbtemperatur	3.000 Kelvin
Leuchtfarbe	weiß
Systemleistung	6 Watt
Dimmbar	Keine Angabe
Farbwiedergabeindex	80 Ra
Nutzlichtstrom	640 Lumen
Hersteller	Brumberg
Webseite	<a href="https://www.brumberg.com/">https://www.brumberg.com/</a>

Übernehmen

Abbrechen

η = 100 % od / klim

Diagramm: Ein Lichtverbreitungsdiagramm (Candela-Diagramm) mit einem roten U-förmigen Strahlengang, der die Lichtverteilung darstellt. Die Achsen sind mit 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900, 2000, 2100, 2200, 2300, 2400, 2500, 2600, 2700, 2800, 2900, 3000, 3100, 3200, 3300, 3400, 3500, 3600, 3700, 3800, 3900, 4000, 4100, 4200, 4300, 4400, 4500, 4600, 4700, 4800, 4900, 5000, 5100, 5200, 5300, 5400, 5500, 5600, 5700, 5800, 5900, 6000, 6100, 6200, 6300, 6400, 6500, 6600, 6700, 6800, 6900, 7000, 7100, 7200, 7300, 7400, 7500, 7600, 7700, 7800, 7900, 8000, 8100, 8200, 8300, 8400, 8500, 8600, 8700, 8800, 8900, 9000, 9100, 9200, 9300, 9400, 9500, 9600, 9700, 9800, 9900, 10000.

Bild: Ein Foto einer LED Einbau-Deckenleuchte mit einem schwarzen Gehäuse und einem roten Lichtstrahl.

Abbildung 28: Exemplarische Darstellung der Charakteristiken einer LED [16]

Die Glühlampe wurde von einem anderen Hersteller gewählt. Damit soll der Benutzer aus Leuchten und Lampen unterschiedlicher Hersteller wählen können, nicht jeder Hersteller verkauft die gleichen Produkte.

Die Glühlampe „Glühlampe Tropfen E27“ von Paulmann Licht GmbH weist eine klassische Bauform auf und ist daher gut als Ersatz für bestehende Lampen geeignet. Die Eigenschaften der jeweiligen Leuchte oder Lampe werden in statischen Variablen gespeichert, um diese bei „Übernehmen“ an die Hauptanwendung zu übergeben.

Listing 3 zeigt die exemplarische Speicherung der Parameter des Leuchtmittels Glühlampe. Diese enthält neben den festen Eigenschaften variable Referenzen zu den Bildern, die von der Webseite des jeweiligen Herstellers in den Ordner der Anwendung kopiert wurden.

```
private void Setze_Parameter_Gluehlampe()
{
    this.richTextBox1.Text = "Glühlampe Tropfen E27";
    this.richTextBox2.Text = "2.300 Kelvin";
    this.richTextBox3.Text = "extra warm weiß";
    this.richTextBox4.Text = "8 Watt";
    this.richTextBox5.Text = "Ja";
    this.richTextBox6.Text = "100 Ra";
    this.richTextBox7.Text = "Paulmann Licht GmbH";
    this.richTextBox8.Text = "40 Lumen";
    this.richTextBox9.Text = "https://de.paulmann.com/";
    this.richTextBox10.Text = "128.08";

    this.pictureBox1.Image = Image.FromFile("../..\Bilder\KeinBildVorhanden.png");
    this.pictureBox2.Image = Image.FromFile("../..\Bilder\Gluehlampe_Paulmann_E27.jpg");

    return;
}
```

Listing 3: Setzen der Eigenschaften der Glühlampe im Code

Da der Hersteller keine LVK für die Glühlampe angeboten hat, wird das Bild „KeinBildVorhanden.png“ an dieser Stelle der Benutzeroberfläche angezeigt. Diese Nutzerfreundlichkeit soll helfen, die Qualität des vom Anwender erlebten Umgangs mit der Software zu erleichtern. Dem Benutzer wird die Information gegeben, dass bei dieser Auswahl an dieser Stelle kein Bild vorhanden ist. [20]

```
private void btn_Uebernehmen_Click(object sender, EventArgs e)
{
    /* Kopiere Parameter für Gui1 */
    if (cb_AuswahlLeuchten.Text == "Glühlampe E27")
    {
        Storage.Leuchtmittel_Typ = "Glühlampe";
        Storage.Leuchtmittel_Farbwiedergabe = 100;
        Storage.Leuchtmittel_Watt = 8;
        Storage.Leuchtmittel_Nutzlichtstrom = 40;
        Storage.Leuchtmittel_Abstrahlwinkel = 120;
    }

    if (cb_AuswahlLeuchten.Text == "LED Einbaustrahler")
    {
        Storage.Leuchtmittel_Typ = "LED";
        Storage.Leuchtmittel_Farbwiedergabe = 80;
        Storage.Leuchtmittel_Watt = 6;
        Storage.Leuchtmittel_Nutzlichtstrom = 640;
        Storage.Leuchtmittel_Abstrahlwinkel = 38;
    }

    this.Close();

    return;
}
```

Listing 4: Übergabe der Parameter des gewählten Leuchtmittels



Listing 4 stellt das Übergeben der Parameter eines Leuchtmittels nach Auswahl der Leuchte oder Lampe an die statischen Variablen dar, sobald auf die Schaltfläche „Übernehmen“ geklickt wurde. Nach dem Programmierungs-Prinzip Interface Segregation Principle [ISP] der SOLID-Prinzipien werden die Funktionen in jeweils eine Methode der Klasse „LampenWahl“ geschrieben. Damit wird nur die Funktionalität an das aufrufende Modul zu übergeben, die es benötigt. [22, S. 94ff.]

Dem Benutzer wird die gewählte Leuchte oder Lampe wieder angezeigt, wenn er das Fenster erneut über die Schaltfläche „Wähle Lampe/Leuchte“ der Hauptansicht anklickt.

Diese Iteration in der Entwicklungsarbeit ist eine Erweiterung des im vorherigen Unterkapitel beschriebenen Schrittes. Die statischen Parameter zu den Lampen wurden durch eine dynamische Auswahl über die Benutzeroberfläche ersetzt.

### 6.3. Fenster im Raum hinzufügen

Um den TQ in die Lichtplanung einbeziehen zu können, muss es dem Benutzer möglich sein, Fenster eingeben zu können. Das soll wie bereits bei der Auswahl der Lampen über ein eigenes Fenster erfolgen. Damit soll die Anwendung eine übersichtliche Darstellung für den Nutzer gewährleisten.

#### Ein Fenster

Zur Erleichterung der Implementierung soll zunächst nur ein Fenster im Raum vorhanden sein. Basierend auf Abbildung 24 kann Formel 4 aufgestellt werden.

$$E_{\text{lokal}} = \frac{E_{\text{außen}} * TQ}{100}$$

Formel 4: Berechnung der Tiefe des Einflusses von Sonnenlicht

Wie bereits im Konzept definiert, wird  $E_{\text{außen}}$  mit einer mittleren Beleuchtungsstärke von 10.000 Lux angenommen. TQ nimmt entsprechend Abbildung 24 nach jedem Meter ab und ist von der Höhe des Fensters ab Boden abhängig. Der Wert für TQ wird aus dem Diagramm abgelesen und kann pro Meter berechnet werden. Ab einem TQ von 2,7% ist dieser Bereich zu dunkel für die Erfüllung der Sehaufgabe. Es wird ein neuer Bereich im Gesamtraum definiert, für den anschließend dieselbe Berechnung wie im vorherigen Unterkapitel beschrieben stattfindet. Es werden auf der Benutzeroberfläche nur die Anzahl und Leistung der Lampen für diesen dunklen Bereich angegeben.

Mit dem Fenster muss der Benutzer angeben, ob es an der Längs- oder an der Breitseite des Raumes liegt. Damit wird die notwendige Beleuchtung im neuen dunklen Bereich im Raum berechnet.

### Mehrere Fenster

Da ein Raum mehr als nur ein Fenster aufweisen kann, muss es dem Benutzer möglich sein, alle Fenster eingeben zu können. Dies soll zunächst durch die in Abbildung 25 dargestellte Tab-Schaltfläche realisiert werden.

Es können die Länge, Breite und Höhe ab Boden des Fensters nach Himmelsrichtung geordnet angegeben werden. Bei der Höhe darf die Fensterlänge nicht mit eingerechnet werden. Es muss zusätzlich angegeben werden, ob das Fenster auf der Längs- oder Breitseite des Raumes liegt.

Die Berechnung wird sehr komplex. Der Benutzer muss jedes Mal die Höhe ab Boden und Länge des Fensters getrennt eingeben. Es ist auch möglich, dass der Benutzer die Seiten falsch angibt. So können beispielsweise die Fenster in drei Himmelsrichtungen an drei Längsseiten vorhanden sein.

Um das zu umgehen und die Benutzeroberfläche einfacher zu gestalten, erfolgt die Eingabe der Fenster in einer eigenen Ansicht, die der Benutzer über die Schaltfläche „Wähle Fenster“ erreichen kann, wie sie im Anhang auf Abbildung 40 zu sehen ist. Abbildung 29 stellt die neue Eingabemaske dar. Es kann übersichtlich pro Himmelsrichtung die Anzahl der Fenster, die Breite und Höhe ab Boden eingegeben werden. Der Benutzer muss nur noch für die Nord-Seite angeben, auf welcher Seite sich die Fenster befinden.

	Anzahl Fenster	Fenster-Breite	Fenster-Höhe (ab Boden)	
Nord-Seite	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	Welche Seite? ▾  Übernehmen  Abbrechen
Ost-Seite	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	
Süd-Seite	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	
West-Seite	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	

Abbildung 29: Eingabe der Maße und Position der Fenster [16]

Basierend auf der Angabe der Nord-Seite werden die weiteren Positionen von Ost-, Süd- und West-Seite von der Anwendung errechnet. Mit der Implementierung einer Fallunterscheidung nach Himmelsrichtung kann nun auf dem zuvor beschriebenen Schema mit einem Fenster aufgebaut werden.

Abbildung 30 stellt die Berechnung schematisch mit zwei Fenstern dar.

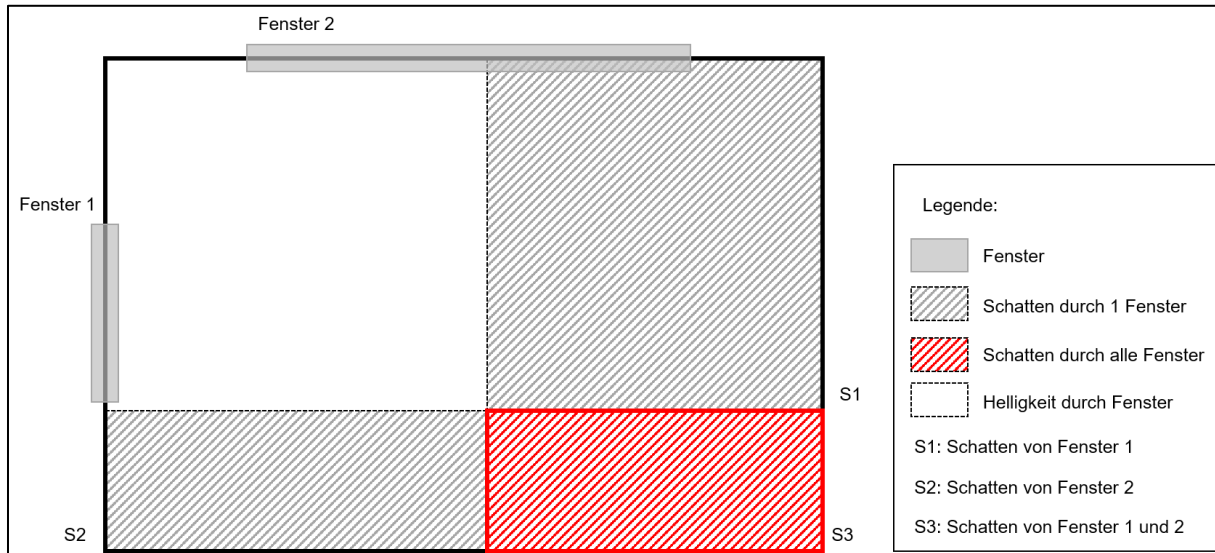


Abbildung 30: Schematische Schattenbildung im Raum mit zwei Fenstern [16]

Es werden zunächst die Fenster der Längs- oder Breitseite entsprechend der Benutzereingabe zur Nord-Seite ausgerichtet. Mit Formel 4 wird errechnet, ob und wo der TQ unter drei Prozent fällt. Dieser neue Bereich im Gesamtraum bleibt mit jedem Fenster gleich oder wird kleiner. Am Ende wird mit diesem Bereich, wie bei einem Fenster zuvor beschrieben, die Anzahl der notwendigen Lampen und deren Gesamtleistung berechnet und ausgegeben.

Da diese Berechnung durch Fehler in der Programmierung nicht realisiert werden konnte, wurde hierfür ein neues Konzept erstellt. Anstatt der Berechnung mit einem rechteckigen Teilbereich im Raum wird nun, basierend auf Ausrichtung der Fenster jeweils die Länge oder Breite des Raumes behalten oder wird verringert. Listing 5 stellt dies exemplarisch für die Nord-Seite dar. Danach wird der neue, rechteckige Raum errechnet.

```
if (0 != Storage.Fenster_Anzahl_Nord)
{
    /* Berechne Lichteinfluss-Tiefe auf Nord-Seite */
    if (Storage.FensterSeiteNorden.Equals("Längsseite"))
    {
        raumtiefeNord = (laengeRaum -
            Berechne_Tiefe_Einfluss_Sonnenlicht(laengeRaum, 10000));
    }
    if (Storage.FensterSeiteNorden.Equals("Breitseite"))
    {
        raumtiefeNord = (breiteRaum -
            Berechne_Tiefe_Einfluss_Sonnenlicht(breiteRaum, 10000));
    }
}
```

Listing 5: Berechnung der Lichteinfluss-Tiefe für die Nord-Seite

### 6.4. Darstellung des Raumes für den Benutzer mit Eingabe-Parametern

Eine Visualisierung des erstellten Raumes mit den Lampen soll dem Benutzer grafisch die Aufteilung der Lampen zeigen.

#### FreeCAD

Die Anwendung FreeCAD soll die Parameter des Raumes und der Anordnung der Lampen von der C# Anwendung über ein Python-Skript empfangen und in einer 3D Ansicht visualisieren. Der Export der Datei in ein CAD-Format ist möglich.

Dass die skriptbasierte Erzeugung einer solchen 3D Ansicht mit Rechtecken und Kugeln möglich ist, wurde über die Python-Konsole von FreeCAD erfolgreich getestet. Jedoch ist die Erzeugung über ein Python -Skript, das die Python-basierten FreeCAD-Bibliotheken einbindet nicht gelungen. Es tritt dabei immer ein Fehler im eingebundenen Modul „FreeCAD“ oder dem aktiven FreeCAD-Dokument auf. Es ist nicht möglich, die Anwendung FreeCAD über das Skript zu öffnen.

#### Roomle

Mit dem Fehlschlagen der Implementierung von FreeCAD wurde eine neue Möglichkeit zur Visualisierung gesucht. Mit der Anwendung „Floorplanner“ des Unternehmens Roomle aus Österreich können Räume webbasiert erstellt und mit Möbeln eingerichtet werden. Die Räume können 2D, 3D und mit einer Augmented Reality [AR] Ansicht betrachtet und über einen Link geteilt werden. Mit dem erstellten Raum können Angebote und Käufe direkt über die Webseite eingebundener Hersteller abgewickelt werden. [23]

Das Erstellen und Teilen eines Raumes kann zunächst ohne Anmeldung bei Roomle erfolgen. Die Erstellung und Einrichtung des Raumes erfolgt intuitiv. Abbildung 31 stellt den exemplarisch erstellten Raum einer Küche mit zwei Türen und einer Seite mit Glastüren dar.

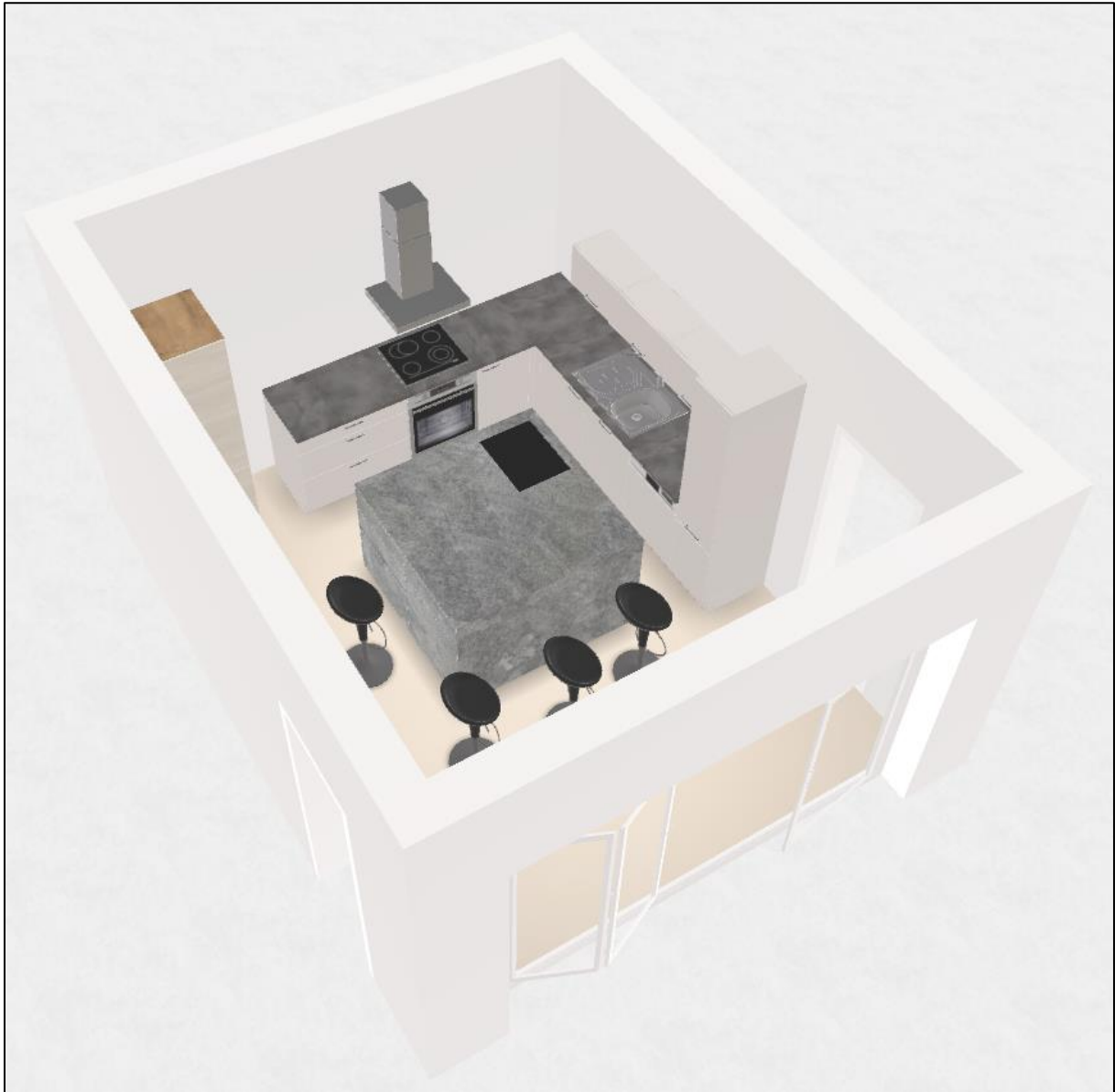


Abbildung 31: Exemplarisch erstellter Raum mit Fenstern und Möbeln einer Küche [16]

Mit dem eingerichteten Raum ist die Generierung einer Tageslicht-abhängigen Steuerung möglich. Durch die Angabe der Arbeitsorte, des Essplatzes, der Beschaffenheit des Inventars und der Raumbegrenzungsflächen, sowie die Angabe von Türen und Fenstern geben genauere Parameter an, um eine gute Beleuchtung durch die Berechnung von notwendigen Beleuchtungsstärken und lokalen Leuchtdichten zu schaffen.

Die Anwendung bietet nur zwei Möglichkeiten, den Raum zu teilen. Einerseits über einen Link, der auf die Ansicht des Raumes im Webbrowser verweist und darüber bearbeitet werden kann. Andererseits kann der Raum als iframe in ein Hypertext Markup Language [HTML]-Dokument eingebettet werden.

Die verwendete Programmiersprache C# bietet ein Modul zur Implementierung eines Webbrowsers an. Dieser basiert auf dem Internet Explorer. Das Laden der Webseite des Links ist über den Internet Explorer nicht möglich.

Da der Webbrowser in C# nicht gewechselt werden kann, soll die Bibliothek „CefSharp“ zur Implementierung eines Webbrowsers in C# verwendet werden. CefSharp basiert auf dem Chromium Embedded Framework und ist eine quelloffene Version des Browsers Google Chrome. [24]

Durch Kompilierfehler des Moduls CefSharp kann die Bibliothek nicht in die Anwendung eingebunden werden.

### **Python QtWebKit**

Da die Implementierung über die Erweiterung von C# mit CefSharp nicht möglich ist, soll die Idee eines Webbrowsers weiterverfolgt werden. Über das Python-basierte Modul QtWebKit der Bibliothek PyQt5 soll ein Browser erstellt werden, mit dem die Webseite von Roomle angezeigt werden kann.

Mit der Verwendung von nicht kompatiblen Versionen von Python und Qt konnten die Kompilierfehler nicht behoben werden. PyQt5 unterstützt das QtWebKit nicht mehr.

Damit konnte keine Visualisierung zur Anzeige auf der Benutzeroberfläche der Anwendung erstellt werden. Anstelle einer 2D oder 3D Ansicht des Raumes wurde der Anwendung mit dem Klicken auf die Schaltfläche „Zeige Raumansicht“ ein exemplarisches Bild hinzugefügt. Es ist ein Screenshot der mit Floorplanner erstellten Küche in 3D Ansicht.

### **6.5.Implementierung einer Funktionalität zum Tageslicht-abhängigen Dimmen**

Da die vorherige Implementierung nicht erfolgreich beendet werden konnte, kann die nachfolgende Iteration nach dem Entwicklungsmodell nicht realisiert werden. Ohne nähere Angaben zu den nachfolgenden Aspekten, ist es nicht möglich, eine effektive Beleuchtungssteuerung im Raum zu realisieren.

- Beschaffenheit der Wände, des Fußbodens und der Möbel im Raum
- Farbe aller Materialien im Raum
- Arbeitsplätze, Essplätze, Entspannungsplätze
- Türen und Fenster mit Tageslichteinfall
- Maße der Möbel und Platzierung im Raum
- Nutzung von Bereichen des Raumes

Besonders der letzte Punkt ist wichtig, da ein Raum mehrere Zonen aufweist. Diese Zonen können Arbeitsorte wie ein Schreibtisch sein, an dem eine hellere Ausleuchtung als in Durchgangszonen notwendig ist.

Neben der Sehleistung ist die Ansteuerung im Raum wichtig, um die verschiedenen Leuchtdichten dem Auge anzupassen. Wie bereits beschrieben, lassen zu starke Unterschiede das Auge schneller ermüden. Zu geringe Unterschiede lassen das Raummilieu langweilig wirken. Ist die Beleuchtung zu hell, ist der Organismus wie bereits erwähnt, überfordert. Zu dunkel lässt das Raummilieu entweder im Dämmerungszustand erscheinen oder führt sogar zu Angstgefühlen. [6, S. 202f.]

### **6.6. Software-Architektur**

Eine Architektur in der Software-Entwicklung beschreibt die Struktur eines Systems durch Komponenten und deren Beziehung. [25, S. 16] Die Architektur ermöglicht die effektive und zielgerichtete Kommunikation über ein System, indem es einen Überblick verschafft. Damit soll sie die Lebensdauer des beschriebenen Systems verlängern. Es werden grundlegende Fragen zur Entwicklung und Implementierung beantwortet. So sollen Konzepte und eingesetzte Technologien, die Implementierung und die Komponenten beschreiben werden. [25, S. 141ff.]

Um die Architektur der vorliegenden Arbeit zu beschreiben, wird der Code mit der statischen Code-Analyse der Anwendung „Understand“ von SciTools überprüft und visualisiert. [26]

Um die Architektur übersichtlich darzustellen, soll Abbildung 32 die abstrakte Aufruf-Hierarchie nach Klassen wiedergeben.

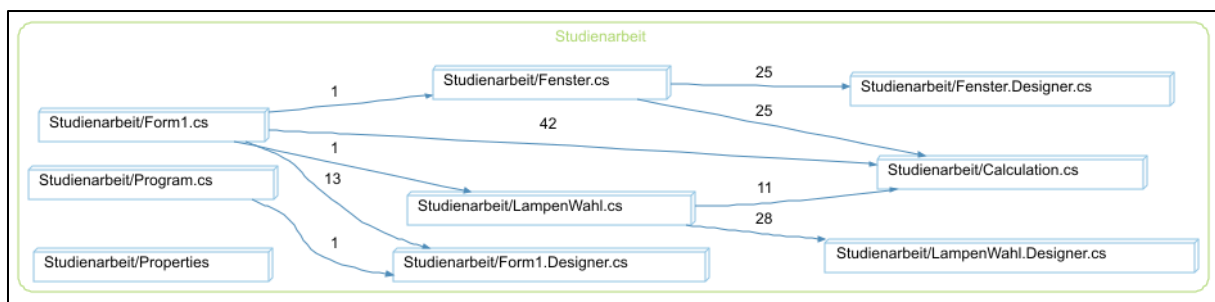


Abbildung 32: Darstellung der Architektur nach Klassen [16]

Im Projekt „Studienarbeit“ befindet sich die Main-Methode in der Klasse „Program“. Diese ruft „Form1.Designer.cs“ auf, die die Beschreibung der Benutzeroberfläche für die initiale Ansicht enthält. Bei Interaktionen mit dem Nutzer wird die Klasse „Form1“ aufgerufen. Diese ruft entweder interne Methoden auf, nutzt die Klasse „Calculation“ oder ruft, wie in den vorherigen Unterkapiteln beschrieben, die Eingabemasken für die Fenster mit „Fenster“ oder die Lampen mit „LampenWahl“ auf. Diese greifen ebenso auf ihre Beschreibungen der Benutzeroberfläche zurück. Die Zahl auf den Pfeilen beschreibt die Häufigkeit, wie viele Methodenaufrufe zwischen den Klassen bestehen.

Da keine übersichtliche Darstellung der Aufruf-Hierarchie der Methoden möglich ist, soll Abbildung 33 einen exemplarischen Ausschnitt zeigen.



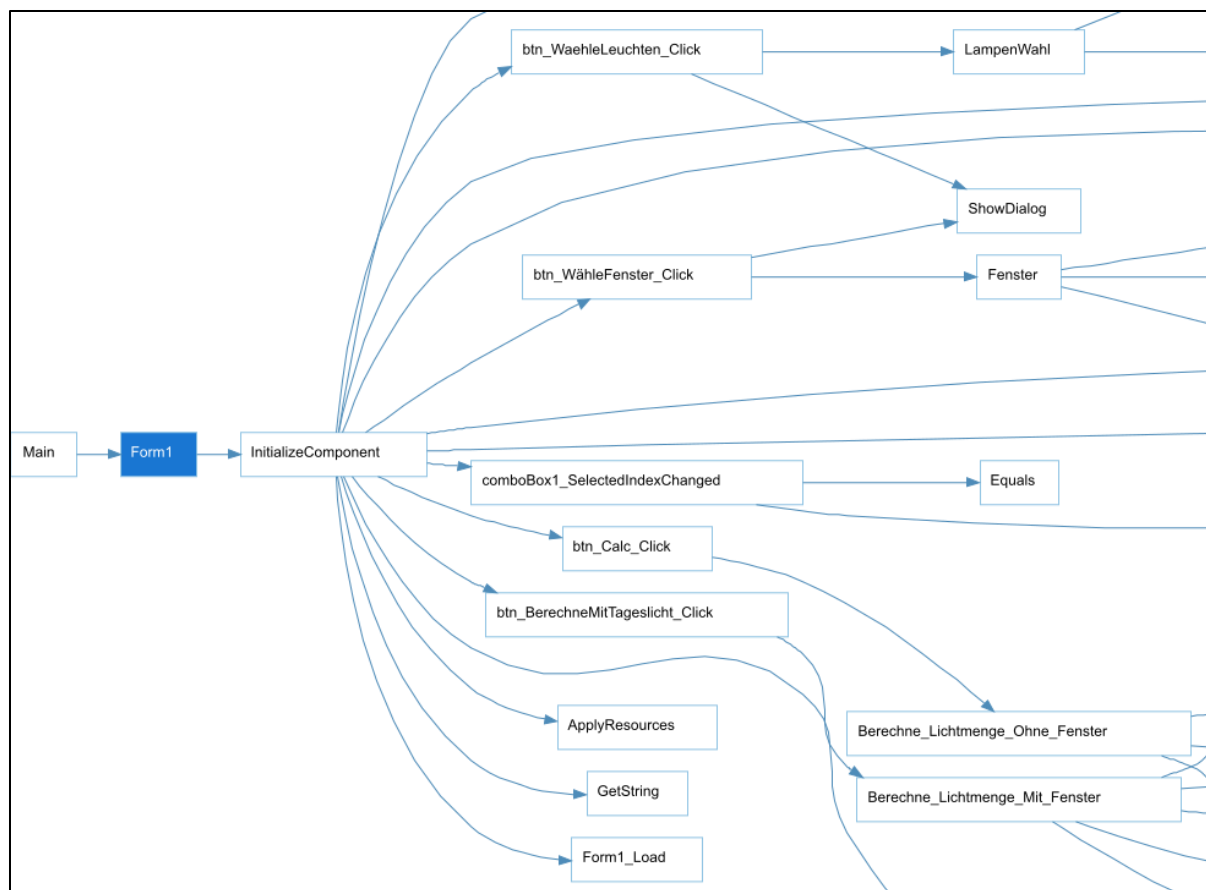


Abbildung 33: Ausschnitt der Aufruf-Hierarchie ab Main [16]

Wie bereits beschrieben ruft `Main` in der Klasse „Program“ die Klasse „Form1“ auf. Nachdem die Benutzeroberfläche geladen wurde, sind die in der Abbildung dargestellten Methoden für eine Interaktion mit dem Benutzer vorhanden. Beispielsweise kann über die Methode „`btn_WaehleLeuchten_Click`“ die Klasse „`LampenWahl`“ aufrufen, die selbst weitere Methoden aufruft.

## 7. Verifikation und Fazit

Die Verifikation beinhaltet die Überprüfung, inwieweit die gestellten Anforderungen umgesetzt werden konnten. Nach dem gewählten Entwicklungsmodell soll nach der Fertigstellung jeder Iteration eine Überprüfung durchgeführt werden.

### 7.1. Analyse der Anforderungsumsetzung

Die Analyse der Anforderungsumsetzung soll die Implementierung der an die Entwicklungsarbeit gestellten Forderungen überprüfen. Zur Konzeption und Entwicklung einer Desktop-Anwendung als Steuerung von Lampen im privaten Wohnraum sind die folgenden Aspekte als Anforderung zu sehen:

Tabelle 3: Analyse der Anforderungsumsetzung

Anforderung	Umsetzung
Einbinden verschiedener Wohnräume	✓
Einbinden verschiedener Lampen	✓
Bestimmen der notwendigen Lampenanzahl durch die Anforderung der Beleuchtungsstärke des jeweiligen Raums	✓
Einbeziehen des Tageslichteinfalls	✓
Steuerung der Beleuchtungsstärke im Raum	✗

### 7.2. Verifikation

Die oberen vier Anforderungen in Tabelle 3 konnten realisiert werden. Basierend auf dem Fehlschlagen des Implementierens einer Anwendung zur Visualisierung des Raumes mit den Möbeln, konnte die Steuerung der Beleuchtungsstärke nicht realisiert werden.

Eine Verifikation des Einbindens verschiedener Wohnräume und Lampen erfolgt über die Ansicht der Benutzeroberfläche. Wenn die Parameter angezeigt werden, ist die Basis für die nachfolgende Anforderung gegeben.

Das Bestimmen der notwendigen Lampenanzahl durch die Anforderung der Beleuchtungsstärke des gewählten Raums kann durch das Nachvollziehen von Beispielen aus [5] und durch das Verändern der Maße der Räume nachvollzogen und verifiziert werden. Dabei werden realistische Werte für die Anzahl des gewählten

Lampentyps erwartet. Mit der Wahl einer LED, die einen Strahlungswinkel von etwa 38° hat, muss der Raum mehr Lampen aufweisen, als bei der Wahl einer Glühlampe mit einem Strahlungswinkel von etwa 120°, um dieselbe Beleuchtungsstärke zu erreichen.

Exemplarisch muss der Raum bei der LED in Quadrate von 1,3m<sup>2</sup> aufgeteilt werden. Für jedes Quadrat wird eine Lampe benötigt.

Durch das Einbinden des TQ soll sich die Anzahl der Lampen im Raum verringern. Wie bereits bei der Entwicklung und Implementierung gezeigt, soll auch hier der Raum in Quadrate eingeteilt werden.

### **7.3. Fazit**

Insgesamt bietet die Anwendung bereits die grundlegenden Funktionalitäten zur Beleuchtung eines privaten Wohnraumes. Mit der einfachen Berechnung wird eine Grundbeleuchtung gegeben, die ein Innenraum aufweisen sollte. Durch die Einbeziehung des TQ bietet die Anwendung eine Basis für die Erstellung eines Beleuchtungskonzepts einer Steuerung bei Tag.

Die Benutzeroberfläche der Anwendung ist einfach gehalten, um dem Nutzer die Bedienung zu erleichtern. Damit ist die Software auch architekturtechnisch auf Erweiterungen ausgelegt. Es können mit geringem Aufwand weitere Räume und Lampen hinzugefügt werden. Mit der Implementierung einer Anwendung zur Visualisierung des Raums kann die Qualität der Nutzerfreundlichkeit gesteigert werden und lässt das Programm ansprechender aussehen.

Abschließend lässt sich sagen, dass die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Anwendung nicht nur von einem Fachmann bedient, sondern durch die oben genannten Gründe auch von einem Nichtexperten der Beleuchtung verwendet werden kann.

## **8. Ausblick**

Die weiteren Entwicklungspotentiale und Möglichkeiten der Anwendung sollen im Ausblick aufgezeigt werden, welche Verbesserungs- und Entwicklungsmöglichkeiten noch am entwickelten Programm bestehen.

### **Verbesserungsmöglichkeiten**

Wenn der Ansatz einer webbasierten Darstellung des Raumes weiter verfolgt werden soll, ist zu überlegen, ob die Anwendung auf eine HTML-basierte Version umgeschrieben werden soll. Dazu können die Windows Presentation Foundation [WPF] des .NET-Frameworks von Microsoft verwendet oder mit der Skriptsprache JavaScript für Anwendungen im Webbrowser gearbeitet werden. Durch diese Umstellung kann die Anwendung einfacher als zentrale Steuerung im Wohnraum oder –gebäude agieren, da somit ein webbasierter Zugriff von verschiedenen mobilen Endgeräten wie einer Statusanzeige im Flur oder einem Mobiltelefon ermöglicht wird.

Über diese Visualisierung kann die Eingabemaske für die Maße und Orientierung der Fenster im Raum entfallen. Die vorgestellte Anwendung Roomplanner von Roomle bietet eine große Anzahl von Möglichkeiten für die einfache Erstellung und Ansicht eines Raumes in 2D, 3D und AR.

Mit dem Erstellen einer Datenbank wird das Angebot für die Auswahl der Lampen erweitert. Die Funktionsfähigkeit des dynamischen Einbindens über die Webseite von Herstellern wird von der Anwendung ReluxDesktop bewiesen. Der Vorteil liegt hierbei in der Vermeidung der regelmäßigen und zeitaufwändigen Pflege von Datenbeständen.

### **Weitere Entwicklungsmöglichkeiten**

Benutzung der Steuerung soll über Sensoren erfasst werden, was effizienter als statische Eingabe von Gewohnheiten des Nutzers ist. Einsatzmöglichkeiten von Sensoren bei der Beleuchtung sind unter anderem Bewegungs- und Präsenzmelder, Zeit-Logik oder eine Wetterstation. Schalt- und Dimmaktoren sollen nur als Ersatz für die manuelle Nachregelung verwendet werden, wie das Beispiel der Abbildung 39 im Anhang zeigt. [4, S. 56ff.]

Die Höhe des Raumes kann bei einer Beleuchtungssteuerung miteinbezogen werden, um eine feinere Abstimmung der Lampen und Lichtstärken zu ermöglichen. Durch den

Abstand zwischen Anbringung der Lampe und dem zu bestrahlenden Objekt wird die Beleuchtungsstärke und damit auch das Raummilieu bestimmt. [5, S. 25]

Aktuell wird die Fensterbreite nicht miteinbezogen. Mit dem Einbeziehen der Fensterbreite können auch dunkle Ecken im Raum errechnet und mit einer Lampe versehen werden. Nur mit der vollständigen Ausleuchtung des gesamten Raumes werden hohe Kontraste und dunkle Ecken vermieden. [6, S. 112ff.]

Mit der Wahl des Raumes nach der Himmelsrichtung im Gebäude und seiner Ausrichtung nach Tageslicht und Fensterflächen haben Studien bereits bewiesen, dass sich Zirkulations- und Durchgangszonen mit künstlicher Beleuchtung und Arbeitsorte mit viel Beleuchtung und Belichtung gut auf das gesamte Raumklima auswirken. [1, S. 147ff.]

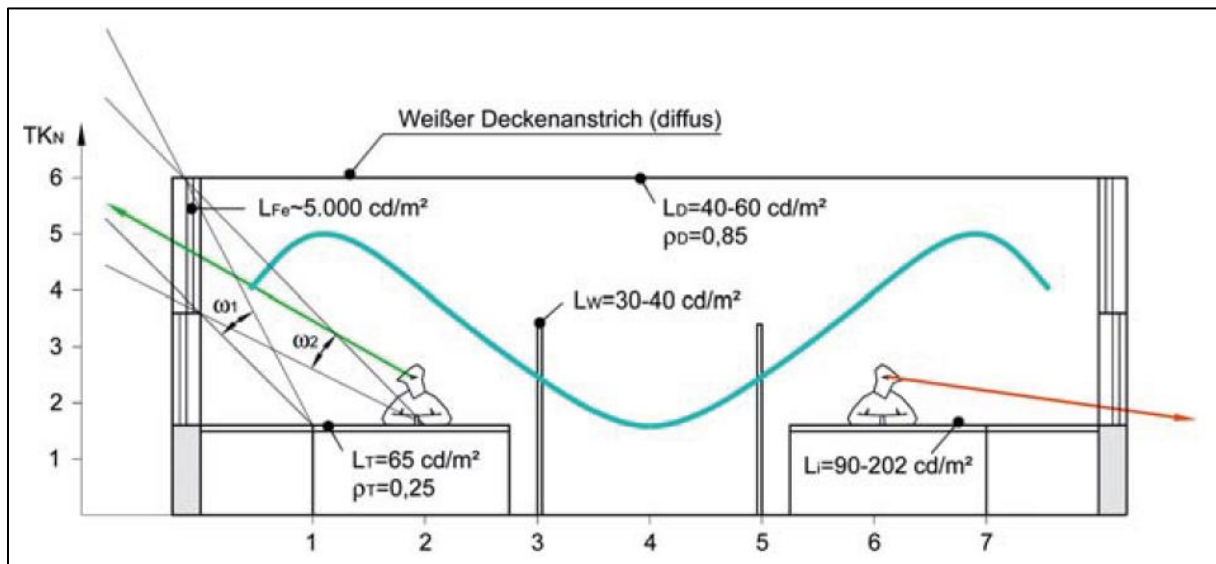


Abbildung 34: TQ-Verlauf ohne Lichtumlenksystem [5, S. 202]

Der Einsatz von Tageslicht-Lenkungen soll Tageslicht blendfrei in den Raum eindringen lassen und dringt dabei mit einem konstanteren TQ tiefer in den Raum ein. Abbildung 35 stellt im diesen Einsatz Vergleich zu Abbildung 34 ohne Lichtlenksystem schematisch dar. Ohne Lichtlenksystem variiert der TQ sehr stark im Raum.

Dieses System kann auch in fortschrittlichen Lösungen zur Temperaturregelung im Raum beitragen. [1, S. 147ff., 5, S. 201f.,]

Die Angabe von Tageslicht-Lenkungen, Gardinen und Vorhängen ist in keiner der vorgestellten Beispiel-Anwendungen ReluxDesktop und DIALux evo möglich. Da diese

häufiger in Wohngebäuden verwendet werden, kann sich eine solche Integration in die Anwendung positiv auf die Qualität des Nutzungserlebnisses auswirken.

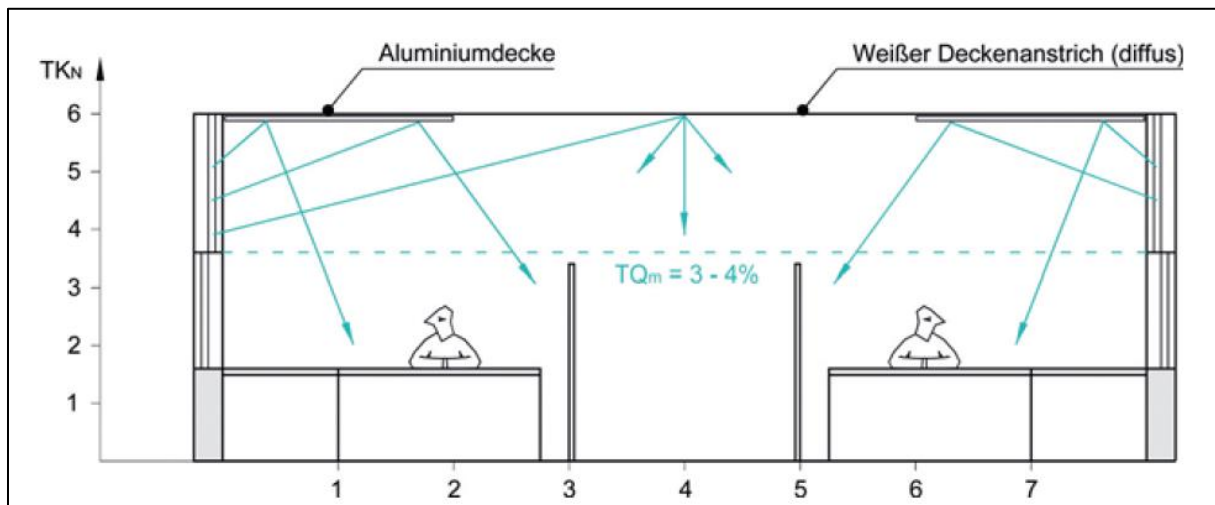


Abbildung 35: TQ-Verlauf mit Lichtumlenksystem [5, S. 202]

## Literaturverzeichnis

---

- [1] Ulmann, P. (2011). Licht: Beleuchtung und Gestaltung - Wie aus Licht eine gute Beleuchtung entsteht und was wir darüber wissen sollten. Projekte-Verlag Cornelius GmbH.
- [2] Philippe P. Ulmann (2015). Licht und Beleuchtung – Handbuch und Planungshilfe. DOM publishers.
- [3] <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/stromverbrauch-der-haushalte/>, letzter Zugriff: 20.04.2021
- [4] Heinle, S. (2016). Heimautomation mit KNX. Rheinwerk Verlag GmbH.
- [5] Bartenbach,, C., Witting, W. (2009). Handbuch für Lichtgestaltung – Lichttechnische und wahrnehmungspsychologische Grundlagen. Springer-Verlag.
- [6] Holfeld, M. (2013). Licht und Farbe – Planung und Ausführung bei der Gebäudegestaltung. Beuth Verlang GmbH.
- [7] Schuster H.G. (2006). Tageslichtsysteme im Spiegel der Nutzer – Zur Nutzerakzeptanz von Sonnenschutz- und Lichtlenksystemen in Büroräumen. Universität Dortmund.
- [8] Arena, S. (2013). Licht und Beleuchtung – Licht verstehen, mit Licht gestalten – Grundlagen für Fotografen. dpunkt.verlag GmbH.
- [9] <https://www.isolicht.com/led-lumen-lux>, letzter Zugriff: 09.05.2021
- [10] <http://www.licht-plattform.org/>, letzter Zugriff: 09.05.2021
- [11] Harke, W. (2004). Smart Home – Vernetzung von Haustechnik und Kommunikationssystemen im Wohnungsbau. C. F. Müller Verlag.
- [12] <https://www.compusoftgroup.com/>, letzter Zugriff: 06.05.2021
- [13] <https://www.dialux.com/de-DE/>, letzter Zugriff: 06.05.2021
- [14] <https://relux.com/de/>, letzter Zugriff: 06.05.2021
- [15] Riley, M. (2012). Das Intelligente Haus – Heimautomation mit Arduino, Android und PC. O'Reilly Verlag GmbH & Co. KG.
- [16] Fleig, M. (2021). Eigene Darstellung.

- [17] <https://www.freecadweb.org/>, letzter Zugriff: 08.05.2021
- [18] <https://my.knx.org/>, letzter Zugriff: 08.05.2021
- [19] <https://ledtipps.net/abstrahlwinkel/>, letzter Zugriff: 09.05.2021
- [20] Hitzges, A. (2016). Usability als wesentlicher Erfolgsfaktor für Unternehmenssoftware. Springer-Link. Artikel 3/2016
- [21] <https://www.brumberg.com/de/>, letzter Zugriff: 08.05.2021
- [22] Martin, R. (2018). Clean Architecture – A Craftman’s Guide to Software Structure and Design. Pearson Education, Inc.
- [23] <https://www.roomle.com/de/>, letzter Zugriff: 08.05.2021
- [24] <https://cefsharp.github.io/>, letzter Zugriff: 08.05.2021
- [25] Starke, G. (2015). Effektive Software-Architekturen – Ein praktischer Leitfaden. Carl Hanser Verlag.
- [26] <https://www.scitools.com/>, letzter Zugriff: 09.05.2021
- [27] <https://www.weltderphysik.de/gebiet/materie/halbleiter/oled/>, letzter Zugriff: 09.05.2021
- [28] Elektropraktiker (2003). Beleuchtungstechnik: Neue Norm für die Planung der Innenraumbeleuchtung – Teil 1: Änderung bei der Planung mit DIN EN 12464-1 – neue Begriffe. Berlin 57, 12/2003.
- [29] Fleig, M. (2021). KNX-basiertes System zur intelligenten Gebäudesteuerung der Firma Bernhard Stern GmbH Präzisionsdrehteile.
- [30] Ousterhout, J. (2018). A Philosophy of Software Design. Yaknyam Press.



## Anhang

Leuchtenbaustoffe	Reflexionsgrad	Farbanstriche	Reflexionsgrad
Aluminium, Reinst-, hochglänzend*	0,70 .. 0,85	Reinweiß	0,80...0,90
Aluminium, eloxiert, matt-hochglanz	0,75 .. 0,87	Hellgrau	0,40...0,60
Aluminium, poliert*	0,65 .. 0,75	Mittelgrau	0,25...0,35
Aluminium, matt*	0,55 .. 0,65	Dunkelgrau	0,10...0,15
Alanod-MIRO, eloxiert+MIRO Verdelg.	0,95	Hellblau	0,40...0,50
Alanod MIRO-SILVER+MIRO SILV.-Verdelg.	0,98	Dunkelblau	0,15...0,20
Aluminiumanstrich, matt	0,50 .. 0,65	Hellgrün	0,45...0,55
Chrom, poliert	0,60 .. 0,70	Dunkelgrün	0,15...0,20
Email, weiß	0,65 .. 0,75	Hellgelb	0,60...0,70
Lack, reinweiß	0,80 .. 0,85	Braun	0,20...0,30
Kupfer, hochpoliert	0,60 .. 0,70	Rosa	0,45...0,55
Messing, hochpoliert	0,70 .. 0,75	Dunkelrot	0,15...0,20
Nickel, hochpoliert	0,50 .. 0,60		
Papier, weiß	0,70 .. 0,80	<b>Naturstoffe</b>	<b>Reflexionsgrad</b>
Silber hinter Glas, als Spiegel	0,80 .. 0,88	Erde (feucht, kultiviert)	ca. 0,07
Silber, hochpoliert	0,90 .. 0,92	Gras (dunkelgrün)	ca. 0,06
		Vegetation (Mittelwert)	0,25
		Schnee (frisch)	ca. 0,75
		Schnee (alt)	ca. 0,65
		menschliche Haut(ungebräunt)	ca. 0,45
		Samt (schwarz)	0,005...0,04
<b>Baukonstruktions-Materialien</b>	<b>Reflexionsgrad</b>		
Ahorn, Birke	ca. 0,6		
Eiche, hell, poliert	0,25 .. 0,36		
Eiche, dunkel, poliert	0,10 .. 0,15		
Holzfasen-Platten, creme	0,50 .. 0,60		
Granit	0,20 .. 0,25		
Kalkstein	0,35...0,55		
Marmor, poliert	0,30 .. 0,70		
Mörtel hell, Kalkputz	0,40 .. 0,45		
Verputz (Gips)	ca. 0,8		
Sandstein	0,20 .. 0,40		
Sperrholz, roh	0,25 .. 0,40		
Zement, Beton, roh	0,20 .. 0,30		
Ziegel, rot, neu	0,10 .. 0,15		

\* Der Reflexionsgrad von unbehandeltem Aluminium ist nicht stabil und kann sich in Laufe der Zeit erheblich verringern.

Abbildung 36: Reflexionsgrade verschiedener Materialien [6, S. 148]



Abbildung 37: Beispiel einer intelligenten Beleuchtungssteuerung mit KNX [29]

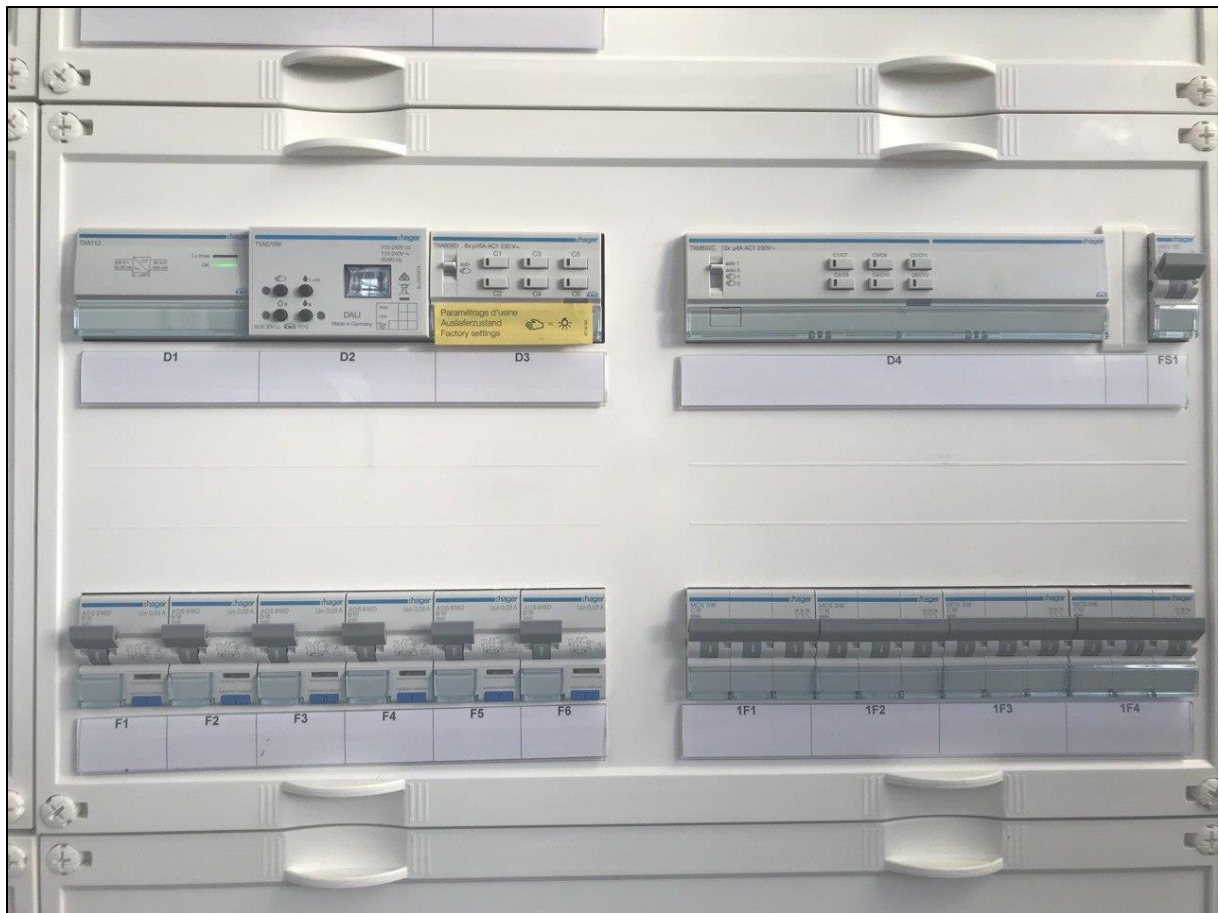


Abbildung 38: Beispiel einer intelligenten Beleuchtungssteuerung mit DALI [29]



Abbildung 39: Taster-Reihe für den manuellen Eingriff in das Gebäudeautomatisierungssystem [29]

The screenshot shows a software window titled "Studienarbeit" with standard Windows window controls (minimize, maximize, close). The interface is divided into a left sidebar with four sections and a large empty main area on the right.

- Maße des Raumes**: Contains two input fields: "Länge" (with a blue border) and "Breite", both followed by a unit "m".
- Nutzung des Raumes**: Contains a dropdown menu "Art" with the text "Wähle Raum-Art", an input field "Lichtmenge im Raum" with the value "500" and unit "lx", and an input field "Arbeitshöhe" with the value "0.80" and unit "m".
- Ausrichtung des Raumes**: Contains a button labeled "Wähle Fenster".
- Auswahl der Lampen**: Contains a button labeled "Wähle Lampe / Leuchte", an input field "Anzahl Lampen", and an input field "Leistung (Watt)".

At the bottom of the sidebar are three buttons: "Berechne mit Tageslicht", "Berechnen", and "Zeige Raumansicht".

Abbildung 40: Ansicht auf das initiale Fenster der Anwendung [16]