



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

## **Bachelorarbeit**

Sohail Karimi

### **Lichtfarbe und -temperatur:**

**Untersuchung der Auswirkungen von verschiedenen  
Lichtfarben und -temperaturen auf das Schlafverhalten  
und die Stimmung der Passagiere**

**Sohail Karimi**

**Lichtfarbe und -temperatur:**

**Untersuchung der Auswirkungen von  
verschiedenen Lichtfarben und -tempe-  
raturen auf das Schlafverhalten und die  
Stimmung der Passagiere**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Flugzeugbau  
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Werner Granzeier  
Zweitprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Alexander Frenkel

Abgabedatum: 11.10.2023

# Zusammenfassung

**Sohail Karimi**

## **Thema der Bachelorarbeit**

Lichtfarbe und -temperatur: Untersuchung der Auswirkungen von verschiedenen Lichtfarben und -temperaturen auf das Schlafverhalten und die Stimmung der Passagiere

## **Stichworte**

Licht, Beleuchtung, Lichtfarbe, Lichttemperatur, Lichtspektrum, Wellenlänge Farbtort, MacAdam Ellipsen, Chronotypen, Circadianer Rhythmus, Schlafverhalten, Schläfrigkeit, Melatonin, Wirkung von Licht, Melatonin-Suppression, Komfort, Wohlbefinden, Stimmung, Flugzeugkabine, Kabinenbeleuchtung, Langstreckenflug

## **Kurzzusammenfassung**

Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich mit den Auswirkungen unterschiedlicher Lichtfarben und -temperaturen auf das Schlafverhalten und die Stimmung von Passagieren in der Flugzeugkabine. Über eine systematische Literaturrecherche werden die Ergebnisse unterschiedlicher Studien präsentiert und diskutiert. Es geht hervor, dass blaues Licht im Bereich von 460 nm Wellenlänge den Schlaf am stärksten stört, während rotes Licht über 580 nm die geringsten Auswirkungen hat. Geringe Farbtemperaturen haben einen positiven Einfluss auf die Stimmung, hohe hingegen wirken sich negativ auf das Wohlbefinden aus.

**Sohail Karimi**

## **Title of the paper**

Light colour and temperature: Investigation of the effects of different light colours and temperatures on the sleeping behaviour and mood of passengers

## **Keywords**

Light, illumination, light color, light temperature, light spectrum, wavelength, chromaticity, MacAdam ellipses, chronotypes, circadian rhythm, sleep behavior, sleepiness, melatonin, effect of light, melatonin suppression, comfort, well-being, mood, aircraft cabin, cabin lighting, long-haul flight

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the effects of different light colors and temperatures on the sleeping behavior and mood of passengers in the aircraft cabin. Through a systematic literature search, the results of different studies are presented and discussed. It emerges that blue light in the 460 nm wavelength range is most disruptive to sleep, while red light above 580 nm has the least effect. Low colour temperatures have a positive effect on well-being, while high ones have a negative effect.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>ii</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>iv</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>v</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Hintergrund und Motivation .....	1
1.2 Aufbau der Arbeit .....	3
1.3 Zielsetzung der Arbeit .....	4
<b>2. Grundlagen</b> .....	<b>5</b>
2.1 Lichttechnische Grundlagen .....	5
2.1.1 Lichtphysikalische Größen .....	7
2.1.2 Lichtfarbe und -temperatur .....	9
2.1.3 Farbort .....	11
2.1.4 Farbwiedergabe .....	13
2.2 Chronobiologische und physiologische Grundlagen .....	15
2.2.1 Zwei-Prozess-Modell des Schlaf-Wach-Verhaltens .....	15
2.2.2 Melatonin .....	16
2.2.3 Serotonin.....	18
2.2.4 Herzratenvariabilität .....	18
2.2.5 Circadianes System .....	19
2.2.6 Chronotypen .....	20
2.3 Wirkung von künstlicher Lichtexposition .....	21
<b>3. Stand der Technik</b> .....	<b>24</b>
3.1 Beleuchtungsarten in Flugzeugkabinen.....	24
3.2 Ablauf von Langstreckenflügen .....	28
<b>4. Einfluss von Lichtfarbe und -temperatur auf das Schlafverhalten der Passagiere</b> .....	<b>31</b>
4.1 Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Lichtfarben und -temperaturen auf das Schlafverhalten .....	31
4.1.1 Studie I.....	31
4.1.2 Studie II.....	35
4.2 Literaturüberblick über die physiologische Wirkung des Lichts in Bezug auf das Schlafverhalten .....	40

<b>5. Bewertung des Einflusses von Lichtfarbe und -temperatur auf die Stimmung .....</b>	<b>41</b>
5.1    Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Lichtfarben und -temperaturen auf die Stimmung der Passagiere .....	41
5.1.1    Studie I.....	41
5.1.2    Studie II.....	47
5.2    Literaturüberblick über die Auswirkungen von Licht auf die Stimmung .....	50
<b>6. Diskussion .....</b>	<b>51</b>
6.1    Untersuchung des Einflusses von Licht auf das Schlafverhalten .....	51
6.2    Einfluss der Lichtfarbe und -temperatur auf die Stimmung .....	53
6.3    Empfehlung geeigneter Beleuchtungsszenarien je nach Flugphase.....	55
<b>7. Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>57</b>
<b>8. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>59</b>
<b>9. Selbstständigkeitserklärung.....</b>	<b>64</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der Flugzeugbeleuchtung nach [4] .....	2
Abbildung 2: Schematische Darstellung des Aufbaus der Arbeit .....	4
Abbildung 3: Bandbreite elektromagnetischer Strahlung mit Hervorhebung des sichtbaren Lichts [7].....	5
Abbildung 4: Schematische Darstellung der Lichtstärke und des Raumwinkels.....	7
Abbildung 5: Schematische Darstellung der Beleuchtungsstärke .....	8
Abbildung 6: Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte nach [7] .....	9
Abbildung 7: Schematische Darstellung des Planck'schen Hohlraum-Strahlers .....	10
Abbildung 8: Standard 1931 2° CIE-Farbdreieck aus dem OSRAM ColorCalculator .....	12
Abbildung 9: 1931 CIE-Farbdreieck mit abgebildeten MacAdam-Ellipsen aus dem OSRAM ColorCalculator.....	13
Abbildung 10: Melatoninspiegel in pg/ml über der regulären und circadianen Zeit [27] .....	17
Abbildung 11: Beispiel für ein RR-Intervall-Tachogramm nach [35] .....	19
Abbildung 12: Interaktionsdreieck der Lichtwirkung in Anlehnung an [56, 57] nach [4] .....	21
Abbildung 13: Kruithof-Diagramm mit Kennzeichnung von D 65.....	23
Abbildung 14: RGB-Farbmodell.....	25
Abbildung 15: Mood Lighting bei der American Airline (Boeing 2012) [64].....	26
Abbildung 16: Airspace LED-Beleuchtung (AIRBUS 2020) [65].....	27
Abbildung 17: jetlite App zur Überwachung der Kabinenbeleuchtung (jetlite 2023) [66].....	27
Abbildung 18: Beispielhafter Verlauf eines Langstreckenflugs.....	30
Abbildung 19: Subjektive Wachsamkeit während der Lichtexposition bei 420, 470 und 600 nm [70].....	34
Abbildung 20: Subjektive Wachsamkeit bei unterschiedlichen Photonendichten [70] .....	34
Abbildung 21: Zeitlicher Ablauf der Versuche [71] .....	37
Abbildung 22: Auswirkungen der Lichtexposition bei 460 nm, 550 nm und keinem Licht [71] .....	38
Abbildung 23: Auswirkungen auf die Körpertemperatur und die Herzfrequenz .....	39
Abbildung 24: Präferenz der Beleuchtung nach CCT und Beleuchtungsstärke im Arbeitsszenario [5].....	44
Abbildung 25: Einschätzung über Komfort und Präferenz für Entspannungsszenarien (a) und Arbeitsszenarien (b) [5] .....	45
Abbildung 26: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs [6].....	48
Abbildung 27: Einschätzung über Fröhlichkeit nach CCT und Aufgabentyp [6].....	49
Abbildung 28: Einschätzung über Begeisterung je nach CCT [6].....	49
Abbildung 29: Wellenlängenbezogene Melatonin-Erhaltungsfunktion [35].....	52
Abbildung 30: Schematischer Flugverlauf mit empfohlenen Beleuchtungseinstellungen .....	56

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung des Spektrums optischer Strahlung nach [4] .....	6
Tabelle 2: Farbwiedergabewerte nach DIN 6169-1 .....	14
Tabelle 3: Beispiele für Tätigkeiten und Räume für verschiedene Farbwiedergabestufen nach [9].....	14
Tabelle 4: Punkte der VAS zur Bewertung der Wachsamkeit und der Stimmung [70].....	33
Tabelle 5: Karolinska-Schläfrigkeitsskala [72].....	36
Tabelle 6: Studien zur Wirkung des Lichts in Bezug auf das Schlafverhalten und circadiane System .....	40
Tabelle 7: Tatsächliche verwendete CCT und korrespondierende CIE 1976 Koordinaten nach [5].....	42
Tabelle 8: Verwendete Fragen innerhalb der Studie [5].....	43
Tabelle 9: Überblick über die Literatur zum Einfluss des Lichts auf die Stimmung.....	50

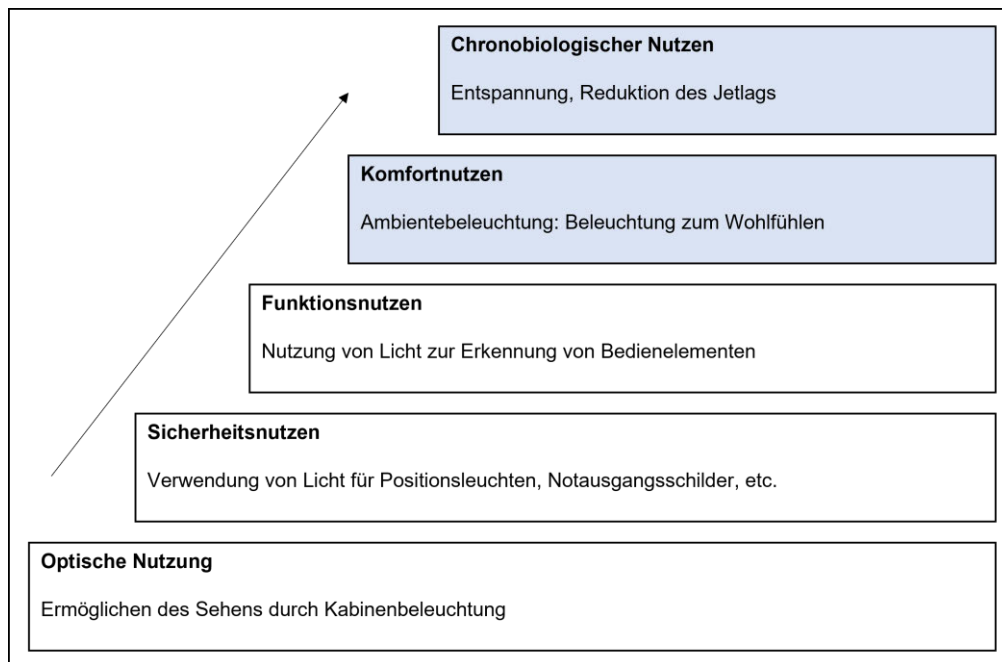
## 1. Einleitung

Im Zuge der fortschreitenden Globalisierung und der damit verbundenen steigenden Anzahl von Langstreckenflügen rückt das Thema des Passagierkomforts immer weiter in den Vordergrund [1]. In einer Zeit eines stetig steigenden Anspruchs einer besseren Lebensqualität, sollen Passagiere nicht mehr nur sicher an ihr Ziel ankommen, sondern sogar erholt und besser gelaunt. Für das Wohlbefinden der Passagiere wird als ein entscheidender Faktor das Licht herangezogen. Die Beleuchtung der Flugzeugkabine ist eine einzigartige Umgebung, in der die Passagiere über mehrere Stunden künstlicher Lichtexposition ausgesetzt sind.

### 1.1 Hintergrund und Motivation

In den letzten Jahren hat die Wissenschaft ein vertieftes Verständnis für die Auswirkung des Lichts auf den menschlichen Organismus entwickelt. Während sich frühere Studien mit der visuellen Wahrnehmung des Lichts beschäftigt haben, beschäftigen sich aktuelle Studien jedoch mit den nicht-visuellen Einflüssen des Lichts auf die grundlegenden physiologischen und psychologischen Mechanismen des Menschen [2]. Licht erfüllt nicht nur die Funktion des Sehens, sondern es beeinflusst auch maßgeblich das Wohlbefinden, die mentale Leistungsfähigkeit und physische Prozesse. Aus diesem Grund kommt ihm eine essenzielle Bedeutung für das Leben zu [3]. Auch in der Flugzeugkabine hat sich die Funktion und Nutzung der Beleuchtung grundlegend verändert. Während sie anfangs lediglich dem Ermöglichen des Sehens in der Kabine diente, entwickelte sich die Art und Weise der Nutzung mit fortschreitender Zeit weiter zur Verbesserung der Sicherheit und der Indikation von Benutzeroberflächen. Auf Langstreckenflügen werden bereits bestimmte Beleuchtungsszenarien verwendet, um ein gewisses Ambiente in der Flugzeugkabine zu schaffen (siehe Abbildung 1). Neue Forschungen beschäftigen sich mit dem chronobiologischen Nutzen des Lichts zur Reduzierung des Jetlags, der oft mit Langstreckenflügen verbunden ist [4].





**Abbildung 1: Entwicklung der Flugzeugbeleuchtung nach [4]**

Insbesondere die Lichtfarbe und -temperatur wurden als wichtige Parameter identifiziert, welche physiologische Prozesse wie das Schlafverhalten sowie das emotionale Wohlbefinden der Menschen maßgebend beeinflussen können [5, 6]. Durch die Wechselwirkung von Licht und der menschlichen Physiologie bedarf es einer differenzierten Untersuchung, um ein besseres Verständnis zu der Thematik zu erhalten und potenzielle Lösungsansätze zur Steigerung des Passagierkomforts in Flugzeugkabinen zu finden.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Im ersten Kapitel dieser Arbeit wird ein theoretischer Rahmen vorgestellt, der dem besseren Verständnis weiterer Ergebnisse dienen soll. Hier werden die lichttechnischen Grundlagen wie lichtphysikalische Größen, die das Konstrukt Licht operationalisieren, Begriffserklärungen wie Lichtfarbe und -temperatur, sowie die Bestimmung des Farbortes und die Wichtigkeit der Farbwiedergabe behandelt. Des Weiteren werden im theoretischen Rahmen die physiologischen und chronobiologischen Grundlagen aufgegriffen. Im Bereich der Physiologie werden dabei die menschlichen Mechanismen des Melatonin- und Serotoninhaushaltes erläutert sowie die Bedeutung der Herzratenvariabilität beleuchtet. Im chronobiologischen Teil werden der circadiane Rhythmus sowie die unterschiedlichen Chronotypen beschrieben, welche ursächlich für das Schlaf-Wach-Verhalten von Menschen sind.

Kapitel 3 soll Aufklärung über den aktuellen Stand der Technik geben und neben der Beschreibung der Kabinenbeleuchtung aufzeigen, welchen Ablauf ein Langstreckenflug hat, da gerade diese relevant für das circadiane System sind.

Mit diesem Wissen werden dann in Kapitel 4 die Auswirkungen des Lichts auf das Schlaf-Wach-Verhalten untersucht und der Zusammenhang zur Lichtfarbe und -temperatur dargelegt. Hierfür werden die Ergebnisse verschiedener Studien herangezogen. Anschließend wird in Kapitel 5 der Zusammenhang zwischen Licht und emotionaler Befindlichkeit analysiert. Auch hier wird der Einfluss der Lichtfarbe und -temperatur aufgegriffen.

Nach dem Aufschluss über den Einfluss von Licht auf das Schlaf-Wach-Verhalten und der Stimmung der Passagiere aus den verschiedenen Studien werden die Ergebnisse in Kapitel 6 ausgewertet und diskutiert. Es folgt eine Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse und ein Ausblick auf die Zukunft der Kabinenbeleuchtung in Kapitel 7. In Abbildung 2 ist der Aufbau der Arbeit schematisch dargestellt.

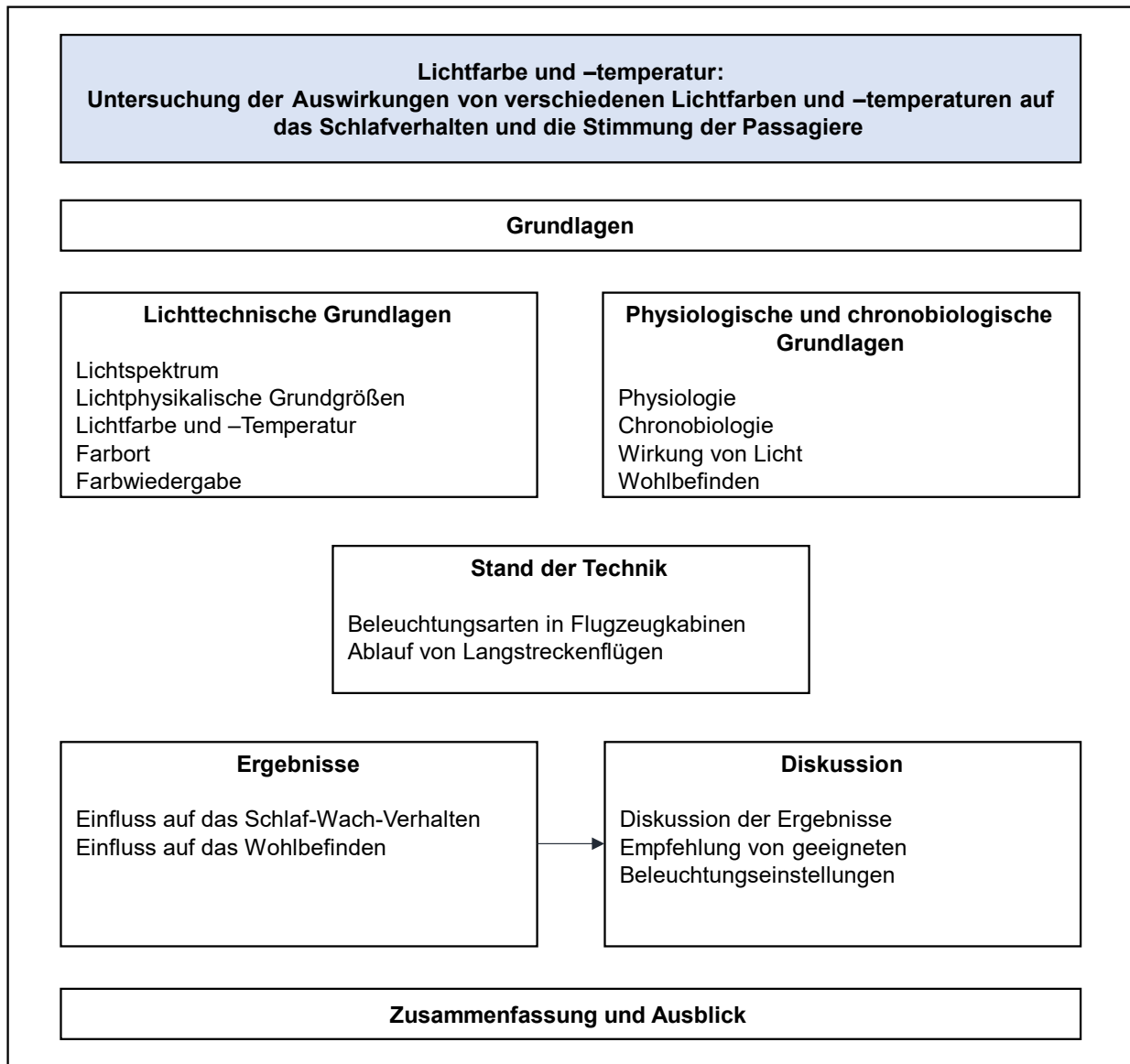


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Aufbaus der Arbeit

### 1.3 Zielsetzung der Arbeit

Das Hauptziel dieser Bachelorarbeit besteht darin, durch eine sorgfältige Analyse der vorhandenen Literatur diejenigen Lichtfarben und -temperaturen zu identifizieren, die positive bzw. negative Auswirkungen auf die Stimmung und das Schlafverhalten der Passagiere haben. Im Sinne des Schlafverhaltens soll erörtert werden, welche Farben bzw. Temperaturen die Schlafqualität verbessern und welche sie beeinträchtigen. Dafür soll im theoretischen Rahmen der Arbeit das benötigte Wissen zum besseren Verständnis der Literatur aufgebaut werden. Aus den Ergebnissen der Studien der Literatur sollen fundierte Empfehlungen zur optimalen Lichtgestaltung im Kontext der Flugzeugkabine entwickelt werden.

## 2. Grundlagen

In dem folgenden Kapitel wird der theoretische Rahmen erläutert, der zum besseren Verständnis der Arbeit beitragen soll. Dazu werden in Abschnitt 2.1 die lichttechnischen Grundlagen, wie die lichtphysikalischen Größen, die Lichtfarbe und -temperatur sowie die Farbbestimmung beschrieben. Ergänzend dazu stellt Abschnitt 2.2 die physiologischen und chronobiologischen Grundlagen vor.

### 2.1 Lichttechnische Grundlagen

Aus physikalischer Sicht ist Licht der vom menschlichen Auge wahrnehmbare Teil elektromagnetischer Wellen im Bereich von 380-780 Nanometer [4]. Dabei wird jedem Wellenbereich ein bestimmter Farbeindruck zugeordnet. Das für den Menschen sichtbare Licht macht nur einen geringen Teil der elektromagnetischen Strahlung aus. Im Spektrum sind weitere Strahlungen, wie beispielsweise die Röntgenstrahlung, die ultraviolette Strahlung oder auch kosmische Strahlung enthalten (siehe Abbildung 3).

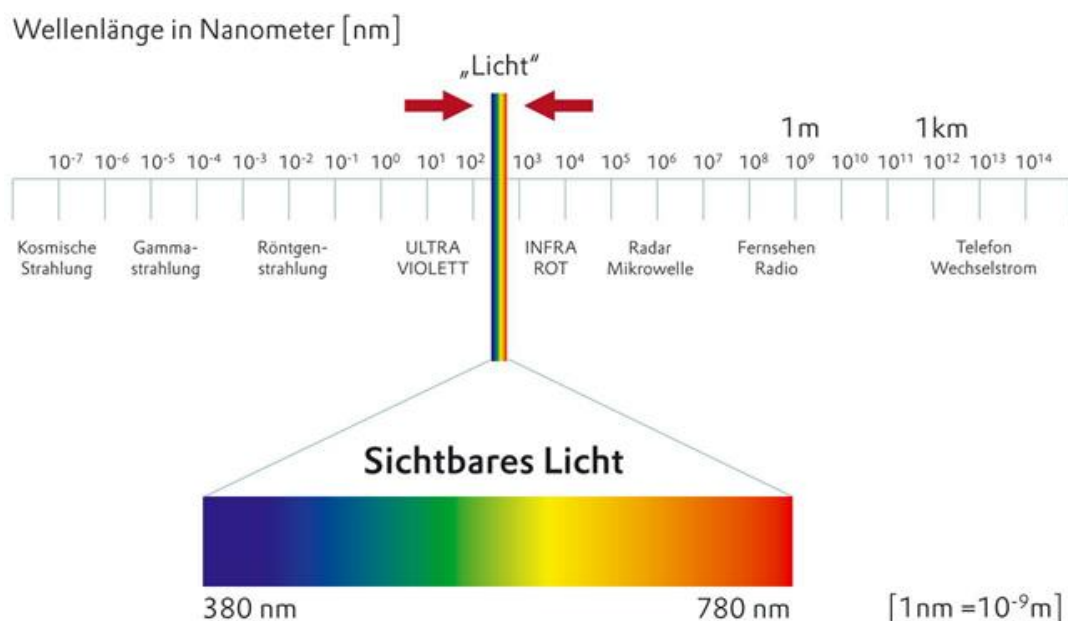


Abbildung 3: Bandbreite elektromagnetischer Strahlung mit Hervorhebung des sichtbaren Lichts [7]

In der Literatur wird Licht in drei optische Kategorien eingeteilt. Grundlegend ist die Strahlung des Lichts als physikalische Optik bekannt. Sie beschreibt Licht als physikalische Energie. Als Reizempfindung zum Sehen verkörpert Licht die physiologische Optik. Bei der ökologischen Optik hingegen wird Licht als Information dargestellt [8].

## Grundlagen

Zudem wird bei der Betrachtung der Strahlung zwischen direkter und indirekter Strahlung unterschieden. Unter direkter Strahlung versteht man das Auftreffen einer Lichtquelle auf ein Objekt, ohne vorher reflektiert oder transmittiert zu werden. Wenn das Licht zuvor von einer Oberfläche reflektiert oder transmittiert wurde, spricht man von indirekter Strahlung. Trifft Licht auf ein Objekt, so wird es je nach Material reflektiert, absorbiert oder transmittiert. Bei Oberflächen wie Spiegeln wird das Licht reflektiert, bei nicht-reflektierenden Oberflächen wird es absorbiert. Bei Oberflächen wie Glas beispielsweise, wird das Licht transmittiert [4].

Elektromagnetische Strahlen von 100 Nanometer bis 1 Millimeter sind der optischen Strahlung zugehörig. In Tabelle 1 sind die unterschiedlichen Bereiche der optischen Strahlung dargestellt. Dabei wird in dem für den Menschen nicht sichtbaren Bereich, der UV-Strahlung und der Infrarot Strahlung sowie dem Licht unterschieden. Besonders interessant für diese Arbeit ist der Bereich des blauen Lichts.

**Tabelle 1: Einteilung des Spektrums optischer Strahlung nach [4]**

<b>Bereich</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Wellenlänge in nm</b>
Ultraviolette Strahlung (UV)	UV-C	100-280
	UV-B	280-315
	UV-A	315-380
Licht	Violett	380-436
	Blau	436-495
	Grün	495-566
	Gelb	566-589
	Orange	589-627
	Rot	627-780
	Infrarot Strahlung (IR)	IR-A
IR-B		1400-3000
IR-C		3000-1x10 <sup>6</sup>

## 2.1.1 Lichtphysikalische Größen

Im folgenden Kapitel werden die relevanten lichtphysikalischen Größen erläutert, die eine wesentliche Rolle bei der quantitativen Beschreibung des Lichts spielen. Begriffe wie „hell“ und „dunkel“, sowie „kalt“ und „warm“ sind individuelle Empfindungen, die ohne eine numerische Skala keinen Vergleich ermöglichen. In der Lichttechnik ist man allerdings auf vergleichbare Messdaten angewiesen [9]. Um eine quantifizierte Charakterisierung von Licht zu erhalten, werden spezifische Größen verwendet, welche Aufschluss über die Eigenschaften des Lichts geben. Im Rahmen dieses Kapitels werden der Lichtstrom, die Lichtstärke, die Beleuchtungsstärke und die Leuchtdichte betrachtet.

### Lichtstrom, Zeichen: $\Phi$ , Maßeinheit: Lumen (lm)

Der Lichtstrom beschreibt die Lichtleistung eines Leuchtmittels. Er umfasst die von der Lichtquelle aus, in alle Richtungen abgestrahlte, sichtbare Lichtmenge [4]. Der Lichtstrom ist somit ein Maß für die Helligkeit eines Leuchtmittels. Alle weiteren lichtphysikalischen Größen werden mit dem Lichtstrom assoziiert.

### Lichtstärke, Zeichen: $I$ , Maßeinheit: Candela (cd)

Anders als der Lichtstrom, ist die Lichtstärke oder auch Lichtintensität genannt, richtungsabhängig. Wie in Abbildung 4 zu sehen, gibt die Lichtstärke an, wie viel Lichtstrom in einem bestimmten Raumwinkel  $\Omega$  fällt [10]. Wäre die Abstrahlung einer Lichtquelle in allen Richtungen gleich, müssten keine Aussagen über die Lichtstärke gemacht werden. Die Lichtstärke ist der Quotient aus dem Lichtstrom und des Raumwinkels [11]. Der Raumwinkel ist dabei der Quotient aus einer beliebigen Teilfläche einer Kugeloberfläche und dem Radius der Kugel ins Quadrat. Er wird in der Einheit Steradian (sr) angegeben [7].

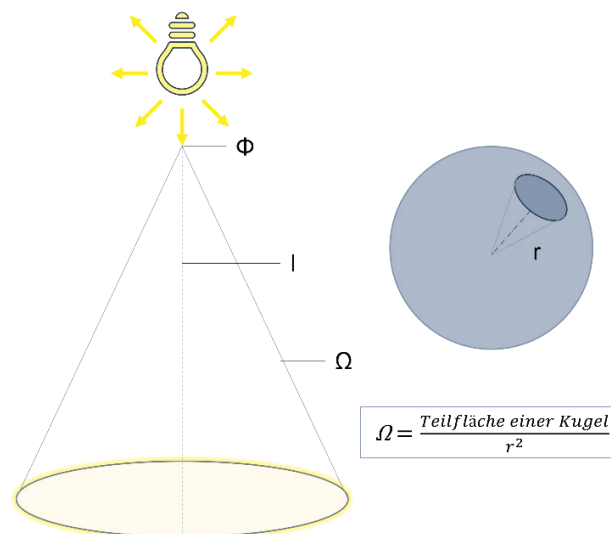
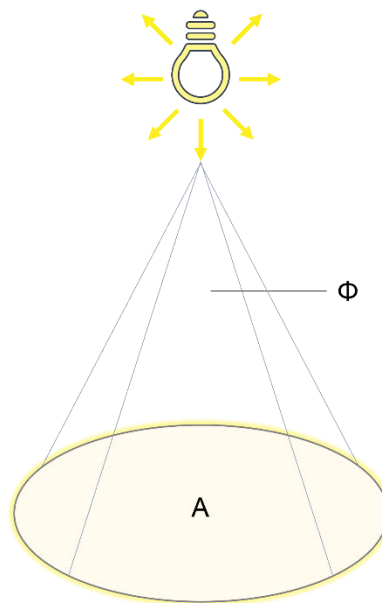


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Lichtstärke und des Raumwinkels

**Beleuchtungsstärke, Zeichen: E, Maßeinheit: Lux (lx)**

Die Beleuchtungsstärke ist die in der Lichttechnik am weitesten verbreitete Größe. Sie gibt an, wie viel Lichtstrom pro Fläche abfällt und ist somit definiert als der Quotient aus dem Lichtstrom und der betroffenen Flächen (siehe Abbildung 5). Dabei ist es belanglos, ob das Licht direkt von der Lichtquelle kommt oder von einer Oberfläche aus reflektiert wird [9]. Dementsprechend beträgt die Beleuchtungsstärke bei einem Lichtstrom von einem Lumen und einer bestrahlten Fläche von einem Quadratmeter ein Lux [4]. Die größte Beleuchtungsstärke wird bei orthogonaler Lichteinstrahlung auf die Fläche erreicht. Bei Neigung des Lichtstrahls verringert sich die Beleuchtungsstärke [12].



**Abbildung 5: Schematische Darstellung der Beleuchtungsstärke**

**Leuchtdichte, Zeichen: L, Maßeinheit: Candela pro Quadratmeter ( $\frac{cd}{m^2}$ )**

Aus Sicht der Wahrnehmungspsychologie hat die Leuchtdichte die größte Bedeutung. Sie ist für den optisch-visuellen Eindruck der Helligkeit von Leuchtmitteln und Oberflächen verantwortlich. Zudem ist sie die einzige photometrische lichtphysikalische Größe, die ohne Umwege vom Auge wahrgenommen wird [9]. Abhängig von der Farbe und dem Material, beschreibt sie den Eindruck der Helligkeit einer Oberfläche [13]. Die Leuchtdichte wird zur Beschreibung der Helligkeit von eher breiten, flächenhaften Lichtstrahlen verwendet, bei punktuellen Lichtquellen hingegen wird die Leuchtstärke herangezogen [14].

## Grundlagen

Der Zusammenhang zwischen der Beleuchtungsstärke  $E$  und der Leuchtdichte  $L$  wird in Abbildung 6 verdeutlicht. Während sich die Beleuchtungsstärke auf die Menge des von einem Leuchtmittel emittierten Lichtstrom bezieht, der auf eine bestimmte Fläche strahlt, drückt die Leuchtdichte die Helligkeitsempfindung der Oberfläche aus. Die Leuchtdichte ergibt sich aus dem Quotienten der Beleuchtungsstärke multipliziert mit dem Reflexionsgrad  $\rho$  zu  $\pi$ .

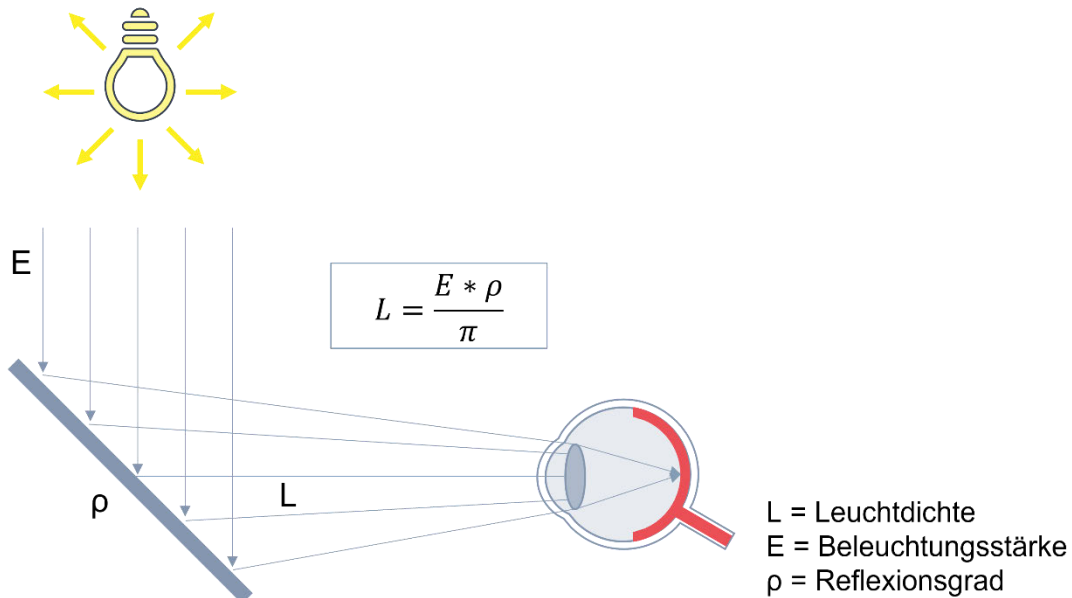


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte nach [7]

### 2.1.2 Lichtfarbe und -temperatur

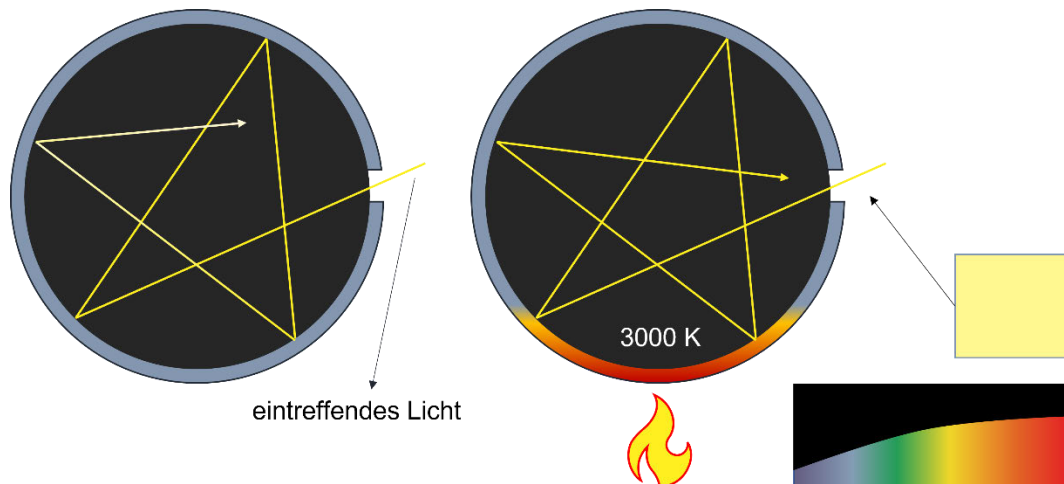
Das Konstrukt der Farbe ist eine Sinnesempfindung, die durch Licht ausgelöst wird. Die wahrgenommene Farbe hängt dabei von dem absorbierten Lichtspektrum und der Physiologie des Betrachters ab. Über drei Farbrezeptoren des trichromatischen Farbempfindens ergibt sich die wahrgenommene Farbe [15]. Einem Objekt ist keine spezifische Farbe zuteil, die Empfindung über diese Farbe ist vielmehr ein Zusammenspiel vieler Parteien. Dabei entsteht das Bewusstsein über eine Farbe erst im Gehirn und nicht bereits im Auge. Die Lichtfarbe beschreibt das farbliche Aussehen weißen Lichts verschiedener Blauanteile und stellt bildlich dar, was der Kennwert Kelvin bei der Farbtemperatur ausmacht [4].

Der Zusammenhang zwischen Lichtfarbe und Lichttemperatur wird oftmals am Beispiel des Planck'schen Hohlraum-Strahler erklärt. Man stelle sich eine Hohlkugel mit einer kleinen Öffnung vor. In diese kleine Öffnung dringt nun Licht ein und wird im inneren dieser Kugel durch Reflexion vollkommen absorbiert, sodass kein Licht mehr austritt und die Öffnung der Kugel gänzlich schwarz erscheint. Wenn diese Hohlkugel nun erhitzt wird bis sie glüht, kann aus der Öffnung der Kugel Licht beobachtet werden. Die Farbe des Lichts hängt dabei von der



Temperatur der Kugel ab. Diese Vorrichtung wird als Planck'scher Hohlraum-Strahler bezeichnet und zeigt, dass Temperatur und Farbe, bzw. die spektrale Zusammensetzung des Lichts in einem festen Verhältnis zueinander stehen [9].

In Abbildung 7 ist eine schematische Darstellung des Planck'schen Hohlraum-Strahlers zu sehen. Auf der linken Seite ist der Anfangszustand zu erkennen, bei dem die Öffnung der Kugel trotz einfallenden Lichts schwarz erscheint. Rechts wird der Hohlkörper auf 3000 Kelvin erhitzt, woraus Licht mit weißgelber Farbe resultiert.



**Abbildung 7: Schematische Darstellung des Planck'schen Hohlraum-Strahlers**

Damit einer gewissen Lichtfarbe eine Temperatur zugewiesen werden kann, wird der Vergleich mit der Farbe des „schwarzen Strahlers“ genutzt. Der schwarze Strahler ist ein idealisierter, nicht schmelzbarer Körper, dessen Reflexionstrahlung gleich Null ist. Bei langsamer Erhitzung dieses idealisierten Körpers durchläuft er eine Farbskala von dunkelrot, rot, orange, gelb, weiß bis hellblau [7]. Je höher die Temperatur, desto weißer die Farbe des Strahlers und desto näher ist sie am Tageslicht [4]. Anhand dieses Beispiels kann auch die Verwirrung um die Farbtemperatur geklärt werden. Oftmals wird mit einer hohen Farbtemperatur warmes Licht assoziiert. Allerdings ist Licht mit einer hohen Farbtemperatur, wie bereits beim schwarzen Strahler erläutert, eher bläulich bis weiß und wird psychologisch als kalt empfunden [9].

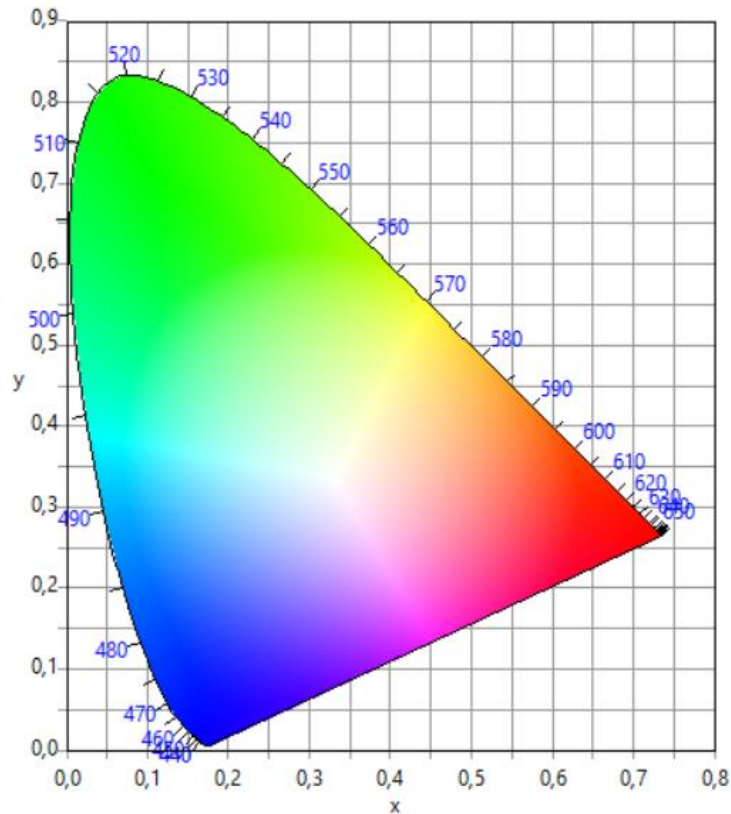
### 2.1.3 Farbort

Für eine präzise Definition einer Farbe bedarf es einer systematischen Struktur, die eine Zuordnung der wahrgenommenen Farben nach Grundparametern ermöglicht. Diese Parameter sind:

- Der Farbton
- Die Sättigung
- Die Helligkeit

Der Farbton repräsentiert die Farbe selbst. Auf einem Farbkreis ist der Farbton der periphere Punkt mit maximaler Sättigung und wird beim Farbkreis durch eine Radiusrichtung definiert [9]. Die Sättigung trifft Aussagen über die Farbkraft. Mit steigendem Weißanteil nimmt die Farbkraft proportional ab. Weniger gesättigte Farben sind jedoch nicht gleich heller, weshalb der dritte Parameter entscheidend ist. Die Helligkeit gibt dem Weiß-, bzw. Schwarzanteil einer Farbe an [9].

Die CIE führte als Basis für den CIE-Farbraum 1931 das CIE-Farbdreieck (siehe Abbildung 8) ein [9]. In der Farbmetrik wird vorwiegend das XYZ-System verwendet. Jenes wird auf Messungen der Grundfarben reiner Spektralfarben zurückgeführt [16]. Dabei basiert es auf drei festgelegte Spektralfarben mit den Primärvalenzen 700 nm für rot, 546,1 nm für grün und 435,8 nm für blau [17]. Über die XYZ-Farbkoordinaten kann der Farbort mathematisch präzise beschrieben werden. Neben dem XYZ-System wird heutzutage auch das uv-Koordinatensystem verwendet. Das Problem beim CIE-Farbdreieck jedoch ist die Wahrnehmung des Menschen, denn die Farben sind hinsichtlich ihrer Wahrnehmung nicht „gleichabständig“. Gleiche Farbabstände entsprechen nicht der wahrgenommenen Abstandsempfindung. Quantitativ gleich große Farbabstände werden bei unterschiedlichen Farbtönen nicht als gleich groß wahrgenommen. Beispielsweise empfindet der Mensch im großen grünen Bereich größere Farbabstände als gleichfarbig verglichen zu dem kleinen blauen Bereich. Der Farbwissenschaftler MacAdam ging dieser Problematik mit einer Reihe von Tests nach und entwickelte die nach ihm benannten MacAdam-Ellipsen. Diese zeigen grafisch als auch rechnerisch, welche Farben im CIE-Farbdreieck für den Menschen visuell nicht differenzierbar sind [9].



**Abbildung 8: Standard 1931 2° CIE-Farbdreieck aus dem OSRAM ColorCalculator**

Die MacAdam-Ellipsen sind ein Maß für die durchschnittliche Farbwahrnehmung einer Person und geben Aufschluss darüber, wie gut sie Farben voneinander unterscheiden können. Dabei basieren die MacAdam-Ellipsen, wie bei den meisten anderen photometrischen Themen auch, nicht auf absolute Werte, die einer definierten physikalischen Eigenschaft zugeordnet werden. Ferner werden sie aus statistischen Messungen der Sehleistung von Probanden abgeleitet. In der Sehwissenschaft gibt es keine absoluten Werte, sondern vergleichende Statistiken. Festgestellt kann nur, wie sich der Wert eines bestimmten Parameters von der visuellen Wahrnehmung einer durchschnittlichen Person differenziert. Es steht außer Frage, dass unserer Farbwahrnehmung Grenzen zugrunde liegen. Farben können so nahe beieinander sein, dass wir keine Unterschiede erkennen. Die Fähigkeit, Farben zu unterscheiden hängt von der Qualität der Beleuchtung, der Sättigung der Farbe und in gewissem Maße von der Farbnuance ab. In den 1940er Jahren führte der Farbwissenschaftler David MacAdam eine Reihe von Tests durch, um die Fähigkeit der Farbunterscheidung zu untersuchen. Dafür führte er Versuche durch, bei denen Probanden eine Farbe mit einer anderen abstimmen mussten und maß, wie gut sie diese Aufgabe bewältigten. Jeder Proband absolvierte diese Aufgaben für 25 verschiedene Farben in einem Bereich von Farbnuancen und Sättigungen. Die Zonen, die dabei entstanden, erscheinen im CIE-Farbraum annähernd als Ellipse.

## Grundlagen

Nachdem statistisch signifikante Ähnlichkeiten zwischen den Testreihen festgestellt wurden, konnte MacAdam einen durchschnittlichen Satz von Ellipsen definieren, welche heute die MacAdam-Ellipsen sind [18]. In Abbildung 9 sind die MacAdam-Ellipsen im 1931 CIE-Farbdreieck zu sehen.

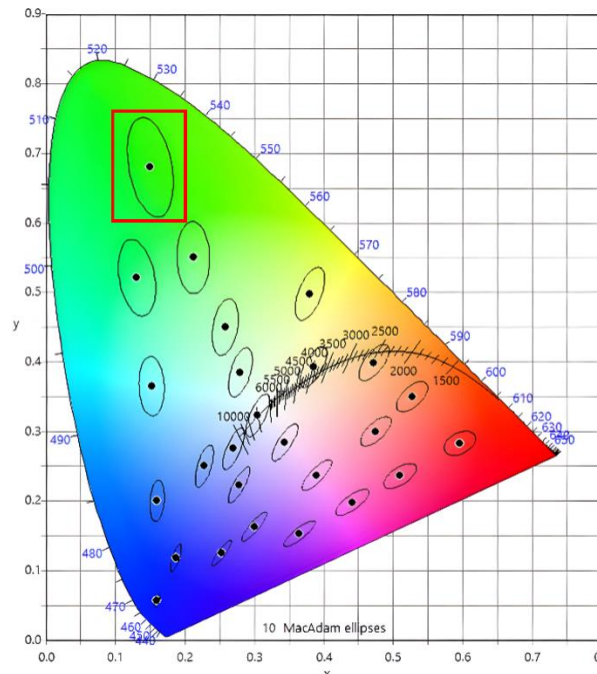


Abbildung 9: 1931 CIE-Farbdreieck mit abgebildeten MacAdam-Ellipsen aus dem OSRAM ColorCalculator

### 2.1.4 Farbwiedergabe

Gerade bei künstlichem Licht ist eine gute Farbwiedergabe ein wichtiges Kriterium für eine gute Beleuchtung und stellt eine der Hauptaufgaben des Lichts dar. Das menschliche Auge ist in der Lage zwischen in etwa 1 Mio. Farbtönen und ca. 300 Graustufen zwischen schwarz und weiß zu unterscheiden [9]. Der Mensch ordnet Objekten bestimmte Farben zu aus der Erfahrung des täglichen Lebens. Die Empfindung über die Farbe eines Objekts kann je nach Beleuchtung variieren. Passt die Empfindung nicht zu der Erwartung, so liegt die Ursache hierfür an einer suboptimalen Farbwiedergabe. Dies kann durch das Fehlen oder durch die Über- oder Unterbetonung einer Spektralfarbe des Lichts hervortreten [7].

Zur Operationalisierung dieses Empfindens dient der *Color Rendering Index* (CRI). Der Farbwiedergabe Index ist ein Maß zur Übereinstimmung der Körperfarbe eines Objekts unter einer bestimmten Bezugsquelle [7]. Er beschreibt somit die Fähigkeit eines Leuchtmittels, Farben eines beleuchteten Objektes naturgetreu und korrekt wiederzugeben [19]. Um eine Bewertung der Farbwiedergabe zu ermöglichen, ist der Vergleich zu einer Referenz notwendig. Die bestmögliche Bezugslichtquelle wäre in diesem Fall das Tageslicht der Sonne. Die permanente Veränderung des natürlichen Tageslichts macht es jedoch unbrauchbar für Vergleichszwecke.

Daher wird als Bezugslichtquelle das *Daylight 6500 K (D65)* herangezogen. Dabei handelt es sich um eine künstliche Annäherung an das Tageslicht mit einer Farbtemperatur von 6500 Kelvin [9]. Der Gütewert des CRI wird dabei über den allgemeinen Referenzindex Ra ausgedrückt, dessen Maximalwert bei 100 liegt. Je höher der Ra-Wert, desto besser ist die Farbwiedergabe eines Leuchtmittels. In Tabelle 2 sind die Farbwiedergabestufen entsprechend ihrer Ra-Werte dargestellt. Gütewerte über 90 sind als sehr gut zu klassifizieren. Abwärts von Werten unter 60 wird von einer weniger guten Farbwiedergabe gesprochen.

**Tabelle 2: Farbwiedergabewerte nach DIN 6169-1**

Bezeichnung	Farbwiedergabestufe	CRI Ra
sehr gut	1A	$Ra \geq 90$
	1B	$80 \leq Ra \leq 90$
gut	2A	$70 \leq Ra \leq 80$
	2B	$60 \leq Ra \leq 70$
weniger gut	3	$40 \leq Ra \leq 60$
	4	$20 \leq Ra \leq 40$

In DIN EN 12464-1 sind den verschiedenen Farbwiedergabestufen Tätigkeiten und Räume zugeordnet worden und in Tabelle 3 dargestellt.

**Tabelle 3: Beispiele für Tätigkeiten und Räume für verschiedene Farbwiedergabestufen nach [9]**

Farbwiedergabestufe	Tätigkeit / Raum
1A ( $Ra \geq 90$ )	Farbkontrolle, Räume für medizinische Tätigkeiten; Haarpflege; Herstellung von Schmuckwaren
1B ( $Ra \geq 80$ )	Unterrichtsräume, Lesebereiche, Speiseräume, Ausstellungshallen, Warteräume, Konferenzräume, Wäschereien
2A ( $Ra \geq 70$ )	Büroräume, Ankunfts- und Abflughallen, Allgemeinbeleuchtung in Krankenhäusern, Personal- und Aufenthaltsräume
2B ( $Ra \geq 60$ )	Wartungs- und Instandsetzungshallen, Instandhaltungsarbeiten an Turbine und Generator in Kraftwerken
3 ( $Ra \geq 40$ )	Normale Industriearbeiten, Verkehrswege in Gebäuden, Aufzüge, Viehställe, Öffentliche Fahrwege, Park- und Abstellflächen
4 ( $Ra \geq 20$ )	Hallen der Schwerindustrie, Verkehrswege im Freien, Baustellen, Unterflurtunnel, Keller

Für den Kontext dieser Arbeit, die sich auf die Kabinenbeleuchtung fokussiert, sind Zuordnungen für Bereiche wie Speiseräume und Lesebereiche hervorzuheben. Hier bewegen wir uns bei Ra-Werten von über 80.

### 2.2 Chronobiologische und physiologische Grundlagen

In folgendem Kapitel werden die chronobiologischen und physiologischen Grundlagen beschrieben. Neben den lichttechnischen Grundlagen tragen diese wesentlich zum besseren Verständnis der Ergebnisse und der Auswertung bei. Dabei behandeln die Abschnitte 2.2.1 bis 2.2.4 den Bereich der Physiologie, während Abschnitt 2.2.5 sowie 0 die Chronobiologie abdecken.

Durch die intensive Forschung der Auswirkungen von Licht werden immer mehr chronobiologisch wirksame Beleuchtungssysteme in Bereichen wie Schulen und Büros eingesetzt [4]. Licht kann als primärer Stimulus für die Regulierung des circadianen Rhythmus und jahreszeitliche Zyklen genutzt werden und durch neuroendokrine Reaktionen Auswirkungen auf die Erholung der Menschen haben [4, 20]. Die sogenannte Lichttherapie gewinnt stetig an mehr Bedeutung und ist bei ausgewählten affektiven Störungen, Schlafproblemen und Störungen des circadianen Systems wirksam [21].

#### 2.2.1 Zwei-Prozess-Modell des Schlaf-Wach-Verhaltens

In den letzten Jahrzehnten haben Forscher verstärkt ein Augenmerk auf den Aspekt der menschlichen Physiologie gerichtet, um ein besseres Verständnis für die Mechanismen zu gewinnen, die den natürlichen Schlaf-Wach-Rhythmus regulieren. Zur Beschreibung des Schlaf-Wach-Rhythmus ist das Zwei-Prozess-Modell von Borbély weit verbreitet [22].

In dem Zwei-Prozess-Modell werden zwei physiologische Prozesse beschrieben, die miteinander interagieren und maßgeblich die Schlaf-Wach-Regulation des Menschen beeinflussen. Es wird zwischen dem homöostatischen Prozess S und dem circadianen Prozess C unterschieden. Der homöostatische Prozess S veranschaulicht den Anstieg der Schläfrigkeit über die Dauer der Wachheit. Je länger ein Mensch wach ist, desto mehr steigt dieser Prozess mit einem negativ logarithmischen Verlauf und somit auch der subjektiv wahrgenommene Schlafdruck. Die Abnahme des Prozesses geschieht mit einsetzendem Schlaf. Hierbei wird ein exponentiell negativer Verlauf vermutet. Bei gesunden Menschen hat der Prozess S nach einer Schlafdauer von acht Stunden so weit abgenommen, dass das Schlafbedürfnis komplett befriedigt ist und die Menschen erwachen [23]. Der Prozess C beschreibt die tageszeitabhängigen Schwankungen physiologischer Körperfunktionen wie die Körpertemperatur oder die Ausschüttung unterschiedlicher Hormone. Folglich verändert sich die subjektiv wahrgenommene Schläfrigkeit von gesunden Menschen im Verlauf des Tages. Anders als der Prozess S, wird dieser nicht vom Schlaf beeinflusst. Der Prozess C weist einen sinusförmigen Verlauf mit einem Maximum am Nachmittag und einem Minimum in der Nacht auf. Gesteuert wird er von der Zirbeldrüse [22].

Verschiedene Studien konnten die autonome Rhythmik dieser beiden Prozesse validieren, indem die beiden Prozesse durch Schlafdeprivation oder circadiane Desynchronisation voneinander entkoppelt wurden. In den Untersuchungen konnten Schwankungen in der wahrgenommenen Müdigkeit festgestellt werden. Diese hängen sowohl von den verschiedenen Tageszeiten bei konstanter Wachdauer als auch von den unterschiedlichen Wachdauern bei konstanter Tageszeit ab [24].

### 2.2.2 Melatonin

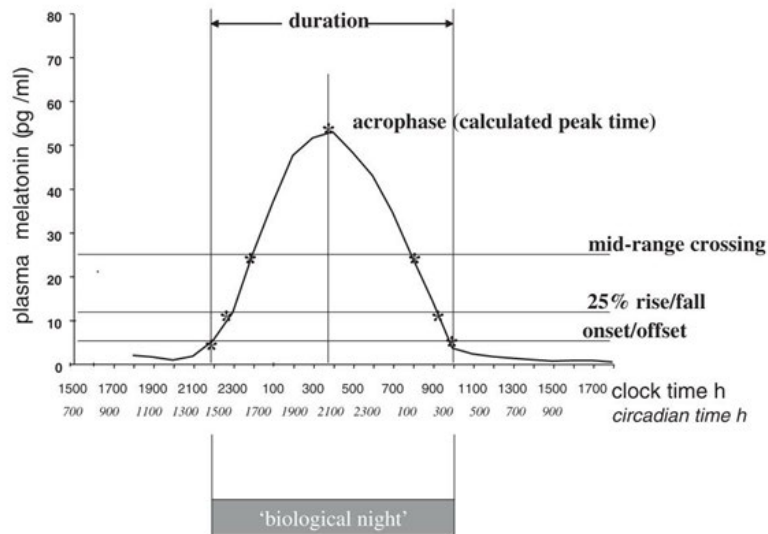
Melatonin ist ein Hormon, welches in den Pinealozyten, den charakteristischen Zellen der Zirbeldrüse, auch Epiphysis genannt, hergestellt wird. Die Zirbeldrüse befindet sich bei Säugtieren im *Nucleus suprachiasmaticus* (SCN), einem Bereich des *Hypothalamus* in der Nähe des Sehnervs. Von dort aus kontrollieren andere Nervenzellen die Zirbeldrüse, indem sie Noradrenalin ausschütten. Von den vielen vermuteten Wirkungen von Melatonin hat sich nur eine bewahrheitet – der Einsatz von Melatonin als Schlafregulator [25]. Melatonin ist dabei nicht ursächlich für den Schlaf. Vielmehr ermöglicht es dem Körper, einen qualitativ erholsamen Schlaf zu erhalten [26].

Aaron Lerner hat als erste Person die schlaffördernde Wirkung von Melatonin auf den Menschen nachgewiesen. Nach einer Einnahme von 100 mg berichtete er über Schläfrigkeit nach der Dosis. Heute weiß man, dass eine Dosis von 0,3 – 10 mg Melatonin während des „biologischen Tages“, also während der Melatoninspiegel gering ist, reichen, um Schläfrigkeit herbeizurufen. Eine einzelne Behandlung mit 5 mg zur richtigen Zeit kann die Zeit der „inneren“ Uhr um bis zu 1,5 Stunden nach vorne versetzen [27].

Die Bildung von Melatonin unterscheidet sich dabei im Hellen und in der Dunkelheit. Im Dunkeln wird bis zu zehn Mal mehr Melatonin freigesetzt als im Hellen [25, 28]. Einigen Studien zufolge gibt es überdies auch jahreszeitliche Schwankungen in der Höhe des Spiegels und der Dauer der Melatoninsekretion [29]. In Abbildung 10 sind die Phasen der Melatoninsekretion dargestellt. Zu sehen ist der Spiegel des Melatonins im Blutplasma in Pikogramm pro Milliliter über der circadianen Zeit und der regulären Zeit. Die Dauer der Sekretion wird dabei als „biologische Nacht“ definiert. Der Melatoninspiegel erreicht zwischen 2-4 Uhr sein Maximum und sinkt dann zum morgen stark. Tagsüber hält er sich auf einem niedrigen Niveau [22].

Durch seinen Rhythmus im Plasma und im Speichel eignet sich Melatonin hervorragend zur Messung der Zeit der circadianen Uhr und zählt, unter kontrollierten Rahmenbedingungen, als bester Index für den menschlichen circadianen Rhythmus [27, 30]. Während sowohl Blut als auch Speichel hohe Melatonin-Konzentrationen aufweisen, ist die Konzentration im Speichel bis zu 70% geringer als im Blut [31]. Die Ermittlung der Melatonin-Konzentration über

Speichelproben hat hingegen den Vorteil, schmerzfrei zu sein und erleichtert damit die Durchführung von Probandenstudien [22].



**Abbildung 10: Melatonininspiegel in pg/ml über der regulären und circadianen Zeit [27]**

Zum Einfluss des Geschlechts auf die Melatonin-Produktion herrscht eine Diskrepanz in den Studien. So konnte eine Studie nachweisen, dass die Melatonin-Produktion bei Frauen höher ist als bei Männern [32]. In anderen Untersuchungen konnte dieses Ergebnis allerdings nicht nachgewiesen werden. Als Ursache für die unterschiedlichen Ergebnisse wird der Einfluss des Menstruationszyklus der Frau oder die Folge von hormonellen Verhütungsmethoden vermutet [33].

Auch über den Zusammenhang zwischen der Melatonin-Konzentration und des Alters gibt es wissenschaftliche Belege. Nach etwa sechs Monaten beginnen Säuglinge einen geregelten circadianen Rhythmus in Bezug auf die Melatonin-Ausschüttung zu erlangen. Zwischen dem vierten und siebten Lebensjahr weisen Kinder die höchste Melatonin-Konzentration auf. Mit steigendem Alter nimmt die Melatonin-Konzentration in der Nacht deutlich ab [34].

Das meiste Wissen über Melatonin gibt es über seine Beziehung zum Schlaf, der Senkung der Körpertemperatur und der Wachsamkeit in der Nacht. Melatonin hat nachgewiesen die Fähigkeit, auch tagsüber Schläfrigkeit zu induzieren, die Körpertemperatur zu senken und menschliche Rhythmen zu verändern, sofern die Behandlung zeitlich korrekt eingesetzt wird. Die chronobiologischen und schlafverbessernden Attribute des Melatonins führten dazu, Melatonin als Behandlung für circadiane Schlafstörungen wie die Non-24 Schlafstörung, das Syndrom der verzögerten Schlafphase (DSPD), bei Schichtarbeit oder Jetlag einzusetzen [27]. Im Rahmen dieser Arbeit spielt die Beziehung zwischen Melatonin und Licht eine wesentliche Rolle. Licht, welches auf das menschliche Auge trifft, kann zu einer Suppression der Melatonin-Produktion führen [22]. Eine genauere Erläuterung erfolgt in Kapitel 4.1.



### 2.2.3 Serotonin

Serotonin ist ein Hormon mit positiver Auswirkung auf die Stimmung und das Wohlbefinden. Es hat eine antriebssteigernde Wirkung und wirkt größtenteils im limbischen System, der Stelle im Gehirn, das für das emotionale Gedächtnis zuständig ist [35]. Serotonin ist daher auch als „Glückshormon“ bekannt [36]. Als Neurotransmitter fungiert Serotonin im Zentralnervensystem, Darm, Herz-Kreislauf-System und im Blut. Sämtliche Antidepressiva wirken auf eine Art und Weise auf den Serotonin-Haushalt [35]. Der Serotonin-Haushalt ist zudem eng an das Schlafverhalten gekoppelt, da das Schlafhormon Melatonin aus Serotonin synthetisiert wird [22].

### 2.2.4 Herzratenvariabilität

Ein gesundes Herz schlägt nicht in gleichen zeitlichen Abständen wie ein Metronom, sondern mit leichten zeitlichen Variationen. Die Variation der zeitlichen Abstände zwischen den Herzschlägen untereinander ist als Herzratenvariabilität (HRV) bekannt. Die HRV wird vom sympathischen und parasympathischen Nervensystem gesteuert und gilt als messbarer Indikator für das autonome vegetative Nervensystem. Stress, Anspannung, Aktivität und Erholung haben neben Herzerkrankungen Einfluss auf die HRV [35].

Der zeitliche Abstand zwischen zwei Herzschlägen wird als RR-Intervall bezeichnet. Andere Bezeichnungen sind auch *Beat-to-Beat-Intervall* oder *NN-Intervall*. Eine hohe Variabilität ist ein Kennzeichen für eine gesunde Herzaktivität. Die HRV ist somit ein Indikator für ein gut funktionierendes, aber auch ein gestörtes vegetatives Nervensystem [35]. Für spätere Betrachtungen ist es wichtig, die Bedeutung einer zunehmender und abnehmenden HRV zu kennen. Eine zunehmende HRV steht für Beruhigung und Entspannung und ist ein parasympathischer Vorgang [35]. Dies mag zu Verwirrung führen, da eine geringe Herzfrequenz mit Entspannung verbunden wird. Die HRV darf jedoch nicht mit der Herzfrequenz verwechselt werden, denn sie ist antiproportional zu der Herzfrequenz [37]. Je höher die Herzfrequenz, desto geringer die HRV [38]. Eine abnehmende HRV hingegen deutet auf Aktivierung und einen sympathischen Vorgang, der ein Anzeichen für eine Stresswirkung aufzeigt [35].

Anhand eines RR-Intervall-Tachogramms wird das zeitliche Intervall zwischen zwei R-Zacken grafisch dargestellt, wie in Abbildung 11 zu erkennen.

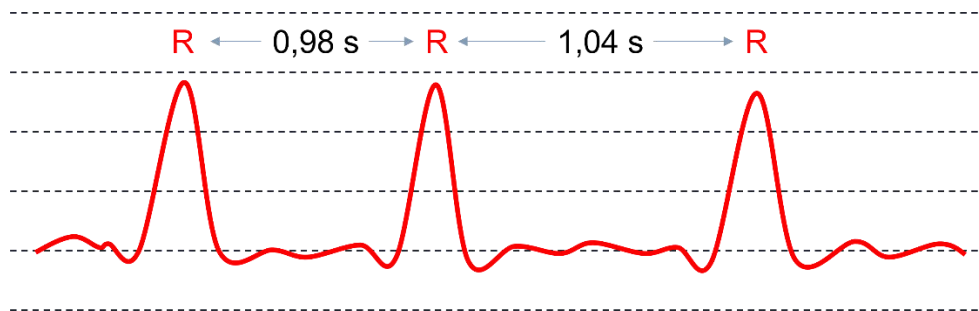


Abbildung 11: Beispiel für ein RR-Intervall-Tachogramm nach [35]

Komfortrelevante Parameter wie das Wohlbefinden und die Schläfrigkeit können somit über die HRV gemessen werden, was die HRV für spätere Betrachtungen im Rahmen dieser Arbeit bedeutsam macht [39].

### 2.2.5 Circadianes System

Das circadiane System, gebrauchssprachlich auch als innere Uhr bekannt, repräsentiert in der Chronobiologie den endogenen Rhythmus des Menschen. Fast alle bisher untersuchten physiologischen und psychologischen Parameter wie Hormone, Befindlichkeit, Blutdruck, Körpertemperatur, Schlaf-Wach-Verhalten, Appetit und motorische Aktivität werden vom circadianen System geregelt [4, 40, 41]. Die exakte Periodenlänge circadianer Rhythmen bei gesunden Menschen beträgt in der Regel nicht genau 24 Stunden, sondern im Mittel etwa 24,2 - 24,5 Stunden [42].

Wird der circadiane Rhythmus aus dem gewohnten Takt gerissen, kann dies negative Folgen für die Gesundheit und das Wohlbefinden haben [4]. Auch kleine Ereignisse wie ein Jetlag oder Winterdepressionen können die Rhythmik durcheinander bringen [43]. Bei Flügen, in denen große Sprünge in der Zeitzone zwischen Abflugs- und Zielort gibt, kann es Tage oder Wochen dauern, bis die natürliche Rhythmik des Körpers sich an den Phasensprung des circadianen Rhythmus anpasst [44].

### 2.2.6 Chronotypen

Zusätzlich zu den bereits behandelten biologischen und physiologischen Prozessen unterliegen auch psychologische und Verhaltensmuster einer periodischen Wiederholung in ungefähr einem 24-Stunden-Rhythmus. Die Kategorisierung der Aktivitätsmuster und die individuelle Ausprägung des circadianen Rhythmus von Menschen ist in der Literatur als Chronotyp bekannt [45].

Während einige Menschen bereits früh am Morgen energiegeladener sind, benötigen andere eine gewisse Zeit um Kraft zu schöpfen und bereit für den Tag zu werden [4]. Durch die Differenzierung des individuellen Schlaf-Wach-Verhaltens, der Schlafdauer und der Reaktion gegenüber Zeitgebern folgt die Einteilung der Chronotypen in die extremen Ausprägungen Morgentypen, bzw. Lerchen und Abendtypen, bzw. Eulen [46, 41, 47, 48]. Dabei ist der Chronotyp eines Menschen bereits determiniert und nicht vom Lebensstil der jeweiligen Person abhängig. Es können jedoch geschlechtsspezifische Unterschiede vorhanden sein [49]. So haben Frauen in der Regel einen früheren Chronotypen als Männer und Erwachsene grundsätzlich einen späteren Chronotypen als Kinder und ältere Menschen [50].

Menschen, die dem Typus Morgentyp zugehörig sind, werden auch Lerchen genannt. Sie sind bereits am frühen Morgen erholt und lebhaft, allerdings oftmals am späten Nachmittag schon müde. Es fällt ihnen schwer, zu späten Abendstunden wach zu bleiben [4]. Der Tagesrhythmus von Morgentypen ist nach weniger als 24 Stunden abgeschlossen, da ihre innere Uhr schneller tickt [41]. Werden äußere Einflüsse außer Acht gelassen, schlafen Morgentypen von ca. 20:00 Uhr bis 4:00 Uhr. In der Nacht wachen sie häufiger auf, sind dafür aber tagsüber weniger schläfrig als Abendtypen [51].

Abendtypen hingegen fühlen sich erst am späten Abend einsatzfähig und sind ohne soziale Einflüsse bis spät in die Nacht wach. Beim Einschlafen in der Nacht benötigen sie mehr Zeit und haben insgesamt eine längere Schlafdauer als Lerchen [22]. Ihr circadianer Rhythmus tickt langsamer als der von Lerchen. Des Weiteren kann ihr individueller Tagesrhythmus bis zu 26 Stunden dauern [41]. Abendtypen würden ohne Einfluss von äußeren Faktoren von ca. 6:00 Uhr bis 14:00 Uhr schlafen [51].

Nur ein geringer Teil der Bevölkerung kann einem der beiden Extrema zugeordnet werden. Etwa 60 - 80 % der Bevölkerung können als intermediäre Typen kategorisiert werden. Auf einer Skala mit Morgentypen als ein Extremum und Abendtypen als anderes Extremum, befinden sie sich zwischen diesen beiden [52]. Morgentypen und intermediäre Typen haben meist einen täglichen Schlafüberschuss [48]. Dafür reagieren Abendtypen besser auf veränderte Zeitzonen als Morgentypen [4].

## 2.3 Wirkung von künstlicher Lichtexposition

In der Literatur werden dem Licht unterschiedliche Einflusswege zugeordnet. Licht hat zum einen die offensichtliche, visuelle Wirkung, die den Sehsinn erst möglich macht. Eine weitere Wirkung ist die perzeptuelle Wirkung, welche die emotionale Wirkung des Lichts beschreibt. Die dritte Wirkung ist die circadiane Wirkung, die beispielsweise einen Einfluss auf das Schlafverhalten hat [53–55].

Eine ähnliche Unterteilung ist auch die Unterscheidung zwischen visuellen, nicht-visuellen und emotionalen Effekten [4]. Die perzeptuelle Wirkung des Lichts wird den emotionalen Effekten zugeordnet und entsteht aus der Interaktion zwischen den visuellen und nicht-visuellen Effekten, wie in Abbildung 12 dargestellt [56].

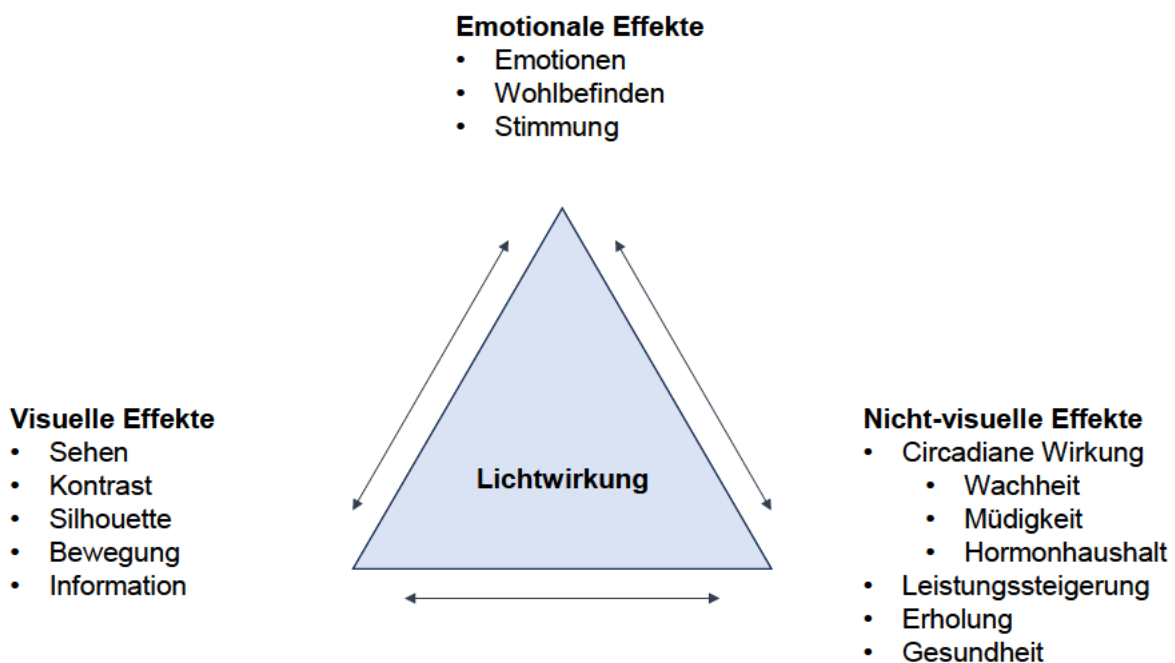


Abbildung 12: Interaktionsdreieck der Lichtwirkung in Anlehnung an [56, 57] nach [4]

### Visuelle Einwirkung

Mit der visuellen Wirkung ist lediglich die Rede von der rein physiologischen Wahrnehmung des Auges und der daraus resultierenden Sehleistung. Die Sehleistung erfolgt vom Auge über den Sehnerv in das Gehirn. Über die Stäbchen und Zapfen, den zwei Photorezeptoren auf der Netzhaut des Auges werden Lichtreize über den Sehnerv an den visuellen Cortex im Gehirn weitergeleitet, wo sie dann zu Bildern weiterverarbeitet werden. Die Stäbchen sind verantwortlich für das Sehen bei schlechten Lichtverhältnissen und die Zapfen sind zuständig für die Wahrnehmung von Farbe [53].

### **Nicht-visuelle Wirkung**

Mit der Entdeckung eines circadianen Photorezeptors im Auge, der in direkter Verbindung zum SCN steht, erweiterte sich das Wissen über die Wirkung des Lichts auf verschiedene körperliche und hormonelle Mechanismen, die das Schlaf-Wach-Verhalten regulieren [47]. Durch die Auswirkung auf den circadianen Rhythmus, werden auch weitere physiologische Parameter wie die Herzfrequenz, der Blutdruck und die Hormonausschüttung in verschiedenen endokrinen Organen beeinflusst [22]. Im Vordergrund steht hierbei die Produktion von Serotonin, des „Glückshormons“ und die Produktion, Sekretion und Suppression der endogenen Hormons Melatonin, welches für die Regulation des Schlafes verantwortlich ist.

### **Emotionale Wirkung**

In Kombination mit vorherigen Erfahrungen und der aktuellen Stimmung eines Menschen, führen visuelle und physiologische Effekte zu emotionalen Reaktionen. Gerade die Wahrnehmung von Farben ist dabei mit Emotionen verbunden [4]. Für die perzeptuelle Wirkung des Lichts ist der visuelle Komfort entscheidend [53]. Dabei ist Komfort keine rein psychologische Größe. Vielmehr können weitere, physiologische relative Parameter wie Entspannung, Stress, Schlaf und Schläfrigkeit gemessen und in Verbindung mit der Wahrnehmung von Komfort gebracht werden [4].

1941 führte Kruithof Arbeiten zur Wahrnehmung von Lichtbedingungen durch mit dem Ziel, das Zusammenspiel zwischen Beleuchtungsstärke und Lichtfarbe im Hinblick auf die Wahrnehmung von Komfort zu bestimmen [58].

## Grundlagen

Aus den Ergebnissen seiner Untersuchungen illustrierte er das nach ihm benannte Kruithof-Diagramm oder auch die „Kruithof-Kurve“, welches in Abbildung 13 zu erkennen ist. Es beschreibt die Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke und der Farbtemperatur und wird in drei Bereiche aufgeteilt. Der weiße Bereich stellt die Kombinationen aus Farbtemperatur und Beleuchtungsstärke dar, die nach seinen Untersuchungen von Menschen als angenehm und komfortabel wahrgenommen werden. Kombinationen aus dem oberen, orangenen Bereich werden als zu farbig und unnatürlich wahrgenommen, während die Kombinationen aus dem blauen Bereich als zu kalt und unbehaglich empfunden werden [58].

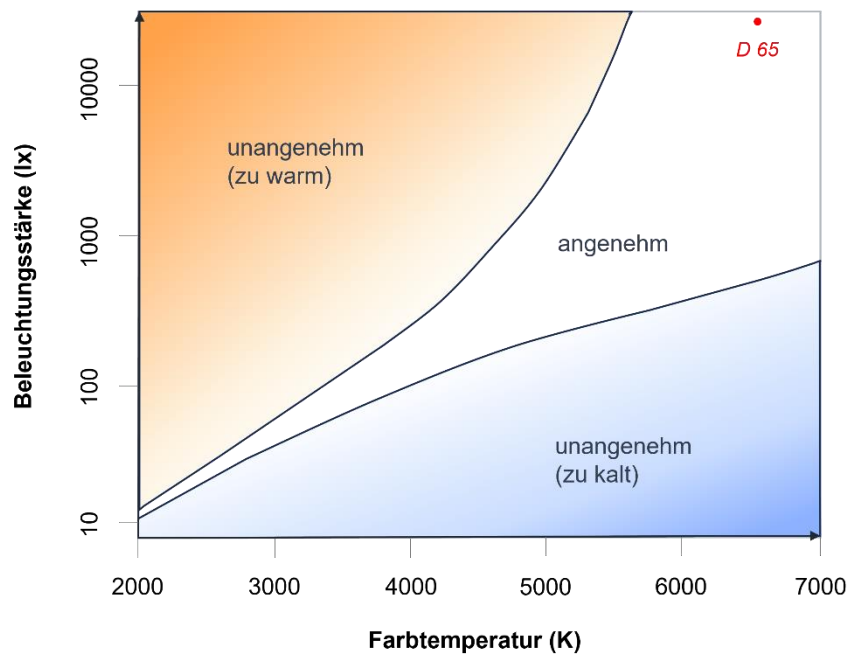


Abbildung 13: Kruithof-Diagramm mit Kennzeichnung von D 65

Aus dem Diagramm geht beispielsweise hervor, dass das Wohlbefinden einer Leuchtstofflampe mit einer Farbtemperatur von 3600 K und einer Beleuchtungsstärke von 500 lx genauso groß ist wie die einer Glühlampe mit 2800 K und 150 lx [4].

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

Da sich diese Arbeit auf die Beleuchtung in Flugzeugkabinen konzentriert, ist es wichtig, zunächst den aktuellen Stand der Beleuchtungssituation zu ermitteln. Dazu zählen die verschiedenen Arten der Beleuchtung, die zugrundeliegende Beleuchtungstechnik sowie der Einsatz von Beleuchtungsszenarien. In Hinsicht auf die Auswirkungen auf das Schlafverhalten, liegt es nahe, Bezug auf Langstreckenflüge zu nehmen. Dazu soll die Klassifizierung von Flügen sowie der gewöhnliche Ablauf von Langstreckenflügen beschrieben werden.

#### **3.1 Beleuchtungsarten in Flugzeugkabinen**

Da sich diese Arbeit mit dem Einfluss der Kabinenbeleuchtung auf die Passagiere beschäftigt, werden externe Beleuchtungen von Flugzeugen nicht weitergehend behandelt. Diese dienen der Orientierung von Flugzeugen untereinander und der eigenen Sicht, im Falle der Scheinwerfer [4].

Innerhalb des Flugzeugs kann zudem zwischen der Cockpit- und der Kabinenbeleuchtung unterschieden werden. Während bei der Cockpitbeleuchtung zwischen Raum-, Lese- und Instrumentenbeleuchtung unterschieden wird [59], wird die Kabinenbeleuchtung in die grundlegende Innenraumbeleuchtung, die Funktionsbeleuchtung, zu welcher beispielsweise die Signalleuchten der PSU wie das Anschnallzeichen und die Sitzplatzkennzeichnung gehören und in Sicherheitsbeleuchtung wie die Notfallbeleuchtung im Falle einer Evakuierung unterteilt [60].

Wie Abbildung 1 in Abschnitt 1.1 bereits aufzeigt, hat sich die Nutzung von Beleuchtung innerhalb der Flugzeugkabine über die Jahre hinweg maßgeblich verändert. Anfangs galt diese nur dem optischen Nutzen, demnach nur zur Ermöglichung des Sehens. Dieser Nutzen wurde um den Nutzen als Sicherheitsbeleuchtung für beispielsweise Notausgänge erweitert, bis schließlich ein funktioneller Nutzen in Form von Leuchten als Indikator für Bedienelemente oder Hinweise dazu kam. Heute dient die Beleuchtung der Kabine neben den bereits erwähnten Funktionen der Verbesserung des Passagierkomforts. Beleuchtungsszenarien stellen visuell einen Sonnenaufgang und -untergang dar und schaffen ein bestimmtes Ambiente. Der Trend geht auf einen chronobiologischen Nutzen zu. Ziel ist es, über die Kabinenbeleuchtung den circadianen Rhythmus der Menschen dahingehend zu beeinflussen, sodass die Auswirkungen des Jetlags minimiert wird und die Passagiere erholt ihre Destination erreichen [4].

## Sicherheitsbeleuchtung

Jedes Flugzeug muss nach CS. 25.812 über die grundlegende Kabineninnenraumbeleuchtung hinaus über eine Notfallbeleuchtung verfügen, die über einen gesonderten Kreislauf betrieben wird und im Falle einer Evakuierung der Passagiere die Kabine genügend ausleuchten kann. Darüber hinaus muss jede Kabine mit Notausgangsschildern sowie bodennaher Fluchtweg-Markierungen ausgestattet sein [4].

## LED-Beleuchtung

Die Nutzung von LED-Beleuchtung hat sich heutzutage in fast jeder Branche etabliert und vorherige Technologien obsolet gemacht. Viele Unternehmen, darunter auch Lufthansa Technik sehen in der LED-Technologie die Zukunft der Kabinenbeleuchtung [61]. Neben ihrer langen Lebensdauer weisen LED-Leuchten einen bis zu 50% geringeren Energieverbrauch auf [62, 61]. Außerdem kann durch den geringeren Energieverbrauch der LED-Beleuchtung an Gewicht gespart werden, da hierfür weniger wärmeisolierende Materialien verwendet werden müssen [4].

In heutigen Kabinen wird die Standardbeleuchtung aus LED in den drei Grundfarben rot, grün und blau erzeugt. Durch dieses RGB-Farbsystem können über additive Farbmischung (siehe Abbildung 14) nahezu unendlich viele farbliche Beleuchtungsvarianten erstellt werden [59].

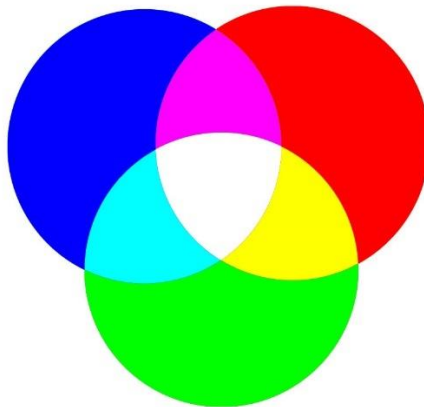


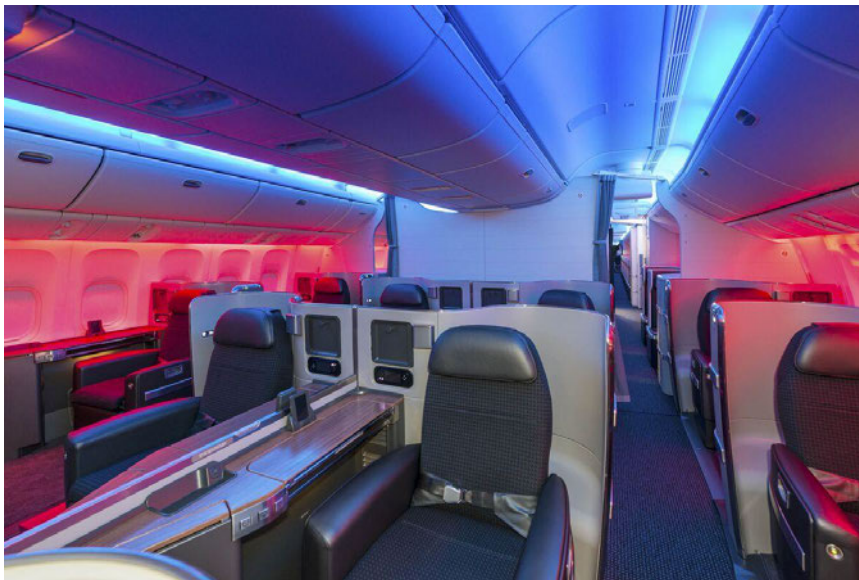
Abbildung 14: RGB-Farbmodell

Mittlerweile hat die Planung der Kabinenbeleuchtung einen Einfluss auf den gesamten Konstruktionsprozess des Flugzeugs [4]. Über die LED-Technologie können auch unübliche Flächen illuminiert werden oder Lichteffekte über indirekte Beleuchtung erzeugt werden. Zudem können über die Ansteuerung einzelner Leuchtpunkte Farbbilder erzeugt werden und beispielsweise Flaggen oder Logos projiziert werden [63, 4, 59]. Fluggesellschaften nutzen diese Möglichkeit, ihre Corporate-Identity-Farben in der Flugzeugkabine zu integrieren [4].



### **Einsatz von „Mood Lighting“**

Durch die Möglichkeiten der LED-Technologien nutzen immer mehr Fluggesellschaften die Kabinenbeleuchtung zur Verbesserung des Wohlbefindens. Im modernen, kommerziellen Flugverkehr geht es schon lange nicht mehr allein darum, Passagiere von einem Punkt zu einem anderen zu befördern. Vielmehr wollen die Fluggesellschaften den Passagieren eine besondere Flugerfahrung bieten. So nutzen sie *Mood Lighting* und erzeugen unabhängig von der Zeitzone und der Umgebung Sonnenauf- und -untergänge, simulieren den Tages- und Nachthimmel oder stellen die Polarlichter nach. Je nach Flugphase werden Beleuchtungsszenarien eingestellt, um ein gewünschtes Empfinden hervorzurufen. In der A330 werden sogar Leseleuchten mit einem weichem Apricotfilter genutzt, um die Passagiere attraktiver erscheinen zu lassen [4]. Auf Abbildung 15 ist ein Leuchtszenario der American Airlines in einer Boeing Maschine zu erkennen.



**Abbildung 15: Mood Lighting bei der American Airline (Boeing 2012) [64]**

Auch wenn mit dem Mood Lighting Millionen von Farben und Farbszenarien dargestellt werden können, hat sie ihre Limitationen. An erster Stelle steht die Orientierung in der Flugzeugkabine. Diese darf keinesfalls durch die Beleuchtung beeinträchtigt werden. Des Weiteren muss auch hier, wie in Abschnitt bereits erläutert, Rücksicht auf die Farbwiedergabe genommen werden. Da in der Kabine auch Speisen aufgenommen werden, ist es wichtig, dass diese natürlich und appetitlich erscheinen und nicht durch die Beleuchtungseinstellungen verfälscht dargestellt werden [4].

Mit der AIRBUS Airspace Cabin bietet Airbus den Fluggesellschaften eine Ambientebeleuchtung (siehe Abbildung 16), die bis zu 16,7 Millionen Farben darstellen kann. Sie versprechen, mit dieser Technologie den Passagiere ein wohltuendes Ambiente zu schaffen, die Adaption

an eine neue Zeitzone zu erleichtern und den Jetlag effektiv um bis zu drei Stunden zu reduzieren [65].



**Abbildung 16: Airspace LED-Beleuchtung (AIRBUS 2020) [65]**

Das Unternehmen jetlite GmbH geht noch einen Schritt weiter und setzt auf chronobiologisch wirksame Kabinenbeleuchtung. Dabei wird das Licht von dem jetlite-Algorithmus gesteuert, dessen Funktion wissenschaftlich nachgewiesen wurde. Um den Schlaf-Wach-Rhythmus der Passagiere zu verbessern, werden die Farbtemperatur und -intensität kontinuierlich angeglichen. Die Passagiere haben zudem die Möglichkeit, bereits einige Tage vor Abflug personalisierte Empfehlungen bezüglich optimaler Beleuchtung, Schlafenszeit und Ernährung per App zu erhalten, um die Auswirkungen des Jetlags bei Langstreckenflügen zu minimieren. Außerdem soll auch die Beleuchtung in der Kabine per App steuerbar sein, wie in zu sehen [66].



**Abbildung 17: jetlite App zur Überwachung der Kabinenbeleuchtung (jetlite 2023) [66]**

### 3.2 Ablauf von Langstreckenflügen

In der Luftfahrt wird in der Regel zwischen Kurz-, Mittel- und Langstreckenflügen unterschieden. Eine genaue, allgemeingültige Kategorisierung gibt es derzeit jedoch nicht. So unterscheiden sich die Definitionen je nach Fluggesellschaft und Region. Eine mögliche Referenz ist jedoch die Fluggastrechteverordnung (EG) 261/2004 der EU. Zur Ermittlung von Schadensansprüchen wird dort in drei Kategorien unterschieden [67]:

- Strecken bis 1500 km
- Strecken zwischen 1500 km und 3500 km
- Strecken über 3500 km

Daraus folgt, dass ein Flug mit einer Distanz von mehr als 3500 km zwischen Abflugs- und Zielort als Langstreckenflug definiert werden kann. Dies entspricht in etwa einer Flugzeit von 4,5 Stunden [4]. Über diese Kategorien hinaus wird vermehrt auch von Ultra-Langstreckenflügen gesprochen, die eine Flugzeit von 14 Stunden und länger aufweisen [68, 4]. Den Rekord für die längste Flugdauer eines Non-Stop-Fluges hält seit 2018 Singapore Airlines. Mit einer beachtlichen Flugdauer von 18 Stunden und 45 Minuten befördern sie Passagiere von Singapur nach New York [69].

Der Ablauf von Langstreckenflügen variiert dabei stark je nach Flugstrecke, Abflugzeit und Fluggesellschaft. Für den Passagier beginnt es jedoch immer mit dem Boarding. Das Boarding findet üblicherweise 45 min vor der geplanten Abflugzeit statt. Beim Eintreten der Passagiere ist die Beleuchtung hell und möglichst einladend. Die Passagiere steigen in das Flugzeug, suchen nach ihrem Sitzplatz und verstauen ihr Handgepäck, weshalb ein helles Licht in dieser Situation notwendig ist. Haben die Passagiere sich hingesetzt, werden die Türen geschlossen und es erfolgt eine Sicherheitsdemonstration zu der Verwendung des Sicherheitsgurtes, der Sauerstoffmasken, der Schwimmwesten und dem Hinweis auf die Notausgänge durch die Flugcrew. Währenddessen bewegt sich das Flugzeug bereits Richtung Startbahn für den Abflug. Vor dem Start wird noch die Kabinenbeleuchtung von den Piloten abgedunkelt. Ab dem Start kann der Flug in drei Flugphasen unterteilt werden: Der Anfangsphase des Fluges, der mittleren Flugphase und der Endphase. Mit dem Start erfolgt zunächst der Anstieg auf die Reiseflughöhe. Ist diese erreicht, wird das Anschlallzeichen ausgeschaltet und die Passagiere können sich frei bewegen, um beispielsweise die Toilette aufzusuchen. Gleichzeitig beginnt hiermit auch der Catering-Prozess für die Flugcrew. Der exakte Ablauf des Caterings kann nicht allgemeingültig beschrieben werden. Er hängt ab von der Fluggesellschaft, der Flugzeit, dem Flugverlauf und der grundlegenden Auslastung des Fluges. Um jedoch einen Überblick über einen möglichen Verlauf zu schaffen, wird der weitere Verlauf am Beispiel eines

## Stand der Technik

Direktfluges von Frankfurt (FRA) nach San Francisco (SFO) beschrieben, welcher von der Lufthansa betrieben wird. Der Flug kann mit einer Flugdauer von 11 Stunden und 30 Minuten als Langstreckenflug klassifiziert werden.

In der mittleren Flugphase versuchen die meisten Passagiere die Zeit zum Schlafen auszunutzen. Daher wird auf Langstreckenflügen oft versucht, den natürlichen Schlaf-Wach-Rhythmus der Zeitzone am Zielort zu simulieren, um den Effekt des Jetlags zu reduzieren. Hierfür wird die Kabinenbeleuchtung gedimmt und oftmals ein spezielles Beleuchtungsszenario für eine Schlafphase durch die Flugcrew eingestellt. Auf Wunsch werden in dieser Flugphase immer noch Snacks und Getränke durch die Flugcrew bereitgestellt.

In der Endphase, dem Beispiel nach etwa 2 bis 3 Stunden vor der Landung wird oft eine kleinere Mahlzeit oder ein Snack serviert. Abhängig von der Ankunftszeit am Zielort wird entschieden, ob es ein Frühstück, Mittagessen oder Abendessen serviert wird. Die Kabinenbeleuchtung wird zudem heller gestellt, um die Passagiere allmählich aufzuwecken und auf die Landung vorzubereiten. Des Weiteren leuchtet das Anschnallzeichen wieder auf und signalisiert den Passagieren, dass die Landung ansteht. Die Crew überprüft ob alle Passagiere angeschnallt, alle Rückenlehnen in eine neutrale Position und die Fensterblenden in der oberen Position sind. Dabei wird in den meisten Fällen die gleiche Beleuchtung wie während des Startens eingestellt. Die Flugphase findet hiermit ihr Ende und die Cockpitcrew geht in den Sinkflug über und landet das Flugzeug.

Nach der Landung gelangt das Flugzeug über die Taxiways auf seine vorgesehene Endposition. Bis zu diesem Zeitpunkt müssen alle Passagiere angeschnallt bleiben. Sobald das Flugzeug bereit für das Deboarding der Passagiere ist, wird die Anschnalleuchte ausgeschaltet und die Kabine aufgehell. Die Passagiere verlassen ihren Sitzplatz, entnehmen gegebenenfalls ihr Handgepäck aus den OHSC, werden von der Flugcrew verabschiedet und verlassen das Flugzeug.

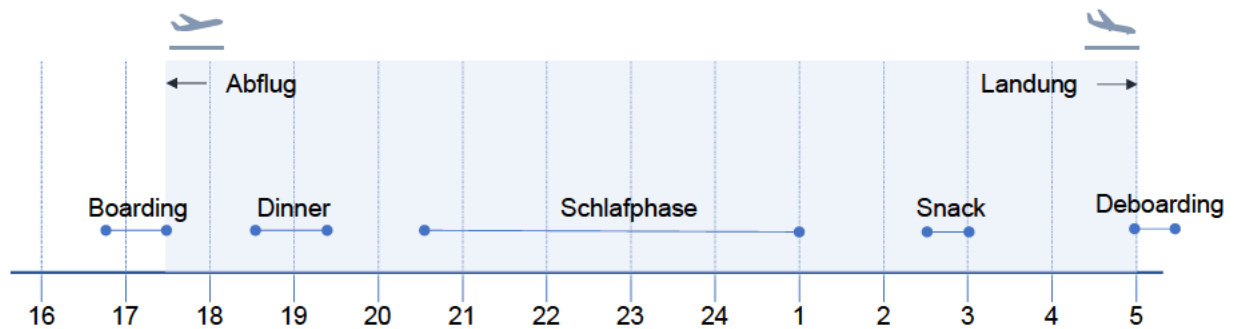


Abbildung 18: Beispielhafter Verlauf eines Langstreckenflugs

Abbildung 18 zeigt schematisch den Verlauf des Langstreckenflugs Frankfurt nach San Francisco. Für diesen beispielhaften Flug wurde von 18:30 Uhr bis 19:30 Uhr ein Zeitfenster für das Servieren und Abräumen des Abendessens eingeplant. Da das Boarding um 17:30 Uhr beginnt, liegt es nahe, dass die erste Mahlzeit das Abendessen ist. Anschließend wird ab 20:30 Uhr die Schlafphase eingeleitet, welche bis 01:00 Uhr andauert. Die letzte Mahlzeit wird um 2:30 Uhr serviert, also wie üblich etwa zwei bis drei Stunden vor der Landung. Um 05:00 Uhr mitteleuropäischer Sommerzeit, die in San Francisco 20:00 Uhr entspricht, beginnt das Deboarding der Passagiere.

## **4. Einfluss von Lichtfarbe und -temperatur auf das Schlafverhalten der Passagiere**

Der Einfluss von Licht auf das Schlaf-Wach-Verhalten des Menschen ist seit Jahrzehnten Objekt intensiver Forschungen. Durch die allgegenwärtige Exposition künstlichen Lichts ist das Zusammenspiel zwischen Licht und Schlaf besonders relevant. Dabei kann die Farbe und Temperatur des Lichts maßgebende Auswirkungen auf den circadianen Rhythmus haben und die Schlafqualität der Menschen prägen.

In diesem Kapitel werden wissenschaftlichen Erkenntnisse aufgezeigt, die den Einfluss von Lichtfarbe und -temperatur erläutern. Weitergehend wird untersucht, wie verschiedene Lichtspektren sich auf das circadiane System auswirken und die natürlichen Schlafmuster verändern können.

### **4.1 Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Lichtfarben und -temperaturen auf das Schlafverhalten**

In Bezug auf die Auswirkungen auf das Schlafverhalten konnten sehr homogene Ergebnisse gefunden werden. Einige dieser Studien werden im Folgenden näher betrachtet

#### **4.1.1 Studie I**

##### **Abstract**

Bei Menschen sind eine Reihe von nicht-bildgebenden (NIF) Lichtreaktionen wie die Melatonsuppression, die Phasenverschiebung und die Wachsamkeit empfindlich gegen kurzwellige Spektren von 440-480 nm. Das Ziel dieser Studie war es, die akute Wirkung drei verschiedener kurzwelliger Lichtpulse (420, 440 und 470 nm) sowie 600 nm Licht auf die subjektive Wachsamkeit zu untersuchen. Dazu wurden 12 Probanden den vier monochromatischen Wellenlängen mit zwei Photonendichten verabreicht. Die subjektive Stimmung und die Wachsamkeit wurden dabei in 30-minütigen Abständen unter der Verwendung von vier 9-Punkte VAS Skalen bewertet, um den Einfluss auf die Wachsamkeit und die Stimmung der verschiedenen Lichtbedingungen mit dem 470 nm Licht zu vergleichen. Im Vergleich zum Licht mit 470 nm war die Wachsamkeit der Probanden bei einer Wellenlänge von 420 signifikant höher und bei 600 nm signifikant niedriger. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die subjektive Wachsamkeit maximal sensitiv auf kurzwelliges, blaues Licht ist [70].

## **Aufbau der Studie**

12 männliche Probanden im Alter von  $27 \pm 4$  Jahren wurden innerhalb von 39 phasenverschobenen Laborsitzungen untersucht. Nach einer Reihe von Tests zeigte keiner der Probanden eine Farbblindheit auf. Um die individuelle Variation der circadianen Phase zu minimieren, wurden Probanden mit einem regulären Schlafrhythmus gewählt. Demzufolge lag die Einschlafzeit der Probanden zwischen 22 und 24 Uhr und das Aufwachen zwischen 7 und 8 Uhr. Für zwei Wochen unmittelbar vor den Untersuchungen mussten die Probanden eine reguläre Schlafphase von 23 Uhr bis 7 Uhr aufrechterhalten. Eine Toleranz von maximal 30 Minuten dieser Zeiten wurde den Probanden gewährt [70].

Beleuchtung und Körperhaltung wurden während der Untersuchungen stetig kontrolliert. Die Umgebungsbeleuchtung wurde durchgehend bei  $<8$  lx gehalten. 2 lx in Blickrichtung und 5-7 lx bei direktem Blick auf die weißen Deckenleuchten. Ein vierstündiger monochromatischer Lichtimpuls wurde am Ende der zweiten Nacht, also am dritten Tag der Studie unmittelbar nach dem Aufwachen der Probanden von 7:15 bis 11:15 Uhr appliziert. Insgesamt wurden vier monochromatische Wellenlängen bei zwei Photonendichten getestet: 420 und 440 nm bei  $2,3 \times 10^{13}$  Photonen/cm<sup>2</sup>/s; 440, 470 und 600 nm bei  $6,2 \times 10^{13}$  Photonen/cm<sup>2</sup>/s. Die Lichtintensität betrug 0,7-17,5 lx. Als Lichtquelle diente ein PL900-Lichtkasten mit einer 150 W Quarz-Halogen-Lampe (Dolan Jenner Industries) die das Licht über ein Glasfaserkabel (Edmund Optics) lieferte. Die Probanden platzierten ihre Köpfe in ein speziell entwickeltes Visier, das monochromatisches Licht erzeugte. Das Visier wurde so platziert, dass die Probanden es während der zehnmütigen Lichtexposition zu ihrem Gesicht schwenken konnten und es für die fünfminütige Dimm-Phase wegdrücken konnten. Dieser Zyklus wurde während des vierstündigen Versuchs 16-mal wiederholt. Die Stichprobengröße in jeder Lichtbedingung war wie folgt:  $2,3 \times 10^{13}$  Photonen/cm<sup>2</sup>/s bei 420 nm (n = 7) und 440 nm (n = 6); und  $6,2 \times 10^{13}$  Photonen/cm<sup>2</sup>/s bei 440 nm (n = 8), 470 nm (n = 8) und 600 nm (n = 10). Ein Proband erhielt eine Lichtbedingung, vier Probanden erhielten zwei Lichtbedingungen, ein Proband erhielt drei Lichtbedingungen, drei Probanden erhielten vier Lichtbedingungen und drei Probanden erhielten fünf Lichtbedingungen [70].

## Ablauf der Studie

Die Wachsamkeit und die Stimmung der Probanden wurden am dritten Tag der Studie mittels der 9-Punkt visuellen Analogskala (VAS) bewertet, welche Tabelle 4 entnommen werden kann. Die Probanden gaben dem Versuchsleiter alle 30 Minuten während der vierstündigen Lichtexposition um 7:40, 8:10, 8:40 Uhr, etc. bis 11:10 Uhr und dann alle 15 Minuten bis 12:00 Uhr eine verbale Rückmeldung. Die Bewertung um 7:10 Uhr erfolgte vor dem Beginn des Lichtimpulses um 7:15 Uhr und die Bewertungen um 11:10 Uhr noch während der Lichtexposition. Für die Analyse wurden nur die Bewertungen genutzt, die während der Lichtimpulse von 7:40 bis 11:10 Uhr aufgenommen wurden [70].

Tabelle 4: Punkte der VAS zur Bewertung der Wachsamkeit und der Stimmung [70]

Nr.	Minimum Skala	Maximum Skala
I	1 - sehr wach	9 - sehr schläfrig
II	1 - sehr ruhig	9 - sehr angespannt
III	1 - sehr fröhlich	9 - sehr unglücklich
IV	1 - deprimiert	9 - begeistert

## Ergebnisse

Die Ergebnisse der Versuche sind in Form von zwei Diagrammen in Abbildung 19 und Abbildung 20 zu sehen. Abbildung 19 zeigt die subjektive Wachsamkeit der Probanden über der Zeit. Die unterschiedlichen Linien stellen die verschiedenen Wellenlängen auf. Hierbei wurden zunächst 420 nm, 470 nm und 600 nm miteinander verglichen. Es wurden signifikante Auswirkungen der Beleuchtungsbedingungen auf die Wachsamkeit festgestellt, nachdem das Licht mit 470 nm mit den anderen Wellenlängen verglichen wurde. Die Wachsamkeit der Probanden war bei Exposition unter Licht mit einer Wellenlänge von 420 nm signifikant höher als bei 470 nm. Ferner waren die Wachsamkeitslevel bei dem 600 nm Licht signifikant geringer als beim 470 nm Licht [70].

Unter 440 nm und 470 nm Licht bei  $2,3 \times 10^{13}$  Photonen/cm<sup>2</sup>/s wurde in den ersten zwei Stunden nach Beginn der Lichtexposition eine leichte Abnahme der Wachsamkeit verzeichnet, gefolgt von einem linearen Anstieg der Wachsamkeit in den letzten zwei Stunden der Lichtexposition, woraus sich ein sinusförmiger Graph ergab. In Kontrast dazu wurden bei dem 420 nm und 440 nm Licht bei  $6,2 \times 10^{13}$  Photonen/cm<sup>2</sup>/s die Wachsamkeitswerte über die gesamte Lichtexposition aufrechterhalten (siehe Abbildung 20). Unter 600 nm Licht blieben die Wachsamkeitswerte während der gesamten Lichtexposition auf einem niedrigerem Niveau [70].



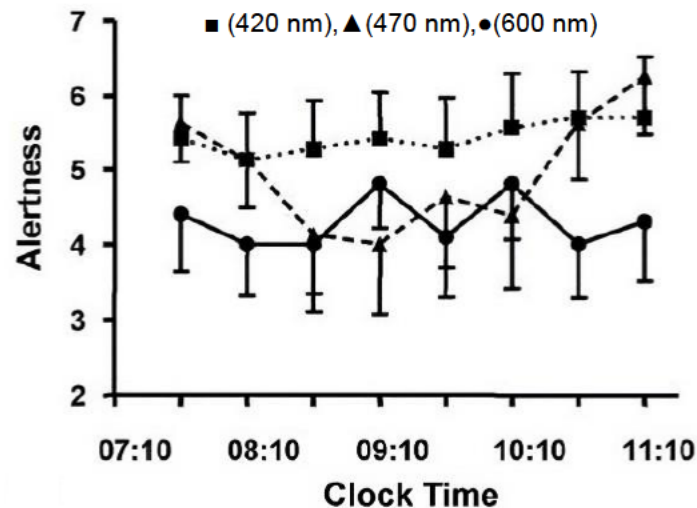


Abbildung 19: Subjektive Wachsamkeit während der Lichtexposition bei 420, 470 und 600 nm [70]

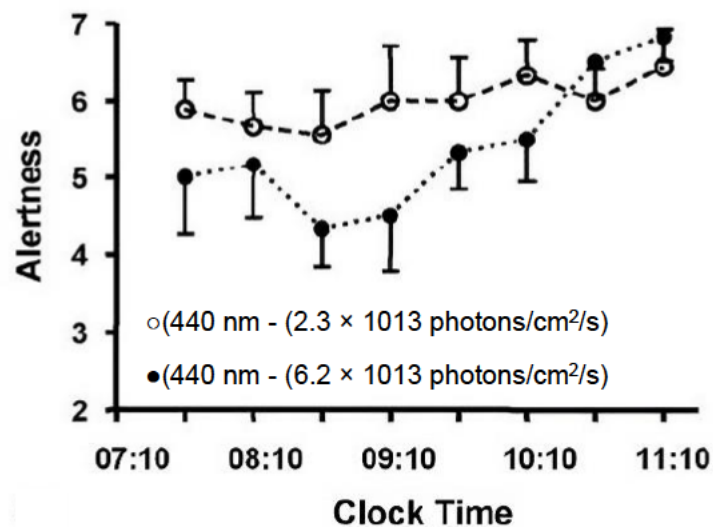


Abbildung 20: Subjektive Wachsamkeit bei unterschiedlichen Photonendichten [70]

### Fazit

Die Studie konnte somit die Ergebnisse von Cajochen [71] reproduzieren und demonstrieren, dass die Wachsamkeit unter Licht mit einer Wellenlänge von 470 nm signifikant höher als ist als Licht mit einer Wellenlänge von 600 nm. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass Licht mit 420 nm signifikant mehr effektiv dabei ist die subjektive Wachsamkeit zu erhöhen im Vergleich zu Licht mit 470 nm, obwohl das Licht mit 420 nm 2,5-mal weniger Photonen hatte. Diese Daten zeigen, dass die subjektive Wachsamkeit maximal sensitiv auf sehr kurze Wellenlängen (420 nm) reagiert [70].

#### **4.1.2 Studie II**

##### **Abstract**

Licht kann bei Menschen akute physiologische und schläfrigkeitsmindernde Reaktionen hervorrufen. Das Ausmaß dieser Reaktion hängt dabei von dem Zeitpunkt, der Dauer und der Intensität der Lichtexposition ab. In dieser Studie wird nachgewiesen, dass sowohl die schläfrigkeitsmindernde als auch die thermoregulatorische Auswirkung und die Herzfrequenz ebenfalls abhängig von der Wellenlänge des Lichts sind. Eine zweistündige Exposition mit Licht von 460 nm Wellenlänge am Abend resultierte in einer signifikant stärkeren Melatoninsuppression als bei einem Licht mit 550 nm. Auch die Körpertemperatur und die Herzfrequenz stiegen signifikant an [71].

##### **Aufbau der Studie**

Im Rahmen dieser Studie wurden zehn männliche Probanden zwischen 21 und 29 Jahren untersucht. Alle Probanden waren Nichtraucher und unbetroffen von medizinischen, psychiatrischen oder Schlafstörungen, was vorher anhand von Fragebögen, körperlichen Untersuchungen und Anamnese festgestellt wurde. Vor Beginn und zum Ende der Studie wurde eine augenärztliche Untersuchung vorgenommen, um zu ermitteln, ob die Probanden unter einer Sehbehinderung leiden und um sicherzustellen, dass die Lichtanwendung innerhalb der Studie keine Schäden davongetragen hat. Um äußere Einwirkungen zu minimieren, sollten die Probanden eine Woche vor der Studie auf Alkohol und Koffein verzichten. Dazu wurde toxikologische Urinanalyse durchgeführt. Zudem wurden die Probanden gebeten, in der Woche vor der Studie einen regelmäßigen Schlaf-Wach-Rhythmus einzuhalten und von diesem maximal 30 Minuten abzuweichen. Die Einhaltung des Rhythmus wurde mit einem Aktigraphen am Handgelenk und täglichen Schlaftagebüchern überprüft. Alle Probanden bestätigten die Randbedingungen dieser Studie mit einer schriftlichen Einwilligung [71].

Das monochromatische Licht wurde dabei von einer 300 W Xenon-Lampe der Firma Thermo Oriel erzeugt, die entweder bei 460 nm oder 550 nm gefiltert wurde. Sowohl während der Lichtexposition als auch im lichtlosen Zustand wurden die Probanden gebeten, ihre Augen offenzuhalten. Auf die Nutzung von Mitteln, um die Pupillen zu weiten wurde verzichtet, da mögliche Auswirkungen auf die Herzfrequenz, der Thermoregulation und der Wachsamkeit der Probanden vermieden werden wollte.

## Einfluss von Lichtfarbe und -temperatur auf das Schlafverhalten der Passagiere

Die subjektive Schläfrigkeit der Probanden wurde mittels einer Karolinska-Schläfrigkeitsskala (siehe Tabelle 5) und einer visuellen Analogskala während der gesamten Wachdauer bewertet [71].

**Tabelle 5: Karolinska-Schläfrigkeitsskala [72]**

<b>Zustand</b>	<b>Nr.</b>
Extremely alert	1
Very alert	2
Alert	3
Rather alert	4
Neither alert nor sleepy	5
Some signs of sleepiness	6
Sleepy, but no effort to keep awake	7
Sleepy, but some effort to keep awake	8
Very sleepy, great effort to keep awake, fighting sleep	9
Extremely sleepy, cannot keep awake	10

Die Körpertemperatur und die Temperatur auf der Hautoberfläche an acht verschiedenen Stellen wurden während der gesamten Studie mit einer Rektalsonde und Hautthermoelementen aufgezeichnet und in 20 Sekunden Abständen gespeichert. Zudem wurden Elektro-Kardiogramm Leitungen auf dem seitlichen Thorax und dem Brustbein angebracht. Ein Offline-Algorithmus der Firma System Hofstetter erkannte dabei die Herzfrequenz anhand der Länge der R-R-Intervalle. Zur Feststellung des Melatonins wurde während der geplanten Wachzeit in 30-minütigen Abständen Speichelproben entnommen. Die minimal nachweisbare Melatonin-Dosis betrug 0,2 pg/ml [71].

### **Ablauf der Studie**

Die Studie wurde in drei Abschnitte unterteilt, die je einen zeitlichen Abstand von einer Woche zueinander hatten. Innerhalb dieser Wochen wurde der Schlaf-Wach-Rhythmus nicht verändert und die Schlafqualität aufrechterhalten. Ausgehend von den gewohnten Schlafzeiten der Probanden wurde ein sogenanntes „constant posture“ Protokoll (CP) geführt, welches zehn Stunden nach der festgelegten Weckzeit um etwa 18:00 Uhr begann und am nächsten Tag zwei Stunden nach der Weckzeit endete. Unter diesen Bedingungen erfuhren die Probanden eine kontrollierte Einschlafphase von 1,5 Stunden bei 2 Lux, auf die eine zweistündige Dunkeladaption bei kompletter Dunkelheit folgte. Anschließend wurde die Lichtexposition für die nächsten zwei Stunden eingeleitet. Während dieser wurden die Probanden entweder mit monochromatischem Licht mit 460 nm, monochromatischem Licht mit 550 nm oder keinem Licht beleuchtet. Danach blieben die Probanden für weitere 1,5 Stunden bei polychromatischem, weißem Licht wach mit 2 Lux wach, bis sie wieder für 7,75 Stunden schlafen durften. Auf Abbildung 21 ist der Ablauf schematisch dargestellt [71].

## Einfluss von Lichtfarbe und -temperatur auf das Schlafverhalten der Passagiere

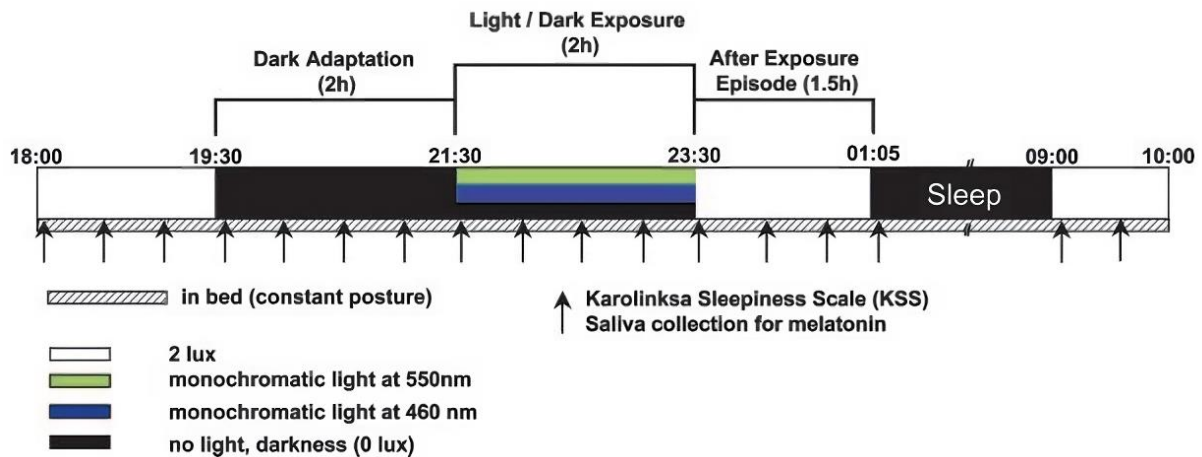


Abbildung 21: Zeitlicher Ablauf der Versuche [71]

### Ergebnisse

Wie auch bereits angenommen, hat monochromatisches Licht eine wellenlängenbedingte Melatonin-suppression hervorgerufen. Auf Abbildung 22 ist der Anteil der Melatoninkonzentration im Speichel so wie die Ergebnisse der subjektiven Schläfrigkeit aus der Karolinska-Schläfrigkeitsskala für die Wellenlängen 460 nm und 550 nm sowie für das Szenario ohne Licht zu erkennen. Dabei wurden die Werte während der vollständigen Dunkelheit, der zweistündigen Lichtexposition mit der jeweiligen Wellenlänge sowie der darauffolgenden Phase mit polychromatischem, weißem Licht aufgenommen. 30 Minuten nach Beginn der Lichtexposition kann bei dem Licht mit einer Wellenlänge von 460 nm eine deutlich höhere Melatonin-suppression festgestellt werden als beim Licht mit 550 nm. Diese Beobachtung konnte auch über den Rest der Lichtexposition festgehalten werden. Die Melatonin-Produktion konnte bei dem Licht mit 550 nm eine Stunde nach Beginn der Lichtexposition nur leicht, aber dennoch signifikant unterdrückt werden im Vergleich zu keinem Licht [71].

Auch die subjektive Schläfrigkeit hat sich dementsprechend parallel verändert. So ist sie bei Licht mit 460 nm in der ersten Stunde der Lichtexposition weit unter der des 550 nm Lichts. Zwischen der Situation ohne Licht und dem Licht mit 550 nm Wellenlänge gab es keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der subjektiven Schläfrigkeit [71].

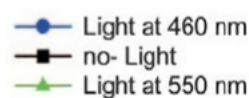
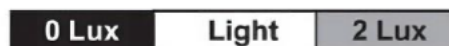


Abbildung 22: Auswirkungen der Lichtexposition bei 460 nm, 550 nm und keinem Licht [71]

Wie bereits in den theoretischen Grundlagen beschrieben, hängen Melatonin-Produktion, Körpertemperatur und Herzfrequenz zusammen und sind durch Licht beeinflussbar. Abbildung 23 zeigt den Verlauf der Körpertemperatur und der Herzfrequenz über der Zeit je nach Lichtexposition. Während der der Lichtexposition mit 460 nm wurde der gewohnte abendliche Rückgang der Körpertemperatur signifikant abgeschwächt und blieb nach der Lichtexposition, während der restlichen Zeit bis zum Schlaf signifikant höher als bei dem Licht mit 550 nm [71].

Auch bei der Herzfrequenz ließ sich ähnliches beobachten. Auch wenn der Effekt nur von kurzer Dauer war, konnte eine signifikant höhere Herzfrequenz bei dem 460 nm Licht im Vergleich zum 550 nm Licht festgestellt werden. Dieses Muster hielt sich auch in den ersten 20 Minuten nach der Lichtexposition [71].

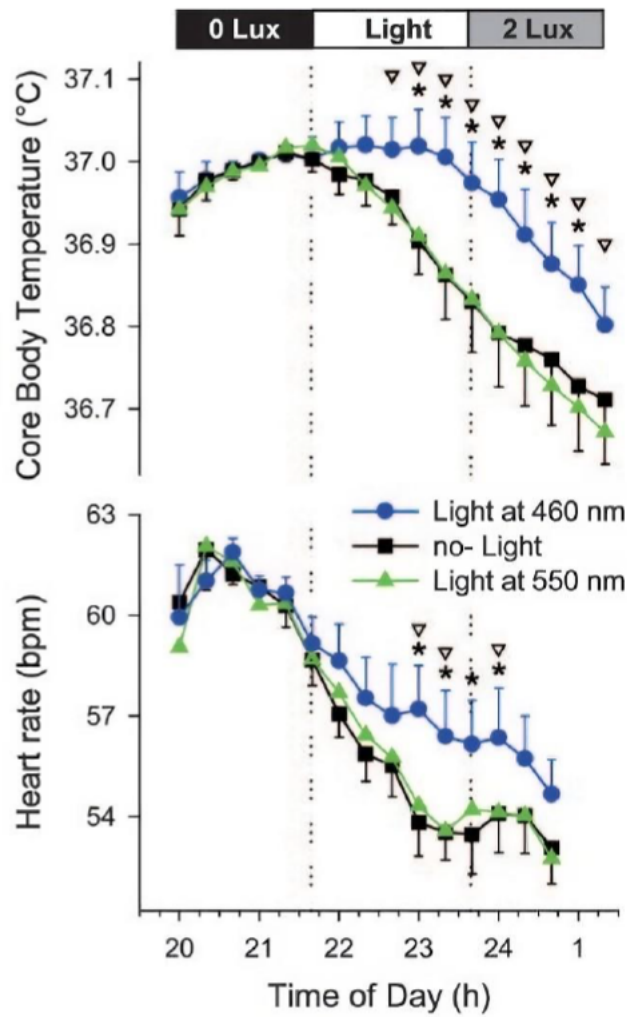


Abbildung 23: Auswirkungen auf die Körpertemperatur und die Herzfrequenz

### Fazit

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Reaktion auf Licht in Bezug auf Wachsamkeit, bzw. subjektiver Schläfrigkeit abhängig von der Wellenlänge des Lichts sind und dass kurzwelliges Licht mit 460 nm effektiver bei der Reduktion der Schläfrigkeit am Abend ist als Licht mit 550 nm. Des Weiteren wurde nachgewiesen, dass auch die Herzfrequenz und die Körpertemperatur abhängig von der Wellenlänge des Lichts sind [71].

## 4.2 Literaturüberblick über die physiologische Wirkung des Lichts in Bezug auf das Schlafverhalten

Neben den zwei ausführlich beschriebenen Studien gibt es weitere Literatur, die von den Auswirkungen von Licht auf das Schlafverhalten und das circadiane System handelt. Angelehnt an [4] werden einige dieser in Tabelle 6 ausgewählt und die Quintessenz kurz erläutert.

**Tabelle 6: Studien zur Wirkung des Lichts in Bezug auf das Schlafverhalten und circadiane System**

<b>Autor</b>	<b>Titel</b>	<b>Kernaussage</b>
Brainard et al. (2001)	Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans; Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor	Es gibt einen dritten Photorezeptor im Auge, die höchste Melatoninsuppression wird mit blauem Licht bei 460 nm erreicht
Berson et al. (2002)	Phototransduction by retinal ganglion cells set the circadian clock	Melatoninsuppression bei 460 nm
Lewy et al. (1980)	Light suppresses melatonin secretion in humans	Melatonin-Produktion kann durch helles Licht in der Nacht unterdrückt werden
Lockley et al. (2003)	High Sensitivity of the Human Circadian Melatonin Rhythm to Resetting by Short Wavelength Light	Die Reaktion des circadianen Systems ist wellenlängenabhängig. Kurzwelliges Licht bei 460 nm trägt maßgebend zur Melatoninsuppression bei
Lucas et al. (2014)	Measuring and using light in the melanopsin age	Es genügen bereits geringe Lichtintensitäten um 1 lx für Melatoninsuppression. Der Bereich um 480 nm ist hauptsächlich wirksam
McIntry et al. (1989)	Human melatonin suppression by light is intensity dependent	Melatoninsuppression ist abhängig von der Lichtintensität
Warman et al. (2003)	Phase advancing human circadian rhythms with short wavelength light.	Die Phasenverschiebung des circadianen Systems reagiert besonders sensitiv auf kurzwelliges Licht

## **5. Bewertung des Einflusses von Lichtfarbe und -temperatur auf die Stimmung**

Sowohl aus visueller als auch nicht-visueller Perspektive spielen Beleuchtungsbedingungen eine wesentliche Rolle für das Wohlbefinden und die Wahrnehmung von Komfort von Menschen [73, 74].

### **5.1 Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Lichtfarben und -temperaturen auf die Stimmung der Passagiere**

In diesem Kapitel werden ausgewählte Studien, welche verschiedene Lichtfarben und -temperaturen in Hinblick auf das Komfortempfinden und der Stimmung miteinander verglichen haben, vorgestellt. Dabei wird auf den allgemeinen Aufbau und Ablauf der Studie, sowie auf die Auswahl der Probanden und die Ergebnisse eingegangen.

#### **5.1.1 Studie I**

Die Farbtemperatur ist einer der wichtigsten Beleuchtungsparameter beim Einfluss subjektiver Wahrnehmung. Dennoch gibt es nur wenige Studien, die eine große Bandbreite an Farbtemperaturen im Rahmen des Einflusses auf das Wohlbefinden in Innenräumen untersucht haben [5].

#### **Abstract**

Im Zuge dessen wurde in dieser Studie ein psychophysiologisches Experiment mit der Methode der erzwungenen Wahl durchgeführt. Hierfür haben insgesamt 12 Probanden die Beleuchtung einer Lichtkabine mit unterschiedlichen Farbtemperaturen beobachtet [5]. Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass die Kruithof'sche Regel (Kapitel 2.3) nur eine qualitative Schlussfolgerung ist und kein genauer Ausdruck für eine angenehme Kombination von Farbtemperatur und Beleuchtungsstärke ist und dass die Beleuchtungsstärke keinen signifikanten Einfluss auf die Einschätzung über Wohlbefinden hat, wenn sie in einem moderaten Bereich liegt [5].

#### **Aufbau der Studie**

Für den Versuch wurden 12 Farbtemperaturen ausgewählt: 2000 K, 3000 K, 3500 K, 4000 K, 4500 K, 5500 K, 6500 K, 8000 K, 10000 K, 20000 K und 100000 K. Zur Vereinfachung wird die Abkürzung CCT synonym für die Farbtemperatur genutzt. Leuchtmittel können selten CCT von höher als 25000 K aufweisen. Die CCT von 100000 K wurde nur in die Studie aufgenommen, um speziell die stark blau-angereicherte Beleuchtung fiktiv zu testen [5]. In der Studie wurden die CCT in Kelvin beschrieben und die entsprechenden  $u'$  und  $v'$  Koordinaten aus dem 1972 2° CIE-Farbsystem zugeordnet.



## Bewertung des Einflusses von Lichtfarbe und -temperatur auf die Stimmung

Zur Visualisierung der resultierenden Lichtfarbe wurden sie im Zusammenhang mit dieser Bachelorarbeit durch die Eingabe der Koordinaten im Color Calculator von OSRAM dargestellt.

**Tabelle 7: Tatsächliche verwendete CCT und korrespondierende CIE 1976 Koordinaten nach [5]**

Nr.	$u'$	$v'$	Farbtemperatur [K]	Farbe
1	0.2975	0.5375	2097	
2	0.2728	0.5313	2489	
3	0.2502	0.5212	3011	
4	0.2357	0.5113	3501	
5	0.2250	0.5015	4006	
6	0.2171	0.4924	4518	
7	0.2040	0.4802	5549	
8	0.1976	0.4680	6541	
9	0.1917	0.4539	8075	
10	0.1880	0.4433	9732	
11	0.1803	0.4146	22460	
12	0.1767	0.3970	100000	

Des Weiteren wurden die Beleuchtungsstärken 350 lx, 500 lx und 1000 lx ausgewählt. Insgesamt ergeben sich mit den 12 CCT dadurch 36 vordefinierte Beleuchtungsbedingungen [5]. Alle Beleuchtungsbedingungen wurden in einer Lichtkabine mit sechs LEDs dargestellt. Die Wände der Kabine wurden innen mit der neutralen Farbe *Munsell N6* bestrichen. Als Messgerät wurde das Konica-Minolta CS-2000 verwendet [5].

Unter den 12 Probanden waren sechs weibliche und sechs männliche Studierende der Zhejiang Universität. Das Alter der Probanden reichte von 21 bis 35 Jahren. Alle Probanden verfügten über eine normales Sehvermögen [5]. Damit sie die Lichtverhältnisse in dieser Studie bewerten können, wurde ein ausgedrucktes Foto mit vier typischen Bildern von natürlichen Objekten wie ein blauer Himmel, grüne Wiesen, menschliche Haut und weiteren mit einer Distanz von 35 cm zum Beobachter verwendet, um den Probanden vertraute Bilder und Szenarien zu zeigen [5].

## Bewertung des Einflusses von Lichtfarbe und -temperatur auf die Stimmung

Mit der Methodik der erzwungenen Wahl wurden vier Fragen gestellt, die Tabelle 8 zu entnehmen sind.

**Tabelle 8: Verwendete Fragen innerhalb der Studie [5]**

No.	Question	Answers
1	„Do you feel comfortable for working in this lighting condition“?	Yes or No
2	„Do you prefer this lighting condition for working“?	Yes or No
3	„Do you feel comfortable for relaxing in this lighting condition“?	Yes or No
4	„Do you prefer this lighting condition for relaxing“?	Yes or No

### Ablauf der Studie

Die 36 Beleuchtungsbedingungen wurden zufällig auf sechs Sitzungen verteilt, wobei jede Sitzung sechs Beleuchtungsbedingungen umfasste und ungefähr 30 Minuten dauerte. Vor der formellen Analyse erhielten die Teilnehmer eine kurze Erläuterung des Experiments. Jede Sitzung begann mit einer Dunkeladaptation von drei Minuten. Darauf folgte zu Beginn jeder Testlichtbedingung eine einminütige Anpassung an das Licht, gefolgt von der Bewertung des Komforts und der Präferenz durch die Teilnehmer mittels eines Fragebogens. Vor dem Wechsel zur nächsten Lichtbedingung wurde eine weitere einminütige Dunkeladaptation durchgeführt. Auf diese Weise wurden alle sechs Testlichtbedingungen in dieser Sitzung durchgeführt. Insgesamt wurden in dieser Studie 1728 Bewertungen gesammelt [12 Teilnehmer × 2 subjektive Einschätzungen (Komfort und Präferenz) × 2 Szenarien (Entspannung und Arbeit) × 12 Farbtemperaturen × 3 Beleuchtungsstärken] [5].

### Ergebnisse

Die Beleuchtungsstärke wird in vielen Arbeiten als wichtigster Faktor, welcher die Wahrnehmung von Komfort und Präferenz beeinflusst betrachtet [75–77]. Aus diesem Grund wurden alle Beleuchtungsstärken im Rahmen der Versuche dieser Studie an die empfohlenen Beleuchtungsstärken aus [78, 79] für Innenraumbeleuchtung orientiert.

Aus diesen Randbedingungen und dem Ergebnis der Versuche entstand dementsprechend das Balkendiagramm in Abbildung 24. Es zeigt die Präferenz im Arbeitsszenario für alle ausgewählten Beleuchtungsbedingungen. Daraus wird deutlich, dass die Unterschiede zwischen den drei ausgewählten Beleuchtungsstärken bei fast allen Farbtemperaturen insignifikant sind, was darauf hindeutet, dass bei Einhaltung der empfohlenen Beleuchtungsstärken in Innenräumen, der Komfort und die Präferenz weniger von Beleuchtungsstärken beeinflusst werden und mehr von der Farbtemperatur [5]

## Bewertung des Einflusses von Lichtfarbe und -temperatur auf die Stimmung

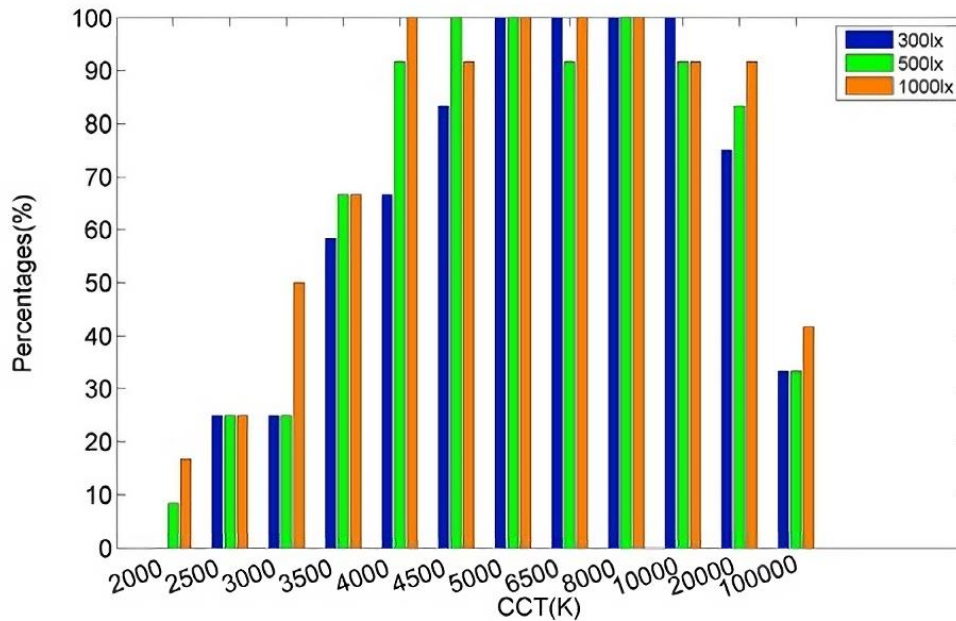
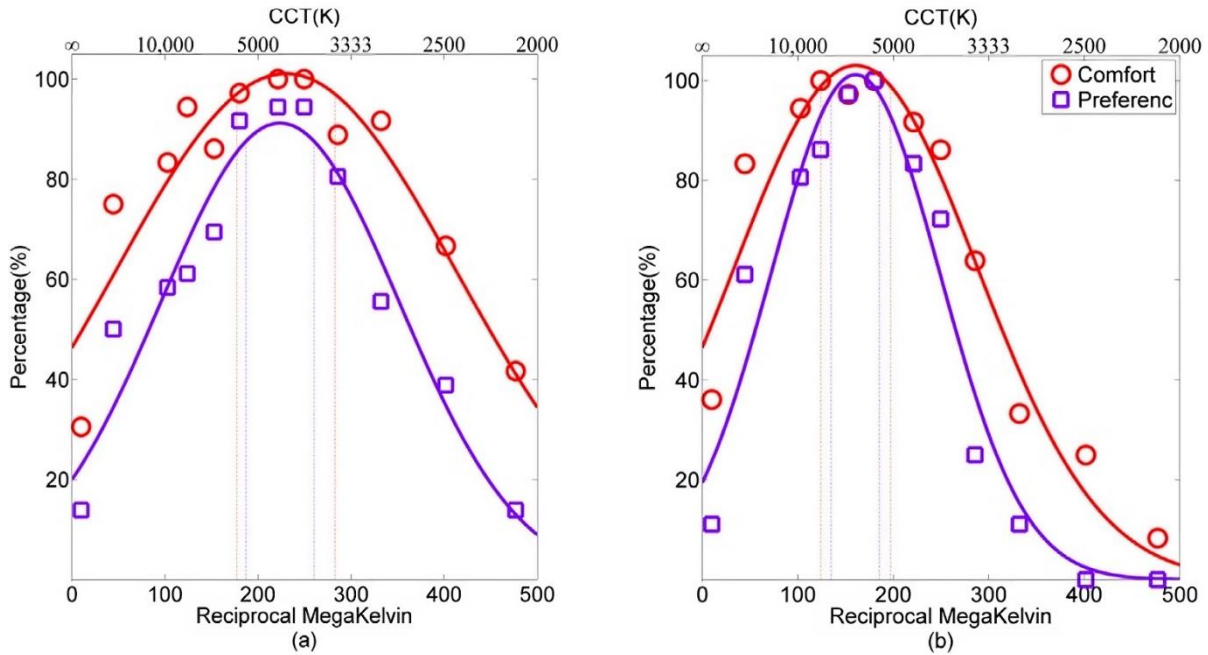


Abbildung 24: Präferenz der Beleuchtung nach CCT und Beleuchtungsstärke im Arbeitsszenario [5]

Nach der Regel von Kruithof, sollten jedoch einige Farbtemperaturen mit unterschiedlichen Beleuchtungsstärken unterschiedliche Grade von Komfort oder Präferenz erreichen. Beispielsweise soll bei einer Farbtemperatur von 6500 K eine Beleuchtungsstärke von 1000 lx der Komfort oder die Präferenz höher sein als die bei 500 lx und 350 lx. Aus dem Balkendiagramm geht jedoch hervor, dass die Einschätzung über die Beleuchtungsstärke bei gleicher Farbtemperatur keinen signifikanten Unterschied macht. Solche Phänomene konnten auch beim Entspannungsszenario beobachtet werden. Ursächlich für diesen Widerspruch könnte die Tatsache sein, dass der Komfort und die Präferenz nicht offensichtlich von der Beleuchtungsstärke abhängen, wenn sie innerhalb des empfohlenen Bereichs liegt und dass die Regel von Kruithof lediglich eine qualitative Schlussfolgerung ist und keine sehr genaue Beschreibung der Kombination aus Farbtemperatur und Beleuchtungsstärke [5].

In Abbildung 25 sind die Kernergebnisse der Studie zu sehen. Hierfür wurde untersucht, welche CCT den höchsten Komfort und die höchste Präferenz erzielt. Dafür wurden zwei Szenarien ausgewählt, ein Entspannungsszenario und ein Arbeitsszenario. Die optimalen CCT für das Entspannungsszenario sind 4350K für Komfort und 4473 für Präferenz. Beim Arbeitsszenario sind es 6223 K für Komfort und 6235K für Präferenz. Daraus wird geschlossen, dass die am meisten präferierte CCT auch die mit dem größten Komfortempfinden ist und umgekehrt [5].

## Bewertung des Einflusses von Lichtfarbe und -temperatur auf die Stimmung



**Abbildung 25: Einschätzung über Komfort und Präferenz für Entspannungsszenarien (a) und Arbeitsszenarien (b) [5]**

Dabei wurden die durchschnittlichen Schätzungen für Komfort und Präferenz für Entspannungs- und Arbeitsszenarien durch eine Gaußfunktion angepasst, wie in Abbildung 25 dargestellt, wobei die Abszisse der reziproken CCT in Mega Kelvin entspricht und die roten Kreise und violetten Quadrate den Komfort bzw. die Präferenz darstellen. Hier müssen zwei wichtige Parameter eingeführt werden, zum einen die optimale CCT, die durch die Position der Kurvenspitze auf der Abszisse bestimmt wird, und zum anderen der akzeptable CCT-Bereich, der durch das Intervall auf der Abszisse zwischen den beiden Punkten mit Kurvenwerten größer als 95 % definiert ist [5].

Die optimale CCT und die reziproke CCT haben einen umgekehrten Zusammenhang. Die optimale CCT beschreibt die Farbtemperatur, bei welcher das Maximum der Kurve auf der Abszisse liegt und die höchsten durchschnittlichen Werte für Komfort und Präferenz in dem jeweiligen Szenario aufzeigt. Die reziproke CCT ist der Kehrwert der optimalen CCT und definiert die Abszisse des Diagramms. Die Nutzung einer reziproken Größe dient oftmals dazu, einen inversen Maßstab zu definieren, der in diesem Fall zum besseren Verständnis der Beziehung zwischen Farbtemperatur und anderen Parametern beitragen soll. Reziproke finden in wissenschaftlichen Arbeiten oft Anwendung, um eine nicht-lineare Beziehung zwischen Variablen zu linearisieren oder diese aus einem anderen Winkel zu betrachten [5].

Darüber hinaus werden die akzeptablen CCT-Bereiche durch die Intervalle zwischen den gestrichelten Linien auf der Abszisse in Abbildung 25 veranschaulicht, was darauf hinweist, dass der akzeptable CCT-Bereich für den Komfort größer ist als der für die Präferenz [5].

## Bewertung des Einflusses von Lichtfarbe und -temperatur auf die Stimmung

Des Weiteren liegt die Kurve des Komforts innerhalb des gesamten CCT-Bereichs über die der Präferenz und die Steigung der Kurve der Präferenz ist steiler als die des Komforts, was verdeutlicht, dass die Präferenz strenger ist als der Komfort. Daraus folgt, dass die Probanden sich in der Lichtbedingung, die sie präferieren auch wohlfühlen. Auf der anderen Seite sind die akzeptablen CCT-Bereiche für das Arbeitsszenario kleiner als die des Entspannungsszenarios. Das zeigt, dass die Anforderungen an komfortable und präferierte CCTs im Arbeitsszenario strenger sind als die im Entspannungsszenario [5].

Ursache für die niedrigeren CCT beim Entspannungsszenario wird im erhöhten Blauanteil von höheren CCT gesehen. Das stark blau-angereicherte Licht hat einen signifikanten Einfluss auf das circadiane System und erhöht die Erregung und senkt die subjektive Schläfrigkeit [5, 20, 71]. Licht mit grüner und gelber Färbung hingegen induzieren Emotionen wie Entspannung und Ruhe [5].

Die Studie konnte somit die Ergebnisse anderer Studien replizieren. Auch dort ist man zur Schlussfolgerung gekommen, dass hohe CCT Wachsamkeit und Erregung induzieren, während niedrige CCT, also „warm“ empfundenes Licht Entspannung induziert [5, 80, 81].

### **Fazit**

In dieser Studie wurden die komfortablen und bevorzugten CCTs für Entspannungs- und Arbeitsszenarien subjektiv mittels der psychophysischen Methode der erzwungenen Wahl mit zwölf CCTs und drei Beleuchtungsstärken bewertet. Die Korrelationsanalyse zwischen den Farbwiedergabeeigenschaften der getesteten CCTs und den beiden subjektiven Einschätzungen deutet darauf hin, dass die Farbwiedergabeeigenschaften der Lichtquellen keinen signifikanten Einfluss auf den wahrgenommenen Komfort und die Präferenz für das Lichtambiente haben. Darüber hinaus werden der Komfort und die Präferenz nicht offensichtlich durch die Beleuchtungsstärke beeinflusst, wenn sie innerhalb des empfohlenen Bereichs liegt. Die aus der Kruithof'schen Regel abgeleiteten angenehmen Kombinationen von CCT und Beleuchtungsstärke sind hauptsächlich eine qualitative Schlussfolgerung ohne exakte Aussage. Eine detaillierte Analyse zeigt, dass der experimentelle Aufbau des Szenarios für die optimalen CCTs sehr wichtig ist, was darauf hindeutet, dass relativ niedrige CCTs als komfortabler angesehen und zum Entspannen bevorzugt werden, während höhere CCTs als komfortabler angesehen und zum Arbeiten bevorzugt werden [5].

### **5.1.2 Studie II**

Auch diese Studie hat den Mangel an Forschungen zu der Auswirkung der Lichtfarbe und -temperatur in Bezug auf zu gering CCT-Bereiche als Motivation für eigene Versuche gesehen. Da in dieser Studie die Auswirkungen auf die Aufgabenleistung einen Großteil ausmachen, werden lediglich für die Stimmung relevanten Ergebnisse gezeigt.

#### **Abstract**

Zahlreiche Studien haben sich mit dem Einfluss der CCT auf die Stimmung beschäftigt. Dabei gab es jedoch nur geringe Schwankungen zwischen den einzelnen CCT, die untersucht wurden. Diese Studie untersuchte die Auswirkungen der CCT in einem größeren Bereich. Mit der Methode der Messwiederholung wurden vier CCT (4000 K, 6000 K, 8000 K und 10000 K) x zwei Aufgabentypen (computerbasiert und papierbasiert) x zwei Testzeiten (5 min und 90 min) durchgeführt. Die Probanden fühlten sich bei einer CCT von 4000 K wohler, aber auch schläfriger. Bei einer sukzessiven Veränderung der CCT von 4000 K auf 10000 K verschlechterte sich die Stimmung, die Aufgabenleistung konnte hingegen verbessert werden [6].

#### **Aufbau der Studie**

Die Studie verwendete einen 4 x 2 x 2 Versuchsplan mit drei unabhängigen Variablen: Der Farbtemperatur des Lichts mit 4000 K, 6000 K, 8000 K und 10000K, der Aufgabentyp, welcher entweder computerbasiert oder papierbasiert war und der Expositionsdauer von 5 oder 90 Minuten. Alle diese Variablen waren Teil der Messwiederholung, um den Einfluss von Intersubjekt-Variationen zu vermeiden. Die Probanden wurden gebeten, an acht Sitzungen teilzunehmen und die Untersuchungen in jeder Sitzung zweimal durchzuführen. Um den Einfluss der vorherigen Lichtbedingung auszuschließen, wurde jede Lichtbedingung im Abstand einer Woche durchgeführt. Insgesamt nahmen 22 Probanden teil, darunter zehn Männer und 12 Frauen. Mit einem Alter von 19 bis 34 Jahren, lag der Mittelwert bei 23 Jahren. Alle Probanden waren Büroangestellte und in einem guten Gesundheitszustand. Keiner der Probanden litt unter Farbenblindheit. Darüber hinaus konnte keiner der Probanden einem extremen Chronotypen zugeordnet werden [6].

Bewertung des Einflusses von Lichtfarbe und -temperatur auf die Stimmung

## Ablauf der Studie

Die Probanden wurden über das allgemeine Verfahren unterrichtet und mussten die Aufgaben am Tag vor der Untersuchung mindestens dreimal absolvieren, um einen Lerneffekt zu vermeiden [6]. Eine schematische Darstellung des Versuches ist in Abbildung 26 zu sehen.

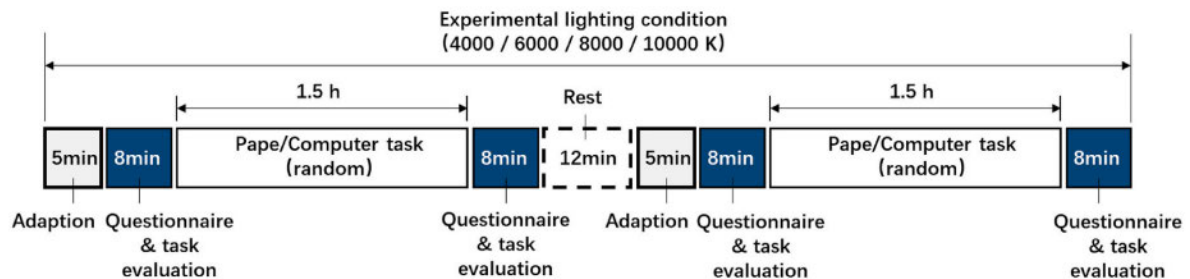


Abbildung 26: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs [6]

In jeder der Sitzungen wurden sowohl die computerbasierten als auch papierbasierten Aufgaben bearbeitet. Dabei wurde die Reihenfolge der Aufgabentypen zufällig zugewiesen. Während eine Hälfte der Teilnehmer die papierbasierten Aufgaben unter allen Beleuchtungsbedingungen löste, arbeitete die andere Hälfte an den computerbasierten Aufgaben. Zwischen den Computer- und Papieraufgaben wurde eine 12-minütige Pause in einer dunklen Umgebung eingelegt, um Auswirkungen der vorherigen Sitzung auszugleichen. Der Versuch begann bei jedem Aufgabentypen mit einer fünf-minütigen Eingewöhnungsphase, gefolgt von einem Fragebogen bezüglich der Bewertung des Lichts, der Wachsamkeit, Stimmungseinschätzungen und einer Bewertung der Aufgabenleistung mit einer Dauer von etwa acht Minuten. Danach wurde die jeweilige Aufgabe für 1,5 Stunden absolviert. Anschließend wurde der Vorgang wiederholt [6].

## Ergebnisse

In Abbildung 27 und Abbildung 28 sind die für die Stimmung relevanten Ergebnisse zu sehen.

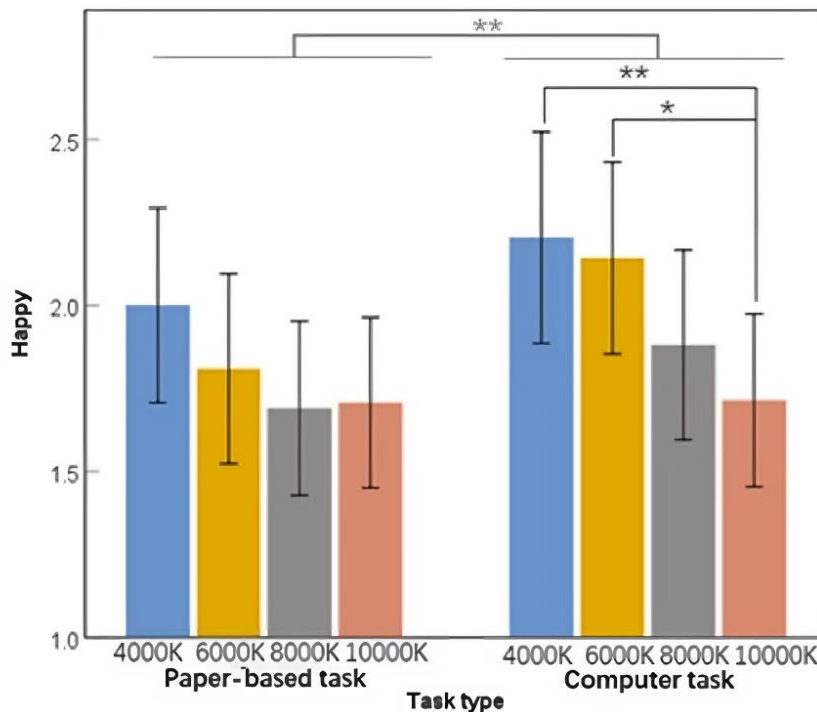


Abbildung 27: Einschätzung über Fröhlichkeit nach CCT und Aufgabentyp [6]

Für den Aspekt der Fröhlichkeit bzw. der Zufriedenheit erreichen die 4000 K den besten Score. Sowohl bei der papierbasierten Aufgabe als auch bei der computerbasierten Aufgabe lässt sich der Trend der sinkenden Zufriedenheit mit steigender Farbtemperatur verzeichnen [6].

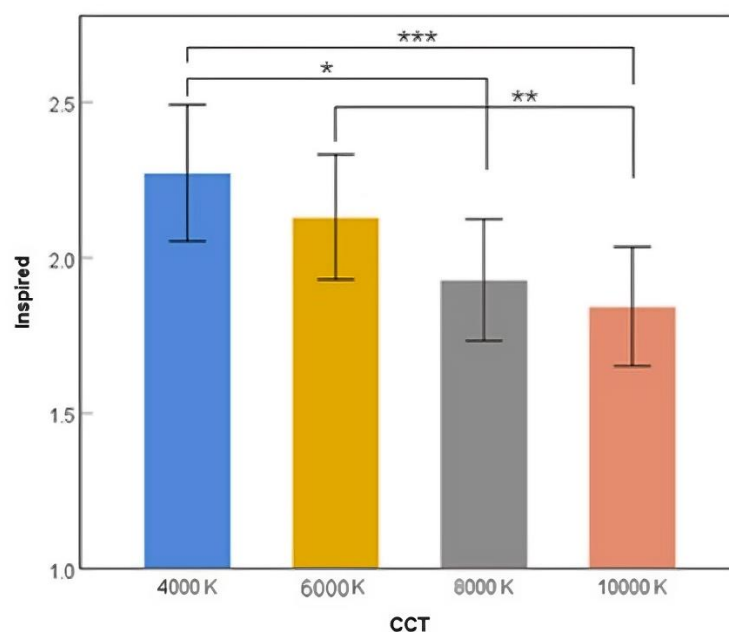


Abbildung 28: Einschätzung über Begeisterung je nach CCT [6]



Im Hinblick auf dem Empfinden der Begeisterung lässt sich ebenfalls der Trend wie bei der Zufriedenheit erkennen. Den höchsten Wert erreicht die Beleuchtung mit 4000 K [6].

## Fazit

Zunächst wurde festgestellt, dass die Lichtfarbe bzw. Farbtemperatur signifikante Auswirkungen auf die Bewertung von Komfort und positiver Stimmung haben und somit das Potenzial besitzt, subjektive Wahrnehmung positiv zu beeinflussen. Wohlbefinden und Stimmung waren bei einer Farbtemperatur von 4000 K optimal. Mit steigender Farbtemperatur sinkt die Stimmung, während die Arbeitsleistung von einem Anstieg der Farbtemperatur profitiert [6].

## 5.2 Literaturüberblick über die Auswirkungen von Licht auf die Stimmung

Selbstverständlich gibt es weitere Studien, die sich mit dem Einfluss der Lichtfarbe und -temperatur befassen haben. In Tabelle 9 werden einige ausgewählt und die Kernaussage samt der verwendeten Beleuchtungseinstellungen in Form von der Farbtemperatur und der Beleuchtungsstärke vorgestellt.

**Tabelle 9: Überblick über die Literatur zum Einfluss des Lichts auf die Stimmung**

<b>Autor</b>	<b>Titel</b>	<b>Beleuchtungseinstellungen</b>	<b>Kernaussage</b>
Baron et al. (1992)	Effects of indoor lighting on the performance of cognitive tasks and interpersonal behaviors: The potential mediating role of positive affect	CCT [K]: 3000, 3600, 4200, 5000 ILL [lx]: 150, 1500	Gedimmtes warmes Licht hat einen positiven Effekt, während gedimmtes kaltes und helles warmes Licht einen negativen Effekt hat
McCloughan et al. (1999)	The impact of lighting on mood	CCT [K]: 3000, 4000 ILL [lx]: 300, 800	Kaltes Licht mit hohen Beleuchtungsstärken hat einen negativen Effekt
Hsieh (2015)	Effects of Illuminance Distribution, Color Temperature and Illuminance Level on Positive and Negative Moods	CCT [K]: 2700, 3000, 4000, 6500 ILL [lx]: 75, 150, 780, 1500	Licht mit 2700 K induziert die höchste positive Stimmung

## 6. Diskussion

Im folgenden Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse aus der Literaturrecherche und den Studien erneut aufgegriffen und diskutiert. Zum Ende des Kapitels werden die gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der Wirkung des Lichts auf den Schlaf und die Stimmung angewendet, um für jede Phase eines Langstreckenflugs ein Beleuchtungsszenario zu wählen.

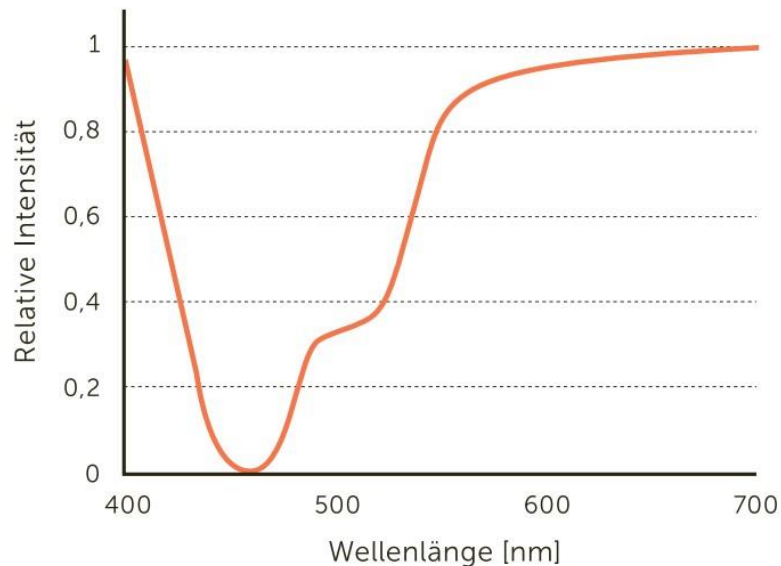
### 6.1 Untersuchung des Einflusses von Licht auf das Schlafverhalten

Das für den Menschen sichtbare Licht verfügt über ein breites Farbspektrum. In Anbetracht des Schlafverhaltens spielen jedoch nur zwei Bereiche eine wesentliche Rolle. Jener, der die höchste Melatoninsuppression erreicht und jener, der die Melatonin-Produktion am geringsten beeinflusst. Mit diesen beiden Bereichen kann man die Kernziele in Bezug auf den Schlaf-Wach-Rhythmus der Passagiere erreichen – sie aufwecken, bzw. wach halten oder Schläfrigkeit zu induzieren. Vor der Literaturrecherche war bereits bekannt, das blaues Licht Wachsamkeit induziert. Um hier genauer zu differenzieren, werden unterschiedliche Wellenlängen des blauen Lichts miteinander verglichen, welche eng an die Farbtemperatur gekoppelt sind.

Ein Großteil der Studien hat in Versuchen nachgewiesen, dass die höchste Melatoninsuppression bei Licht mit einer Wellenlänge von 460 nm erreicht wird [71, 82–84]. Dementsprechend wird die Melatonin-Produktion am geringsten gehemmt, je geringer der Blauanteil und je höher der Rotanteil des Lichts ist. Nur eine Studie [70] konnte in ihren Versuchen nachweisen, dass ein Wellenlänge von 420 nm noch effektiver ist in der Melatoninsuppression, als Licht mit 460 nm.

## Diskussion

In Abbildung 29 ist eine Melatonin-Erhaltungsfunktion zu sehen, welche diese Erkenntnisse visuell darstellt. Auf der Ordinate ist die relative Intensität der Melatonin-Produktion zu erkennen und auf der Abszisse die Wellenlänge des Lichts. Bei Wellenlängen unter 400 nm und über 700 nm wird die Melatonin-Produktion kaum beeinträchtigt. Bereits ab einer Wellenlänge von 600 nm, ist der Einfluss auf die Melatonin-Produktion marginal.



**Abbildung 29: Wellenlängenbezogene Melatonin-Erhaltungsfunktion [35]**

Es ist wichtig zu erwähnen, dass mit der Nutzung von Licht die Melatonin-Produktion nur erhalten oder gehemmt werden kann, jedoch nicht erhöht. Die Melatoninsekretion erreicht bei gesunden Menschen ihr Maximum am späten Abend. Möchte man auch tagsüber Schläfrigkeit induzieren, muss Melatonin in einer anderen Form eingenommen werden, um eine Phasenverschiebung zu erreichen.

Neben der Lichtfarbe und der Farbtemperatur gibt es weitere wesentliche Parameter, welche in den Studien nur nebensächlich oder gar nicht behandelt worden. Die Lichtintensität hat bei der Wirkung auf die Melatonsuppression ebenfalls eine entscheidende Rolle. So erfolgte bei Versuchen von Lewy et al. (1980) die Melatonsuppression bei einer Beleuchtungsstärke von 1000 lx dreimal schneller als bei 500 lx [4].

Des Weiteren wurden bei keinen der Studien die Chronotypen der Probanden identifiziert. Durch unterschiedliche Chronotypen können die Melatonin-Level zu gegebenen Uhrzeiten je nach Probanden unterschiedlich ausfallen. Dennoch können auch ohne diese Betrachtung wirksame Spektren des Lichts zur Erhaltung oder Suppression der Melatonin-Produktion gefunden werden.

## 6.2 Einfluss der Lichtfarbe und -temperatur auf die Stimmung

Der Einfluss der Lichtfarbe und -temperatur auf die Stimmung der Passagiere muss aus einer anderen Perspektive betrachtet werden als der Einfluss auf das Schlafverhalten. Hormonelle Mechanismen in Bezug auf das Schlafverhalten unterliegen bei allen Menschen denselben Grundsätzen. Durch Alter, Geschlecht und persönlicher Veranlagung können gewisse Unterschiede entstehen. Bezüglich des wirksamen Spektrums für die Melatoninsuppression sind sich die Forscher jedoch einig. Anders ist es bei der emotionalen Wirkung auf die Stimmung. Sie ist geprägt von sozialen Hintergründen und Lebenserfahrungen. Im asiatischen Raum werden andere Farbtemperaturen zum Arbeiten und Entspannen bevorzugt als im Westen [5]. Des Weiteren werden je nach Nation unterschiedliche Emotionen mit einer gewissen Farbe assoziiert. So wird in vielen Teilen des Westens beispielsweise Weiß mit Reinheit, Unschuld und Frieden assoziiert. In einigen Ländern Asiens jedoch steht Weiß für Trauer und den Tod [85].

Die Studienlage hat dennoch nachgewiesen, dass „warm“ empfundene Beleuchtung, also Leuchtmittel mit geringeren Farbtemperaturen sich positiv auf die Stimmung und den Komfort von Menschen auswirken [5]. Im Hinblick auf Entspannung, geht aus Kapitel 5.1.1 hervor, dass eine Farbtemperatur von 4350 K am meisten bevorzugt wird. Für ein Arbeitsszenario wird eine Farbtemperatur von 6223 K als komfortabel angesehen. Ursächlich hierfür ist der höhere Blauanteil des Lichts, welcher die Wachsamkeit und Konzentration fördert. Des Weiteren wurde nachgewiesen, dass die Beleuchtungsstärke keine wesentliche Rolle für das Empfinden von Komfort spielt, wenn sie in einem moderaten Bereich liegt [5]. Die Studie hat somit die Grundsätze des Kruithof-Diagramms für ungenau befunden. Weitere Studien, wie die von Bodman (1967), Boyce und Cuttle (1990) und Davis und Ginthner (1990) sind sich darüber einig, dass es keine Beobachtungsnachweise für die Kruithof-Kurve gibt [86]. Aus den Ergebnissen, die in Kapitel 5.1.2 vorgestellt wurden, ergibt sich eine Farbtemperatur von 4000 K für eine optimale Stimmung. Damit liegen die beiden Ergebnisse nicht weit auseinander. Dennoch können diese Ergebnisse nicht als Referenz für eine fundierte Empfehlung geeigneter Lichtfarben und -temperaturen zur Verbesserung des Wohlbefindens im Kontext der Flugzeugkabine genutzt werden. Zum sind diese Bereiche weit entfernt von den Kernaussagen aus Tabelle 9. Aufgrund der doch arbeitsorientierten Grundlage der beiden Studien in Kapitel 5 fallen die Farbtemperaturen in diesen Studien höher aus. Hier steht nicht der Komfort zum Entspannen in einer Situation wie in der Flugzeugkabine im Fokus, ferner werden alltäglichere Szenarien betrachtet. Der Einfluss auf die Stimmung muss ohnehin kritischer betrachtet werden, da die Einschätzung sehr subjektiv und emotional geschieht.

## Diskussion

Die im Allgemeinen geringen Korrelationen zwischen den subjektiven Einschätzungen und den beiden Arten von Farbwiedergabeindizes in Kapitel 5.1.1 zeigen, dass die Farbwiedergabeeigenschaft in dieser Studie keinen signifikanten Einfluss auf den Wahrnehmungskomfort und die Präferenz hat. Der Hauptgrund für dieses Ergebnis ist, dass die Probanden gebeten wurden, den Wahrnehmungskomfort und die Präferenz für den Farbton und die Helligkeit der Testbeleuchtung zu bewerten und nicht die Farbtreue der Objektfarben unter der Testbeleuchtung. Daraus ergibt sich die Hypothese, dass das Gefühl der Behaglichkeit und der Präferenz keine signifikante Korrelation mit der Farbwiedergabeeigenschaft von LED-Beleuchtung aufweist. Im Kontext dieser Studie mag das sein, innerhalb der Flugzeugkabine gibt es jedoch hierzu andere Rahmenbedingungen. Da hier Nahrung verzehrt wird, ist die Farbwiedergabe und somit die korrekte Wahrnehmung bekannter Objekte von großer Bedeutung. Eine farblich unappetitliche Wiedergabe von Speisen und Getränken ist weder für die Passagiere noch für die Crew vorteilhaft und könnte das Gemüt kippen. Daher ist im Rahmen des Wohlbefindens der Passagiere an Bord nicht nur die Lichtfarbe und -temperatur entscheidend, sondern auch eine gute Farbwiedergabe. Nach DIN 6169-1 (siehe Tabelle 2) wäre hier für die Flugzeugkabine eine Farbwiedergabestufe von 1A angebracht.

Ein weiterer Punkt ist der Versuchsort. Keine der Studien wurden in dem Umfeld einer Flugzeugkabine durchgeführt. Für die physiologische Wirkung des Lichts, beispielsweise der Melatonin-suppression ist dies nicht ausschlaggebend. Für die Wirkung des Lichts auf die Stimmung, also auf emotionaler Ebene jedoch fließen weitere Faktoren mit ein. Zum einen spielt die Ergonomie eine wesentliche Rolle. Neben der Intensität und der Lichtfarbe und -temperatur hat die Ergonomie des Raumes einen Einfluss auf die emotionale Wahrnehmung. Formen und Dimensionen des Raumes können dem Beobachter unterschiedliche Gefühle vermitteln.

Aufgrund der Unterschiede in der Forschungslage, können im Hinblick auf die Stimmung im Vergleich zu den Auswirkungen auf das Schlafverhalten keine präzisen und vor allem fundierten Empfehlungen entwickelt werden.

### 6.3 Empfehlung geeigneter Beleuchtungsszenarien je nach Flugphase

In Kapitel 3.2 wurde im Zusammenhang mit der Definition eines Langstreckenfluges ein Beispielflug vorgestellt. Anhand des gewonnenen Einblicks in die Studienlänge und dem Wissen über die theoretischen Grundlagen folgen nun Empfehlungen für die Beleuchtung in der Flugzeugkabine für den ausgewählten Beispielflug. Dabei geht es hauptsächlich um die Wahl der Lichtfarbe bzw. der Farbtemperatur.

Bevor die erste Flugphase beginnt, muss zunächst erst das Boarding der Passagiere stattfinden. Da der Eintritt in die Flugzeugkabine den ersten Eindruck hinterlässt, ist es wichtig, die Passagiere einladend zu empfangen. Gleichzeitig steht die Orientierung im Vordergrund. Die Passagiere suchen ihren Sitzplatz, verstauen ihr Gepäck in den OHSC und machen sich mit ihrem Platz vertraut. Dementsprechend muss alles bestens sichtbar sein. Die Beleuchtungsstärke muss hier also hochgefahren werden. Im Hinblick auf die Farbtemperatur ist eine tagelichtähnliche Beleuchtung um die 6500 K sinnvoll. Sie ist für alle Menschen bekannt und ermöglicht genügend visuelle Orientierung. Airlines können in dieser Phase auch, sofern die Technik es zulässt, Akzente in Farben ihrer Corporate-Identity einsetzen, um einen Wiedererkennungswert zu schaffen.

Sobald alle Passagiere sich auf ihrem Platz befinden und die Sicherheitseinweisung seitens der Crew ihr Ende findet, können geringere Farbtemperaturen eingesetzt werden, die wie jetzt bekannt, eine „wärmere“ und komfortablere Stimmung erzeugen. Hierfür sollten, nach den Ergebnissen aus Kapitel 5, Farbtemperaturen von etwa 2700 bis 4000 K eingesetzt werden. Anschließend wird die Kabine für den Start abgedunkelt. Sofern das Flugzeug die Reiseflughöhe erreicht hat, sollte die Lichtbedingung von vorher wiederaufgenommen werden. Die Aufhellung der Stimmung der Passagiere kommt durch die Ausschüttung des Hormons Serotonin, wie bereits in Kapitel 2.2.3 erklärt. Sie hängt zusammen mit einer erhöhten Herzratenvariabilität und ist äußerst wichtig für die Schlafqualität. Da Serotonin für die Melatonin-Synthese verantwortlich ist, ist es von Vorteil, die Ausschüttung dieses Hormons tagsüber zu maximieren. Je höher die Melatonin-Produktion ist, desto besser ist die Schlafqualität.

Beim Servieren der Mahlzeiten sollte aufgrund der Wiedergabequalität der Farben ein neutrales Licht herangezogen werden. Rot- und Blauanteil des Lichts sollten hier in etwa gleich aufgestellt sein. Der Bereich von 5000 K bis 6500 K ist hier zu empfehlen. Da im Anschluss die Schlafphase erfolgt, ist es von Vorteil, die Farbtemperatur im unteren Bereich dieses Spektrums zu wählen.

Aus Kapitel 4.1 geht hervor, dass blaues Licht im Bereich von 460 nm die größte Melatonin-suppression aufweist und damit Schläfrigkeit unterdrückt. Für die Schlafphase sollte demnach

## Diskussion

für die Beleuchtungseinstellungen Licht mit einer Wellenlänge von über 580 nm mit der geringst erlaubten Beleuchtungsstärke gewählt werden [4]. Das rote Licht hat damit eine sehr geringe Auswirkung auf die endogene Melatonin-Produktion und vermeidet Beeinträchtigungen der Schlafqualität.

Nach dem Ende der Schlafphase verbleiben beim Beispielflug noch etwa vier Stunden bis zur Landung. Das Ziel ist es, die Passagiere aufzuwecken und ihre Aufmerksamkeit zu erhöhen, damit sie reibungslos beim Deboarding zurechtkommen und aufgeweckt das Flugzeug verlassen. Um Disruption zu vermeiden und eine angenehme Transition zu gewährleisten, sollte die Beleuchtung sich allmählich dem Bereich von 460 nm und einer erhöhten Beleuchtungsstärke annähern. Mit diesen Beleuchtungseinstellungen wird die maximale Melatonsuppression erreicht, Schläfrigkeit vermindert und Wachsamkeit induziert [82–84]. Diese Einstellungen können bis zum Deboarding beibehalten werden. In Abbildung 30 sind die Empfehlungen passend zum Flugverlauf schematisch dargestellt.

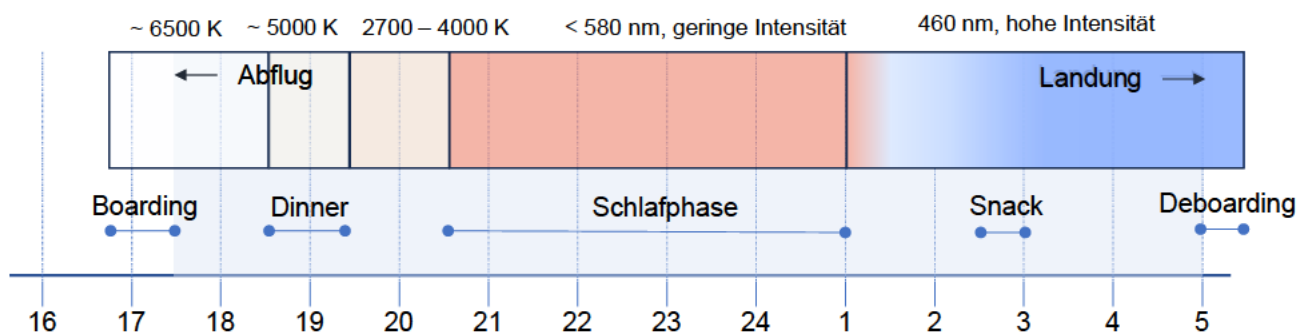


Abbildung 30: Schematischer Flugverlauf mit empfohlenen Beleuchtungseinstellungen

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

### Zusammenfassung

Aus der umfangreichen Forschungslage geht hervor, dass Licht einen hohen Stellenwert in der Bereicherung der Lebensqualität hat. Neben anfänglichen Untersuchungen, die sich weitestgehend mit der Auswirkung der Beleuchtungsstärke auf die Stimmung und das Schlafverhalten befasst haben, gewinnt die Frage der optimalen Lichtfarbe und -temperatur immer mehr an Bedeutung. Gerade im Hinblick auf die Wirkung des Lichts auf den Schlafrhythmus gibt es zahlreiche Studien, die ähnliche Ergebnisse erzielen konnten.

Mit den Erkenntnissen der Studienlage können somit folgende Schlussfolgerungen gezogen werden. Zur Aktivierung der Passagiere während der Landephase wird blaues Licht mit hoher Intensität um die 460 nm Wellenlänge empfohlen, da hier die höchste Melatoninsuppression und somit Wachsamkeit erzielt wird. Zur Deaktivierung der Passagiere ist es zunächst wichtig, die Serotonin-Produktion hochzuhalten. Dies wird hauptsächlich mit gelblichem Licht geringer Farbtemperatur und moderater Intensität erreicht, welches die Stimmung der Passagiere aufhellt. Durch eine hohe Serotonin-Produktion kann mehr Melatonin synthetisiert werden, welches die Schlafqualität maßgebend erhöht. Um die Melatoninsekretion nicht zu beeinträchtigen, muss rötliches Licht mit einer Wellenlänge von über 580 nm und einer möglichst geringen Intensität eingesetzt werden. Stimmung, bzw. Wohlbefinden sowie Schlafqualität gehen somit Hand in Hand miteinander.

Nicht einstimmig und universell sind die Aussagen der Auswirkungen der Lichtfarbe und -temperatur auf die Stimmung und das Wohlbefinden der Passagiere. Auch wenn die Studienlage sich darüber einig ist, dass geringe Farbtemperaturen und moderate Beleuchtungsstärken eine positive Auswirkung auf das Komfortempfinden und die Behaglichkeit haben und hohe Farbtemperaturen mit hoher Beleuchtungsstärke tendenziell negative Auswirkungen, herrscht kein klar erscheinender Konsens über die genaue Farbtemperatur. Ursächlich hierfür ist, dass die Empfindung einer Stimmung in Reaktion auf eine Lichtbedingung auch auf einer emotionalen und individuellen Ebene geschieht, während die Wirkung auf das Schlafverhalten hauptsächlich auf die Physiologie des Menschen zurückzuführen ist.

Insgesamt kann jedoch gesagt werden, dass die Interaktion zwischen verschiedenen Beleuchtungsparametern wie die Beleuchtungsstärke, Spektralverteilung und Lichtfarbe sowie -temperatur eine wichtige Rolle in Bezug auf die Stimmung von Menschen hat und somit nicht nur ein einziger Faktor den Gesamteindruck beeinflusst [87].



### **Ausblick**

Für die Auswirkungen der Lichtfarbe und -temperatur auf das Schlafverhalten ist die Studienlage bereits gut aufgestellt. In Anbetracht des stets vorhandenen Problems des Jetlags bei Langstreckenflügen besteht dennoch weiterhin Bedarf an Forschung von chronologisch wirksamem Licht. Auch der Einfluss auf die Stimmung muss im Raum der Flugzeugkabine untersucht werden, um hier präzisere Erkenntnisse zu gewinnen.

Die zusätzlichen Gegebenheiten wie unterschiedliche Chronotypen, soziale sowie kulturelle Hintergründe und verschiedene Bedürfnisse deuten bereits darauf hin, dass keine allgemeingültig optimalen Lichtbedingungen existieren. Ferner bedarf es hier an einer individuellen Personalisierung. Genau hier stößt die Flugzeugkabine in der Economy-Class an ihre Grenzen und stellt den limitierenden Faktor dar. Auch wenn hier verschiedene Beleuchtungsszenarien visualisiert werden können, werden diese nicht den Bedürfnissen aller Passagiere gerecht. Während ein Passagier ein beruhigendes und entspanntes Licht zum Lesen möchte, fordert ein anderer eventuell eins, was die Konzentration erhöht und nicht zum Schlafen verleitet. Die gewünschte Zeit für die Schlafphase kann bei den Passagieren auch unterschiedlich ausfallen und ist abhängig vom bisherigen und nachfolgenden Tagesablauf der Passagiere.

Geeignete Lösungen hierfür können jedoch mit der First- oder Businessclass realisiert werden. Über Partitionen kann jeder Passagier einen eigenen kleinen Raum erhalten, in welchem die Beleuchtung personalisiert und ideal auf die Bedürfnisse zugeschnitten werden kann. Dieses Konzept könnte auch auf andere Verkehrsmittel wie Züge oder Automobile übertragen werden, wobei die Personalisierungsmöglichkeiten bei letzterem besonders vielversprechend sind.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Forschung im Bereich der Lichtgestaltung in der Flugzeugkabine noch diverse interessante Möglichkeiten bietet, den Komfort und das Wohlbefinden der Passagiere stetig zu verbessern und gleichzeitig die Herausforderungen von Langstreckenflügen anzugehen. Die Erfahrungen weiterer Forschungen können nicht nur das Flugerlebnis verbessern, sondern auch wichtige Erkenntnisse für die lichttechnische Gestaltung von Innenräumen in anderen Kontexten liefern.

## 8. Literaturverzeichnis

- [1] DLR – Fast zehn Milliarden Flugpassagiere im Jahr 2040, 2023, [https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2019/04/20191216\\_fast-zehn-milliarden-flugpassagiere-im-jahr-2040](https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2019/04/20191216_fast-zehn-milliarden-flugpassagiere-im-jahr-2040) [Zugriff am: 09.10.2023].
- [2] *Knez, I.*: Effects of colour of light on nonvisual psychological processes.
- [3] *Lieberman, J.*: Light – Medicine of the future: how we can use it to heal ourselves now. Bear & Company, Santa Fe, New Mexico, 1991.
- [4] *Leder, A.*: Komfortgewinn für Passagiere auf Langstreckenflügen, Dissertation, 2015.
- [5] *Wang, Q.; Xu, H.; Zhang, F. et al.*: Influence of color temperature on comfort and preference for LED indoor lighting. *In: Optik* 129 (2017), S. 21-29. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.10.049>.
- [6] *Zeng, Y.; Sun, H.; Yu, J. et al.*: Effects of correlated color temperature of office light on subjective perception, mood and task performance. *In: Building and Environment* 224 (2022), S. 109508. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109508>.
- [7] *Christian Bartenbach; Andreas Danler, J.G.*: Licht – Beleuchtung von Büroarbeitsplätzen Grundlagen und Beispiele. *In: IBA Fachschrift* (2003).
- [8] *Leichtfried, V.; Mair-Raggautz, M.; Schaeffer, V. et al.*: Intense illumination in the morning hours improved mood and alertness but not mental performance. *In: Applied Ergonomics*, 46 Pt A (2015), pp. 54-59. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2014.07.001>.
- [9] *Witting, W.*: Licht, Sehen, Gestalten – Lichttechnische und wahrnehmungspsychologische Grundlagen für Architekten und Lichtdesigner. Bartenbach Lichtgestaltung. Birkhäuser, Basel, 2014.
- [10] *Kempen, C.*: Lichtstärke: Definition und Erklärung | Lampe Magazin, 2015, <https://www.lampe.de/magazin/was-bedeutet-lichtstaerke/> [Zugriff am: 20.07.2023].
- [11] *Bloch, L.*: Lichttechnik. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, Berlin, 2019.
- [12] *Richard Spieser*: Manual for lighting. Girardet, 1975.
- [13] Leuchtdichte | licht.de, 2023, <https://www.licht.de/de/grundlagen/lichtlexikon/details-lichtlexikon/leuchtdichte> [Zugriff am: 20.07.2023].
- [14] *Baer (Hrsg.)*: Beleuchtungstechnik. Verl. Technik, Berlin, 2006.
- [15] *Jüstel, T.; Schwung, S.*: Leuchtstoffe, Lichtquellen, Laser, Lumineszenz. Springer-Verlag GmbH. Springer Spektrum, Berlin, 2016.
- [16] *Därr, J.J.*: Vergleich der visuellen Wahrnehmung von realen und virtuellen Umgebungen am Beispiel einer Flugzeugkabine. Cuvillier Verlag, Göttingen, 2010.
- [17] *Dietrich Gall*: Grundlagen der Lichttechnik, 2007.
- [18] *Mike Wood*: MacAdam ellipses, 2010.
- [19] *Davis, W.; Ohno, Y.*: Approaches to color rendering measurement. *In: Journal of Modern Optics* 56 (2009), Heft 13, S. 1412-1419. <https://doi.org/10.1080/09500340903023733>.
- [20] *George C. Brainard; John P. Hanifin; Jeffrey M. Greeson et al.*: Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor. *In: The Journal of Neuroscience* (2001).
- [21] *R. Küller and L. Wetterberg*: Melatonin, cortisol, EEG, ECG and subjective comfort in healthy humans: Impact of two fluorescent lamp types at two light intensities.
- [22] *Weng, M.*: Biologische Wirkung von Licht im Kraftfahrzeug, Springer Fachmedien Wiesbaden, Dissertation, 2022.
- [23] *Akerstedt, T.; Folkard, S.*: The three-process model of alertness and its extension to performance, sleep latency, and sleep length. *In: Chronobiology International*, Vol. 14 (1997), Iss. 2, pp. 115-123. <https://doi.org/10.3109/07420529709001149>.

- [24] *Johnson, M.P.; Duffy, J.F.; Dijk, D.J. et al.*: Short-term memory, alertness and performance: a reappraisal of their relationship to body temperature. *In: Journal of Sleep Research*, Vol. 1 (1992), Iss. 1, pp. 24-29. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2869.1992.tb00004.x>.
- [25] *Kleine, B.; Rossmannith, W.*: Hormone und Hormonsystem – Lehrbuch der Endokrinologie, Springer-Lehrbuch, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [26] *Zhdanova, I.V.; Wurtman, R.J.; Lynch, H.J. et al.*: Sleep-inducing effects of low doses of melatonin ingested in the evening. *In: Clinical pharmacology and therapeutics*, Vol. 57 (1995), Iss. 5, pp. 552-558. [https://doi.org/10.1016/0009-9236\(95\)90040-3](https://doi.org/10.1016/0009-9236(95)90040-3).
- [27] *Arendt, J.*: Melatonin: characteristics, concerns, and prospects. *In: Journal of biological rhythms*, Vol. 20 (2005), Iss. 4, pp. 291-303. <https://doi.org/10.1177/0748730405277492>.
- [28] *Reiter, R.J.*: Pineal Melatonin: Cell Biology of Its Synthesis and of Its Physiological Interactions\*. *In: Endocrine reviews*, Vol. 12 (1991), Iss. 2, pp. 151-180. <https://doi.org/10.1210/edrv-12-2-151>.
- [29] *Kauppila, A.; Kivelä, A.; Pakarinen, A. et al.*: Inverse Seasonal Relationship Between Melatonin and Ovarian Activity in Humans in a Region With a Strong Seasonal Contrast in Luminosity\*. *In: The Journal of clinical endocrinology and metabolism*, Vol. 65 (1987), Iss. 5, pp. 823-828. <https://doi.org/10.1210/jcem-65-5-823>.
- [30] *Jeanne F. Duffy; Jamie M. Zeitzer; David W. Rimmer et al.*: Peak of circadian melatonin rhythm occurs later within the sleep of older subjects.
- [31] *Kennaway, D.J.; Voultsios, A.*: Circadian rhythm of free melatonin in human plasma. *In: The Journal of clinical endocrinology and metabolism*, Vol. 83 (1998), Iss. 3, pp. 1013-1015. <https://doi.org/10.1210/jcem.83.3.4636>.
- [32] *Wetterberg, L.; Bratlid, T.; Knorrning, L. von et al.*: A multinational study of the relationships between nighttime urinary melatonin production, age, gender, body size, and latitude. *In: European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience*, Vol. 249 (1999), Iss. 5, pp. 256-262. <https://doi.org/10.1007/s004060050095>.
- [33] *Burgess, H.J.; Fogg, L.F.*: Individual differences in the amount and timing of salivary melatonin secretion. *In: PloS one*, Vol. 3 (2008), Iss. 8, e3055. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003055>.
- [34] *Burkhard Poeggeler*: Melatonin, Aging, and Age-Related Diseases – Perspectives for Prevention, Intervention, and Therapy. *In: Endocrine* (2005).
- [35] *Christian Bartenbach*: Licht – Meine Erkenntnisse. Birkhäuser, Basel, 2021.
- [36] *Roth, G.*: Persönlichkeit, Entscheidung und Verhalten – Warum es so schwierig ist, sich und andere zu ändern. Klett-Cotta, Stuttgart, 2009.
- [37] *Dr. Doris Eller-Berndl*: Herzratenvariabilität. Haus der Ärzte, 2010.
- [38] Untersuchung zur Herzratenvariabilität unter Stress-und Entspannungs-Bedingung, 2008.
- [39] *Heinze, C.; Schirmer, S.; Trutschel, U. et al.*: Can Frequency Domain Heart Rate Measures Detect Impaired Driver Performance? *In: Proceedings of the 7th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design : driving assessment 2013*. University of Iowa, Bolton Landing, New York, USA>, 2013, S. 390-396.
- [40] *Kunz, D.*: Melatonin und Schlaf-Wach Regulation Ausgabe 2008.
- [41] *E Hahn, F Preckel, FM Spinath*: Das Eule-Lerche-Prinzip: Der Zusammenhang von Chronotyp, Persönlichkeit, Intelligenz und akademischer Leistung. *In: Report Psychologie* (2011).

- [42] Carskadon, M.A.; Labyak, S.E.; Acebo, C. et al.: Intrinsic circadian period of adolescent humans measured in conditions of forced desynchrony. *In: Neuroscience letters*, Vol. 260 (1999), Iss. 2, pp. 129-132. [https://doi.org/10.1016/S0304-3940\(98\)00971-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3940(98)00971-9).
- [43] Burgess, H.J.; Crowley, S.J.; Gazda, C.J. et al.: Preflight adjustment to eastward travel: 3 days of advancing sleep with and without morning bright light. *In: Journal of biological rhythms*, Vol. 18 (2003), Iss. 4, pp. 318-328. <https://doi.org/10.1177/0748730403253585>.
- [44] Health, sleep, and mood perceptions reported by airline crews flying short and long hauls, 1994.
- [45] Kerkhof, G.A.: Inter-individual differences in the human circadian system: a review. *In: Biological Psychology*, Vol. 20 (1985), Iss. 2, pp. 83-112. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(85\)90019-5](https://doi.org/10.1016/0301-0511(85)90019-5).
- [46] Kerkhof, G.A.; van Dongen, H.P.: Morning-type and evening-type individuals differ in the phase position of their endogenous circadian oscillator. *In: Neuroscience letters*, Vol. 218 (1996), Iss. 3, pp. 153-156. [https://doi.org/10.1016/S0304-3940\(96\)13140-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3940(96)13140-2).
- [47] Christian Cajochen: Alerting effects of light. *In: Sleep Medicine Reviews* (2007), S. 453-464.
- [48] Roenneberg, T.; Wirz-Justice, A.; Mellow, M.: Life between clocks: daily temporal patterns of human chronotypes. *In: Journal of biological rhythms*, Vol. 18 (2003), Iss. 1, pp. 80-90. <https://doi.org/10.1177/0748730402239679>.
- [49] Díaz-Morales, J.F.; Pilar Sánchez-López, M.: Morningness-eveningness and anxiety among adults: A matter of sex/gender? *In: Personality and Individual Differences* 44 (2008), Heft 6, S. 1391-1401. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2007.12.007>.
- [50] Roenneberg, T.: What is chronotype? *In: Sleep and Biological Rhythms* 10 (2012), Heft 2, S. 75-76. <https://doi.org/10.1111/j.1479-8425.2012.00541.x>.
- [51] Vetter, C.; Juda, M.; Roenneberg, T.: The influence of internal time, time awake, and sleep duration on cognitive performance in shiftworkers. *In: Chronobiology International*, Vol. 29 (2012), Iss. 8, pp. 1127-1138. <https://doi.org/10.3109/07420528.2012.707999>.
- [52] Roenneberg, T.; Kuehnle, T.; Juda, M. et al.: Epidemiology of the human circadian clock. *In: Sleep Medicine Reviews*, Vol. 11 (2007), Iss. 6, pp. 429-438. <https://doi.org/10.1016/j.smr.2007.07.005>.
- [53] Lioba Wert; Anna Steidle; Carolin Hubschneider et al.: Psychologische Befunde zu Licht und seiner Wirkung auf den Menschen – ein Überblick.
- [54] Boyce, P.R.: Lighting research for interiors: the beginning of the end or the end of the beginning. *In: Lighting Research and Technology* 36 (2004), Heft 4, S. 283-293. <https://doi.org/10.1191/11477153504li118oa>.
- [55] Boyce, P.R.: On measuring task performance. *In: Coloration Technology*, Vol. 127 (2011), Iss. 2, pp. 101-113. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2011.00284.x>.
- [56] Vetter, C.; Juda, M.; Lang, D. et al.: Blue-enriched office light competes with natural light as a zeitgeber. *In: Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, Vol. 37 (2011), Iss. 5, pp. 437-445. <https://doi.org/10.5271/sjweh.3144>.
- [57] Berson, D.M.: Strange vision: ganglion cells as circadian photoreceptors. *In: Trends in Neurosciences*, Vol. 26 (2003), Iss. 6, pp. 314-320. [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(03\)00130-9](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(03)00130-9).
- [58] Kruithof, A.A.: Tubular luminescence lamps for general illumination. *In: Philips Technical Review* 3 (1941), S. 65-96.
- [59] Leszczynska, J.: New Technologies in Aircraft Cabin Lighting – What is the impact of mood lighting passengers' satisfaction on board an aircraft. London, Bartlett School of Graduated Studies, Masterarbeit, 2010.

- [60] *Bor, R.*: Passenger Behaviour. Routledge, 2017.
- [61] Cabin illumination, 2011.
- [62] *Narendran, N.*: LED Reading Light Study. Lighting Research Center, New Orleans.
- [63] *God, R.; Kurz, C.*: Die Flugzeugkabine-Wohin geht die Reise (2010).
- [64] *Bachman, J.* Airlines Add Mood Lighting to Chill Passengers Out [online]. *In*: Bloomberg, 2015 [Zugriff am: 09.08.2023], <https://www.bloomberg.com/news/articles/2015-04-22/airlines-add-mood-lighting-to-chill-passengers-out#xj4y7vzkg>.
- [65] *Airbus Aircraft*: Airspace Ambience, 2021, <https://aircraft.airbus.com/en/aircraft/airspace-cabin/airspace-ambience> [Zugriff am: 08.08.2023].
- [66] *Aviation, H.*: jetlite verkündet Kooperation mit Lilium und General Atomics auf der E-BACE 2023, 2023, <https://www.hamburg-aviation.de/detail/details/news/jetlite-verkuen-det-kooperation-mit-lilium-und-general-atomics-auf-der-ebace-2023.html> [Zugriff am: 10.08.2023].
- [67] *Europäisches Parlament*: Verordnung (EG) Nr. 261/2004. Europäisches Parlament, 2004.
- [68] *Caldwell, J.A.; Mallis, M.M.; Caldwell, J.L. et al.*: Fatigue countermeasures in aviation. *In*: Aviation, space, and environmental medicine, Vol. 80 (2009), Iss. 1, pp. 29-59. <https://doi.org/10.3357/ asem.2435.2009>.
- [69] *flugladen.de*: Die längsten Nonstop Flüge der Welt | Flugladen.de Blog, 2022, <https://www.flugladen.de/blog/die-laengsten-nonstop-fluege-der-welt> [Zugriff am: 06.08.2023].
- [70] *Revell, V.L.; Arendt, J.; Fogg, L.F. et al.*: Alerting effects of light are sensitive to very short wavelengths. *In*: Neuroscience letters, Vol. 399 (2006), 1-2, pp. 96-100. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2006.01.032>.
- [71] *Cajochen, C.; Münch, M.; Koblalka, S. et al.*: High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light. *In*: The Journal of clinical endocrinology and metabolism, Vol. 90 (2005), Iss. 3, pp. 1311-1316. <https://doi.org/10.1210/jc.2004-0957>.
- [72] *Azmeh Shahid; Kate Wilkinson; Shai Marcu et al.*: STOP, THAT and One Hundred Other Sleep Scales.
- [73] *Loe, L.; Mansfield, K.P.; Rowlands, E.*: Appearance of lit environment and its relevance in lighting design: Experimental study. *In*: Lighting Research and Technology 26 (1994), Heft 3, S. 119-133. <https://doi.org/10.1177/096032719402600301>.
- [74] *Veitch, J.A.; Newsham, G.R.; Boyce, P.R. et al.*: Lighting appraisal, well-being and performance in open-plan offices: A linked mechanisms approach. *In*: Lighting Research and Technology 40 (2008), Heft 2, S. 133-151. <https://doi.org/10.1177/1477153507086279>.
- [75] *Boyce, P.R.; Cuttle, C.*: Effect of correlated colour temperature on the perception of interiors and colour discrimination performance. *In*: Lighting Research & Technology 22 (1990), Heft 1, S. 19-36. <https://doi.org/10.1177/096032719002200102>.
- [76] *Davis, R.G.; Ginthner, D.N.*: Correlated Color Temperature, Illuminance Level, and the Kruithof Curve. *In*: Journal of the Illuminating Engineering Society 19 (1990), Heft 1, S. 27-38. <https://doi.org/10.1080/00994480.1990.10747937>.
- [77] Effect of Illuminance, CCT and Decor on the Perception of Lighting, 2002.
- [78] *DiLaura, David L.*, *Illuminating Engineering Society of North America*: The lighting handbook : reference and application. *In*: (No Title).
- [79] Standard for daylighting design of buildings, 2013.
- [80] *Oi N.*: Preferred combinations between illuminance and color temperature in several settings for daily living activities. *In*: Proceedings of 26th CIE, 2007 2 (2007), S. 178.

- [81] *Shamsul, B.; Sia, C.C.; Ng, Y. et al.*: Effects of Light's Colour Temperatures on Visual Comfort Level, Task Performances, and Alertness among Students. *In: American Journal of Public Health Research* 1 (2013), Heft 7, S. 159-165. <https://doi.org/10.12691/aj-phr-1-7-3>.
- [82] *Lockley, S.W.; Brainard, G.C.; Czeisler, C.A.*: High sensitivity of the human circadian melatonin rhythm to resetting by short wavelength light. *In: The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, Vol. 88 (2003), Iss. 9, pp. 4502-4505. <https://doi.org/10.1210/jc.2003-030570>.
- [83] *Berson, D.M.; Dunn, F.A.; Takao, M.*: Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *In: Science*, Vol. 295 (2002), Iss. 5557, pp. 1070-1073. <https://doi.org/10.1126/science.1067262>.
- [84] *Brainard, G.C.; Hanifin, J.P.; Greeson, J.M. et al.*: Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. *In: Journal of Neuroscience*, Vol. 21 (2001), Iss. 16, pp. 6405-6412. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.21-16-06405.2001>.
- [85] *Hui-Chih Yu*: A cross-cultural analysis of symbolic meanings of color, 2014.
- [86] *All Things Lighting Association*: The Kruithof Curve - All Things Lighting Association, 2019, <https://www.allthingslighting.org/the-kruithof-curve/> [Zugriff am: 08.10.2023].
- [87] *Hsieh, M.*: Effects of Illuminance Distribution, Color Temperature and Illuminance Level on Positive and Negative Moods. *In: Journal of Asian Architecture and Building Engineering* 14 (2015), Heft 3, S. 709-716. <https://doi.org/10.3130/jaabe.14.709>.

## 9. Selbstständigkeitserklärung



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
Hamburg University of Applied Sciences

### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

<b><u>Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit</u></b>	
Hiermit versichere ich,	
Name:	<u>Karimi</u>
Vorname:	<u>Sohail</u>
dass ich die vorliegende Bachelorarbeit <input checked="" type="checkbox"/> bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema: Lichtfarbe und -temperatur: Untersuchung der Auswirkungen von verschiedenen Lichtfarben und -temperaturen auf das Schlafverhalten und die Stimmung der Passagiere	
ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.	
- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -	
Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:	
<u>Hamburg</u> Ort	<u>11.10.23</u> Datum