





## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

---

Datum

---

Unterschrift

## **Verfassernachweis**

I. Einleitung (Karola Lorenz B.Sc.)

II. Stand der Technik

2.1 Nachhaltige Bewertung (Vincent Tallavania B.A.)

2.2 Betriebs- und Steuerungssysteme (Vincent Tallavania B.A.)

2.3 Forschung (Karola Lorenz B.Sc.)

III. Hypothesen (Karola Lorenz B.Sc., Vincent Tallavania B.A.)

IV. Simulation

4.1 Simulationsaufbau (Karola Lorenz B.Sc.)

4.2 Anforderungen an die Sehaufgabe (Karola Lorenz B.Sc.)

4.3 Nutzung (Karola Lorenz B.Sc.)

4.4 Beleuchtungskonzepte (Vincent Tallavania B.A.)

4.5 Eingabe in DIALux (Vincent Tallavania B.A.)

V. Auswertung

5.1 Ökologische Bewertung (Vincent Tallavania B.A.)

5.2 Ökonomische Bewertung

5.2.1 Energieverbrauch (Karola Lorenz B.Sc.)

5.2.2 Systemkosten (Karola Lorenz B.Sc.)

5.2.3 Amortisation (Karola Lorenz B.Sc.)

5.2.4 Lampennutzung (Vincent Tallavania B.A.)

5.2.5 Effizienz (Vincent Tallavania B.A.)

5.2.6 Zusammenfassende Bewertung (Vincent Tallavania B.A.)

5.3 Soziale Bewertung (Karola Lorenz B.Sc.)

VI. Verifizierung und Falsifizierung (Karola Lorenz B.Sc., Vincent Tallavania B.A.)

VII. Leitfaden (Karola Lorenz B.Sc., Vincent Tallavania B.A.)

VIII. Fazit und Ausblick (Karola Lorenz B.Sc.)

IX. Fehlerbetrachtung (Vincent Tallavania B.A.)

---

---

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchten wir all jenen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Masterarbeit beigetragen haben.

Ein herzliches Dankeschön gilt unserem Betreuer Herrn Daniel Kierdorf M.Sc. der uns durch seine Präsenz und seine wertvollen Hinweise stets weiter helfen konnte. Die Zusammenarbeit ermöglichte es uns eine durchdachte und strukturierte Arbeit zu erstellen.

Darüber hinaus möchten wir uns bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Lang bedanken. Durch Sie hatten wir erst die Möglichkeit unsere Masterarbeit am Institut für nachhaltiges Planen und Bauen anzufertigen.

## Kurzfassung

- Titel:** Anwendungsbezogene Beleuchtungskonzepte unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit
- Autoren:** Karola Lorenz B.Sc.  
Vincent Tallavania B.A.
- Referenten:** Prof. Dr.-Ing. Werner Lang  
Daniel Kierdorf M.Sc.
- Zusammenfassung:** Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei verschiedene Beleuchtungsvarianten jeweils mit direkt strahlenden und indirekt/direkt strahlenden Leuchtentypen für Nichtwohngebäude in Bezug auf ökologische, ökonomische und soziale Faktoren verglichen. Unter Berücksichtigung der geltenden DIN-Normen wurden Musterräume entworfen, um Tageslicht- und Beleuchtungsberechnungen durchzuführen. Diese Berechnungen ergaben, dass Beleuchtungsvarianten mit Steuerungstechnik die Umwelt schonen, geringere Kosten verursachen und ein komfortableres Arbeiten ermöglichen. Außerdem erwies sich ein Beleuchtungskonzept mit Pendelleuchten als deutlich effizienter und flexibler als ein Konzept mit Anbauleuchten. Die Auseinandersetzung mit verschiedenen Leuchtmitteln ergab, dass LEDs leistungsfähiger als Leuchtstofflampen sind. Aus den Erkenntnissen dieser Analyse wurde ein Leitfaden zur Planung nachhaltiger Beleuchtungskonzepte entwickelt.
- Schlüsselwörter:** Bürogebäude, Beleuchtungskonzept, Ökologie, Ökonomie, Soziales, Tageslichtberechnung, LED, Leuchtstofflampe, Anbauleuchten, Pendelleuchten
- Datum:** 02. Oktober 2015

## **abstract**

title: Lightning concepts for sustainable applications

authors: Karola Lorenz B.Sc.  
Vincent Tallavania B.A.

supervisors: Prof. Dr.-Ing. Werner Lang  
Daniel Kierdorf M.Sc.

summary: In this thesis, we compared three different lightning concepts for non-residential buildings with respect to ecological, economic and social criteria. We designed exemplary rooms according to currently applicable DIN standards in order to calculate the natural and artificial lightning requirements. The calculations indicate that electronically regulated lightning systems are environmentally friendly, reduce costs and allow for better working conditions. Furthermore, it was found that concepts using pendant luminaires are more efficient and flexible than concepts based on surface-mounted ones. Our analysis also showed that light emitting diodes are more powerful than fluorescent lamps. Finally, we used these new insights to develop a guideline for sustainable lightning concepts.

keywords: lightning concept, office buildings, conference halls, economic, ecological, social, natural lightning, LED, light emitting diode

date: 02. Oktober 2015

## Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>II</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>5</b>
2.1	Nachhaltige Bewertung .....	6
2.2	Betriebs- und Steuerungssysteme.....	11
2.3	Forschung .....	13
<b>III</b>	<b>Hypothesen</b>	<b>16</b>
<b>IV</b>	<b>Simulation</b>	<b>18</b>
4.1	Simulationsaufbau.....	19
4.1.1	Örtliche Gegebenheiten .....	19
4.1.2	Flächen am Arbeitsplatz .....	20
4.1.3	Möblierung.....	21
4.1.4	Geometrie .....	22
4.1.5	Fensterflächen.....	24
4.1.6	Grundrisse / 3D-Visualisierung .....	25
4.2	Anforderungen an die Sehaufgabe .....	28
4.3	Nutzung .....	31
4.4	Beleuchtungskonzepte .....	32
4.4.1	Varianten.....	32
4.4.2	Leuchtenauswahl und Steuerungstechnik .....	33
4.4.3	Leuchtenstruktur .....	36
4.4.4	Steuerungstechnik .....	39
4.5	Eingabegrundlage in DIALux.....	41
<b>V</b>	<b>Auswertung</b>	<b>43</b>
5.1	Ökologische Bewertung.....	44
5.1.1	Tageslichtnutzung .....	44



5.1.2	Herstellung .....	47
5.1.3	Nutzung .....	49
5.1.4	Wartung .....	50
5.1.5	Recycling .....	53
5.1.6	Zusammenfassende Bewertung.....	55
5.2	Ökonomische Bewertung.....	57
5.2.1	Energieverbrauch.....	57
5.2.2	Systemkosten.....	62
5.2.3	Amortisation.....	69
5.2.4	Lampennutzung.....	70
5.2.5	Effizienz .....	73
5.2.6	Zusammenfassende Bewertung.....	74
5.3	Soziale Bewertung .....	77
5.3.1	Sehleistung.....	77
5.3.2	Sehkomfort .....	80
5.3.3	Erscheinungsbild .....	81
5.3.4	Vitalität.....	81
5.3.5	Individualität und Flexibilität .....	84
5.3.6	Zusammenfassende Bewertung.....	85
<b>VI Verifizierung und Falsifizierung der Hypothesen</b>		<b>88</b>
<b>VII Leitfaden</b>		<b>90</b>
<b>VIII Fazit und Ausblick</b>		<b>96</b>
<b>IX Fehlerbetrachtung</b>		<b>98</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>100</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>		<b>104</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>		<b>106</b>

# **Teil I**

# **Einleitung**

Was bedeutet Nachhaltigkeit in der Lichtplanung bzw. Lichttechnik eigentlich? Ist es sinnvoll Aspekte aus Ökologie, Ökonomie und Sozialem in die Planung einfließen zu lassen, oder ist es eher eine Verkaufsstrategie der Industrie? Welche Gründe sprechen für eine nachhaltige Beleuchtung? Wie groß ist dabei der Einfluss des Leuchtmittels und was muss beachtet werden, um ein stimmiges Gesamtkonzept umzusetzen?

Es zeigt sich, dass es viele Fragen rund um das Thema Nachhaltigkeit in der Lichtplanung gibt. Sicher ist, dass der Stromverbrauch für Beleuchtung in Deutschland im Gewerbe, Handel und Dienstleistungssektor etwa 15% des Gesamtverbrauchs einnimmt.<sup>1</sup> Durch den Einsatz von Beleuchtungstechnologie und Regelungsmaßnahmen ist es möglich diesen Anteil um bis zu 75% zu reduzieren.<sup>2</sup> Es besteht Handlungsbedarf um dieses Einsparpotenzial zu nutzen. Den Begriff Nachhaltigkeit hauptsächlich mit Energieeffizienz zu verbinden, wäre dennoch ein Fehler. Eine ganzheitliche Betrachtung von Umwelt, Wirtschaftlichkeit und Komfort bietet hingegen einen breitgefächerten Überblick und ein tieferes Verständnis für die Materie. Aspekte, wie ein umweltfreundlicher Lebenszyklus der Lampen von der Herstellung bis zum Recycling, fließen mit ein. Verbrauchsarme und langlebige Lichtquellen, Leuchten und Betriebsgeräte sind entscheidend, ebenso geringe Ausgaben für Strom und Wartung. Austauschbare Komponenten für eine einfache Reparatur oder eine mögliche Modernisierung erleichtern den Umgang mit der Beleuchtungsanlage. Diese Aspekte haben eine Laufzeitverlängerung zur Folge. Zur Gestaltung eines für den Bürobereich adäquaten Komforts, spielt unter anderem die Lichtqualität eine wesentliche Rolle. Gute Sehbedingungen und ein angenehmes Raumgefühl wirken sich positiv auf das Wohlbefinden des Menschen aus. Ein ausgewogenes Zusammenspiel dieser Faktoren kann durch eine anwendungsbezogene Lichtplanung unterstützt und verstärkt werden.

Mittels der Untersuchung zweier Leuchtmittel (LED, Leuchtstofflampe), als auch der Variation von Anbau- und Pendelleuchten und der optionalen Steuerungstechnik, soll ein aussagekräftiges Skriptum in den betrachteten Bereichen Ökologie, Ökonomie und Soziales entstehen. Aus der Analyse wird ein Leitfaden zur nachhaltigen Planung von Beleuchtungskonzepten entwickelt.

---

<sup>1</sup> Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2013, 26.

<sup>2</sup> Regiolux GmbH o. J., 6.

## **Teil II**

# **Stand der Technik**

## 2.1 Nachhaltige Bewertung

Nachhaltige Beleuchtung zeichnet sich unter anderem durch energieeffiziente und umweltverträgliche Lampen aus. Zu den herkömmlichen Lampentypen gehören Wärmestrahler, wie Glüh- und Halogenlampen, Entladungslampen (Energiespar- und Leuchtstofflampen), als auch lichtemittierende Dioden. Hinsichtlich ökologischer und ökonomischer Aspekte werden diese Lampentypen miteinander verglichen.

Die Glühlampe zählt zu den ineffizientesten Lichtquellen. Sie erzeugt bei voller Leistung 95% Wärme und lediglich 5% Licht.<sup>3</sup> Die Gegenüberstellung zwischen Wärmestrahlern und Entladungslampen (vgl. Tabelle 1) zeigt eine große Diskrepanz im Bezug auf die erzielte Lichtausbeute. Eine Glühlampe erreicht eine Lichtausbeute zwischen 9,2 - 18,8 lm/W, im Vergleich dazu Leuchtstofflampen einen Wert von 75 - 104 lm/W. LEDs nutzen die zugeführte Energie effizienter, bei einer geringeren Wärmeabgabe erzeugen sie eine Lichtausbeute von bis zu 120 lm/W. *OSRAM Opto Semiconductors*, ein Unternehmen welches an der Weiterentwicklung der Licht emittierenden Diode interessiert ist, hat einen LED - Prototyp entwickelt. Dieser überschreitet einen Wert von 200 lm/W und wandelt damit mehr als 50% der eingesetzten Energie in Licht um.<sup>4</sup>

Tabelle 1 – Vergleich Lichtausbeute - Farbwiedergabe<sup>5</sup>

Lampentyp	Lichtausbeute [lm/W]	Farbwiedergabeindex
Glühlampen	9,2 - 18,8	100
Halogenlampen	10 - 22	> 90
Energiesparlampen	30 - 65	80 - 89
Leuchtstofflampen	75 - 104	80 - 89
Leuchtdioden	bis 120	70 - 89

<sup>3</sup> Paschotta o.J., <https://www.energie-lexikon.info/gluehlampe.html>, Stand: 26.09.2015.

<sup>4</sup> Vgl. Osram o.J., [http://www.osram.de/osram\\_de/presse/pressemitteilungen/\\_fachpresse/2014/osram-baut-effizienteste-led-lampe-der-welt/index.jsp](http://www.osram.de/osram_de/presse/pressemitteilungen/_fachpresse/2014/osram-baut-effizienteste-led-lampe-der-welt/index.jsp), Stand: 22.09.2015.

<sup>5</sup> Vgl. Osram o.J., [http://www.osram.de/osram\\_de/news-und-wissen/led-home/professionelles-wissen/index.jsp](http://www.osram.de/osram_de/news-und-wissen/led-home/professionelles-wissen/index.jsp), Stand: 18.08.2015.

Mit Hilfe der Farbwiedergabe und der Farbtemperatur lässt sich die Lichtqualität beschreiben. Der Farbwiedergabeindex  $R_a$  beschreibt den Farbeindruck durch eine Lichtquelle auf einem Objekt.<sup>6</sup> Durch diesen Wert erfolgt die Klassifizierung der Lampen mit Hilfe einer dimensionslosen Kennzahl von 0 bis 100. Je höher dieser Index, desto natürlicher können Farben wahrgenommen werden. Die Glühlampe besitzt aufgrund ihres kontinuierlichen Farbspektrums einen definierten Farbwiedergabeindex von bis zu 100 (s. a. Tabelle 1). Die Indizes der anderen Lampentypen fallen infolge ihres unregelmäßigeren Farbspektrums geringer aus.

Mit der Farbtemperatur wird der Weißton einer Lampe typisiert. Leuchtmittel mit niedrigen Temperaturen erzeugen eher warmweißes Licht und vermitteln damit eine gemütliche und angenehme Atmosphäre. Höhere Farbtemperaturen wirken anregend und aktivierend, da sie dem Tageslicht ähnlicher sind.<sup>7</sup>

Ein nicht zu vernachlässigender Aspekt ist die Nutzlebensdauer der verschiedenen Lampentypen. Sie definiert einen Zeitpunkt, bei dem Lampen einen festgelegten Lichtstrom unterschreiten und damit als nicht mehr funktionstüchtig gelten.<sup>8</sup> Der Hersteller gibt für jedes Lampenmodell eine zusätzliche Bezeichnung, z.B. L75, an. Diese besagt, dass nach einer gewissen Zeitspanne noch ein Lichtstrom von 75%, im Vergleich zum Neuwert, vorhanden ist. Im Vergleich erzeugen Glühlampen etwa 1.000 h Licht, LEDs bis zu 50.000 h. Die gängigsten Lampentypen sind in der Tabelle 2 mit den jeweiligen Lebensdauern zusammengefasst.

*Tabelle 2 – Lebensdauer*<sup>9</sup>

Lampentyp	Nutzlebensdauer [h]
Glühlampen	1.000
Halogenlampen	2.000 - 4.000
Leuchtstofflampen	18.000
Energiesparlampen	10.000
Leuchtdioden	20.000 - 50.000

<sup>6</sup> ERCO o.J., <http://www.erco.com/guide/lighting-technology/dimensions-units-5878/de/pkm1842>, Stand: 01.10.2015.

<sup>7</sup> Vgl. RIESTE Licht GmbH o.J., <http://www.rieste.at/Lichtplanung/wirkung-lichtfarbe-auf-den-mensch.html>, Stand: 07.08.2015.

<sup>8</sup> Vgl. licht.de o.J., <http://www.licht.de/de/trends-wissen/beleuchtungstechnik/lampen/lebensdauer/>, Stand: 07.08.2015.

<sup>9</sup> lightMAG o.J., <http://www.light11.de/lightMAG/vergleich/>, Stand: 22.09.2015.

Eine höhere Lebensdauer führt zu einem geringeren Wartungsaufwand und einer längeren Beständigkeit des Beleuchtungssystems. Dies spart Kosten und Ressourcen.<sup>10</sup>

Verschiedene Einflussfaktoren verkürzen die Lebenszeit von Lampen, ein optimales Thermomanagement hingegen verlängert die Langlebigkeit der Lampen. Ein kühleres Raumklima sorgt für ein effizienteres Leuchtmittel. Des Weiteren können äußere Einflüsse, wie mechanische oder chemische Belastungen, die Lebensdauer verkürzen oder diese sogar zerstören. Ebenso ist Feuchtigkeit für alle elektronischen Bauteile schädlich.

Erhöhte Feuchtigkeitswerte führen zu Korrosion und später zu einem vorzeitigen Ausfall des Systems. Abhängig von der Qualität der Lampe unterliegt die Lebensdauer Schwankungen.<sup>11</sup>

Im Weiteren werden die fünf Lampentypen in Bezug auf ihren Energieverbrauch verglichen. Um die Gegenüberstellung zu erleichtern, wird die LED mit einer Lebensdauer von 25.000 h als Bezugswert festgelegt. Es erfolgt eine Hochrechnung, sodass alle Lampen die geforderten 25.000 h Lichtproduktion erreichen. Damit sind 25 Glühlampen, 12,5 Halogenlampen (2.000 h), 1,4 Leuchtstofflampen, 2,5 Energiesparlampen und eine Leuchtdiode für die Berechnung notwendig.

Das Diagramm (Abbildung 2) stellt die Herstellung- und Nutzungsenergie im Bezugszeitraum von 25.000 h dar. Die linke Graphenachse bezieht sich auf die Nutzungsenergie (hellgrau), die Rechte auf die Herstellungsenergie (blau). Klar erkennbar ist der hohe Energieverbrauch der Glüh- und Halogenlampen, sowohl während der Nutzung, als auch bei der Herstellung. Leuchtstoff-, Energiesparlampen und LED sind im Verbrauch als auch in der Herstellung annähernd gleich. Obwohl der Energieaufwand zur Herstellung einer LED etwa 10 mal höher ist als bei einer Glühlampe, lohnt sich die Verwendung von lichtemittierenden Dioden durch den geringeren Energieverbrauch während der Nutzung.<sup>12</sup> Im Betriebszeitraum zeigen sich große Unterschiede in den CO<sub>2</sub> – Bilanzen. Im Diagramm 3 dienen die aus der Abbildung 2 ermittelten Energiebilanzen als Grundlage für eine Berechnung der CO<sub>2</sub> - Emissionen. Die Kalkulation beinhaltet den deutschen Emissionsfaktor von 569 g/kWh im Jahr 2014.<sup>13</sup>

<sup>10</sup> Vgl. lightMAG o.J., <http://www.light11.de/lightMAG/lebensdauer-von-leuchtmitteln/>, Stand: 25.08.2015.

<sup>11</sup> OSRAM o.J., [http://www.osram.de/osram\\_de/news-und-wissen/led-home/professionelles-wissen/led-grundlagen/lebensdauer/index.jsp](http://www.osram.de/osram_de/news-und-wissen/led-home/professionelles-wissen/led-grundlagen/lebensdauer/index.jsp), Stand: 26.09.2015.

<sup>12</sup> OSRAM Semiconductors 2009, 13-17.

<sup>13</sup> Umweltbundesamt o.J., <http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen>, Stand: 26.09.2015.

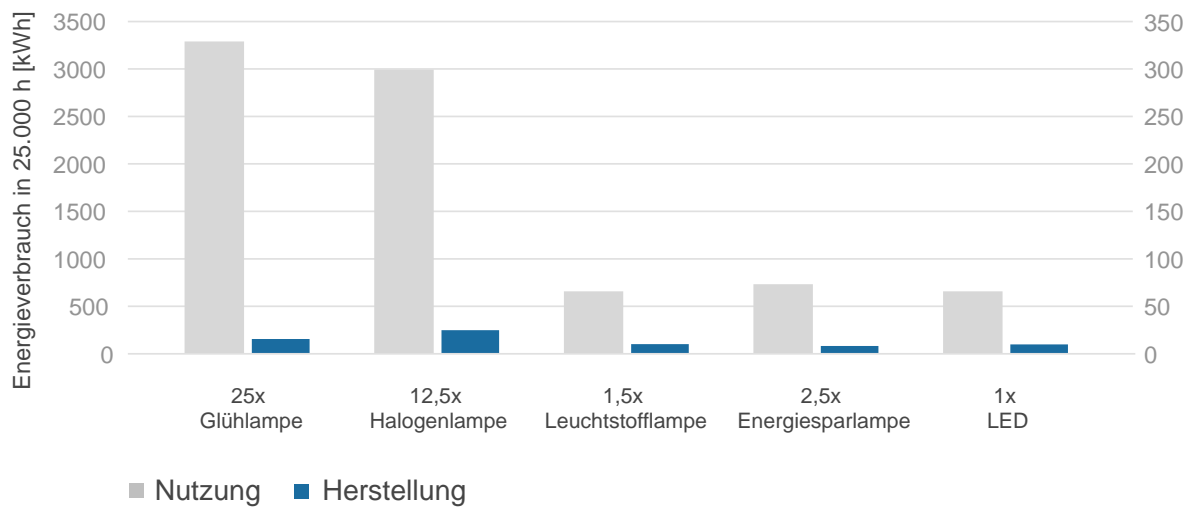


Abbildung 2 – Energieverbrauch in kWh (25.000 h)<sup>14</sup>

Die linke Achse definiert die CO<sub>2</sub> - Emissionen innerhalb der Betriebszeit. Der CO<sub>2</sub> - Ausstoß der Produktion wird auf der rechten Achse angezeigt. Im Gesamtvergleich produzieren Entladungslampen während der Herstellung und der Nutzungszeit den höchsten CO<sub>2</sub> - Ausstoß. Die Gesamtemission des Lebenszyklus einer LED beläuft sich etwa auf ein Zehntel im Vergleich zur Glühlampe.

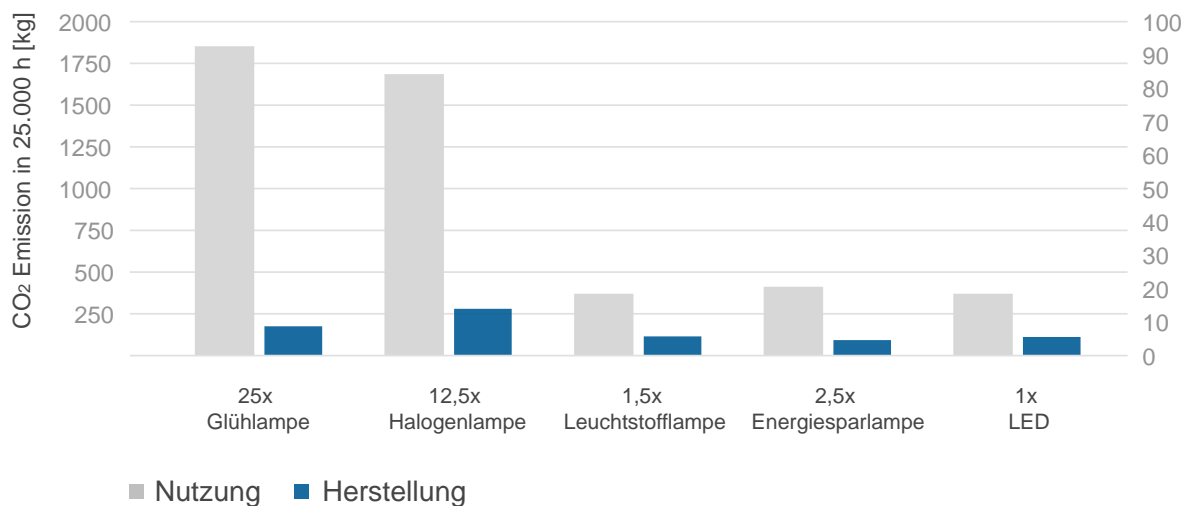


Abbildung 3 – CO<sub>2</sub> - Emissionen in Kg (25.000 h)

<sup>14</sup> OSRAM Semiconductors 2009, 13-17.



In einer Studie von *Global LightZ* wird die Umweltverträglichkeit von Glühlampen und LEDs dargestellt. Berücksichtigung findet der für die Umwelt schädliche Quecksilbergehalt. Im Produktzyklus fallen bei der Glühlampe 350 mg und bei der LED 37,4 mg Quecksilber an.<sup>15</sup>

Die europäische Richtlinie „2012/19/EU“ des *europäischen Parlaments und Rates* schreibt das Recycling für Elektro- und Elektronik Altgeräte vor. Hersteller sind verpflichtet, Ressourcen durch die Verwendung wiederverwertbarer Materialien zu schonen. Glüh-, Energiesparlampen und LEDs sind nicht für den Restmüll geeignet. Zum Recyceln müssen Wärmestrahler und Entladungslampen aufgrund ihres Quecksilbergehalts und LEDs wegen der elektronischen Bauteile fachgerecht entsorgt werden. Beim Recyclingprozess werden die Leuchtmittel in ihre Bestandteile zerlegt und ein großer Teil zur Herstellung neuer Produkte verwendet.<sup>16</sup>

---

<sup>15</sup> Global LightZ o.J., <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/opto/articles/266157/>, Stand: 26.09.2015.

<sup>16</sup> Europäische Union 2012, 26.

## 2.2 Betriebs- und Steuerungssysteme

Neben der Wahl der Leuchtmittel trägt auch ein gutes Steuerungssystem maßgeblich zu einer nachhaltigen Beleuchtung bei. Das Einsparpotenzial liegt je nach Nutzung bei bis zu 70%.<sup>17</sup> Auf dem Markt existieren derzeit verschiedene Systeme, welche sich sowohl im Preisniveau, als auch in der Komplexität stark unterscheiden.

Es werden zur Energiereduzierung optische Sensoren (Präsenzmelder, Lichtsensoren) eingesetzt. Präsenzmelder erfassen Bewegungen im Raum und ermöglichen damit eine Regulierung der Lichtquellen, sodass die Beleuchtung nur bei tatsächlich genutzten Flächen verwendet wird. Hierbei kann zwischen einem Dimmen oder dem kompletten Abschalten der Leuchten gewählt werden. Lichtsensoren dagegen messen die Beleuchtungsstärke sowohl innerhalb des Raumes (Innensensor), als auch im Freien (Außensensor). Zusätzlich können die Sensoren den Lichteinfall mit Hilfe eines gekoppelten Sonnenschutzsystems regeln. Die Technik erlaubt dadurch eine ökonomische Steuerung der Beleuchtung im Rauminnen in Abhängigkeit des einfallenden Tageslichtes.<sup>18</sup>

Intelligente Steuerungssysteme verknüpfen die Sensoren zu einem perfekt abgestimmten Gesamtkonzept. Der Lichtbedarf für unterschiedliche Tätigkeiten und Sehaufgaben kann durch die Steuerungstechnik flexibel und einfach angepasst werden. Hierbei unterscheidet man zwischen analoger und digitaler Steuerungstechnik (s. a. Abbildung 4). Die analoge Variante (1V - 10V) arbeitet mit elektronischen Vorschaltgeräten (EVG), welche die Leistung der Leuchten regelt. Bei dieser Form der Ansteuerung muss bereits bei der Planung feststehen, welche Leuchten oder Leuchtengruppen mit welchem Schalt- / Dimmfaktor angesteuert werden sollen. Eine nachträgliche Änderung ist nur mit großem Aufwand, oder überhaupt nicht umsetzbar. Demzufolge ist diese Variante nur für Beleuchtungskonzepte mit geringer Komplexität geeignet<sup>19</sup>. Mit dem digitalen Steuerungsprotokoll DALI (Digital Adressable Lighting Interface) können sowohl einzelne Leuchten, als auch Gruppen angesteuert und deren Status abgefragt werden. In Abbildung 4 wird der Unterschied der beiden Steuerungssysteme noch einmal graphisch dargestellt.<sup>20</sup> Das System (DALI) ermöglicht ein komfortables Lichtmanagement und kann als Subsystem in moderne Gebäudesteuerungssysteme wie KNX (KoNNeX) eingegliedert werden.

<sup>17</sup> Zumtobel GmbH 2011, 2.

<sup>18</sup> Vgl. ERCO o.J., <http://www.erco.com/guide/lighting-control/sensors-2611/de/>, Stand: 07.07.2015.

<sup>19</sup> Vgl. OSRAM o.J., [http://www.osram.de/osram\\_de/news-und-wissen/lichtmanagementsysteme/technologien/1...10v/index.jsp](http://www.osram.de/osram_de/news-und-wissen/lichtmanagementsysteme/technologien/1...10v/index.jsp), Stand: 13.07.2015.

<sup>20</sup> Vgl. OSRAM o.J., [http://www.osram.de/osram\\_de/news-und-wissen/lichtmanagementsysteme/technologien/dali/index.jsp](http://www.osram.de/osram_de/news-und-wissen/lichtmanagementsysteme/technologien/dali/index.jsp), Stand: 02.09.2015.

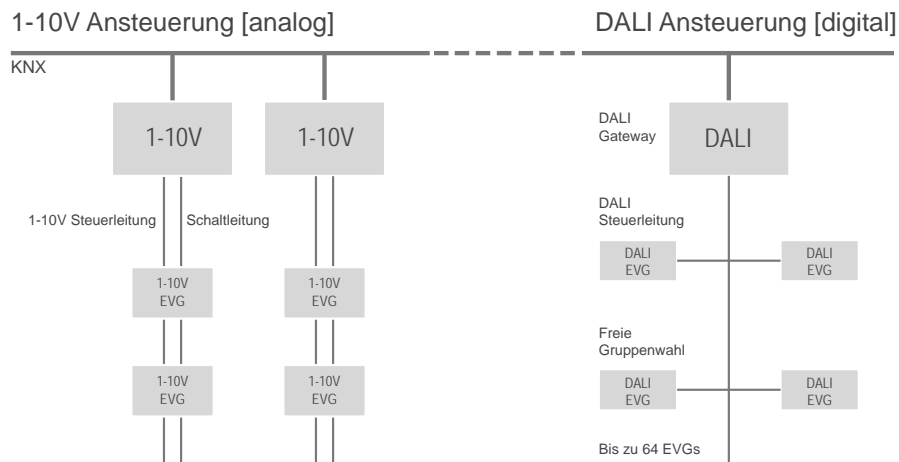


Abbildung 4 – Vergleich Ansteuerung analog - digital <sup>21</sup>

KNX vernetzt und regelt übergreifend alle eingebauten Systeme in einem Gebäude, unter anderem Sonnenschutz, Belüftung, Sicherheitstechnik, Temperaturregelung und die Beleuchtung. Diese Art der Steuerung setzt sowohl ein ganzheitliches als auch nachhaltiges Konzept um, welches die Bedürfnisse des Nutzers integriert. Je nach Anwendung kann das System mit dem richtigen Preis - Leistungs - Verhältnis (s. a. Abbildung 5) eingesetzt werden.<sup>22</sup>

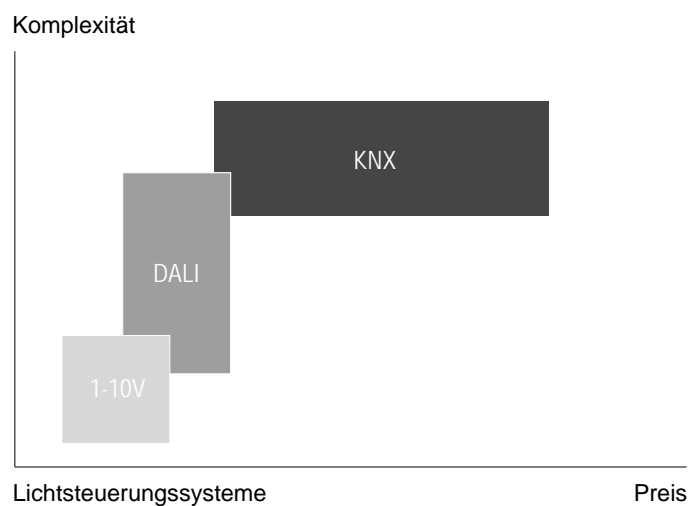


Abbildung 5 – Lichtkontrollsystem <sup>23</sup>

<sup>21</sup> Vgl. OSRAM o.J., [http://www.osram.de/osram\\_de/news-und-wissen/lichtmanagementsysteme/technologien/1...10v/index.jsp](http://www.osram.de/osram_de/news-und-wissen/lichtmanagementsysteme/technologien/1...10v/index.jsp), Stand: 13.07.2015.

<sup>22</sup> Vgl. KNX Deutschland o.J., <http://www.knx.de/knx-de/bauen-mit-knx/index.php>, Stand: 10.09.2015.

<sup>23</sup> ERCO o.J., <http://www.erco.com/guide/lighting-control/lighting-control-systems-2588/de/>, Stand: 07.07.2015.

## 2.3 Forschung

Die Veränderungen der Bürotätigkeit am Arbeitsmarkt führen zu einer Anpassung der Lichttechnik in diesem Sektor. Sie hat sich in den letzten Jahren stark verändert und weiterentwickelt. Entwicklungen sind notwendig, um einerseits den immer weiter steigenden Anforderungen der Nutzer gerecht zu werden, andererseits um umweltfreundlicher zu arbeiten. Umweltfreundlichkeit in der Beleuchtungstechnik bedeutet Aspekte der Nachhaltigkeit, wie Energieeffizienz, Wohlbefinden und Kreativität bestmöglich in den Entwicklungsprozess mit einzubeziehen.

Die *Technische Universität Berlin* unterhält einen eigenen Fachbereich für Lichttechnik. Das Projekt „Energetische und ergonomische Optimierung von Beleuchtungssystemen für Sanierung und Neubau“ wird in Zusammenarbeit mit dem *Fraunhofer Institut für Bauphysik*, dem *Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme* und dem Ingenieurbüro *daylighting.de* durchgeführt. Das Ingenieurbüro ist spezialisiert auf die Beleuchtung mit Tageslicht<sup>24</sup>. Der Forschungsstart fand Mitte 2013 statt und soll voraussichtlich 2016 abgeschlossen sein.

Das vom *Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie* finanziell geförderte Projekt schafft eine wissenschaftliche Basis für energieeffiziente und ergonomisch optimierte Tageslicht- und künstliche Beleuchtungssysteme. Das Energieeinsparpotential von veralteten Beleuchtungsanlagen in Bürogebäuden, die durch neuwertige und effiziente Anlagen ersetzt werden, beläuft sich auf fast 20%. Allein ein Austausch von Lampen und Leuchten kann eine Reduzierung des Energieverbrauchs bewirken. Innovative Steuerungssysteme sorgen zusätzlich für eine Verringerung des Energiebedarfs, werden jedoch bei der Sanierung selten berücksichtigt. Frühere Projekte haben sich meist nur auf einen Bereich bezogen, entweder auf die Optimierung und Bewertung des Tageslichtertrags, oder auf die künstliche Beleuchtung. Das Forschungsprojekt der *Technischen Universität Berlin* untersucht sowohl beide Aspekte separat als auch ihre Beziehungen untereinander.

Die Forschung wird in zwei Teile gegliedert. Das Teilprojekt A generiert Tageslichtdaten. Neue Erkenntnisse über Lichtquellen, z.B. farbmétrische Parameter des Himmelslichtes oder die Dimmkennlinien der LED, sollen entwickelt und anschließend mit den technischen Neuheiten und dem nutzerabhängigen Wissen zusammengebracht werden. Daten der Auswertung tragen zur Entwicklung eines ideal zu steuernden Sonnenschutzsystems mit kombiniertem Beleuchtungssystem bei. Teilprojekt B setzt sich mit der Systemtechnologie auseinander.

<sup>24</sup> daylighting.de, www.daylighting.de, Stand: 18.08.2015.

Ein ganzheitliches Bewertungsverfahren beurteilt die konzipierten Ansätze unter Berücksichtigung von energetischen und nutzerbezogenen Faktoren. Die Anwendung der Lichtlösung im Bereich Sanierung und die Auswirkungen auf den Sanierungsprozess sind ein wichtiger Aspekt der Auswertung.<sup>25 26</sup>

Ein weiterer Fortschritt in der Lichttechnik ist die Erfindung einer organisch lichtemittierenden Diode (OLED). Der Unterschied zu einer herkömmlichen LED besteht in der Verwendung der Halbleitermaterialien. OLEDs werden aus organischen und LEDs aus anorganischen Materialien produziert, deshalb sind OLEDs wesentlich ressourcenschonender und somit nachhaltiger. OLEDs erzeugen im Vergleich zu LEDs flächiges Licht und kein punktuell, dadurch weitet sich der Bereich der Einsatzmöglichkeiten aus.<sup>27</sup>

Das Forschungsprojekt „OLYMP (Organische Lichtemittierende Systeme auf Basis von energie- und kosteneffizienten Materialien und Prozessen)“ ist ein vom *Bundesministerium für Bildung und Forschung* ins Leben gerufenes Projekt, dass OLEDs zur Marktreife führen soll. Führende deutsche Unternehmen haben sich zu einem Verbund zusammengeschlossen um gemeinsam an der Aufgabenstellung zu arbeiten und LEDs für den breiten Markt erschwinglich zu machen. Derzeit sind OLEDs sehr teuer, haben keine guten Effizienzwerte und die Lebensdauer befindet sich derzeit nicht auf dem Stand der LED.

Ein wesentliches Ziel liegt in der Erhöhung der Lebensdauer. Ein besseres Verständnis der Alterungsmechanismen kann Aufschluss über die kurze Lebenszeit bringen. Mit der Entwicklung von innovativer Prozesstechnologie sollen die Produktionskosten erheblich gesenkt werden. Zudem wird die Aufbau- und Kontaktierungstechnik verbessert. Das Projekt schafft den Grundstein für eine breitgefächerte und ökologischere Anwendung in Wohn- und Nichtwohngebäuden. Das Förderprojekt zeigt durch intensive Forschung große Fortschritte in der OLED Technologie. So können OLED - Einheiten mittlerweile in Designerleuchten oder auch in Displays eingesetzt werden.<sup>2829</sup>

<sup>25</sup> Technische Universität Berlin 2013, [https://www.li.tu-berlin.de/menue/forschung/forschungsprojekte/laufende\\_projekte527511](https://www.li.tu-berlin.de/menue/forschung/forschungsprojekte/laufende_projekte527511), Stand: 18.08.2015.

<sup>26</sup> Völker/Schumacher 2013, 44.

<sup>27</sup> Sasabe/Kido 2014, 12-16.

<sup>28</sup> Bundesministerium für Bildung und Forschung 2013, 1-2.

<sup>29</sup> Vgl. OSRAM o.J., [http://www.osram.de/osram\\_de/presse/pressemitteilungen/\\_fachpresse/2013/olymp-projekt-soll-oled-so-effizient-machen-wie-led/index.jsp](http://www.osram.de/osram_de/presse/pressemitteilungen/_fachpresse/2013/olymp-projekt-soll-oled-so-effizient-machen-wie-led/index.jsp), Stand: 17.08.2015.

Das *Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO)* rief 2014 eine Forschungsreihe ins Leben mit dem Namen „Innovationsoffensive Office 21“. Ein wichtiger Teilbereich ist das „Smarter Working“ bei dem die Erfolgsfaktoren der modernen Arbeitswelt analysiert und erforscht werden. Hauptaugenmerk bei diesem Projekt ist die Anpassung der Arbeitsumgebung auf den Nutzer. Eine räumliche, technologische und organisatorische Gestaltung hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Effizienz, das Wohlbefinden und die Zufriedenheit der Nutzer. Das Projekt wird in mehrere Bereiche geteilt: Innenausbau, Immobilienentwicklung, Büromöblierung- und Ausstattung, Informations- und Kommunikationstechnologie, Elektrotechnik und Gebäudeautomation, Immobilienfonds.

Das Teilprojekt „Office Lighting – Leistung und Wohlbefinden gezielt steuern“, beschäftigt sich mit dem Vergleich von Beleuchtungskonzepten und Best - Price - Beispielen. Für die Bürotätigkeit und somit für den Nutzer, spielen Sehleistung und Wohlbefinden immer eine übergeordnete Rolle. Zusätzlich sollen Perspektiven und Innovationsideen dargelegt werden, welche die Faktoren der Tätigkeiten, Raum- und Arbeitsumgebungen, Gewohnheiten und persönliche Aspekte der Nutzer mit einbeziehen. Ziel der Forschung ist es herauszufinden, welche Kriterien, Güte-merkmale und Kennwerte für ein optimales Beleuchtungskonzept charakterisierend sind. LEDs werden auf ihre Leistungsfähigkeit überprüft, mögliche Innovationspotenziale aufgezeigt und die Analysen in einem Abschlussbericht dokumentiert. Genauere Ergebnisse liegen noch nicht vor, denn das Verbundprojekt wird erst im Jahr 2016 abgeschlossen sein.<sup>30</sup>

Des Weiteren führte das *Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO)* mit der *Zumtobel Lightning GmbH* ein Forschungsprojekt zur wahrgenommenen Lichtqualität in Büroräumen durch. Seit Oktober 2013 gab es eine Webumfrage mit dem Titel „The Light. Globale Nutzerstudie über wahrgenommene Lichtqualität im Büro“. Diese Langzeitstudie verfolgte das Ziel die wahrgenommene und bevorzugte Lichtqualität am Arbeitsplatz von Nutzern aus der ganzen Welt beurteilen zu lassen und später auszuwerten. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass eine anwendungsbezogene Beleuchtung am Arbeitsplatz Verbesserungen für den Nutzer bringen. Die individuelle Abstimmung von Licht zum Benutzer steigert das Wohlbefinden und trägt zu einer besseren Gesundheit bei. Eine Leistungssteigerung durch optimal abgestimmtes Licht kann in dieser Umfrage auch verzeichnet werden.<sup>31</sup>

---

<sup>30</sup> Richters 2014, 14.

<sup>31</sup> Zumtobel Lightning GmbH 2014, 12-30.

## **Teil III**

# **Hypothesen**

Die Information aus Teil 2 „Stand der Technik“, beschreiben die LED als beste und einzige Alternative für Büro- und Konferenzräume in der heutigen Zeit. Zur Beurteilung dieser Aussagen werden vier Hypothesen, im Bereich der Nachhaltigkeit aufgestellt und auf ihre Gültigkeit überprüft.

### **Hypothese 1**

Für die Beleuchtung von Arbeitsstätten sind Leuchten mit LED - Lampen ökologischer, als Leuchten mit Leuchtstofflampen. Die Produktzyklusanalyse zeigt, dass sich Lichtemittierende Dioden in Bezug auf Produktion, Nutzung, Wartung und Recycling von anderen Lampen absetzen und viele Vorteile mit sich bringen.

### **Hypothese 2**

Aus ökonomischer Sicht amortisiert sich eine Anlage mit LED - Beleuchtung, im Vergleich zu einem System mit Leuchtstofflampen, trotz höherer Erstinvestitionskosten durch die geringen Betriebskosten bereits nach 3 - 5 Jahren.

### **Hypothese 3**

Leuchten mit LEDs sind effizienter als Leuchten mit Leuchtstofflampen. Beleuchtungskonzepte mit LED - Leuchten und Steuerungstechnik sind langlebiger und energiesparender.

### **Hypothese 4**

Durch die Umsetzung eines Beleuchtungskonzeptes mit einer LED - Beleuchtung wird individuell für den Nutzer eine optimale Lichtqualität entsprechend seiner Sehaufgabe geschaffen. Die Produktivität und das Wohlbefinden der Nutzer werden durch eine angemessene Beleuchtungsstärke und die Vermeidung von Blendung jeglicher Art verbessert.



# **Teil IV**

# **Simulation**

## 4.1 Simulationsaufbau

Im Folgenden werden alle Rahmenbedingungen definiert, die Versuchsräume zu konzipieren. Es werden aktuelle in Deutschland geltende DIN-Normen und Richtlinien eingehalten. Büroräume und Konferenz- und Besprechungsräume werden im genaueren betrachtet. Die Büroräume gliedern sich in Einzel-, Gruppen- und Großraumbüro.

### 4.1.1 Örtliche Gegebenheiten

Für die Berechnung wird München als Simulationsstandort festgelegt. Um mögliche äußere Einflüsse zu eliminieren und da für die Auswertung nur die Minimalwerte der Beleuchtungsstärke relevant sind, wird auf eine Verschattung als Gegenstand der Simulation verzichtet. Von einer genauen Angabe des Stockwerkes wird abgesehen, jedoch wird davon ausgegangen, dass sich der Raum mindestens in einer Höhe von 12,00 m befindet (s. a. Tabelle 3). Die Höhe ist im weiteren Vorgehen für die Bestimmung der Brüstungshöhe relevant (vgl. Abschnitt 4.1.5).

*Tabelle 3 – Örtliche Gegebenheiten*

Standort	München
Verschattung	keine
Stockwerk	in einer Höhe über 12,00 m

#### 4.1.2 Flächen am Arbeitsplatz

Zur Bestimmung der Grundflächen der vier Räume müssen zunächst die notwendigen Flächen der Arbeitsplätze ermittelt und die Möblierung ausgewählt werden.

Für eine ergonomische Arbeitsweise ist eine Ansitzbreite und eine Tiefe im Beinraum von 0,80 m zu gewährleisten. Die Arbeitsfläche an einem Büroarbeitsplatz muss 1,60 m x 0,80 m groß sein, mit einer zugehörigen Bewegungsfläche von 1,60 m x 1,00 m. Ein Konferenzplatz benötigt 0,60 - 0,80 m x 0,80 m Arbeitsfläche und 0,80 m x 0,80 m Bewegungsfläche. Im Falle eines Notfalls sind Mindestbreiten von Verkehrsflächen und Fluchtwegen einzuhalten. Ein Weg zum persönlichen Arbeitsplatz ist mit einer Breite von 0,60 m, Wege welche von bis zu 20 Personen genutzt werden mit einer Breite von 1,00 m und Verkehrsflächen für bis zu 200 Personen mit 1,20 m Breite auszulegen. Übersichtlich sind die benötigten Flächen an einem Arbeitsplatz in der unten stehenden Tabelle 4 dargestellt.

Für die Nutzung von Schränken, Schubkästen und anderer Möblierung ist eine ausreichend große Funktionsfläche vorzusehen. Diese wird in der Breite durch das Möbelstück selbst und in der Tiefe durch Türbreiten oder Auszugstiefen von Schubladen bestimmt.

*Tabelle 4 – Flächen am Arbeitsplatz*

Beinraum	in der Tiefe	0,80 m	DIN EN 527-1 - 4.2
Ansitzbreite		0,80 m	DIN 16555 - 4.2.1.2
Arbeitsfläche	Büroarbeitsplatz	1,60 m x 0,80 m	DIN 4543-1 - 3.1
	Konferenzplatz	0,60-0,80 m x 0,80 m	DIN 16555 - 4.2.1.3
freie Bewegungsfläche	Büroarbeitsplatz	1,60 m x 1,00 m	DIN 4543-1 - 3.2.4.1
	Konferenzplatz	0,80 m x 0,80 m	
Verkehrswegeflächen/ Fluchtweg	bis 20 Personen	1,00 m	ASR A1.8 - 4.2 ASR A2.3 - 5(3)
	bis 200 Personen	1,20 m	
	zum persönlichen Arbeitsplatz	0,60 m	
			DIN 4543-1 - 3.2.6.1

### 4.1.3 Möblierung

Das Einzel-, Gruppen- und Großraumbüro ist für jede arbeitende Person mit einem Schreibtisch, einem zugehörigen Bürostuhl, einem Schrank und einem Kopierer ausgestattet. Darüber hinaus wird zur Standardeinrichtung im Gruppenbüro zwischen zwei Arbeitsplatzgruppen eine Trennwand mit einer Höhe von 1,60 m angebracht und eine zusätzliche Ablagemöglichkeit neben dem Schreibtisch bereitgestellt. Das Großraumbüro verfügt zusätzlich pro Arbeitsplatzgruppe über einen separaten Besprechungstisch mit zwei Stühlen.

Der Konferenzraum verfügt pro Teilnehmer über einen 0,80 m x 0,60 m großen Tagungstisch und einem genormten Tagungsstuhl. Zudem ist der Raum mit einem Flipchart, einer Bildwand (2,00 m x 1,50 m) und Zubehör ausgestattet. Eine weitere Möblierung wird nicht vorgenommen, da dies für die Simulation nicht weiter relevant ist und davon ausgegangen wird, dass ausreichend Lagerflächen außerhalb des Konferenzraumes vorhanden sind. Detaillierte Angaben zur Möblierung sind in Tabelle 5 als auch visuell in Abschnitt 4.1.6 zu finden.

*Tabelle 5 – Möblierung*

Bürotisch	Tischbreite	ab 1,60 m	DIN 4543-1 - 3.1
	Tischtiefe	ab 0,80 m	
Bürostuhl	Sitzhöhe	0,40 - 0,51 m	DIN EN 1335-1
	Sitzbreite	min. 0,40 m	
	Sitztiefe	0,38 - 0,47 m	
Besucherstuhl	Sitzhöhe	0,40 - 0,50 m	DIN EN 13761
	Sitzbreite	0,40 m	
	Sitztiefe	0,40 - 0,42 m	
Tagungstisch (2 Personen)	Tischhöhe	0,70 - 0,75 m	DIN 15906 - 14.3
	Tischbreite	ab 1,30 m	
	Tischtiefe	ab 0,45 m	
Tagungsstuhl	Sitzhöhe	0,45 - 0,50 m	DIN 15906 - 14.2
	Sitzbreite	0,40 - 0,50 m	
	Sitztiefe	0,40 - 0,48 m	
	Stuhlbreite	0,55 - 0,60 m	

#### 4.1.4 Geometrie

Die Arbeitsstättenrichtlinie A1.2 - 5(3) schreibt für Arbeitsräume Mindestgrößen vor. Ein Einzelbüro benötigt mindestens 8,00 m<sup>2</sup> Fläche, für jeden weiteren Arbeitsplatz im Raum zusätzlich noch einmal 6,00 m<sup>2</sup>. Mit den Kenntnissen der vorgeschriebenen Flächen am Arbeitsplatz und der gewählten Möblierung ergeben sich die in Tabelle 6 aufgeführten Grundflächen. Für das Einzelbüro werden 11,18 m<sup>2</sup>, für das Gruppenbüro 64,50 m<sup>2</sup>, und für das Großraumbüro 468,00 m<sup>2</sup> Fläche veranschlagt.

*Tabelle 6 – Grundflächen Einzel-, Gruppen-, Großraumbüro*

Grundfläche	Einzelbüro je weiterer Arbeitsplatz	min. 8,00 m <sup>2</sup> min. 6,00 m <sup>2</sup>	ASR A1.2 - 5(3)
Gewählte Grundfläche	Einzelbüro	11,18 m <sup>2</sup> (2,60 m x 4,30 m)	
	Gruppenbüro	64,50 m <sup>2</sup> (15,00 m x 4,30 m)	
	Großraumbüro	468,00 m <sup>2</sup> (39,00 m x 12,00 m)	

Für die Grundfläche des Konferenz- und Besprechungsraumes wird eine Teilnehmerzahl von 20 Personen zugrunde gelegt. Da der Raum vielseitig genutzt werden kann (z. B. für Sitzungen, Seminare, Schulungen, Präsentationen usw.) und für die verschiedenen Nutzungen mehrere Bestuhlungsvarianten sinnvoll sind, wird der jeweils notwendige Platzbedarf ermittelt. In der Tabelle 7 sind die notwendigen Flächen für jede Bestuhlungsvariation aufgeführt. Um alle Bestuhlungsvarianten zu ermöglichen wird die Raumgröße mit der maximal notwendigen Fläche maßgebend (60,00 m<sup>2</sup>).

*Tabelle 7 – Grundfläche Konferenz- und Besprechungsraum*

Bestuhlungsvarianten (min. Flächenbedarf)	Reihenbestuhlung	42,00 m <sup>2</sup> (7m x 6m)
	Tische in Blockform	36,00 m <sup>2</sup> (9m x 4m)
	Tischreihen parlamentarisch	54,00 m <sup>2</sup> (9m x 6m)
	Tische in U-Form	60,00 m <sup>2</sup> (10m x 6m)
Gewählte Grundfläche	Konferenzraum	60,00 m <sup>2</sup> (10m x 6m)

Für die verschiedenen Raumtypen sind, abhängig von ihrer Größe, Mindestraumhöhen einzuhalten. Ein Einzelbüro ist bereits mit einer Raumhöhe von 2,50 m richtlinienkonform, das Großraumbüro erst mit einer lichten Höhe von 3,00 m (s. a. Tabelle 8). In der Simulation wird davon ausgegangen, dass sich alle Räume in einem Gebäude befinden. Innerhalb eines Gebäudes gibt es keine Höhenversprünge, die Raumhöhe wird daher mit 3,00 m festgesetzt. Damit steht ein Luftraum von 36,00 m<sup>3</sup> im Einzelbüro, 193,50 m<sup>3</sup> im Gruppenbüro für 6 Personen und das Großraumbüro mit 1404,00 m<sup>3</sup> für 26 Personen zur Verfügung. Der Richtwert in der ASR A1.2 - 7 von 12,00 m<sup>3</sup> pro ständig anwesende Person, welche eine überwiegend sitzende Tätigkeit ausübt ist somit für alle Typen eingehalten. Auch die Leinwand mit einer Höhe von 1,50 m und einem Format von 4:3 kann normgerecht in einer gewählten Höhe von 1,20 m angebracht werden.

*Tabelle 8 – Lichte Raumhöhe*

Grundfläche Büro	< 50,00 m <sup>2</sup>	2,50 m Raumhöhe	ASR A1.2 - 6(2)
	> 50,00 m <sup>2</sup>	2,75 m Raumhöhe	
	> 100,00 m <sup>2</sup>	3,00 m Raumhöhe	
Luftraum Büro für jede ständig anwesende Person	12,00 m <sup>3</sup>	bei überwiegend sitzender Tätigkeit	ASR A1.2 - 7
Konferenzraum	Höhe des projizierten Bildes (FOK) Leinwandhöhe	Gewählt = 1,20 m Format 4:3 = 1,50 m	DIN 19045-1 - 4.2
Gewählte lichte Höhe	3,00 m		

#### 4.1.5 Fensterflächen

Fenster in einem Büro haben zum einen die wesentliche Aufgabe Tageslicht in den Raum zu lassen und zum anderen eine Sichtverbindung nach außen herzustellen. Zusätzlich schafft das natürliche Licht der Sonne ein angenehmes Helligkeitsniveau im Raum.

Um den maximalen Lichteintrag zu erhalten, werden die Fensterflächen so groß wie möglich gewählt. Die Fensterfläche spannt sich über die gesamte Breite des Raumes. Lediglich in der Höhe wird sie durch die vorgegebene Brüstungshöhe aus der *ASR 12/1-3* begrenzt. Diese besagt, dass bei Räumen welche sich über 12,00 m über dem Erdboden befinden eine Brüstungshöhe von 1,00 m einzuhalten ist. Die Fensterfläche errechnet sich aus der maximalen Breite multipliziert mit der Gesamthöhe ab Oberkante Brüstung.

Daraus ergeben sich mit einer Fensterhöhe von 2,00 m für das Einzelbüro eine Fensterfläche von 5,20 m<sup>2</sup>, für das Gruppenbüro 30,00 m<sup>2</sup> und für den Konferenzraum eine Fläche von 20,00 m<sup>2</sup>. Aufgrund der großen Grundfläche des Großraumbüros wird dieser Raum auf zwei Seiten mit einer Fensterfront versehen. Damit verfügt das Großraumbüro über eine Fensterfläche von 78,00 m<sup>2</sup> je Seite.

Durch die maximal mögliche Verglasung können die Abmessungen, Mindestfensterflächen als auch die Gewährleistung des größten Lichtertrags und der notwendigen Sichtverbindung aus der DIN, sowie der Arbeitsstättenrichtlinien, ohne Probleme eingehalten werden. Die Tabelle 9 fasst die Anforderungen noch einmal übersichtlich zusammen.

*Tabelle 9 – Fensterflächen*

Fensterbrüstung	ab 12 m Absturzhöhe	1,00 m	ASR 12/1-3
Sichtverbindung	Raumtiefe	≤ 5,00 m = 1,25 m <sup>2</sup> > 5,00 m = 1,50 m <sup>2</sup>	DIN 5034-1 - 4.2.3 ASR 7/1
	min. Fenstergröße	min. H = 1,25 m min. B = 1,00 m	
Gesamtfläche der Sichtverbindung	bis 600m <sup>2</sup>	1/10 der Raumgrundfläche	ASR 7/1
Einzelbüro	5,20 m <sup>2</sup> (2,60 m x 2,00 m)		
Gruppenbüro	30,00 m <sup>2</sup> (15,00 m x 2,00 m)		
Großraumbüro	156,00 m <sup>2</sup> (39,00 m x 2,00 m x 2)		
Konferenzraum	20,00 m <sup>2</sup> (10,00 m x 2,00 m)		

#### 4.1.6 Grundrisse / 3D-Visualisierung

In den nachfolgenden Abbildungen 6 - 9 sind übersichtlich der Konferenz- und Besprechungsraum und alle Büroformen aufgeführt. Die Darstellungen veranschaulichen, wie jeder Bürotyp eingerichtet ist. Die Anordnung der Möbel ist im weiteren Verlauf der Simulation relevant für die Berechnung des Lichts. Anhand der Grundrisse können die Leuchten angeordnet und eventuell auftretende Verschattungen in der Berechnung berücksichtigt werden. Abbildung 6 zeigt den Besprechungsraum mit der Bestuhlungsvariante der Blockform. Diese Form wurde gewählt, da bei dieser Variante die Maximalbeleuchtung zum Einsatz kommt, auf welche das System ausgelegt werden muss. Alle anderen Bestuhlungsvarianten sind zur besseren Vorstellung im Anhang in den Abbildungen 1 - 3 aufgereiht.

#### Konferenz- und Besprechungsraum



*Abbildung 6 – Grundriss und Rendering Konferenz- und Besprechungsraum in Blockform*



## Einzelbüro

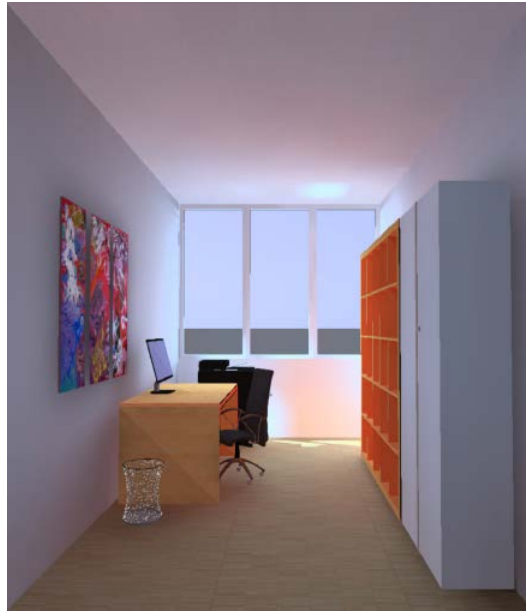
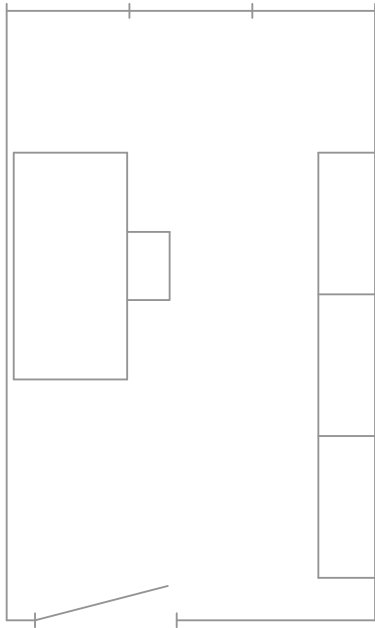


Abbildung 7 – Grundriss und Rendering Einzelbüro

## Gruppenbüro

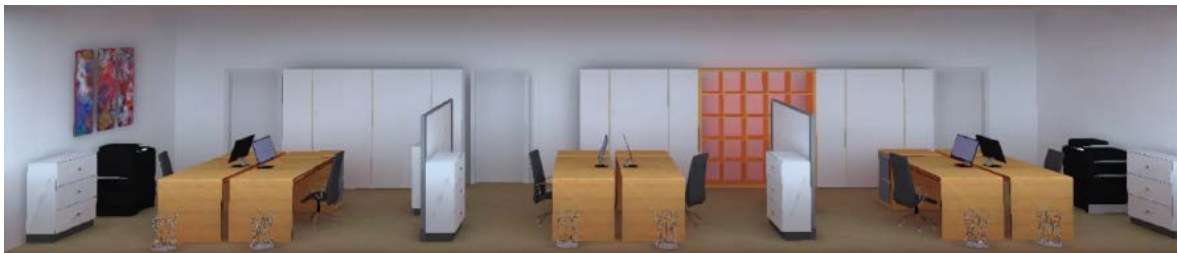
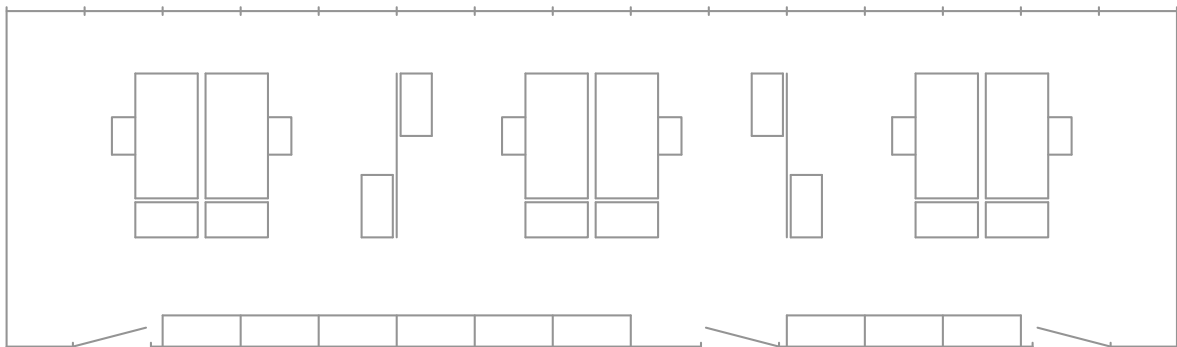
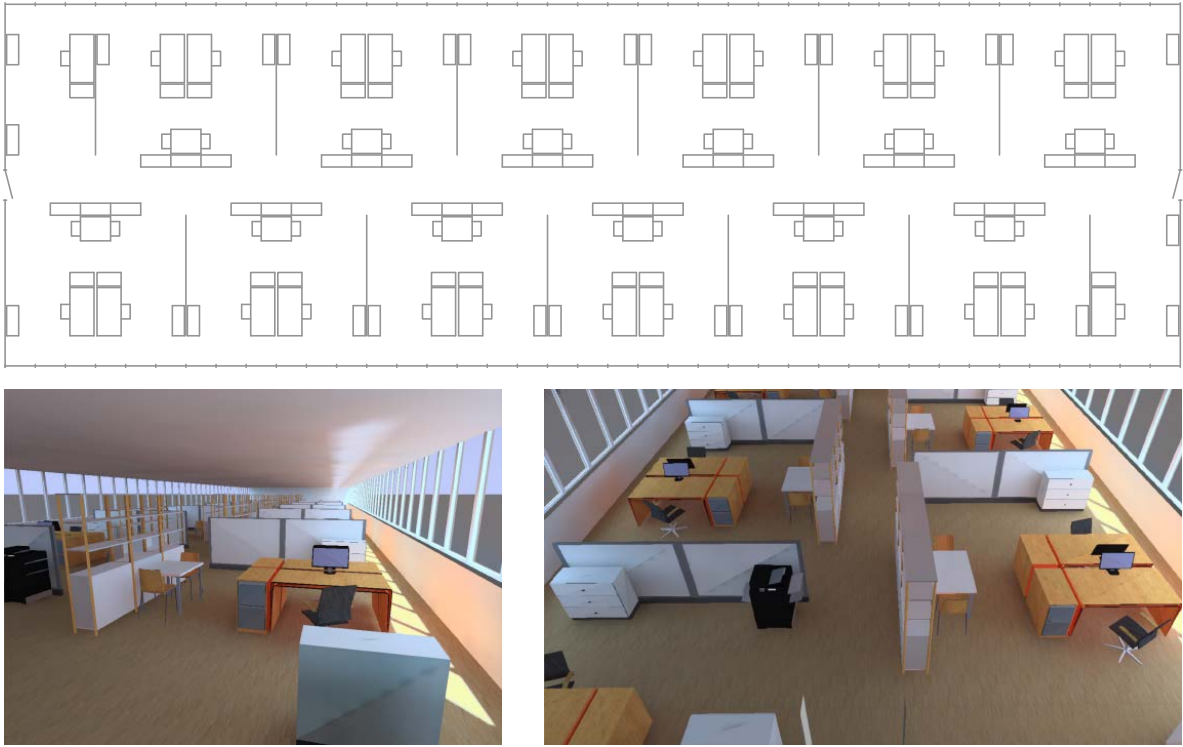


Abbildung 8 – Grundriss und Rendering Gruppenbüro

Großraumbüro



*Abbildung 9 – Grundriss und Rendering Großraumbüro*

## 4.2 Anforderungen an die Sehaufgabe

Im Büro fallen verschiedene Tätigkeiten an, welche hauptsächlich im Sitzen ausgeführt werden. Zur adäquaten Ausführung der Arbeit ist eine gute Beleuchtung wichtig. Die Lichtqualität soll sowohl visuelle, emotionale, als auch biologische Anforderungen erfüllen. Nicht nur die Wahrnehmung und gute Sichtbarkeit von Objekten muss gewährleistet sein, sondern auch den Arbeitnehmer aktiv unterstützen, aufmerksam seine Aufgaben umzusetzen. Zusätzlich kann eine gute Beleuchtung eine arbeitsfreundliche Atmosphäre schaffen und die Produktivität der Mitarbeiter steigern.<sup>32</sup>

Die *DIN EN 12464-1* gibt Richtwerte zur Orientierung für die erforderliche Helligkeit auf Arbeitsflächen vor. Die notwendige Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche kann durch Tageslicht und/oder künstliches Licht erreicht werden. Die Mindestwerte der Beleuchtungsstärken müssen in jeder Arbeitsstätte eingehalten sein. Eine individuelle Betrachtung der Arbeitsplätze kann erforderlich werden.

Bei Büroräumen wird zwischen drei Beleuchtungsstärken unterschieden. Für ein tageslichtorientiertes Büro reichen 300 Lux im Arbeitsbereich, beim normalen Arbeiten oder CAD zeichnen fordert die Norm 500 Lux und für technisches Zeichnen benötigt der Arbeitnehmer sogar 750 Lux (vgl. Tabelle 10). Der Berechnung wird ein Büro mit einem normalen Tätigkeitsbereich zugrunde gelegt und 500 Lux als Richtwert angesetzt.

*Tabelle 10 – Beleuchtungsstärke*

Arbeitsbereich	300 Lux (tageslichtorientiert)	DIN EN 12464-1 - 5.3
	500 Lux (CAD, Konferenz)	
	750 Lux (technisches Zeichnen)	
Umgebungsbereich	min. 200 Lux (tageslichtorientiert)	DIN EN 12464-1 - 4.3.2
	300 Lux (CAD)	
	500 Lux (technisches Zeichnen)	
Verkehrsflächen / Flure	100 Lux	DIN EN 12464-1 - 5.3

<sup>32</sup> Zumtobel GmbH 2013, 7-10.

Bei Konferenz- und Besprechungsräumen wird vom Teilnehmer konzentriertes und aufmerksames Zuhören von Präsentationen und Vorträgen gefordert. Außerdem können Aufgaben wie Schreibarbeiten, oder auch klassisches Lesen erforderlich sein. Zur Umsetzung dieser Aufgaben darf eine Mindestbeleuchtungsstärke von 500 Lux im Bereich der Sehaufgabe und 300 Lux im Umgebungsbereich im Mittel nicht unterschritten werden. (vgl. Tabelle 10)

Die richtige Wahl von Farben und Materialien unterstützt die Aufhellung der Konferenz- und Büroräume. Die zugehörigen Reflexionsgrade der Materialien geben an, wie hoch der Anteil des auftreffenden Lichts ist, der von der Oberfläche zurückgeworfen wird.<sup>33</sup> Je höher der Reflexionsgrad, desto heller der Raum. Um Blendungen im Bereich der Sehaufgabe zu vermeiden, reglementiert die *DIN 12464-1* diese Werte.

Für Wände und Decken wurde ein weiß gestrichener Kalkputz mit einem Reflexionsgrad von  $\rho = 0,70$  ausgewählt. Damit liegt der Wert innerhalb der Toleranzbereiche. Für Wände wird ein Wert von  $\rho = 0,30 - 0,80$  und für Decken von  $\rho = 0,60 - 0,90$  vorgegeben (s. a. Tabelle 11). Der Fußboden und die Arbeitsfläche müssen einen geringeren Reflexionsgrad aufweisen, um Blendungen für den Arbeitnehmer zu vermeiden. Hierfür eignet sich ein Holzwerkstoff sehr gut. Schreibtische, sowie Fußboden, werden aus Eiche gefertigt, wobei für die Schreibtische der Reflexionsgrad von  $\rho = 0,50$  und für den Boden von  $\rho = 0,10$  definiert wird.

*Tabelle 11 – Reflexionsgrad*

Wände	$\rho = 0,30 - 0,80$	DIN EN 12464-1 - 4.2
Gewählt	$\rho = 0,80$	Kalkputz, Weiß gestrichen
Decken	$\rho = 0,60 - 0,90$	DIN EN 12464-1 - 4.2
Gewählt	$\rho = 0,70$	Kalkputz, Weiß gestrichen
Arbeitsflächen	$\rho = 0,20 - 0,60$	DIN EN 12464-1 - 4.2
Gewählt	$\rho = 0,50$	Eiche hell, poliert
Fußboden	$\rho = 0,10 - 0,50$	DIN EN 12464-1 - 4.2
Gewählt	$\rho = 0,10$	Eiche dunkel, poliert

<sup>33</sup> Vgl. ERCO o.J., <http://www.erco.com/guide/glossary/r/reflection-1995/de/>, Stand: 01.10.2015.

Für die Beleuchtung von Konferenz- und Büroräume werden neutralweiße Lichtquellen eingesetzt. Eine sachlich ruhige Umgebung wird geschaffen und eignet sich damit ideal für die Anforderungen der Sehaufgaben in diesem Einsatzgebiet. Bei Bildschirmarbeitsplätzen muss der Farbwiedergabewert mindestens  $R_a = 80$  aufweisen (s. a. Tabelle 12), in Fluren reicht ein  $R_a$  - Wert von 40. Für Konferenzräume ist ebenfalls ein Farbwiedergabeindex von  $R_a = 80$  einzuhalten.

*Tabelle 12 – Farbwiedergabeindex*

Konferenz- und Büroräume	$R_a = 80$	DIN EN 12464-1 - 5.3
Verkehrsflächen / Flure	$R_a = 40$	DIN EN 12464-1 - 5.3

### 4.3 Nutzung

Ein wesentlicher Faktor der späteren Auswertung ist die Verwendung der Beleuchtungsanlage durch den Nutzer. Daraus lassen sich zusätzliche Anforderungen für das geplante Beleuchtungskonzept ableiten. Zum besseren Vergleich wird die Betriebszeit für alle Bürotypen identisch vorgegeben.

Es wird davon ausgegangen, dass das Mitarbeiteralter von 16 bis 68 Jahren reicht. Zur Erfüllung ihrer Aufgaben benötigen ältere Arbeitnehmer in der Regel mehr Licht als jüngere. Andere Gründe für den Bedarf einer erhöhten Beleuchtungsstärke können auch Müdigkeit oder Konzentrationsschwierigkeiten sein. In der Planung werden diese Faktoren für die Beleuchtungsanlage berücksichtigt.

Für die Ermittlung der Betriebsstunden der Beleuchtungsanlage wird eine fünf Tage Woche von Montag bis Freitag und einem Arbeitstag von 08.00 - 17.00 Uhr zugrunde gelegt. Die Mittagspause bleibt hinsichtlich der ermittelten Betriebsstunden unberücksichtigt, . Diese Annahme beruht darauf, dass nicht alle Mitarbeiter gleichzeitig das Büro für die Pause verlassen, bzw. mit den Spitzenwerten gerechnet werden soll. Damit ergeben sich 2250 Betriebsstunden pro Jahr. Detaillierte Darstellung in der Tabelle 13.

*Tabelle 13 – Nutzerverhalten*

Alter	16 - 68 Jahre
Arbeitstage	Montag - Freitag
Arbeitsstunden	08.00 - 17.00 Uhr
Mittagspause	1 Stunde
Wochen	50 Wochen
Nutzung	9 h pro Tag 45 h pro Woche 2250 h pro Jahr

## 4.4 Beleuchtungskonzepte

### 4.4.1 Varianten

In der Simulation werden sechs verschiedene Beleuchtungssituationen ausgewertet. Die Unterteilung gliedert sich in drei Hauptvarianten (Standard, Eco, Eco Plus) und jeweils zwei Beleuchtungskonzepte (Direktbeleuchtung, Direkt- und Indirektbeleuchtung). Die möglichen Kombinationen fasst die Tabelle 14 übersichtlich zusammen.

Dabei wird die Standard - Variante mit Leuchtstoff - Rasterleuchten und keiner Steuerungstechnik umgesetzt. Die Eco - Variante ersetzt die Leuchtstofflampen gegen LEDs und wird in der Eco Plus - Variante durch Steuerungstechnik erweitert. Als Steuerungstechnik wird ein Steuerungsmodul, Bewegungsmelder und Lichtsensoren eingesetzt.

*Tabelle 14 – Beleuchtungsvarianten*

Varianten	Umsetzung des Beleuchtungskonzepts
<b>Standard</b>	
Leuchtstoff - Leuchten	<b>Direktbeleuchtung</b>
Keine Steuerungstechnik	<b>Direkt- und Indirektbeleuchtung</b>
<b>Eco</b>	
LED - Leuchten	<b>Direktbeleuchtung</b>
Keine Steuerungstechnik	<b>Direkt- und Indirektbeleuchtung</b>
<b>Eco Plus</b>	
LED - Leuchten	<b>Direktbeleuchtung</b>
Steuerungstechnik	<b>Direkt- und Indirektbeleuchtung</b>

#### 4.4.2 Leuchtauswahl und Steuerungstechnik

Für die Leuchten dienen die Lampen des Herstellers *Zumtobel* als Referenz. Von dieser Firma sind sowohl Anbau-, als auch Pendelleuchte der gleichen Lampenfamilie verfügbar. Jede Variante ist in der Ausführung mit einer Leuchtstofflampe oder mit LEDs erhältlich. Zusätzlich sind für diese Leuchten alle notwendigen DIALux - Daten vorhanden. In der Auswertung erleichtert dies die Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Faktoren wie unterschiedliche Bauart, Größe oder verschieden verwendete Materialien können ausgeschlossen werden.

Die Steuerungstechnik wird teilweise ebenfalls von der Firma *Zumtobel* verwendet. Für die Bewegungsmelder wird ein Modell der Firma *Theben* ausgewählt.

##### Direktbeleuchtung

Direktbeleuchtung beschreibt ein Beleuchtungskonzept, bei welchem der Lichtaustritt unmittelbar von oben, ohne Umlenkungen aus der Lichtquelle, auf die darunter liegende Fläche auftrifft. Das Konzept der Direktbeleuchtung wird mit dem System von Anbauleuchten umgesetzt. Diese werden direkt an der Decke installiert.

Die ausgewählte Leuchte zählt zu der *ECOOS* - Familie der *Zumtobel* - Leuchten und wird in unserem Fall mit den Abmessungen 1207 x 120 x 80 mm eingesetzt. Die Leuchten der Standard - Variante werden mit T16 - Lampen, in den Eco - Varianten mit LEDs bestückt. Die Leuchten werden beide mit dem DALI - Protokoll angesteuert, eine Dimmung ist bis zu 1% möglich.

Beim Betriebswirkungsgrad erzielt die LED - Version einen Wert von 100%, bei einem Lampen- und Leuchtenlichtstrom von 4030 lm, einer Leistung von 42,00 W und einer Lichtausbeute von 95,9 lm/W. Die Werte für die Leuchtstoff - Leuchte sind im Gesamtvergleich geringer. Sie besitzt damit einen Betriebswirkungsgrad von 89,98%, einen Lampenlichtstrom von 4450 lm und einen Leuchtenlichtstrom von 4004 lm. Mit einer Leistung von 59,7 W wird eine Lichtausbeute von 67,1 lm/W erzeugt.

Die Blendungsbegrenzungen entsprechen mit einem Wert  $<19$  der Norm. Ebenso der Farbwiedergabeindex, welcher mindestens  $R_a = 80$  erreicht. Die Lebensdauer einer Leuchtstofflampe liegt im Schnitt etwa bei 20.000 h und bei einer LED bis zu 50.000 h. Die Haltbarkeitsangabe der LED bezieht sich auf den Lichtstromrückgang von 75%.



Die Preise beziehen sich auf direkte Herstellerangaben inklusive Mehrwertsteuer. Eine Leuchte mit LEDs wird für 654,50 € verkauft, eine Leuchte mit Leuchtstofflampen für 437,92 €. Die Angaben dienen als Richtwert zur späteren Systemkostenberechnung. In der Tabelle 15 sind alle Kenndaten der verwendeten Anbauleuchten übersichtlich und getrennt in Leuchtstoff- und LED - Variante aufgelistet.

*Tabelle 15 – Kenndaten - Anbauleuchte Ausführung Leuchtstofflampe / LED <sup>34</sup>*

Kenndaten	Leuchtstofflampe	LED
Hersteller	Zumtobel	Zumtobel
Abmessungen	1207 x 120 x 80 mm	1207 x 120 x 80 mm
Lampenfamilie	ECOOS	ECOOS
Verwendete Lampen	1 x T16	LED - Platine
Typ	A 1/54W T16 LDE	A LED4000-830 L1200 LDO
Steuerung	dimmbar bis 1% - DALI	dimmbar bis 1% - DALI
Betriebswirkungsgrad	89,98%	100%
Lampenlichtstrom	4450 lm	4030 lm
Leuchtenlichtstrom	4040 lm	4030 lm
Leistung	59,7 W	42,0 W
Lichtausbeute	67,1 lm/W	95,9 lm/W
UGR	< 19	< 19
Farbwiedergabeindex	min. 80	min. 80
Lebensdauer	20.000 h	50.000 h (Lichtstromrückgang bis 75%)
Preis	437,92 €	654,50 €

<sup>34</sup> Zumtobel GmbH 2014, 10-15.

## Direkt- Indirektbeleuchtung

Das Lichtkonzept mittels direkter und indirekter Beleuchtung erzeugt einen direkten Lichtanteil (vgl. Direktbeleuchtung) und einen indirekte Reflexionsanteil im Raum. Für dieses Beleuchtungskonzept wurden Pendelleuchten ausgewählt und in einer Höhe von 0,50 m von der Decke abgehängt.

Zur einfacheren Auswertung sind diese Leuchten ebenfalls aus der ECOOS - Familie. In den Ausführungen Leuchtstofflampe und LEDs in einer Größe von 1207 x 120 x 80 mm. Die Kenn-daten der Pendelleuchte sind mit der Variante der Direktbeleuchtung identisch.

Die Leuchtentypen unterscheiden sich nur anhand ihrer Typen - Bezeichnung und ihre Ein-kaufspreisen. Die Tabelle 16 fasst alle Informationen noch einmal übersichtlich zusammen.

*Tabelle 16 – Kenndaten - Pendelleuchte Ausführung Leuchtstofflampe / LED <sup>35</sup>*

Kenndaten	Leuchtstofflampe	LED
Hersteller	Zumtobel	Zumtobel
Abmessungen	1207 x 120 x 80 mm	1207 x 120 x 80 mm
Lampenfamilie	ECOOS	ECOOS
Verwendete Lampen	1 x T16	LED - Platine
Typ	ID 1/54W T16 LDE	ID LED4000-830 L1200 LDO
Steuerung	dimmbar bis 1% - DALI	dimmbar bis 1% - DALI
Betriebswirkungsgrad	89,98%	100%
Lampenlichtstrom	4450 lm	4030 lm
Leuchtenlichtstrom	4040 lm	4030 lm
Leistung	59,7 W	42,0 W
Lichtausbeute	67,1 lm/W	95,9 lm/W
UGR	< 19	< 19
Farbwiedergabeindex	min. 80	min. 80
Lebensdauer	20.000 h	50.000 h (Lichtstromrückgang bis 75%)
Preis	472,43 €	687,82 €

<sup>35</sup> Zumtobel GmbH 2014, 10-15.

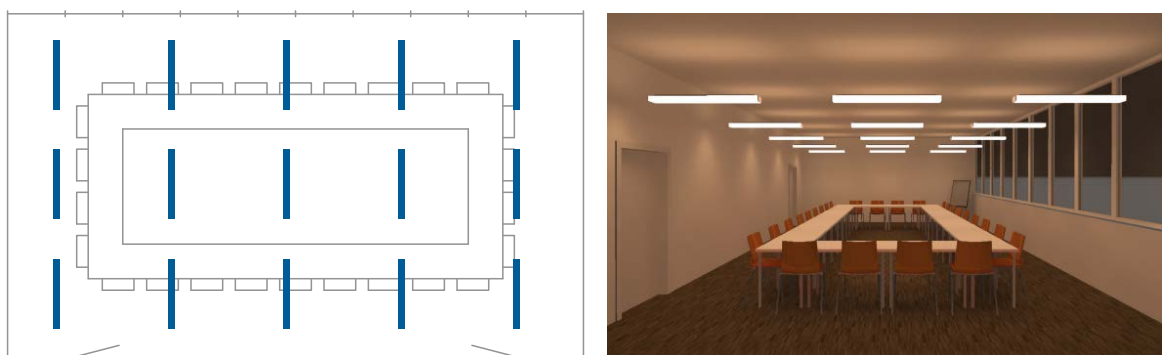
### 4.4.3 Leuchtenstruktur

Zur Veranschaulichung ist in der Tabelle 17 übersichtlich die Anzahl der Leuchten jeder Variante zusammengefasst. Der Konferenzraum kommt mit einer Steuergruppe mit je 12, 15 oder 18 Leuchten aus. Das Einzelbüro wird in einer Steuergruppe mit 4 bzw. 6 Leuchten geplant. Im Gruppenbüro gibt es 18 bzw. 20 Leuchten welche sich auch in einer Steuerungsgruppe befinden. Mit 128 oder 136 Leuchten ist das Großraumbüro ausgestattet, welche auf jeder Seite in 2 Steuerungsgruppen aufgeteilt ist. Die Abbildungen 10 - 13 zeigen die Anordnungen der LED - Pendelleuchten. Die Anbauleuchtenvariante ist in den Anlagen 4 - 17 aufgereiht.

*Tabelle 17 – Anzahl Leuchten*

	Einzelbüro	Gruppenbüro	Großraumbüro	Konferenzraum
Leuchtstoff - Anbauleuchten	6 Stk.	18 Stk.	128 Stk.	15 Stk.
Leuchtstoff - Pendelleuchten	4 Stk.	18 Stk.	128 Stk.	12 Stk.
LED - Anbauleuchten	6 Stk.	20 Stk.	136 Stk.	18 Stk.
LED - Pendelleuchten	4 Stk.	18 Stk.	136 Stk.	15 Stk.

#### Konferenz- und Besprechungsraum



*Abbildung 10 – Struktur der LED - Pendelleuchten im Konferenz- und Besprechungsraum*

## Einzelbüro

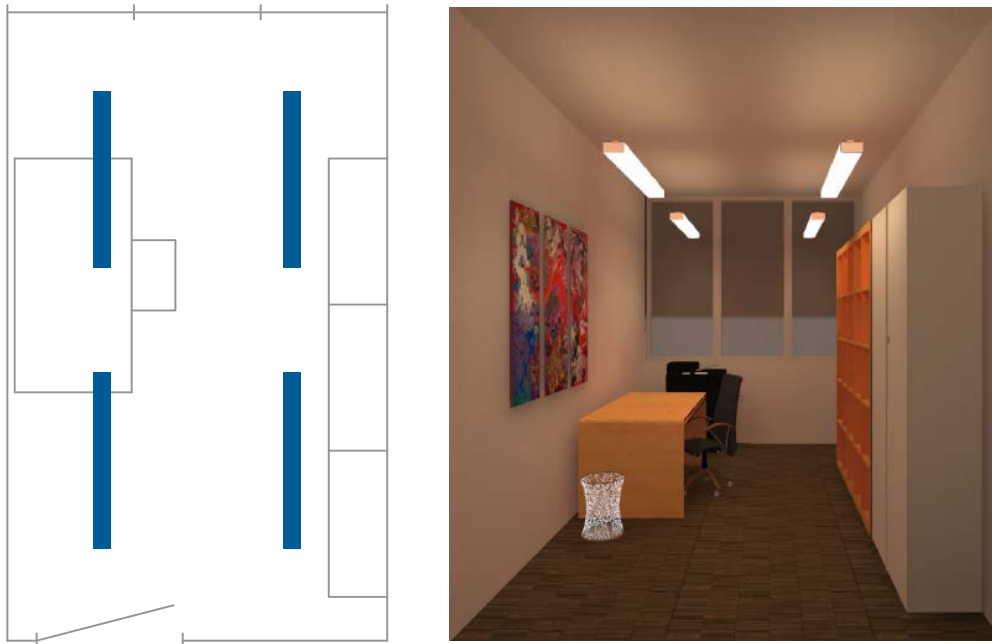


Abbildung 11 – Struktur der LED - Pendelleuchten im Einzelbüro

## Gruppenbüro

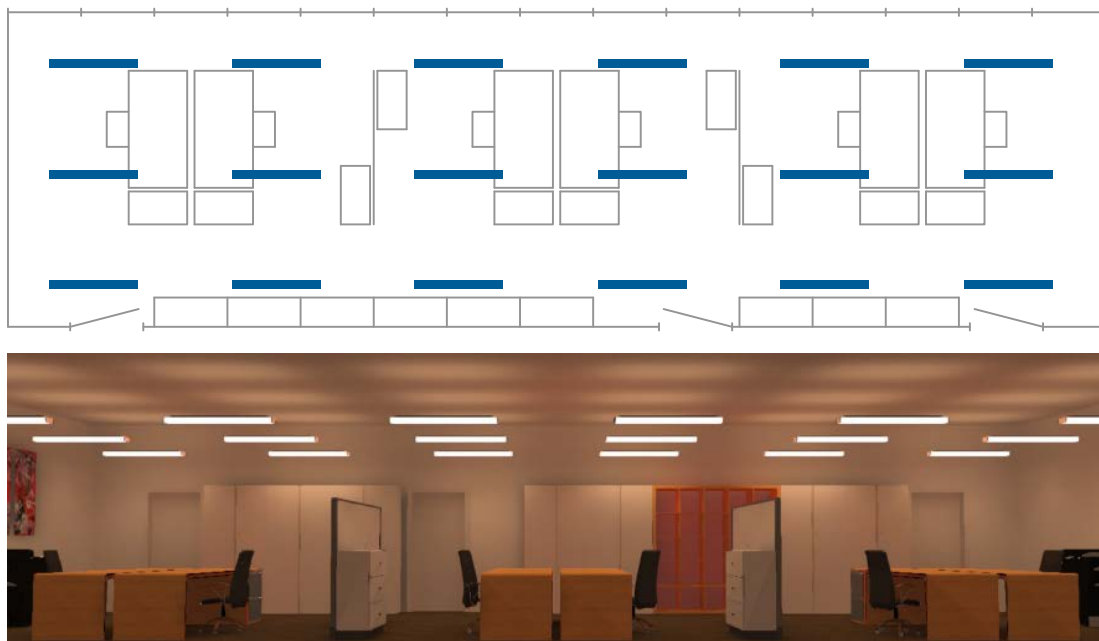
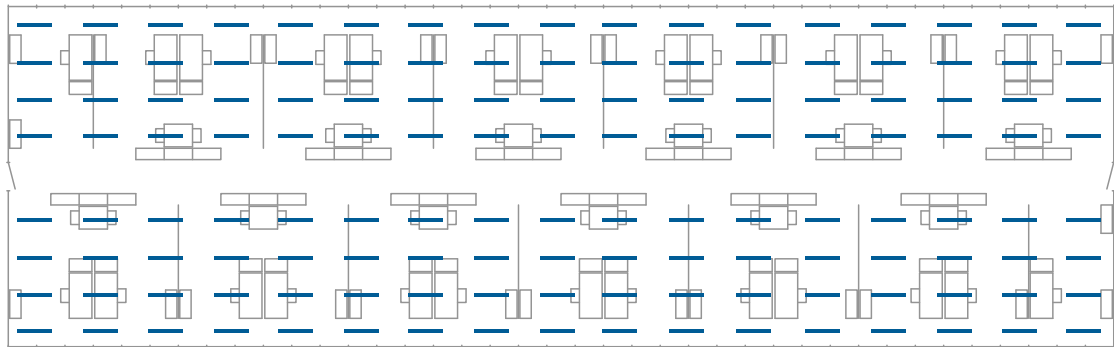


Abbildung 12 – Struktur der LED - Pendelleuchten im Gruppenbüro

## Großraumbüro



*Abbildung 13 – Struktur der LED - Pendelleuchten im Großraumbüro*

#### 4.4.4 Steuerungstechnik

Die Planung der Steuerungstechnik unterliegt großer Komplexität und kann nur vollständig von einem Elektroplaner geplant werden. Die zusätzlich anfallenden Kosten werden durch eine überschlägige Hochrechnung berücksichtigt.

Bei Verwendung eines Steuerungsmoduls kann dieses 50 Leuchten, in einer Aufteilung von maximal zwei Gruppen, gleichzeitig ansteuern. Das DIMLIGHT daylight - System von *Zumtobel* findet hier Anwendung.<sup>36</sup> Es dient als Basis und setzt die erhaltenen Steuerungsbefehle von Lichtsensor und Bewegungsmelder um. Zusätzlich zu jedem Steuerungsmodul wird ein Lichtsensor notwendig.<sup>37</sup> Dieser wird unmittelbar unter der Decke mit Ausrichtung zum Fenster montiert. Die Tageslichtdaten werden erfasst und an das Steuerungsmodul weitergeleitet. Gemeinsam bilden beide Teile eine Sensoreinheit und sind für eine Steuerung mit DALI geeignet. Preislich liegt das Steuerungsmodul bei 204,68 € und der Lichtsensor bei 102,34 €.

Im Weiteren werden Bewegungsmelder an der Decke montiert. Das gewählte Modell wird von *Theben* vertrieben. Es besitzt eine 360° Erfassung, ist für den Innenbereich geeignet und nimmt Bewegungen in einem Radius von 12,00 m wahr.<sup>38</sup>

*Tabelle 18 – Kenndaten - Steuerungstechnik*

DIMLIGHT daylight	Hersteller: Zumtobel Steuerungsmodul Ansteuerung von 50 Lampen 2 Gruppen 204,68 €
Lichtsensor	Hersteller: Zumtobel Tageslichtmessung 102,34 €
Bewegungsmelder	Hersteller: Theben 360° Erfassung Reichweite im Radius von 12,00 m 95,95 €

<sup>36</sup> Zumtobel GmbH 2014, 33-35.

<sup>37</sup> Zumtobel GmbH 2014, 16.

<sup>38</sup> Theben o. J., 1-3.

Für die Bürotypen ergeben sich aufgrund der Daten die in der Tabelle 19 aufgelisteten Stückzahlen der einzelnen Technikbauteile. So sind wegen der Grundfläche im Einzelbüro und Konferenzraum nur ein Steuerungsmodul und jeweils ein Bewegungs- und Lichtsensor notwendig. Das Gruppenbüro braucht zusätzlich noch einen Bewegungsmelder und das Großraumbüro wird mit 2 Steuerungseinheiten und 4 Bewegungsmeldern ausgestattet.

*Tabelle 19 – Anzahl Steuerungstechnikmodule*

	DIMLIGHT daylight	Lichtsensoren	Bewegungsmelder
Einzelbüro	1	1	1
Gruppenbüro	1	1	2
Großraumbüro	2	2	4
Konferenzraum	1	1	1

#### 4.5 Eingabegrundlage in DIALux

Die Tageslicht- und Beleuchtungsberechnung wird mit DIALux Evo 5 (Version: 5.5.0.24451) durchgeführt. Das Objekt wird erstellt, die Geländeausrichtung und der Wartungsfaktor eingegeben. In der Geländeausrichtung findet die geographische Zuordnung statt. Der Ort München wird durch den Längengrad 11,6° und den Breitengrad von 42,2° definiert. Die Nordausrichtung gibt die gewünschte Richtung der Fensterflächen nach Osten an (s. a. Tabelle 20). Der Raum wird anhand der in Abschnitt 4.1 festgelegten Daten, in das Programm eingepflegt.

Beim Wartungsfaktor wird folgende Überlegung zugrunde gelegt. Wie im Abschnitt 4.2 ermittelt, muss eine Mindestbeleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche von 500 Lux gewährleistet sein. Während der Lebenszeit jeder Lampe nimmt ihre Leuchtstärke stetig ab. Zusätzlich werden Leuchten, Wände und Decken durch äußere Einflüsse verschmutzt. Um die Beleuchtungsanlage über einen längeren Zeitraum ohne Wartung nutzen zu können, wird die Anlage mit einem höheren Neuwert ausgestattet. Für den Wartungsfaktor wird in einem Büro mit sauberer Umgebung ein Wert von 0,67 für LEDs und für Leuchten mit Leuchtstofflampen ein Wert von 0,80 angesetzt.

Das Beleuchtungssystem mit LED - Leuchten hat einen Neuwert von 750 Lux, die Leuchtstofflampen - Varianten einen Neuwert von 625 Lux.

*Tabelle 20 – Konstruktion*

Wartung	Leuchtstofflampen	0,80
	LEDs	0,67
Geländeausrichtung	Ort	München
	Längengrad	11,6°
	Breitengrad	48,2°
	Nordausrichtung	270,0°
	Zeitzone	UTC +01:00
Gebäude/ Möblierung	siehe Abschnitt 4.1 - Simulationsaufbau	
Materialien	siehe Abschnitt 4.2 - Anforderungen an die Sehaufgabe	



Nach dem Einarbeiten der Rahmenbedingungen des Gebäudes in DIALux, wird für jeden Raum eine Tageslichtberechnung durchgeführt. In den Konferenz- und Büroräumen sind die Leuchten von *Zumtobel* in verschiedenen Varianten installiert (vgl. Abschnitt 4.4.2). Die zugehörigen DIALux - Daten können in das Programm geladen werden.

Die Berechnung erfolgt stündlich im Zeitraum von 08.00 - 17.00 Uhr und für jede Jahreszeit. Das Datum legt der kalendarische Jahreszeitenanfang fest. Die Himmelsmodelle für Frühling und Sommer charakterisieren „klarer Himmel“ und für die Jahreszeiten Herbst und Winter „bedeckter Himmel“. Damit wird eine realitätsnahe Berechnung umgesetzt. In den Büroräumen ist die Sehaufgabe in einer Höhe von 0,750 m und in den Konferenzräumen auf 0,725 m positioniert (s. a. Tabelle 21).

*Tabelle 21 – Tageslichtdaten*

Leuchten/ Lampen	(s. a. Abschnitt 4.4.2)	
Lichtszene	Datum	21.03.2015 - Frühlingsanfang
		21.06.2015 - Sommeranfang
		21.09.2015 - Herbstanfang
		21.12.2015 - Winteranfang
	Himmelsmodell	Frühling - klarer Himmel
		Sommer - klarer Himmel
		Herbst - bedeckter Himmel
		Winter - bedeckter Himmel
	Uhrzeit	08.00 - 17.00 Uhr (stündlich)
Positionierung	Berechnungshöhe	0,750 m (Bürräume)
		0,725 m (Konferenzraum)

In der Berechnung werden ausschließlich horizontale Flächen und die Himmelsrichtung Osten ausgewertet. Des Weiteren ist zur Bewältigung der Rechenaufgabe die nicht relevante Möblierung entfernt worden. Möbelstücke die Einfluss auf die Berechnung (z.B. Schattenwurf) haben, sind im Raum verblieben.

# **Teil V**

# **Auswertung**

Die Auswertung umfasst eine ökologische, ökonomische und soziale Bewertung. Jeder Bereich ist in mehrere Aspekte unterteilt. Die betrachteten Varianten werden hinsichtlich dieser Schwerpunkte analysiert. Ein übersichtlicher Vergleich bietet die Darstellung der Ergebnisse in einem Spinnendiagramm. Dieses besitzt eine Skala von 1 (schlecht) bis 5 (sehr gut). Jeder Aspekt wird bezüglich dieser Skala untersucht und ein passender Zahlenwert vergeben.

## **5.1 Ökologische Bewertung**

### **5.1.1 Tageslichtnutzung**

Tageslicht erhöht nicht nur das Wohlbefinden der arbeitenden Personen, sondern steigert auch die Leistungsfähigkeit und die Produktivität. Infolgedessen ist es unvermeidbar, Tageslicht in die Planung miteinzubeziehen. Es besteht ein wesentlicher Einfluss auf den Energiebedarf, je größer der Tageslichtertrag, desto geringer der Kunstlichtanteil. Der Strombedarf wird reduziert und Kosten gesenkt. Ausschlaggebend für eine optimierte Tageslichtnutzung sind sowohl die Positionierung und Größe der Fenster, als auch die Art der Verglasung. Die maximale Fensterfläche ohne Verschattungssysteme (s. a. Abschnitt 4.1.5) der Konferenz- und Büroräume führt zu einer größtmöglichen Tageslichtausbeute. Als Ausgangssituation wird in jedem Raum das einfallende Licht im Tagesverlauf von 08.00 bis 17.00 Uhr berechnet. Jeder Jahreszeit wurde ein repräsentativer Tag zugeordnet und anschließend simuliert.

Konferenzraum (Abbildung 14) und Einzelbüro besitzen jeweils eine Sehaufgabe, wohingegen das Gruppenbüro in drei und das Großraumbüro in vierzehn Sehaufgaben aufgeteilt ist. Die Sehaufgaben eines Raumes, mit den geringsten Beleuchtungsstärken sind für die Auslegung der Beleuchtung maßgebend. In der Höhe der Arbeitsflächen (Schreibtische / Konferenztische) erfolgt die Berechnung. Im Konferenzraum, Einzel- und Gruppenbüro erfolgt die Ansteuerung der Leuchten gleichzeitig (eine Leuchtengruppe). Die Beleuchtungsanlage im Großraumbüro teilt sich in vier Leuchtengruppen. Die festgelegten Sehaufgaben und Leuchten der Büroräume sind im Anhang 18 - 20.

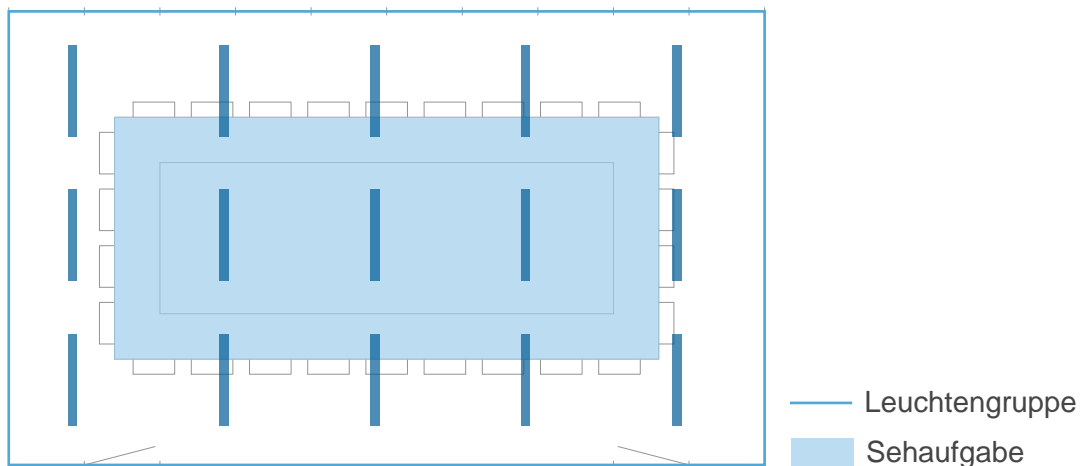


Abbildung 14 – Sehaufgabe und Leuchtengruppe im Konferenzraum

Die Anordnung in Blockform benötigt aufgrund ihrer Nutzung die höchsten Beleuchtungsstärken und ist daher maßgebend für die Berechnung der Sehaufgabe. Sie liefert eine Ergebnisspanne bestehend aus Minimal-, Maximal- und Durchschnittswerten des Tageslichts. Zur Auswertung werden die Minimalwerte herangezogen, um den maximal notwendigen Kunstlichtanteil zu bestimmen. Abbildung 15 stellt die Entwicklung während des Tages für jede Jahreszeit im Konferenzraum dar. Die Kurven dokumentieren zu welchem Zeitpunkt der einzuhaltende Beleuchtungswert von 500 Lux unterschritten wird.

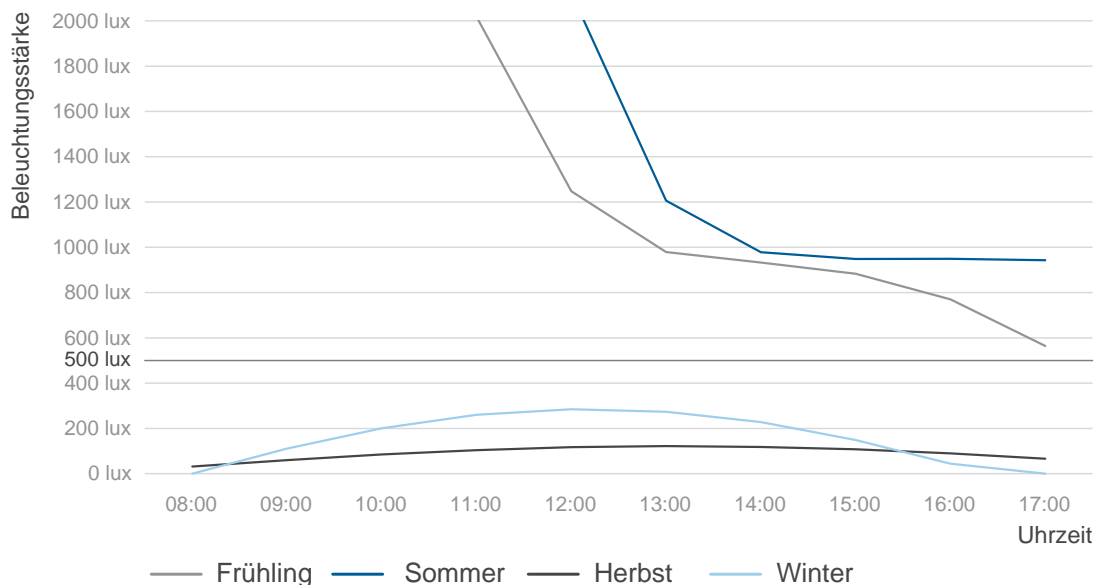


Abbildung 15 – Tageslichtverlauf Konferenzraum

Klar ersichtlich in diesem Diagramm ist, dass der Richtwert im Herbst und Winter ganztägig unterschritten wird. Im Frühling und Sommer besteht kein zusätzlicher Bedarf an künstlichem Licht. Aufgrund des ungehinderten Tageslichteinfalls sind auch Werte über 2.000 Lux festzustellen. Hier wäre eine Tageslichtoptimierung mittels Sonnenschutz notwendig. Diese ist nicht Teil der Bearbeitung.

Die Analyse der Daten zeigt den Zeitpunkt für die Zuschaltung von Kunstlicht. Die Tabelle 22 gibt die benötigten Betriebsstunden als Hochrechnung für jede Jahreszeit an. Alle Büroräume sind nach diesem Schema ausgewertet und übersichtlich in der Tabelle 22 zusammengefasst. Die zugehörigen Diagramme sind in Anlagen 21 - 23 zu finden.

*Tabelle 22 – Arbeitstage und Betriebsstunden der Beleuchtung*

<b>Beleuchtung</b>	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Gesamt
Arbeitstage [d]	63	66	65	65	259
<b>Einzelbüro</b> [h]	63	-	585	585	1233
<b>Gruppenbüro</b> [h]	-	-	585	585	1170
<b>Großraumbüro</b> [h]	-	-	585	585	1170
<b>Konferenzraum</b> [h]	-	-	585	585	1170

Für jeden Bürotyp ist die maximale Nutzung des Tageslichtes mit der größtmöglichen Fensterfläche umgesetzt worden. Ersichtlich ist, dass Räume mit kleineren Fenstern den Tageslichteinfall begrenzen. Weitläufige Räume mit langen Fensterfronten, bieten einen ungehinderten Lichteinfall. Das natürliche Licht kann besser genutzt werden. Ebenso ist ein höherer Lichteinfall im Winter als im Herbst zu verzeichnen. Dies lässt sich einfach auf den Sonneneinfallswinkel zurückführen. Im Winter steht die Sonne sehr tief, folglich wird weniger Licht von Raumgrenzen wie Wänden und Decken abgefangen.

## 5.1.2 Herstellung

Bei der Produktion wird ein geringer Anteil von etwa 7% des Gesamtenergieverbrauchs bezogen auf die gesamte Lebenszeit verwendet.<sup>39</sup> Die Herstellung des Leuchtenschirms ist komplett identisch, angesichts dessen ist ein aussagekräftiger Vergleich nur über die Lampen möglich.

Zunächst werden die eingesetzten Materialien genauer betrachtet. Bei der Fertigung der Leuchtstofflampen wird Quecksilberdampf als Füllmittel verwendet. Der giftige Dampf ist bis heute immer noch das beste und effizienteste Füllgas für Entladungslampen. Amalgam, eine Quecksilberverbindung, wird zusätzlich genutzt um die stark temperaturabhängigen Leuchtstofflampen zu kühlen und den Lichtstromrückgang der Lampe abzumildern. Der Vergleich einer Amalgam gefüllten T16 - Lampen mit 58 W und einer T26 - Lampe mit 60 W zeigt, dass sich der Temperaturkurvenverlauf prinzipiell nicht unterscheidet (Abbildung 16). Das Temperaturmaximum der T16 - Lampe mit Amalganfällung liegt bei 35°, im Vergleich dazu hat die T26 - Lampe ohne zusätzliche Füllung ein Maximum bei 20°. Die Amalgamfüllung ist in Bezug auf die Ökologie ein Nachteil, demgegenüber steht der Vorteil einen gleichmäßigen Lichtstrom bei höheren Temperaturen zu erzielen.

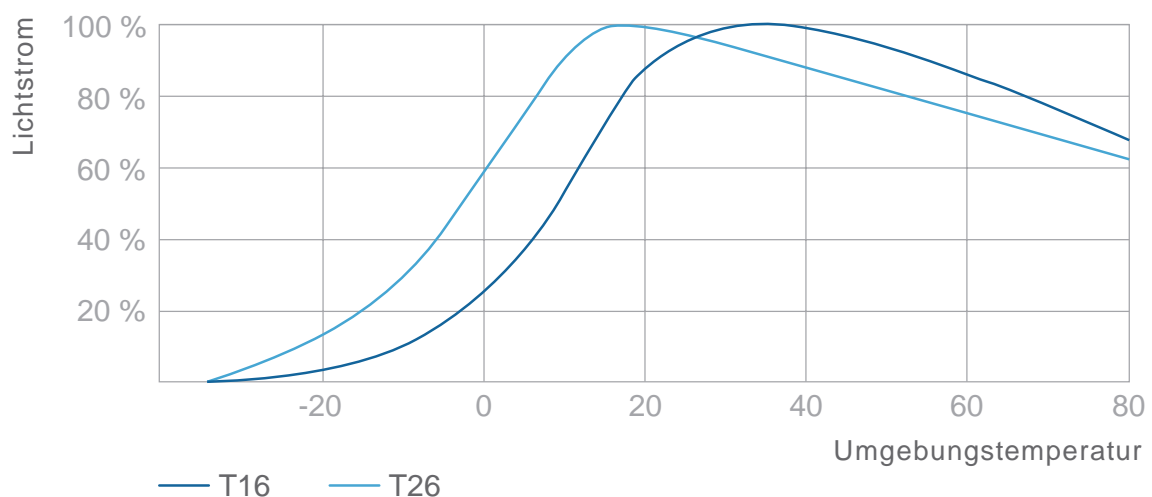


Abbildung 16 – Temperaturunterschied T16 / T26<sup>40</sup>

<sup>39</sup> licht.de 2014, 19.

<sup>40</sup> Zumtobel GmbH 2013, 7-10.

LEDs sind temperaturempfindlich und brauchen ein gutes Thermomanagement um den Rückgang des Lichtstroms im Laufe der Zeit zu verringern. Verwendung finden bei der Herstellung von LED - Chips und deren Kühlkörpern Aluminium und seltene Erden. Häufig sind Metalle wie Yttrium oder Europium in LED - Lampen enthalten. Die knappen Rohstoffe belasten durch die Entstehung von giftigen Schlämmen während ihres Abbaus die Umwelt.

Über den Anteil der Herstellungsenergie gibt es nur dürftige Angaben der Hersteller. Infolgedessen wird für die Analyse eine Studie von *OSRAM* als Wertungsgrundlage herangezogen. Die Studie zum Thema Lebenszyklusanalyse (*Life Cycle Assessment of Illuminants - A Comparison of Light Bulbs, Compact Fluorescent Lamps and LED Lamps*) vergleicht eine 8 W LED mit einer Lebensdauer von 25.000 h mit einer 8 W Kompaktleuchtstofflampe (10.000 h). LEDs in der heutigen Zeit verbrauchen 9,90 kWh Herstellungsenergie, Kompaktleuchtstofflampen hingegen weniger als die Hälfte (4,08 kWh). Die Berechnung inkludiert die Transport- sowie Verpackungsenergie. <sup>41</sup>

Die Herstellungsenergie der LED in Bezug auf die Lebenszeit der Kompaktleuchtstofflampe legt dar, dass die LED nur 3,96 kWh für 10.000 h verbraucht. Auch in Bezug auf den Lichtstrom sind die beiden Lampentypen in etwa auf gleichem Niveau. Die LED schneidet in der Energiebilanz aufgrund ihrer höheren Lebenserwartung knapp besser ab als die Entladungslampe.

---

<sup>41</sup> OSRAM Semiconductors 2009, 13-17.

### 5.1.3 Nutzung

Der Nutzungszeitraum wird mit 90% der Gesamtenergiebilanz angesetzt. Die Nutzungsenergie wird in der ökologischen Bewertung nur peripher betrachtet, aussagekräftige Resultate finden sich in der ökonomischen Bewertung 5.2.1. Bei der Nutzung hat die Lebensdauer in verschiedener Hinsicht eine große Bedeutung. Plausibel ist, dass Produkte mit höherer Lebensdauer weniger Ressourcen in Anspruch nehmen, weniger Transportkosten verursachen und weniger Abfall bei der Entsorgung produzieren. Eine lange Lebensdauer um jeden Preis ist dennoch nicht erstrebenswert, wenn sich dadurch die Effizienz der Produkte verschlechtert und folglich finanzielle Nachteile für den Verbraucher entstehen.

Die Lichtausbeute beschreibt die Effizienz der Leuchte und zeigt wie viel Lumen pro verbrauchter Leistung [Watt] abgegeben wird. Die ECOOS - Leuchten mit Leuchtstofflampen erzeugen eine Lichtausbeute von 67,1 lm/W. Die Lichtausbeute von LED - Chips stieg in den letzten Jahren rasant von ca. 52,0 lm/W auf über 120,0 lm/W. Die in den Berechnungen verwendete LED - Leuchte hat eine Lichtausbeute von 95,9 lm/W und besitzt somit einen um 42% höheren Wert als die Entladungslampe.

Die Lampentypen stehen unter dem Einfluss mehrerer Faktoren, die die Lebensdauer und den Lichtstrom beeinflussen. Jede Lampe unterliegt während der Betriebszeit einer Degeneration des Lichtstroms. T16 - Lampen haben anfänglich einen stärkeren Lichtstromrückgang und bleiben nach etwa 15.000 h auf einem konstanten Level bis zum Nutzungsende (20.000 h). Zu Beginn degeneriert die LED langsamer, nach einer Nutzungsdauer von 20.000 h ist immer noch ein Lichtstrom von 90% vorhanden. Die Degeneration setzt sich weiter fort, bis die Leuchte bei etwa 50.000 h nur noch einen Lichtstrom von 70% aufweist und ausgewechselt werden muss (vgl. Abbildung 17).

Entladungslampen und LEDs sind temperaturempfindlich. Steigende Temperaturen beschleunigen den Lichtstromrückgang und können Farbverschiebungen hervorrufen. Daraus resultiert dass Leuchten in kühleren Umgebungen effizienter arbeiten. Feuchtigkeit kann ebenfalls zu einem früheren Ausfall der Leuchte führen, da lediglich der LED - Chip und die Leuchtstofflampe in sich komplett abgeschlossen sind. Die elektronischen Anbauteile und metallischen Verbindungen sind feuchtigkeitsempfindlich. Ein besonderes Augenmerk muss auch auf die Reinigung gelegt werden. Die Verwendung von „scharfen“ Chemikalien kann den Leuchtkörper oder die elektronischen Bauteile wie den LED - Chip beschädigen. Die Sicherstellung eines ausreichenden Schutzes gegen Feuchtigkeit ist dann nicht mehr gewährleistet.



#### 5.1.4 **Wartung**

Der Lichtstrom der Leuchten reduziert sich während seiner Lebensdauer. Mögliche Ursachen sind Verschmutzung des Raumes und Alterung der Lichtquelle. Diese Problematik wird während der Planung über den Wartungsfaktor berücksichtigt. Der Wartungsfaktor gewährleistet, dass die vorgegebene Mindestbeleuchtungsstärke von 500 Lux in den Konferenz- und Büroräumen zu jeder Zeit gegeben ist. Eine Verschlechterung des Lichtstroms kann durch Lampenreinigung reduziert werden, das Austauschintervall vergrößert sich.

Verschiedene Wartungsfaktoren müssen für Anlagen mit LED - Leuchten oder Leuchten mit Leuchtstofflampen angesetzt werden. Der Wartungsfaktor (MF) hat großen Einfluss auf die Nutzungsdauer der Lampen und kann mithilfe der folgenden Formel ermittelt werden:

$$MF = LLMF \times LSF \times LMF \times RSMF$$

- MF = Wartungsfaktor (Maintenance Factor)
- LLMF = Lampenlichtstromrückgang (Lamp Lumence Maintain Factor)
- LSF = Lebensdauer (Light Survival Factor)
- LMF = Verschmutzung der Leuchte (Luminaire Maintenance Factor)
- RSMF = Verschmutzung im Raum (Room Surface Maintenance Factor)

Das Vorgehen zur Berechnung des Wartungsfaktors ist zudem im *Leitfaden zur Wartung von elektrischen Beleuchtungsanlagen im Innenraum (CIE97)* identisch.<sup>42</sup> Der Lampenlichtstromrückgang beschreibt die Reduzierung des Lichtstroms durch Alterung. Bei der Leuchte mit LEDs kann dieser nicht so einfach bestimmt werden. Lampe und Leuchte bilden eine Einheit. Die Bauart und Leuchtmittel sind ausschlaggebend für die Stärke des Rückgangs des Lampenlichtstroms. Lampen mit einer besseren Verarbeitung halten in der Regel länger.

In Abbildung 17 erkennbar ist der Lampenlichtstromrückgang einer Leuchtstofflampe mit einer Lebensdauer von 20.000 h im Vergleich zu einer LED - Leuchte mit einer Lebensdauer von 50.000 h. Die Abhängigkeit der Nutzungsdauer vom Wartungsfaktor wird damit deutlich. Die LED - Leuchte hat einen spezifischen LLMF von 0,70 - 0,75. Für die Berechnung wird ein Wert von 0,75 angenommen. T16 - Lampen sind mit einem LLMF von 0,90 typisiert.

---

<sup>42</sup> ETAP Beleuchtung 2013, 19.

Der LSF beschreibt die durchschnittliche Funktionszeit einer Lampe. Defekte Leuchtstofflampen werden unverzüglich ausgetauscht, um eine durchgängige Funktionstüchtigkeit der Beleuchtungsanlage zu gewährleisten (LSF = 1). Leuchten mit LED - Chips haben ebenfalls einen LSF von 1, wenn die Fehlerrate der Chips während der Nutzungsdauer unter 0,5% liegt.

Des Weiteren gibt es zwei Kenngrößen zur Verschmutzung: Zum einen die Verschmutzung der Leuchte, zum anderen die Verschmutzung im Raum. Für die Verschmutzung der Leuchten ist ein Reinigungsintervall von 3 Jahren festgelegt, dadurch ergibt sich ein LMF von 0,95. In Büros und Konferenzräumen wird hauptsächlich Schreibtischarbeit verrichtet und Seminare abgehalten. In beiden Fällen ist nicht von starker Verschmutzung auszugehen. Die Raumverschmutzung hat Auswirkungen auf Reflexionsgrade im Raum und wird auf 0,94 gesetzt. Der Grad der Verschmutzung der Leuchte und des Raumes stimmen von Leuchtstofflampen und LEDs überein.<sup>43</sup>

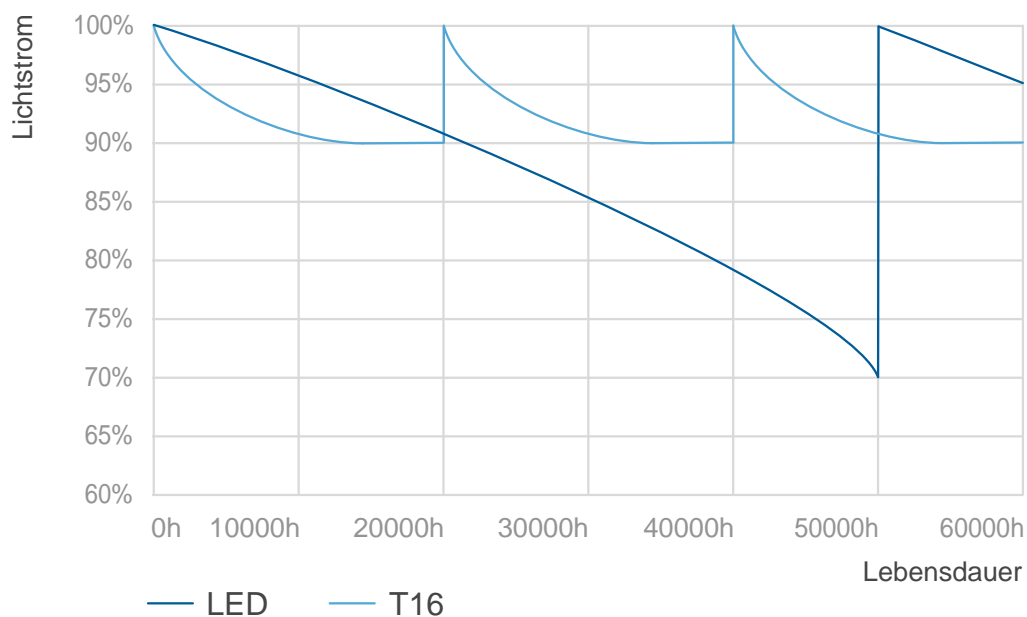


Abbildung 17 – Lichtstromrückgang der LEDs und T16 - Lampen<sup>44</sup>

<sup>43</sup> Zumtobel GmbH 2013, 7-10.

<sup>44</sup> ETAP Beleuchtung 2013, 19.

Es ergeben sich Wartungsfaktoren von rund 0,67 für alle Räume, die mit LEDs ausgestattet sind. Dieser Faktor deckt sich mit der *DIN EN 12464-1*. Für Räume mit T16 - Leuchten ergibt sich ein Wartungsfaktor von rund 0,80. Damit die Anlage über einen längeren Zeitraum ohne Wartung auskommt, benötigt man einen höheren Neuwert. Dieser Wert errechnet sich aus dem Quotient von Wertungswert zu Wartungsfaktor. Der Wertungswert beschreibt dabei die Mindestbeleuchtungsstärke nach DIN (in unserem Fall 500 Lux), dabei ist eine Unterschreitung unzulässig. Das LED - System wird mit einem Neuwert von 750 Lux und die Anlage mit den Leuchtstofflampen mit einem Neuwert von 625 Lux geplant. <sup>45</sup>

Durch den niedrigeren Wartungsfaktor der LED ist erkennbar, dass diese seltener ausgetauscht werden muss. Die geringere Beleuchtungsstärke der Beleuchtungsanlage für Leuchten mit Leuchtstofflampen hat zudem Auswirkungen auf die Anzahl der Leuchten.

---

<sup>45</sup> Vgl. ERCO o.J., <http://www.erco.com/guide/simulation-and-calculation/maintenance-factor-2713/de/content-1.php>, Stand: 23.08.2015.

### 5.1.5 Recycling

Etwa 80% aller Altgeräte sind Lampen. Trotzdem nehmen sie nur 1% des gesamten Elektroschrottes ein. Wichtig beim Recycling ist, wertvolle Rohstoffe aus den Altlasten der Leuchtmittel zu gewinnen. Abbildung 18 zeigt welche Bestandteile wiederverwendet werden können. Laut *WEEE* Richtlinie gehören diese Produkte nicht in den Hausmüll oder in den Glascontainer, sondern gehören gesondert gesammelt, entsorgt und recycelt. <sup>46</sup> Leuchtstoff- und Kompaktleuchtstofflampen enthalten neben Inhaltsstoffen, die wiederverwertet werden können, auch geringe Mengen an Quecksilber. LED - Lampen enthalten kein Quecksilber, dennoch ist aufgrund der giftigen Stoffe in den elektrischen Bauteilen eine spezielle Entsorgung notwendig. Die enthaltenen seltenen Erden in den LED - Lampen müssen dem Rohstoffkreislauf wieder zugeführt werden.<sup>47</sup>

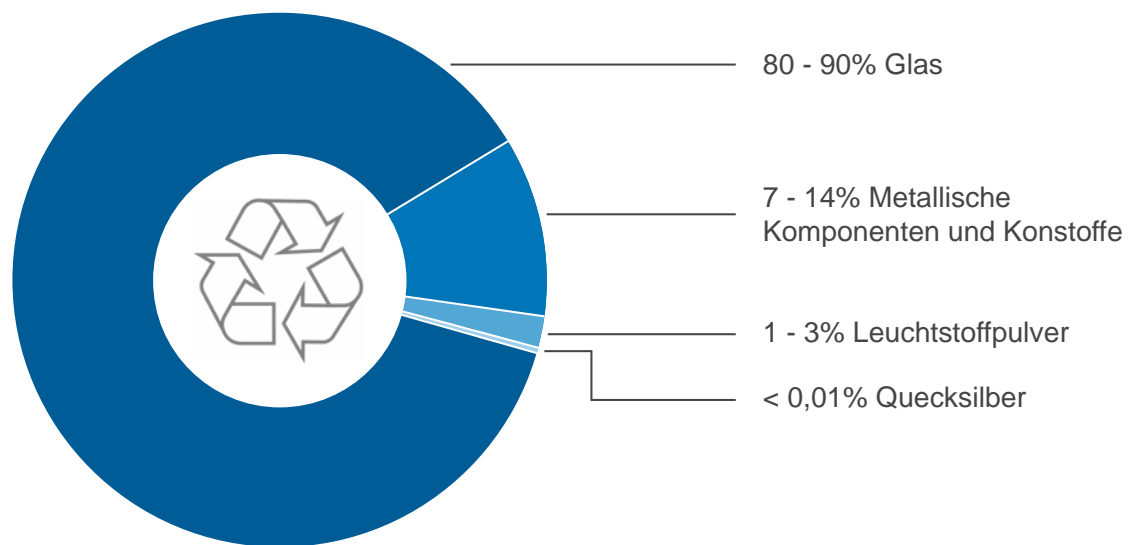


Abbildung 18 – Verwertbare Bestandteile von Altlampen <sup>48</sup>

Verschiedene Recyclingverfahren stehen für LED- und Entladungslampen zur Verfügung. Das Hauptziel beim Wiederverwerten der Altlampen besteht in der sauberen Trennung in ihre Bestandteile, die zur Herstellung neuer Produkte dienen. Früher wurde das Quecksilber aus den Leuchtstofflampen fachgerecht entsorgt.

<sup>46</sup> Vgl. Europäische Union 2012, 5-6

<sup>47</sup> Vgl. Lightcycle o.J., <http://www.lightcycle.de/ruecknehmer/rechtliche-grundlagen.html>, Stand: 14.08.2015.

<sup>48</sup> Lightcycle o.J., <http://www.lightcycle.de/ruecknehmer/altlampen-recycling.html>, Stand: 07.08.2015.

Mittlerweile wird mittels Destillation fast das gesamte Quecksilber aus dem Leuchtstoff extrahiert. Die industrielle Wiederverwertung des Quecksilbers ist durch die Destillation realisierbar. Das Recycling ermöglicht eine Rohstoffrückführung von über 90%.

Die folgenden zwei Verfahren verwerten alle Lampenformen:

Das Glasbruchwaschverfahren, kann nicht nur ganze sondern auch gebrochene Lampen verarbeiten. Das Glas wird zerkleinert und alle Metallteile durch Magnete herausgefiltert. Ein Vibrobecken trennt Quecksilber und Leuchtstoff anschließend vom Glas. Durch die Destillation ist es möglich bis zu 99,9% reines Quecksilber zu erhalten. Alle Bestandteile stehen der industriellen Wiederverwertung zur Verfügung.

Das Shredderverfahren recycelt in drei Schritten. Nach Zerkleinerung der Lampen erfolgt eine Aufteilung der Bruchstücke in drei Gruppen verschiedener Größen. Die metallischen Teile werden weiter verwertet, die Glasscherben zu minderwertigen Glasprodukten verarbeitet und das Quecksilber durch Destillation zurückgewonnen.

Das Zentrifugal-Separationsverfahren arbeitet nur Kompaktleuchtstoff- und Energiesparlampen auf. Die Zentrifuge trennt die Lampen zunächst in Glas und Metall bzw. Kunststoff. Das Leuchtmittel wird bei der Trennung abgesaugt und über Filteranlagen abgesondert. Die Rückgewinnung des Quecksilbers geschieht durch Erhitzen von Glas und Sockel. Die thermische Behandlung ermöglicht es durch die Reinigungswirkung die Glasteile wieder in die Produktion neuer Lampen gläser aufzunehmen. Metall- und Kunststoffteile werden zerstückelt und die Metallpartikel mit einem Magneten herausgefiltert.

Für die Wiederaufbereitung von stabförmigen Lampen (Leuchtstofflampen) findet vorwiegend das Kapp-Trenn-Verfahren Anwendung. Die metallischen Enden der Leuchtstofflampen werden abgetrennt und in seine Bestandteile zerlegt. Es erfolgt eine Absaugung, Sammlung und industrielle Aufbereitung des giftigen Quecksilbers im Leuchtstoff. Der Glaskolben wird wie bei allen Verfahren zerkleinert, gesäubert und wieder für die Herstellung neuer Lampen genutzt.<sup>49</sup>

---

<sup>49</sup> Vgl. Lightcycle o.J., <http://www.lightcycle.de/ruecknehmer/altlampen-recycling.html>, Stand: 14.08.2015.

### 5.1.6 Zusammenfassende Bewertung

Bei der Bewertung der drei Beleuchtungsvarianten kann aus ökologischer Sicht nicht zwischen Anbau- und Pendelleuchten unterschieden werden. Die Vergleichbarkeit wird auf einer Skala von 1 (schlecht) bis 5 (sehr gut) gewährleistet.

Das Tageslicht tangiert den Vergleich in Bezug auf die Beleuchtungsvarianten Standard, Eco und Eco Plus nicht. Der Kunstlichtanteil reduziert sich in Abhängigkeit der Beleuchtungsvariante. Maximale Fensterflächen führen zu einem größtmöglichen Lichteinfall in jedem Simulationsraum und sind daher alle mit 5 zu bewerten.

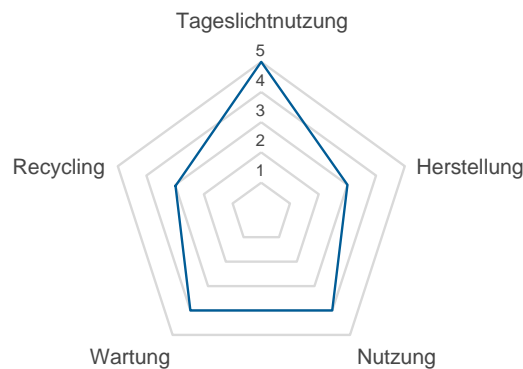


Abbildung 19 – Standard - Anbau- und Pendelleuchten

Während der Herstellung werden in beiden Leuchten umweltschädliche Stoffe verwendet, Europium und Yttrium in LEDs und Quecksilber in Leuchtstofflampen. LEDs halten mit 50.000 h 2,5 mal so lange wie Entladungslampen (20.000 h) und verbrauchen bei der Herstellung 3,96 kWh pro 20.000 h. Leuchtstofflampen mit den gleichen Betriebsstunden benötigen 4,08 kWh. 3 Punkte erhält die Standard - Variante, 4 Punkte die Eco Plus - Variante (zusätzliche Herstellungsenergie der Steuerungstechnik) und 5 Punkte die Eco - Variante.

LEDs erzeugen im Vergleich zu Leuchtstofflampen mit geringerer Leistung eine höhere Lichtausbeute. In der Nutzung wird für die Standard - Variante 4 Punkte und die Ausführungen mit LEDs (Eco und Eco Plus) jeweils 5 Punkte vergeben.

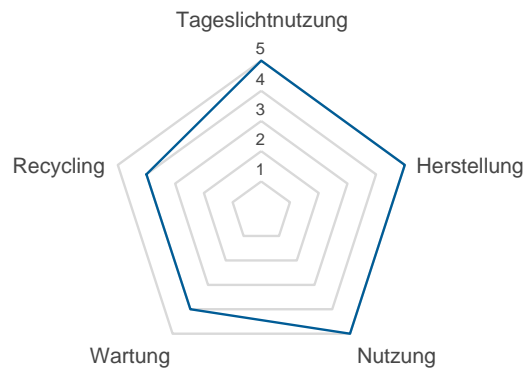


Abbildung 20 – Eco - Anbau- und Pendelleuchten

Infolge eines höheren Wartungsfaktors benötigen die T16 - Beleuchtungsvarianten weniger Leuchten und sind mit 4 Punkten zu bewerten. Analog wird für die Eco - Variante die gleiche Punktzahl vergeben. Der niedrige Wartungsfaktor sorgt einerseits für ein höhere Anfangsbeleuchtungstärke und andererseits für ein längeres Austauschintervall. Effizientere Ressourcennutzung durch Steuerungstechnik bringt der Eco Plus - Variante volle Punktzahl.

Beide Lampentypen enthalten Giftstoffe, demzufolge wird keine volle Punktzahl vergeben. Seltene Erden können im Vergleich zu Quecksilber vollständig recycelt werden. Die Beleuchtungsanlage mit Leuchtstofflampen bekommt 3 Punkte, alle anderen Varianten mit LEDs 4 Punkte.

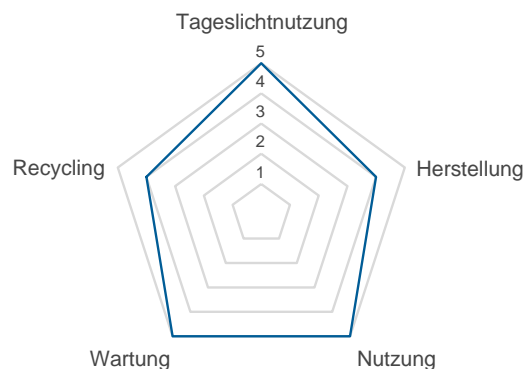


Abbildung 21 – Eco Plus - Anbau- und Pendelleuchten

## 5.2 Ökonomische Bewertung

### 5.2.1 Energieverbrauch

Die Nachhaltigkeit einer Beleuchtungsanlage wird unter anderem maßgeblich von seinem Energieverbrauch bestimmt. Durch neue Technologien sind große Einsparpotenziale in diesem Segment möglich. Zur Ermittlung des Energieverbrauchs, werden die Tage bzw. Stunden herangezogen, welche bereits im Abschnitt 5.1.1 eruiert wurden (s. a. Tabelle 22). Für den Frühling werden im Einzelbüro 63 h, im Sommer keine und für Herbst und Winter jeweils 585 Betriebsstunden angesetzt. Im Gruppen-, Großraumbüro und Konferenzraum wird im Frühling und Sommer kein künstliches Licht benötigt, um den Richtwert von 500 Lux zu erreichen. Für Herbst und Winter werden jeweils 585 h veranschlagt.

Die Vorgehensweise zur Ermittlung des Energiebedarfs für die Varianten Standard und Eco sind identisch. Die Beleuchtungsanlage ohne Steuerungstechnik arbeitet bei zusätzlichem Lichtbedarf mit maximaler Leistung. Der verursachte Verbrauch lässt sich über folgende Formel berechnen.

$$\text{Anzahl Leuchten} \times \text{Leistung [kW]} \times \text{Betriebsstunden pro Jahr [h/a]} = \text{Verbrauch [kWh/a]}$$

Die eingesetzten Leuchten in jedem Raum werden mit der Leistung der Leuchte und den ermittelten Betriebsstunden multipliziert. Als Ergebnis ergibt sich daraus der Energieverbrauch in kWh pro Jahr für jeden Bürotyp. Für die weiteren Untersuchungen werden Grafiken und Tabellen des Konferenzraumes (Pendelleuchten, LED) als Referenz zur Erläuterung angegeben.

Das Zuschalten des künstlichen Lichts bei der Eco Plus - Variante erfolgt nach Abfragen einer Lichtmessung automatisch. Melden Sensoren das Unterschreiten des Mindestwerts von 500 Lux, werden Leuchten prozentual zugeschalten. Berücksichtigung findet der Energieverbrauch der Leuchten, welcher nicht linear zur eingestellten Lichtmenge abnimmt. Das Diagramm 22 zeigt das Verhältnis der eingesetzten Leistung zur produzierten Lichtmenge. Die Darstellung gibt den Verlauf für LED, Leuchstoff- und Glühlampe an. Zum Vergleich ist eine linear verlaufende Kurve, die ideale Dimmkurve, abgebildet. Die Grafen zeigen deutlich, wie



hoch der Energieverbrauch bei einer starken Dimmung der Leuchte ist. Dimmt man eine Leuchte um 50% benötigt eine Glühlampe noch etwa 76% seiner Leistung. Leuchtstofflampen brauchen dagegen noch 60% und LEDs noch 53%. Bei der Gegenüberstellung stellt sich heraus, dass sich LEDs am ehesten einem linearen Verlauf annähern.

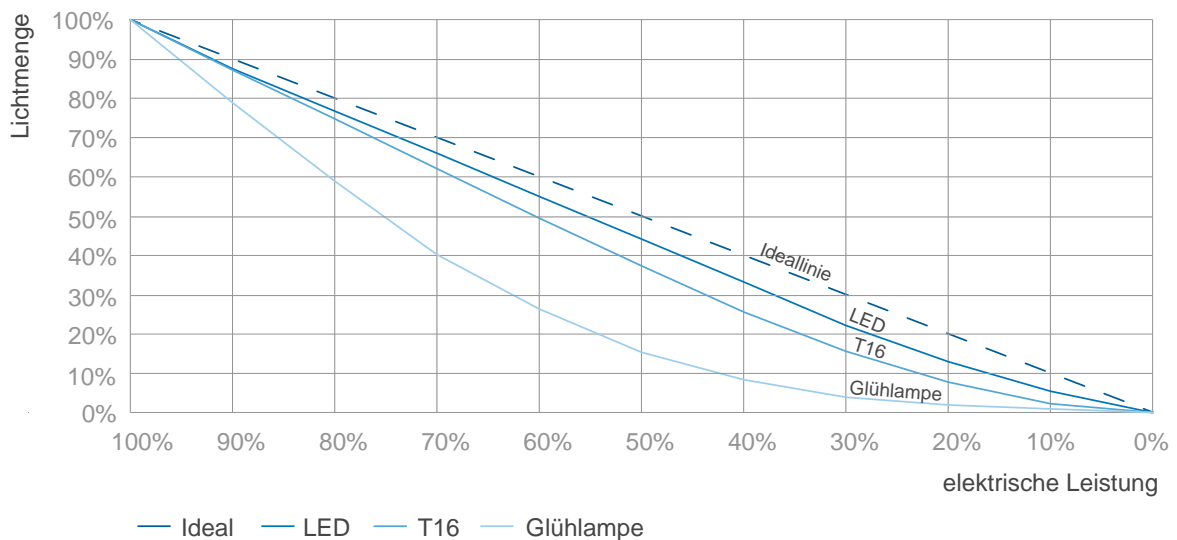


Abbildung 22 – Diagramm Verhältnis von elektrischer Leistung zur Lichtmenge<sup>50</sup>

Der errechnete Energiebedarf bezieht sich nur auf den tatsächlichen Verbrauch der Leuchten. Der benötigte Strom für die Steuerungstechnik (auch im Standby - Betrieb) ist verschwindend gering und somit zu vernachlässigen.

Zur Bestimmung der Leistung wird zunächst anhand der Tageslichtmessung (vgl. Abbildung 15) die Höhe des Defizits zur Mindestbeleuchtungsstärke eruiert (Tabelle 23 - Minimalwert). Daraus ergibt sich der Kunstlichtanteil jeder Stunde. Der Wert zu Beginn einer jeden vollen Stunde, dient als Referenzwert bis zur nächsten vollen Stunde. In der Realität würde die Steuerung nach einem geringeren Intervall die Lichtmenge anpassen. Die Differenz der Mindestbeleuchtungsstärke von 500 Lux zu den Minimalwerten sind in der Tabelle 23 im Reiter „Zuschalten“ angegeben.

Im Weiteren wird die Dimmkurve einer Pendelleuchte mit LEDs (vgl. Abbildung 23) mittels DIAlux erfasst. Der Graf gibt den Mittelwert der Beleuchtungsstärke auf der definierten Sehaufgabe an, wenn die Leuchte zu einem bestimmten Prozentsatz angeschalten ist.

<sup>50</sup> Oesterreichische Energieagentur - Austrian Energy Agency o.J., 42.

Abbildung 23 gibt anhand der Zuschaltwerte den zugehörigen prozentualen Lichtstrom an. Dem Lichtstrom, wird in der Abbildung 22 die passende elektrische Leistung in Prozent zugewiesen (Tabelle 23 - Leistung [%]).

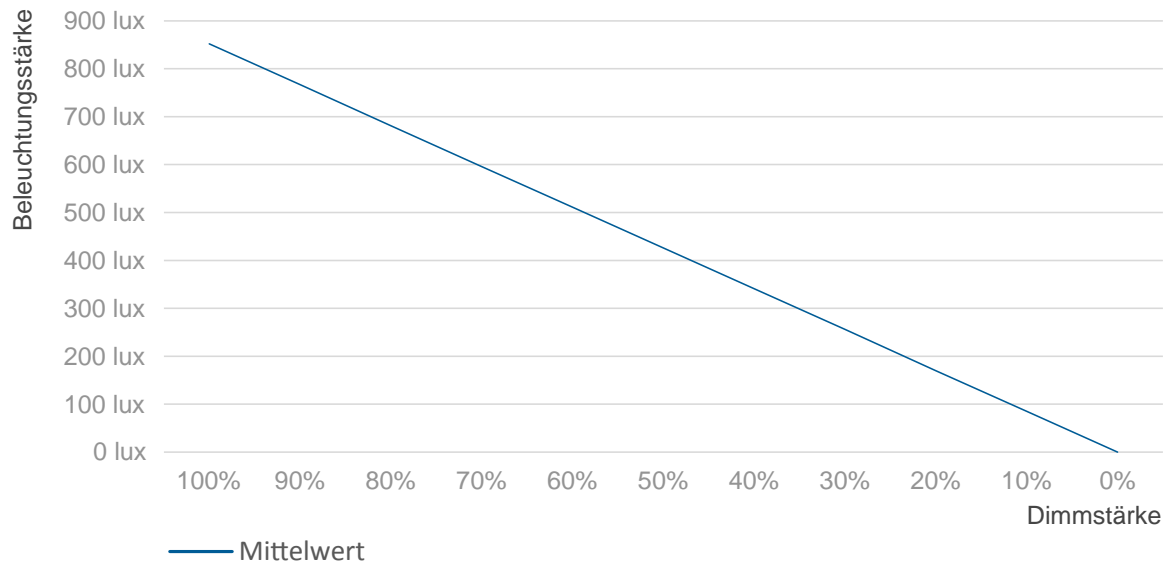


Abbildung 23 – Dimmkurve der LED - Pendelleuchten

Tabelle 23 – Errechnung der Leistung im Herbst - Tagesverlauf

Uhrzeit	Minimum [Lux] [Lux]	Zuschalten [Lux] [Lux]	Lichtstrom [%] [%]	Leistung [%] [%]	Leistung [W] [W]
08:00	32	468	55 %	62 %	390,60
09:00	60	440	52 %	58 %	365,40
10:00	85	415	49 %	56 %	352,80
11:00	104	396	46 %	54 %	340,20
12:00	117	383	45 %	52 %	327,60
13:00	122	378	44 %	51 %	321,30
14:00	118	382	45 %	52 %	327,60
15:00	108	392	46 %	52 %	324,60
16:00	90	410	48 %	55 %	346,50

Eine Einheit von 15 LED - Pendelleuchten mit je 42,0 W, ergeben eine Gesamtleistung von 756,0 W. Die tatsächlich benötigte Leistung in Watt, wird in Tabelle 23 dargestellt.

In Tabelle 23 ist der Leistungsbedarf im Tagesverlauf für den repräsentativen Tag im Herbst errechnet. Zur Ermittlung des Jahresbedarfes wird der spezifische Tagesbedarf einer jeden Jahreszeit hochgerechnet und im Gesamten addiert. Daraus ergibt sich für ein Jahr ein Energieverbrauch des Systems mit LED - Pendelleuchten von 416,22 kWh/a (s. a. Tabelle 24).

*Tabelle 24 – Gesamtleistung pro Jahr*

Jahreszeit	Betriebstage	Leistung pro Jahreszeit
Frühling	0 Tage	0,00 kWh
Sommer	0 Tage	0,00 kWh
Herbst	65 Tage	226,54 kWh
Winter	65 Tage	189,68 kWh
Gesamtleistung pro Jahr		416,22 kWh/a

Abbildung 24 zeigt exemplarisch den Konferenzraum. Die Anlagen 24 - 26 geben die Ergebnisse der Büroräume wieder. In der Gegenüberstellung verbraucht das Beleuchtungssystem mit Pendelleuchten im Gegensatz zum System mit Anbauleuchten weniger Energie. Dies liegt an der unterschiedlichen Anzahl der eingesetzten Leuchten. Zum einen trifft eine höhere Beleuchtungsstärke aufgrund der Abhanghöhe auf die Sehaufgabe auf. Zum anderen verteilen die Leuchten ihr Licht in Form eines Kegels im Raum. Mit steigender Entfernung wird die zu beleuchtende Kreisfläche größer. Aus diesen Gründen kommt die Pendelleuchte mit einem geringeren Lichtstrom aus, um die geforderten 500 Lux auf der Sehaufgabe zu erreichen. Im Schnitt sind bei der Verwendung von Pendelleuchten weniger Leuchten benötigt worden als bei einem System mit Anbauleuchten.

Unter Einbezug des Leuchtmittels ist klar ersichtlich, dass LEDs einen geringeren Verbrauch als Leuchtstofflampen aufweisen. Systeme mit LED - Lampen sind auf 750 Lux ausgelegt, Systeme mit Leuchtstofflampen auf 625 Lux, deshalb sind mehrere Leuchten bei den LED - Varianten notwendig (s. a. Tabelle 17). LED - Leuchten erzeugen mit einer geringeren Leistung höhere Lichtausbeuten als Leuchtstofflampen und benötigen in der Gesamtbilanz trotz höherer Leuchtenanzahl weniger Energie.

Die Verwendung von Steuerungstechnik findet Berücksichtigung in der Eco Plus - Variante. Das hinterlegte Intervall justiert anhand einer Lichtmessung jede Stunde die Zuschaltung des Kunstlichts. Die Einsparungen jeder Variante im Vergleich zur Standard - Variante ohne moderner Technik beträgt im Konferenzraum bis zu 61%. Unnötige Spitzenleistungen werden durch bedarfsgerechte Regulierung der Leuchten vermieden. Größere Einsparpotenziale sind bei den Konzepten mit LEDs vorhanden. Die Leuchtstofflampe benötigt bei gleichem Dimmwert mehr Energie als eine LED (vgl. Abbildung 22). Die Einsparungen werden durch Verkleinerung des Justierintervalls nochmals erhöht. Die Gesamtauswertung aller Büroräume und des Konferenzraums zeigen, dass die Eco Plus - Variante als Ausführung mit LED - Pendelleuchten den geringsten Energieverbrauch erzielt. Die Gesamtauswertung und die dafür benötigten Dimmkurven sind in der Anlage 24 - 26 und in Anlage 27 - 41.

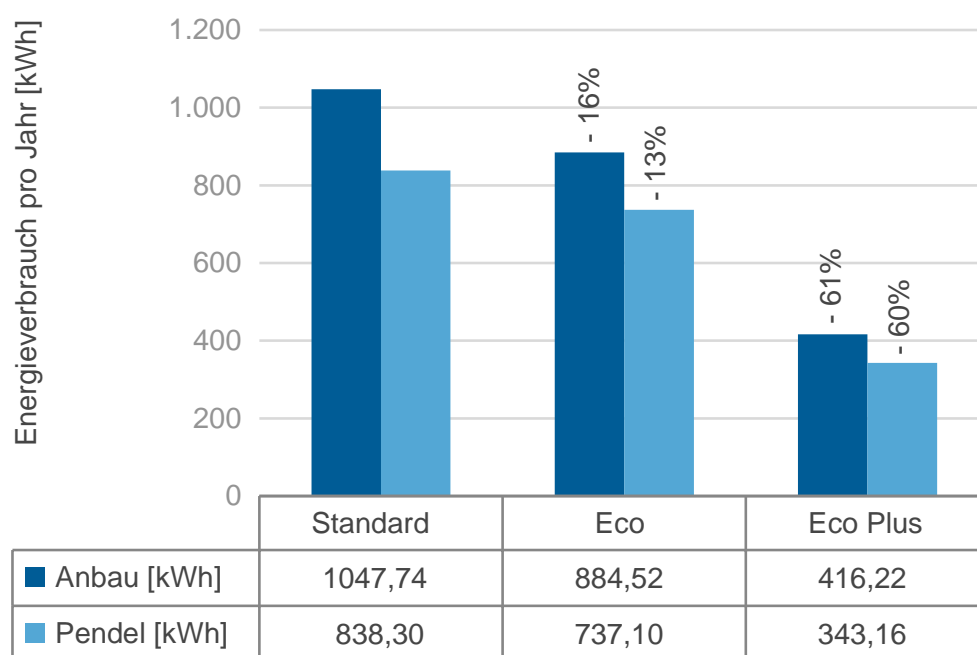


Abbildung 24 – Energieverbrauch pro Jahr im Konferenzraum

## 5.2.2 Systemkosten

In der Kostenkalkulation der Beleuchtung spielen mehrere Faktoren eine Rolle. Die jährlichen Gesamtkosten errechnen sich vereinfacht aus folgenden Anteilen:

- Erstinvestitionskosten (Leuchten, Zubehör, Montage)
- Betriebskosten
- Instandhaltungskosten laut DIN 13306 (Wartung, Inspektion, Instandsetzung)

In der Berechnung sind die Kosten für die Leuchten, die Betriebskosten und eventuelle Neuanschaffungen von Leuchten (Instandsetzung) herausgefiltert. Alle anderen Kostenanteile jeder Variante sind identisch und bleiben unberücksichtigt. Dieses Verfahren setzt den Fokus auf die Leuchten. Dennoch fällt bei der Eco Plus - Variante ein höherer Montage- und Instandhaltungsaufwand auf. Hauptsächlich wird dieser durch die Installation der benötigten Technikbauteile verursacht. Der Anteil ist für den Vergleich jedoch so gering, dass er zu vernachlässigen ist.

### Erstinvestitionskosten

Angesetzt werden die in Tabelle 25 aufgeführten Listenpreise des Herstellers (*Zumtobel*). Die Listenpreise unterliegen wirtschaftlichen Schwankungen und sind daher als Orientierung zu betrachten. Pendelleuchten sind teurer als Anbauleuchten. Aufgrund der direkten und indirekten Lichtproduktion ist der Aufbau aufwendiger und die Kosten daher höher.

*Tabelle 25 – Listenpreise*

Leuchten	T16 - Anbauleuchte	437,92 €
	LED - Anbauleuchte	654,50 €
	T16 - Pendelleuchte	472,43 €
	LED - Pendelleuchte	687,82 €
Steuerungstechnik	Steuerungsmodul DIMLIGHT daylight	211,68 €
	Lichtsensoren	102,34 €
	Bewegungsmelder	99,95 €

Anhand der Listenpreise werden die Erstinvestitionskosten für jeden Bürotyp als auch jede Variante ermittelt. Abbildung 25 gibt den Kostenaufwand zusammengefasst für den Konferenzraum wieder. Einzel- Gruppen- und Großraumbüro sind in Anlage 42 - 44 dargestellt.

Beleuchtungssysteme mit LEDs erfordern sichtlich höhere Investitionen. Im Bezug zur Standard - Variante des Konferenzraumes verursacht die Eco - Variante Mehrkosten von ca. 80%. Zu den Anschaffungskosten der Eco Plus - Variante kommen die Ausgaben für Steuerungstechnik hinzu. Diese Mehrkosten belaufen sich beim Konferenzraum auf ca. 85% (Abbildung 25). Die preisliche Differenz zwischen Anbau- und Pendelleuchten ist auf die Anzahl der Leuchten zurückzuführen (s. a. Tabelle 17). Variantenübergreifend ist das Standardkonzept das kostengünstigste. Die Steuerungstechnik fällt in den Eco Plus - Konzepten nur geringfügig ins Gewicht.

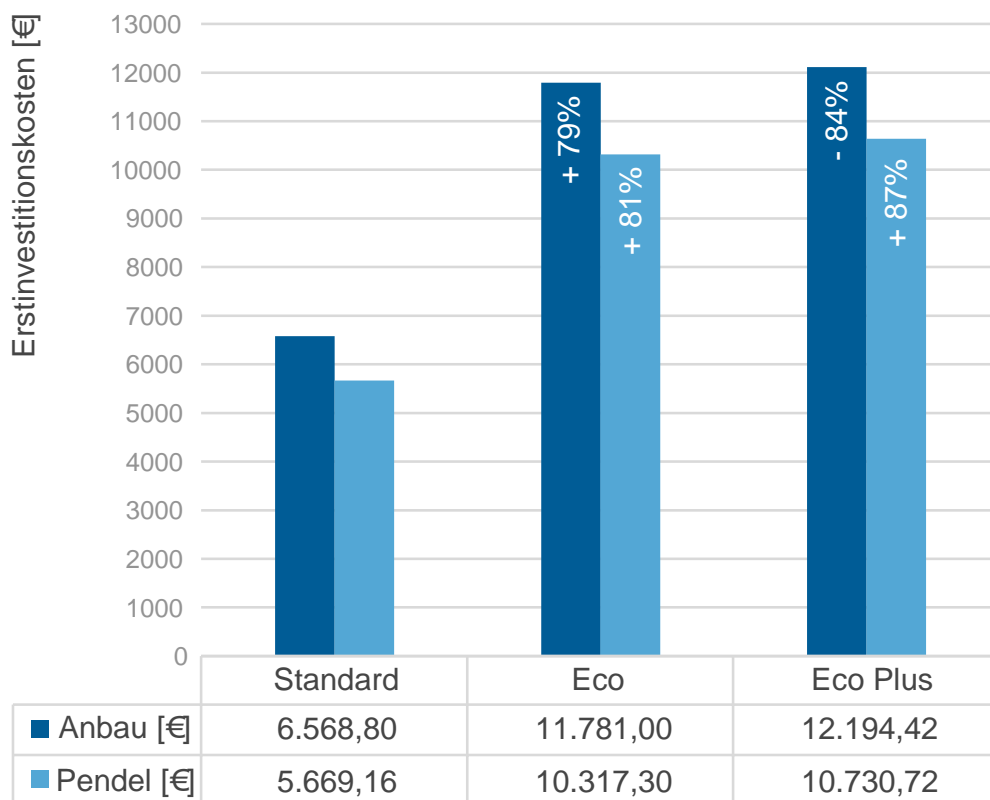


Abbildung 25 – Erstinvestitionskosten Konferenzraum

Betriebskosten

Mit einem Strompreis von 28,8 Ct./kWh können die Betriebskosten für den ermittelten Energieverbrauch aus Abschnitt 5.2.1 pro Jahr errechnet werden .<sup>51</sup>

Wie auch schon beim Energieverbrauch verhalten sich die Kosten aller Räume für den Betrieb der Anlage im gleichen Verhältnis. Im Vergleich schneidet die Eco Plus - Variante des Konferenzraumes am besten ab (Abbildung 26). Die gleiche Tendenz ist in den Büroräumen erkennbar(Anlage 45 - 47).

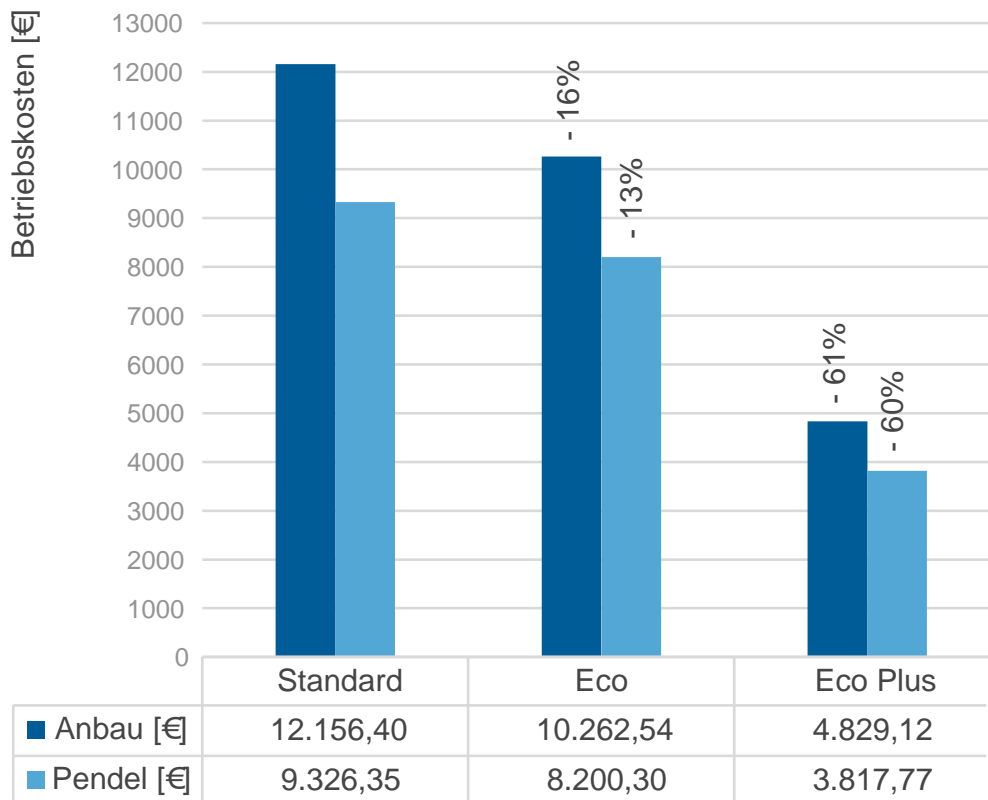


Abbildung 26 – Betriebskosten pro Jahr im Konferenzraum

<sup>51</sup> strom-report.de o.J., <http://strom-report.de/strompreise/>, Stand: 22.09.2015.

Instandhaltungskosten

Zur Erhaltung der Mindestbeleuchtungsstärke ist ein Austausch der Leuchten im Laufe der Nutzungszeit unerlässlich. Bei einer Lebensdauer der Leuchtstofflampen von 20.000 h müssen im Einzelbüro alle 16 Jahre und in den anderen Räumen die Lampen nach 17 Jahren ausgetauscht werden. Dieses Intervall errechnet sich mit den im Abschnitt 5.1.1 ermittelten Betriebsstunden. LED - Systeme mit einer Lebensdauer von 50.000 h benötigen einen Austausch erst nach 40 bzw. 42 Jahren. Beim Versagen der LED - Lampen ist ein Leuchtaustausch erforderlich. Es ist nicht möglich nur das Leuchtmittel zu wechseln. Tabelle 26 fasst die Austauschintervalle der Räume zusammen.

*Tabelle 26 – Austauschintervall*

Lebensdauer	Typ	Betriebsstunden	Austauschintervall
Leuchtstofflampe (20.000 h)	Einzelbüro	1233 h	16,2 Jahre
	Gruppen-, Großraumbüro	1170 h	17,1 Jahre
	Konferenzraum	1170 h	17,1 Jahre
LED (50.000 h)	Einzelbüro	1233 h	40,6 Jahre
	Gruppen-, Großraumbüro	1170 h	42,7 Jahre
	Konferenzraum	1170 h	42,7 Jahre

Der Austausch einer Leuchtstofflampe wird mit einem Grundpreis von 9,00 € angegeben. In Tabelle 27 sind die Sachkosten aufgelistet. Der Austausch der LED - Leuchten erfolgt nach über 40 Jahren, somit ist im definierten Nutzungszeitraum kein Austausch notwendig.

*Tabelle 27 – Instandhaltungskosten*

Leuchtmittel	Typ	Anbauleuchten	Pendelleuchten
Leuchtstofflampe	Einzelbüro	54,00 €	36,00 €
	Gruppenbüro	162,00 €	162,00 €
	Großraumbüro	1152,00 €	1152,00 €
	Konferenz	135,00 €	108,00 €
LED	Komplett austausch (Preise siehe Tabelle 25)		



## Gesamtsystemkosten

Die Gesamtsystemkosten setzen sich aus den Erstinvestitions-, den Betriebs- und den Instandhaltungskosten zusammen. Die Betriebskosten werden für einen Nutzungszeitraum von 20 Jahren, unter Beachtung einer jährlichen Preissteigerung von 6,84% bestimmt.<sup>52</sup> Aus den Abbildungen 27 - 30 geht hervor, dass die Investition in energiesparendere LED - Leuchten grundsätzlich sinnvoll ist. Die Standard und Eco - Varianten liegen im Gesamtkostenvergleich aller Bürotypen annähernd auf gleichem Niveau. Die Standard - Varianten verbrauchen mehr Energie bei geringeren Erstinvestitionskosten. Die Instandhaltungskosten fallen kaum ins Gewicht. Die Eco - Variante kann durch die effizientere Energienutzung die Erstinvestitionskosten lediglich ausgleichen. Eine Reduzierung der Gesamtsystemkosten kann nicht erreicht werden. Der Einsatz von Steuerungstechnik halbiert die Betriebskosten in einem Betrachtungszeitraum von 20 Jahren. Je länger eine Beleuchtungsanlage mit LEDs und Steuerungstechnik genutzt wird, desto markanter ist die Einsparung.

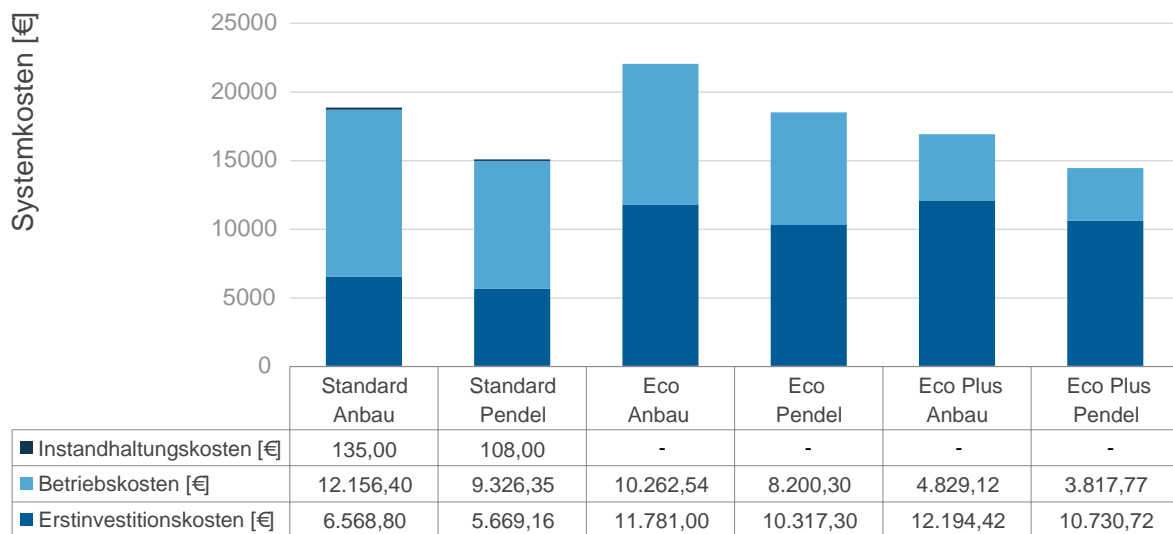


Abbildung 27 – Gesamtsystemkosten im Konferenzraum - 20 Jahre

<sup>52</sup> Statistisches Bundesamt 2015, 46.

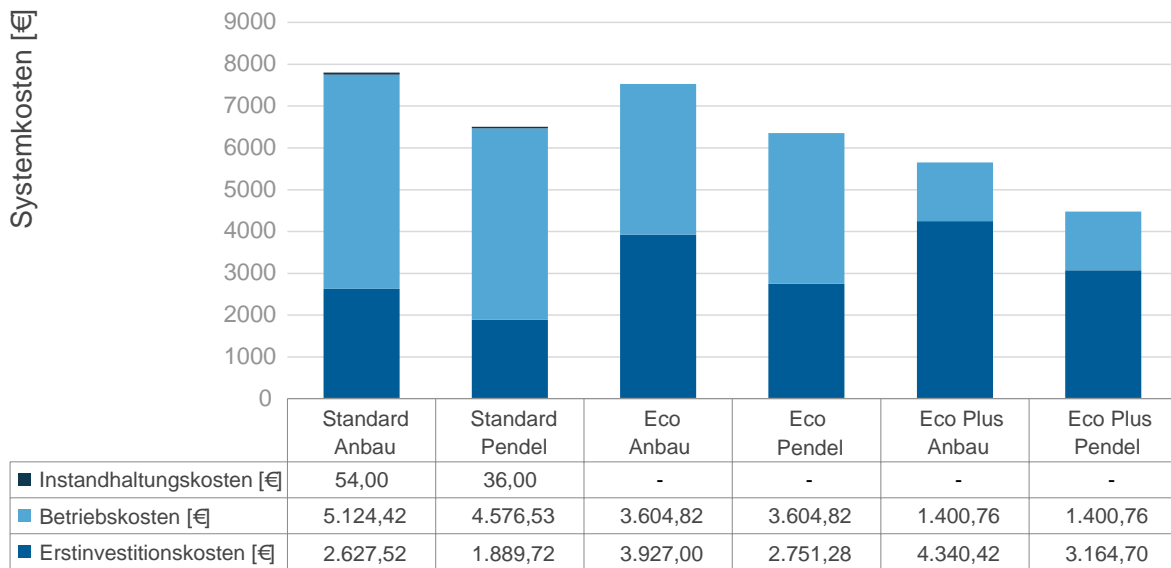


Abbildung 28 – Gesamtsystemkosten im Einzelbüro - 20 Jahre

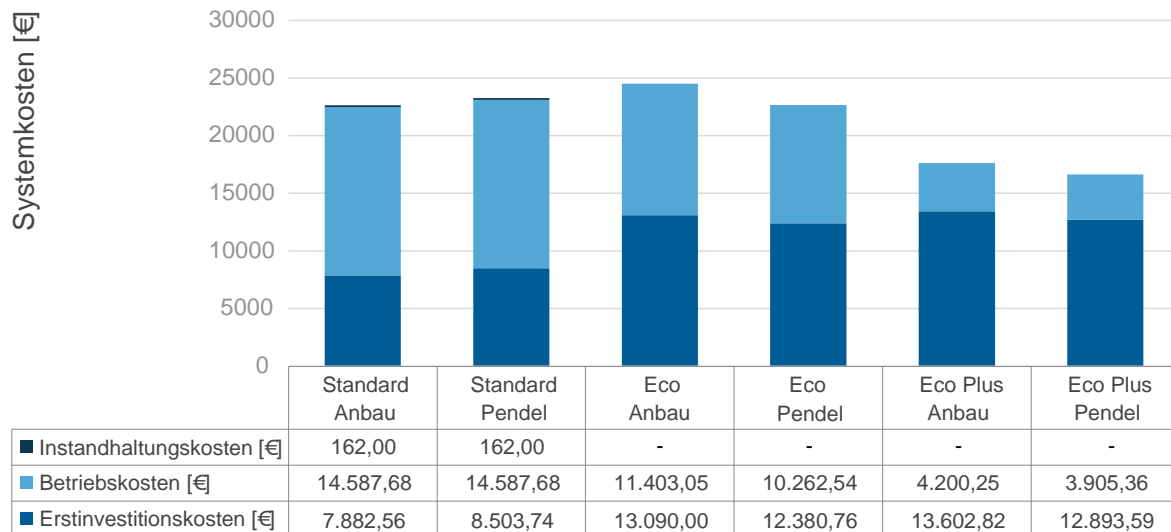


Abbildung 29 – Gesamtsystemkosten im Gruppenbüro - 20 Jahre

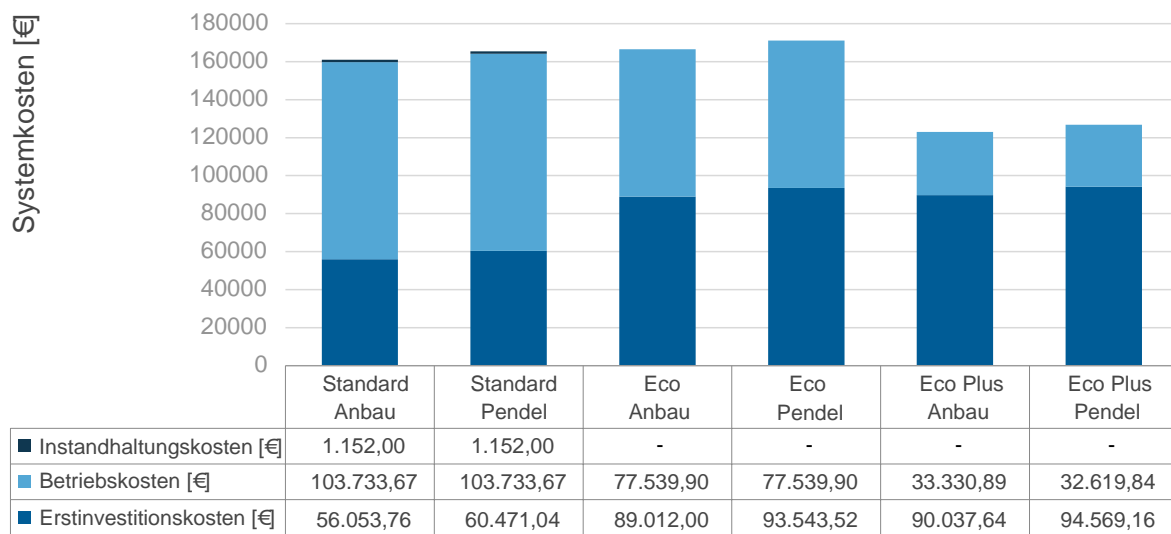


Abbildung 30 – Gesamtsystemkosten im Großraumbüro - 20 Jahre

### 5.2.3 Amortisation

Die Analyse der Amortisationszeit legt die ermittelten Betriebsstunden von 1233 h (Einzelbüro) und von 1170 h bei den anderen Räume (vgl. Tabelle 22) zugrunde.

Ausgehend von den Erstinvestitionskosten wird der Kostenverlauf während der Nutzungszeit von 20 Jahren für alle Varianten kalkuliert. Berücksichtigung finden neben den Betriebskosten auch Instandsetzungskosten und eine Preissteigerung des Strompreises pro Jahr. Mittels folgender Formel lässt sich aus dem Strompreisindex des *Statistischen Bundesamtes* im Zeitraum von 2000 - 2014 eine Preissteigerung von 6,84% pro Jahr berechnen <sup>53</sup>.

$$(\text{Neuer Indexstand} / \text{Alter Indexstand} * 100 - 100) / \text{Jahre} = \text{Preissteigerung pro Jahr}$$

Der Kostenverlauf des Nutzungszeitraumes von 20 Jahren für den Konferenzraum kann aus dem Amortisationsdiagramm 31 für das Beleuchtungskonzept mit Pendelleuchten entnommen werden. Die restlichen Version mit Pendel- und Anbauleuchten befinden sich in Anlage 49 - 54. Der Verlauf von Standard und Eco - Variante ist relativ parallel. Im Laufe der Nutzungsdauer nähern sich die zwei Kurven an, treffen sich jedoch nicht. Die Eco Plus - Variante hat einen flacheren Verlauf. Sie amortisiert sich bei allen Bürotypen innerhalb der Nutzungszeit nach etwa 12 - 18 Jahren. Die Betriebsstunden pro Jahr beeinflussen maßgeblich die Steigung der Kurven und somit den Zeitpunkt der Amortisation. Eine intensivere Nutzung der Beleuchtungsanlage zieht einen früheren Amortisationszeitpunkt nach sich.

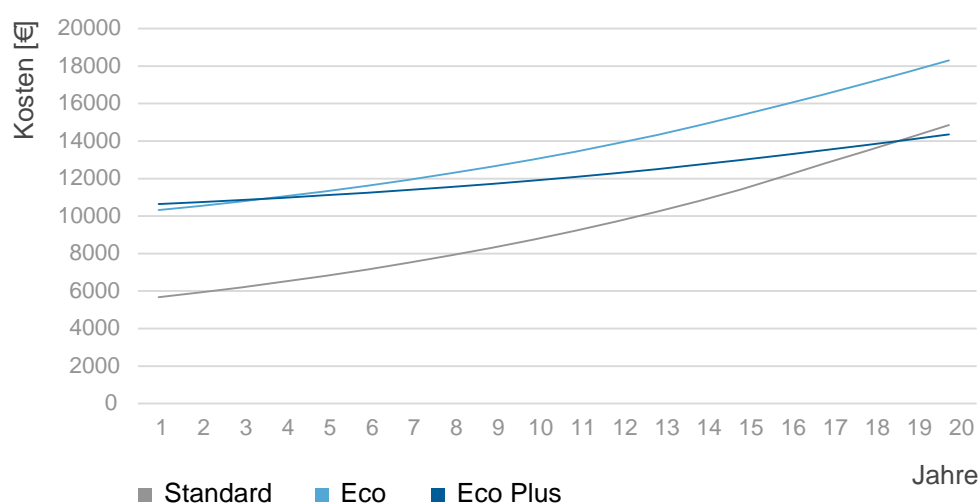


Abbildung 31 – Amortisation Konferenzraum Pendelleuchten - 20 Jahre

<sup>53</sup> Statistisches Bundesamt 2015, 46.

## 5.2.4 Lampennutzung

Die Leuchten der Beleuchtungsvarianten stammen aus der ECOOS - Familie. Beide Leuchtentypen (Anbau- und Pendelleuchten) können einzeln oder auch als Lichtband verwendet werden und zeichnen sich durch eine 360° Beleuchtung aus. Die Zusammensetzung des direkten und indirekten Lichtanteils ist bei der Pendelleuchte ausgewogener.

Die Lichtverteilungskurven (LVK) der Leuchten weisen Unterschiede in den einzelnen Kegel (Abbildung 32) auf. Die Verteilung der Lichtstärke wird in einem Polarkoordinatensystem angegeben. Dieses System integriert zwei verschiedene Ebenen in einer Zeichnung. Die Lampenlängsachse (C0 - C180) ist in der Abbildung 32 durch eine hellblau gestrichelte Linie gekennzeichnet. Die dunkelblaue Linie zeigt die Querachse (C90 - C270) der Lampe.

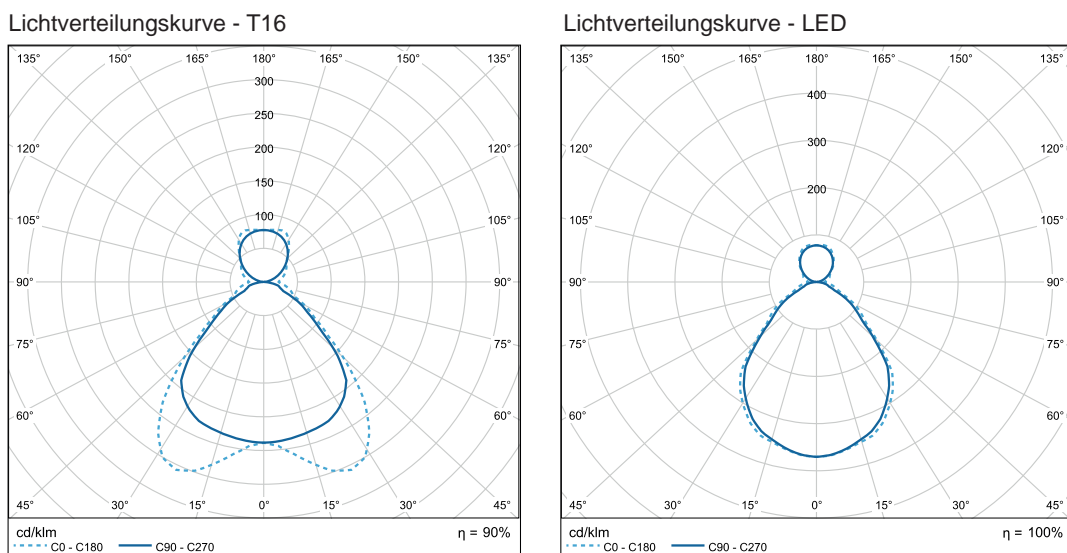


Abbildung 32 – Lichtverteilungskurve LED- und Leuchtstoff - Leuchte

Die Lichtverteilungskurve (LVK) der LED - Leuchten (Anbau- und Pendelleuchte) haben in beiden Achsen eine annähernd gleiche Lichtkurve in Form eines bauchigen Kegels. Der Austritts-kegel von 90° der Leuchte sorgt für eine großflächige Lichtverteilung. LED - Leuchten erreichen in der 0° - Achse einen Maximalwert von 370 cd/klm (Tabelle 28). In der Lichtverteilungskurve einer T16 - Leuchte (Anbau- und Pendelleuchte) sticht die Lampenlängsachse heraus. Die dargestellte Form ist die typische Form für breitstrahlende Leuchten.

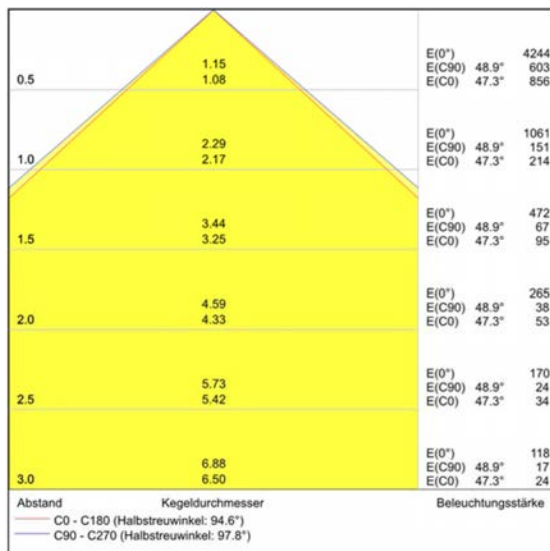
Der Nutzer hat weniger Licht in der Längsachse, jedoch mehr in der Peripherie. Mit einem Maximalwert von 310 cd/klm (Tabelle 28) bei ca. 25° haben die T16 - Leuchten einen geringeren Lichtstärkewert pro 1.000 lm gegenüber LED - Leuchten.

Die Lichtstärkenverteilungskurven von Anbau- und Pendelleuchten sind kongruent. Die Lichtverteilung wird durch das Leuchtmittel verändert und nicht durch die Anbauhöhe. Erkennbar anhand der Kegeldiagramme ist, dass T16 - Leuchten breiter strahlen als LED - Leuchten (Abbildung 33). Der breitere Strahlungswinkel verursacht eine flächigere Lichtstärkenverteilung auf der Sehaufgabe. Die Maximalwerte der Lichtverteilungskurve sind ausschlaggebend für die Beleuchtungsstärke auf der Sehaufgabe. Die Lichtstärke pro 1.000 lm wird durch den Leuchtenlichtstrom der verschiedenen Leuchten hochgerechnet.

$$(\text{Gesamtlichtstärke} / \text{Abstand zur Sehaufgabe})^2 = \text{maximaler Lichtstrom}$$

Den maximalen Lichtstrom in Höhe der Sehaufgabe ist die Division aus Gesamtlichtstärke durch den Abstand zur Sehaufgabe im Quadrat.

Kegeldiagramm - T16



Kegeldiagramm - LED

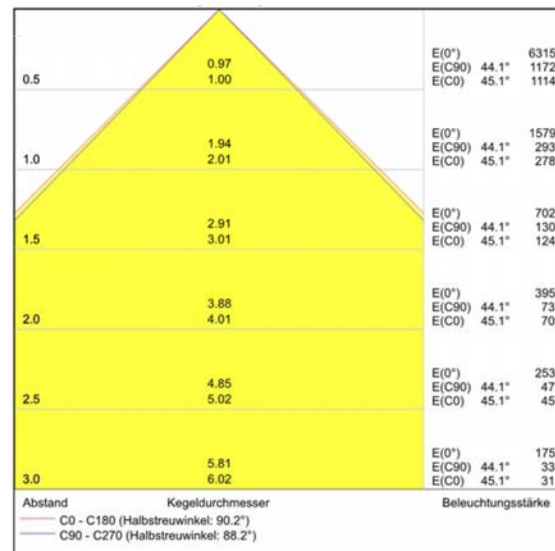


Abbildung 33 – Lichtkegel LED- und Leuchtstoff - Leuchte

Die Tabelle 28 macht kenntlich, LED - Leuchten erzeugen im Bereich der Sehaufgabe eine höhere Beleuchtungsstärke als T16 - Leuchten. Zusätzlich wird eine Verbesserung der Beleuchtungsstärke von 65% durch den Einbau von Pendelleuchten statt Anbauleuchten erreicht. Alle Kenndaten zur Bestimmung des Lichtstroms auf der Sehaufgabe sind in Tabelle 28 übersichtlich zusammengefasst.

*Tabelle 28 – Lichtstrom auf der Sehaufgabe*

Typ	T16 - Anbau	T16 - Pendel	LED - Anbau	LED - Pendel
Leuchtenlichtstrom [lm]	4040	4040	4030	4030
Lichtstärke pro klm [cd/klm]	310	310	370	370
Lichtstärke [cd]	1252,40	1252,40	1491,10	1491,10
Abstand zur Sehaufgabe [m]	2,25	1,75	2,25	1,75
Lichtstrom Sehaufgabe [Lux]	247,48	408,94	294,54	486,89

### 5.2.5 Effizienz

Zur Beurteilung der Effizienz im Sinne der Nachhaltigkeit ist eine Unterscheidung zwischen Lampen- und Leuchtenlichtstrom unverzichtbar. Die Angabe des Lampenlichtstroms bezeichnet den Lichtstrom des Leuchtmittels, hingegen werden beim Leuchtenlichtstrom die Verluste des Leuchtschirms miteinbezogen. Bei der Auswahl der Leuchten ist damit der Wert des Leuchtenlichtstroms entscheidend. Die Leuchten mit Leuchtstofflampen haben einen Lampenlichtstrom von 4450 lm und einen Leuchtlichtstrom von 4040 lm. Bedingt durch die Bauart unterscheidet sich der Lampen- und Leuchtenlichtstrom der ECOOS LED - Leuchten nicht, beide erreichen einen Wert von 4030 lm.

Der lichttechnische Leuchtenbetriebswirkungsgrad, gibt das Verhältnis zwischen Lichtstrom der Leuchte und der Lampe an. Effektiv verlässt bei der T16 - Leuchte nicht die gesamte Lichtmenge den Leuchtenkörper. Der Betriebswirkungsgrad der Leuchten mit Leuchtstofflampen liegt bei 89,98%. Leuchtschirm und LED - Chip bilden eine untrennbare Einheit und erreichen einen Leuchtenbetriebswirkungsgrad von 100%.

Das Verhältnis von Leuchtenlichtstrom zur Leistung der Leuchte gibt einen weiteren essentiellen Wert für die Effizienz der Leuchten an. Die Lichtausbeute [lm/W] beschreibt wie viel Licht die Lampe aus der ihr zugeführten Energie erzeugen kann. Eine höhere Lichtausbeute bedeutet ein wirtschaftlicheres Arbeiten. Leuchtstoff - Leuchten erzeugen mit einer Leistung von 59,7 W eine Lichtausbeute von 67,1 lm/W. Bei geringerer Leistungszufuhr (42,0 W) liefern die LED - Leuchten eine 42% höhere Lichtausbeute von 95,9 lm/W. Folglich ist auch der Energieverbrauch der LED - Beleuchtung niedriger. Der Einsatz von Steuerungstechnik verbessert durch eine gezielte Regelung den Energiebedarf.

Das Energie - Label der *Europäischen Union* unterteilt sich in Energieeffizienzklassen. Sie sind in mehrere Abstufungen unterteilt, von A++ (sehr effiziente Lampen) bis zur schlechtesten Effizienzkategorie G. Die ECOOS Leuchte in der Ausführung mit LEDs erhält ein Energielabel von A++, hingegen die Leuchtstofflampe ein A bis A+.<sup>54</sup>

<sup>54</sup> Vgl. Umweltbundesamt o.J., <http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energiesparen/energieverbrauchskennzeichnung>, Stand: 01.10.2015.



## 5.2.6 Zusammenfassende Bewertung

Die folgende Bewertung unterscheidet aufgrund der Gegebenheiten zwischen allen sechs Kombinationen. Die Verwendung von Anbau- oder Pendelleuchten ist ausschlaggebend und wird daher separat für Standard, Eco und Eco Plus betrachtet. Die Skala besitzt Werte zwischen 1 und 5, wobei 5 die beste Bewertungsstufe darstellt. Anbauleuchten sind immer links, Pendelleuchten immer rechts dargestellt.

LEDs haben einen geringeren Leistungsbedarf als Leuchtstofflampen. Die installierte Steuerungstechnik in der Eco Plus - Variante senkt den Energiebedarf zusätzlich. Im weiterreichenden Vergleich von Anbau- und Pendelleuchten benötigen abgehängte Leuchten, aufgrund der geringeren Anzahl, weniger Energie als Anbauleuchten. Damit ergeben sich folgende Bewertungspunkte für die Varianten: Standard - Anbau = 1, Standard - Pendel = 1, Eco - Anbau = 2, Eco - Pendel = 3, Eco Plus = 4, Eco Plus = 5.

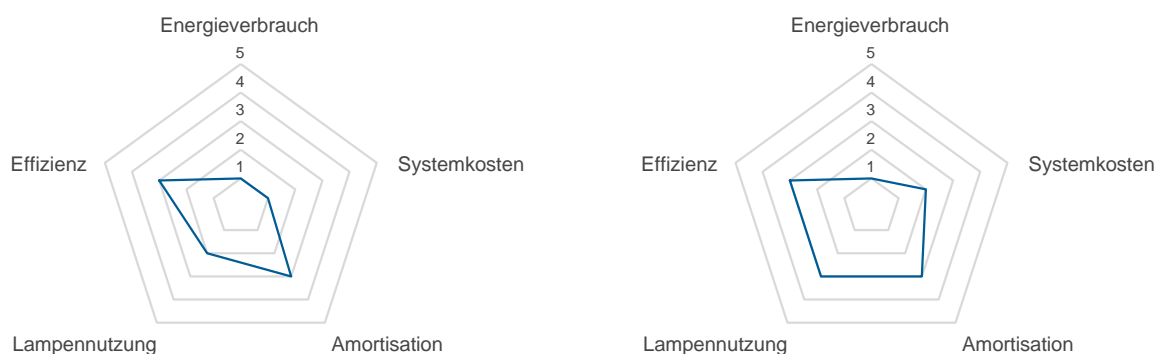


Abbildung 34 – Standard - Anbau- und Pendelleuchten

Trotz höherer Erstinvestitionskosten schneidet die Eco Plus - Variante durch die geringsten Betriebskosten im Zeitraum von 20 Jahren am besten ab. Konzepte ohne Steuerungstechnik pendeln sich im Laufe der 20 Jahre auf ein ähnliches Gesamtkostenniveau ein. Die Beleuchtungskonzepte mit Anbauleuchten werden mit einer höheren Leuchtenanzahl umgesetzt. Dies verursacht Mehrkosten. Punktevergabe: Standard - Anbau = 1, Standard - Pendel = 3, Eco - Anbau = 1, Eco - Pendel = 3, Eco Plus = 4, Eco Plus = 5.

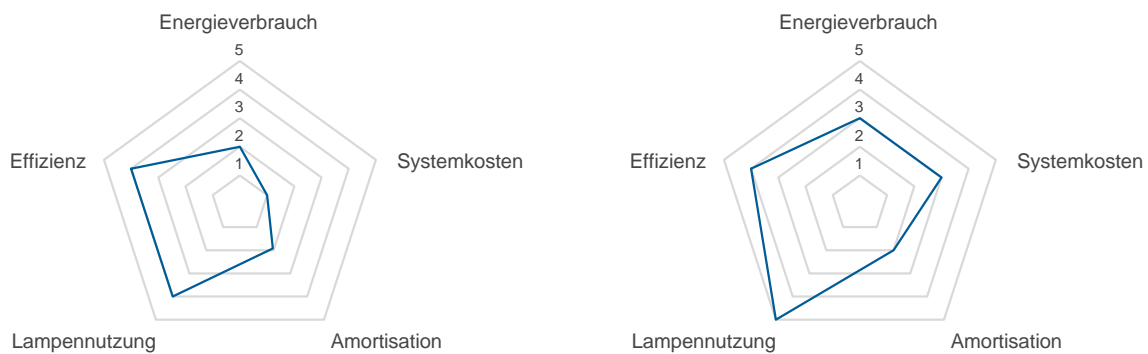


Abbildung 35 – Eco - Anbau- und Pendelleuchten

Im Betrachtungszeitraum von 20 Jahren sind die Eco - Varianten mit den zugrunde gelegten, bzw. errechneten Betriebsstunden, nicht rentabel (je 2 Punkte). Die Eco Plus - Varianten erreichen den Amortisationszeitpunkt konzeptabhängig zwischen 12 - 18 Jahren (je 4 Punkte). Der Kostenfaktor bringt den Standard - Varianten jeweils 3 Punkte.

Die Lichtverteilung der LED - Leuchten erzeugen eine höhere Beleuchtungsstärke in der Längsachse. Des Weiteren bieten Pendelleuchten den Vorteil eines größeren Lichtertrags auf der Sehaufgabe, hervorgerufen durch den verringerten Abstand. Die Eco - und Eco Plus - Varianten werden mit jeweils 5 Punkten für Pendelleuchten und 4 Punkten für Anbauleuchten bewertet. Die Standard - Varianten erhalten für Pendelleuchten 3 und für Anbauleuchten 2 Punkte.

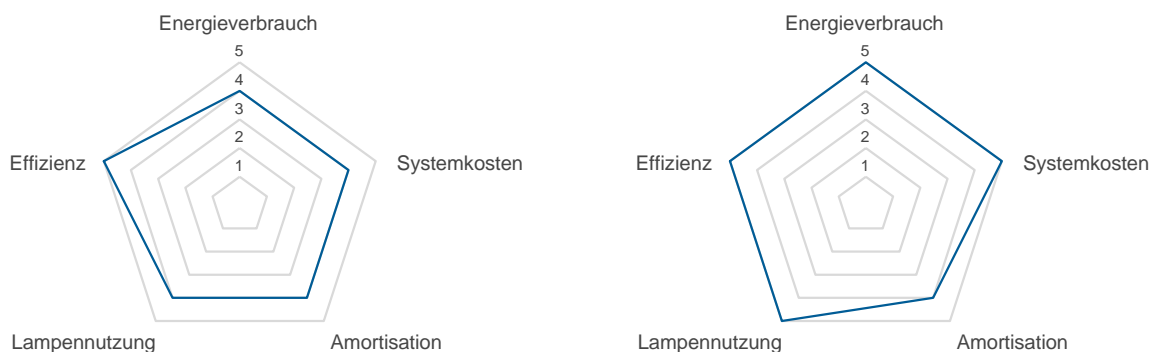


Abbildung 36 – Eco Plus - Anbau- und Pendelleuchten

Unter dem Aspekt der Effizienz sind LED - Beleuchtungskonzepte zu bevorzugen. Der Vorteil besteht in der höheren Lichtausbeute bei geringerem Energieeinsatz und einem Betriebswirkungsgrad von 100%. Zwischen Anbau- und Pendelleuchten besteht in diesem Vergleich kein Unterschied, daher sind sie identisch zu bewerten. Die Eco Plus - Varianten bekommen 5 Punkte, da durch die Steuerungstechnik die eingesetzte Energie effizienter, als bei den Standard - Varianten (3 Punkte) und bei den Eco - Varianten (4 Punkte) genutzt werden kann.

## 5.3 Soziale Bewertung

### 5.3.1 Sehleistung

In Büros sind verschiedenste Aufgaben zu erfüllen: Klassische Bürotätigkeit, Arbeiten am Bildschirm und Schreiarbeiten. Die Tätigkeiten erfordern als Grundanforderung ein gleichmäßiges Beleuchtungsniveau. Hauptsächlich lässt sich dieses Niveau durch die Beleuchtungsstärke beschreiben. In Abhängigkeit der visuellen Anforderung sind Mindestbeleuchtungsstärken im Bereich des Arbeitsfeldes einzuhalten. Zu beachten gilt, je anspruchsvoller die Sehaufgabe ist, desto mehr Licht wird benötigt. Im Büro wird eine Beleuchtungsstärke im Arbeitsbereich von 500 Lux gefordert. Alle Beleuchtungskonzepte für jeden Bürotyp gewährleisten das Erreichen eines flächendeckenden horizontalen Beleuchtungsniveaus, unter anderem durch eine einheitliche Leuchtenanordnung. Zudem besteht die Möglichkeit, zusätzliches Licht auf den einzelnen Arbeitsplätzen durch Zuschalten einer Tischleuchte zu erhalten. Im Konferenzraum ist diese Lichtergänzung nicht vorhanden.

Reflexionseigenschaften der Raumbegrenzungsflächen beeinflussen das Beleuchtungsniveau. Helle Oberflächen eignen sich generell besser für die Einrichtung. Allgemein gilt, umso dunkler Räume eingerichtet sind desto mehr Licht wird benötigt, um den Raum zu erhellen. Anwendung für Wände und Decken findet ein weiß gestrichener Kalkputz. Der Boden ist mit einer dunklen Eiche ausgelegt. Die gewählte Farbkonstellation mit unterschiedlichen Reflexionsgraden von Wänden, Decken, Böden und Mobiliar unterstützen den Eindruck eines ausgewogenen Beleuchtungsniveaus und stellen einen angenehmen Kontrast dar.

Das gewählte Leuchtenraster vermeidet die Entstehung harter Schatten. Diese sind für den Betrachter besonders deutlich wahrzunehmen und können störend wirken.<sup>55</sup>

Als weiteres Gütemerkmal für die Sehleistung wird die Lichtqualität angesetzt. Eine Aussage wird mit Hilfe des Farbwiedergabeindex getroffen. Je höher dieser Wert ausfällt, desto besser ist die Lichtqualität. Der Farbeindruck einer Fläche kann durch die eingesetzte Leuchte variieren. Oberflächenfarben können nur originalgetreu wahrgenommen werden, wenn das Licht der Leuchte diese Farbe im Spektrum enthält. Das ganzheitliche Farbspektrum des Sonnenlichts lässt Objekte natürlich erscheinen.

---

<sup>55</sup> Zumtobel GmbH 2013, 24.

Abbildung 37 zeigt nachdrücklich das diskontinuierliche Spektrum einer Leuchtstofflampe. Beim Verlauf der LED und der Glühlampe ist ein gleichmäßigeres Farbspektrum gegeben. Farben werden natürlicher wiedergegeben, da keine bzw. weniger Farbkomponenten fehlen. Die ausgewählten Leuchten von *Zumtobel* erreichen mindestens einen Farbwiedergabeindex von 80.<sup>56</sup>

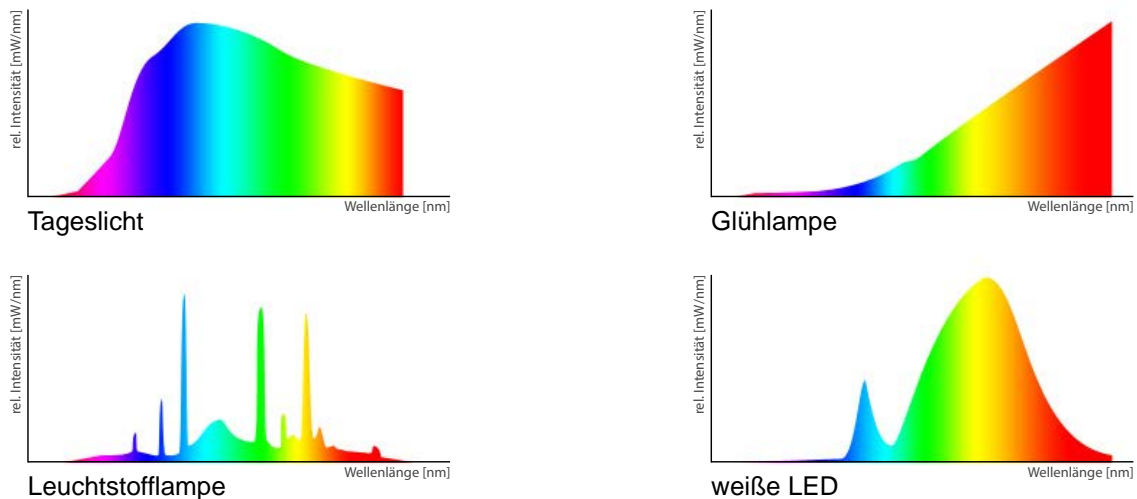


Abbildung 37 – Farbspektren<sup>57</sup>

Das wichtigste Büromobiliar, der Schreibtisch, gibt die Möblierung im Raum vor. Bei einem Büroarbeitsplatz wird davon ausgegangen, dass dieser mit einem Computer und zugehörigem Bildschirm ausgestattet ist. Aus Büroplanungserfahrung heraus empfiehlt sich eine senkrechte Anordnung zur Fensterfront. Befinden sich die Fenster hinter dem Arbeitsplatz, sind lästige Reflexblendungen möglich. Ähnlich verhält es sich mit einer um 180° gedrehten Anordnung. Die großen Leuchtdichteunterschiede zwischen den hellen Fenster und dem Bildschirm verursachen eine direkte Blendung. Die Anordnung senkrecht zur Fensterfläche wurde konsequent in allen Büroräumen umgesetzt. Eine Blendung durch Tageslicht wird weitestgehend verhindert.<sup>58,59</sup>

<sup>56</sup> Zumtobel GmbH 2014, 12.

<sup>57</sup> Bayerisches Landesamt für Umwelt 2014, 5.

<sup>58</sup> Vgl. bürowissen.de o.J., <http://www.buerowissen.de/Licht/Beleuchtung-von-Bildschirmarbeitsplätzen/>, Stand: 10.09.2015.

<sup>59</sup> Zumtobel Lightning GmbH 2014, 16.

Die Umsetzung im Konferenzraum ist nach diesem Schema nicht möglich, aber auch nicht erforderlich. Bei Besprechungen oder ähnlichen Nutzungen wird in der Regel kein Laptop verwendet, dadurch sind keine störenden Spiegelungen zu erwarten. Im Gegensatz dazu ist die Leinwand senkrecht zur Fensterfront angeordnet, eine Blendung durch Tageslicht wird minimiert. Die Projektionsfläche der Leinwand kann eine zusätzliche Verschattung des Raumes dennoch notwendig machen.

Die Anordnung und Ausrichtung der Arbeitsplätze begünstigt oder verringert eine mögliche Blendung. Um zusätzliche Reflexblendungen zu vermeiden, ist es ratsam, keine glänzenden Arbeitsmittel wie z. B. Mappen zu verwenden. Auch stark glänzende Tischplatten können störend sein. Die eingesetzten Möbel besitzen Oberflächen aus heller Eiche. Die Holzoptik eignet sich hervorragend für dieses Einsatzgebiet und gewährleistet ein angenehmes Arbeiten.

Die ECOOS Leuchten besitzen auf ihrem Gehäuse eine Mikroprismenstruktur. Diese sorgt für eine Entblendung und eine gezielte Lichtlenkung. Bei Leuchten mit nach unten offenen, sichtbaren Lampen muss präzise auf deren Anordnung im Raum geachtet werden. Das direkt abstrahlende, un gelenkte Licht führt zu unangenehmen Blendungen im Arbeitsbereich. Eine Veränderung der Möblierung ist damit nur schwer oder überhaupt nicht umsetzbar. Die ausgewählten Leuchten bewirken keine störende Reflexblendung durch ihre Oberflächenbeschaffenheit und halten zudem auch die vorgeschriebenen Grenzen der Direktblendung ein. Eine variable Einrichtung ist ausführbar.<sup>60</sup>

---

<sup>60</sup> Zumtobel GmbH 2013, 12.

### 5.3.2 Sehkombfort

Ein ebenmäßiges Leuchtdichte Verhältnis im Gesichtsbereich sorgt für einen hohen Sehkombfort. Die Leuchtdichte beschreibt den Helligkeitseindruck, welcher der Mensch von einer Fläche hat.<sup>61</sup> Bei der Gestaltung im Raum sind zu geringe, als auch zu hohe Leuchtdichteunterschiede zu vermeiden. Geringe Gegensätze bewirken Monotonie hingegen lichtüberflutete Räume eine gewisse Orientierungslosigkeit. Bei der Verwendung von Anbauleuchten besteht die Möglichkeit der Unbehaglichkeit. Ist keine zusätzliche Akzentbeleuchtung oder eine Trennung von Bereichen durch die Beleuchtung vorhanden, sinkt der Wohlfühlfaktor. Die Atmosphäre mittels direkten und indirekten Lichtkomponenten sorgt für eine ausgewogene Schattigkeit und für ein angenehmes Raumgefühl für den Nutzer. Die Beleuchtung mit den Pendelleuchten setzt dieses Konzept um.

Erweiternd, um ein optimales Ergebnis zu erhalten, kann zusätzliche Akzentbeleuchtung, z.B. punktuelle Beleuchtung von Bildern, eingesetzt werden. Zu hohe Kontraste sind beim Hervorheben durch Beleuchtung zu vermeiden, da sie anstrengende Hell- Dunkeladaptionen für das Auge verursachen. Die Einhaltung von Reflexionsgraden (bereits in Abschnitt 5.3.1 beschrieben) unterstützen die harmonische Verteilung zusätzlich.

Flimmerfreies Licht gewährleistet einen optimalen Sehkombfort. Die Leuchten sind so konstruiert, dass sie diesen Effekt verhindern. Ein konzentriertes Arbeiten ohne störende unregelmäßige Lichteinflüsse wird dadurch gewährleistet.

Vom Arbeitnehmer wird Sehkombfort häufig mit dem Grad des einfallenden Tageslichts und dem Sichtbezug nach außen definiert. Die Anordnung der Tische bildet die Grundlage hierfür. Nicht nur die Entfernung zu den Fenstern, sondern auch die Ausrichtung senkrecht zur Fensterfront ermöglichen die Nutzung von viel Tageslicht und einem ungehinderten Blick ins Freie. Unterstützend sind die großen Fensterflächen in den Räumen, die beide Anforderungen bestmöglich umsetzen.<sup>62</sup>

---

<sup>61</sup> bürowissen.de o.J., <http://www.buerowissen.de/Licht/Beleuchtung-von-Bildschirmarbeitsplatzen/>, Stand: 10.09.2015.

<sup>62</sup> Zumtobel Lightning GmbH 2014, 27.

### 5.3.3 Erscheinungsbild

Licht stellt eine sehr vielseitige Gestaltungsmethode dar und beeinflusst und unterstützt vorhandene Innenraumgestaltung positiv. Für Pendelleuchten sind der Gestaltungsfreiheit wenig bis keine Grenzen gesetzt. Kreatives und ausgefallenes Design bietet vielseitige Umsetzungsmöglichkeiten und kann damit optimal in die Raumarchitektur eingebunden werden. Anbauleuchten hingegen sind lediglich in Größe, Form und der Oberflächenbeschaffenheit veränderbar. Abgehängte Leuchten vermitteln ein angenehmes Raumgefühl und geben Struktur. Deckenleuchten hingegen können einen monotonen Eindruck vermitteln sind jedoch für den Einsatz von Akzentbeleuchtung bestens geeignet. Präzise können kleine Lichtflächen im Raum platziert werden. Ein weiterer Vorteil besteht in der Lichtproduktion von direktem und gleichzeitig indirektem Licht der Pendelleuchte. Die Kombination sorgt für ein angenehmes Raumgefühl, passende Steuerung ermöglicht die Wahl einer gewünschten Lichtstimmung. Bei den gewählten Konzepten kann bei der Variante mit Anbauleuchten indirektes Licht durch z.B. Stehleuchten in den Raum gebracht werden. Die Umsetzung ist letztendlich Geschmackssache. Für die Beurteilung im Variantenvergleich von Anbau- und Pendelleuchten sind abgehängte Leuchten zu bevorzugen.<sup>63</sup>

### 5.3.4 Vitalität

Die Lichtfarbe hat großen Einfluss auf die Stimmung eines Menschen. Leuchten sind in drei Farbtemperaturgruppen unterteilt (vgl. Tabelle 29). Farbtemperaturen bis 3.300 Kelvin werden als warmweißes Licht wahrgenommen. Zwischen 3.300 Kelvin und 5.300 Kelvin entsteht eine neutralweiße Lichtfarbe. Tageslichtweiß ist ab einem Wert von 5.300 Kelvin definiert.

*Tabelle 29 – Lichtfarben künstlicher Lichtquellen*<sup>64</sup>

Lichtfarbe	Farbtemperatur	Farbanteile
warmweiß	< 3.300 K	überwiegend rot
neutralweiß	3.300 K bis 5.300 K	ausgewogen rot, blau, grün
tageslichtweiß	> 5.300 K	überwiegend blau

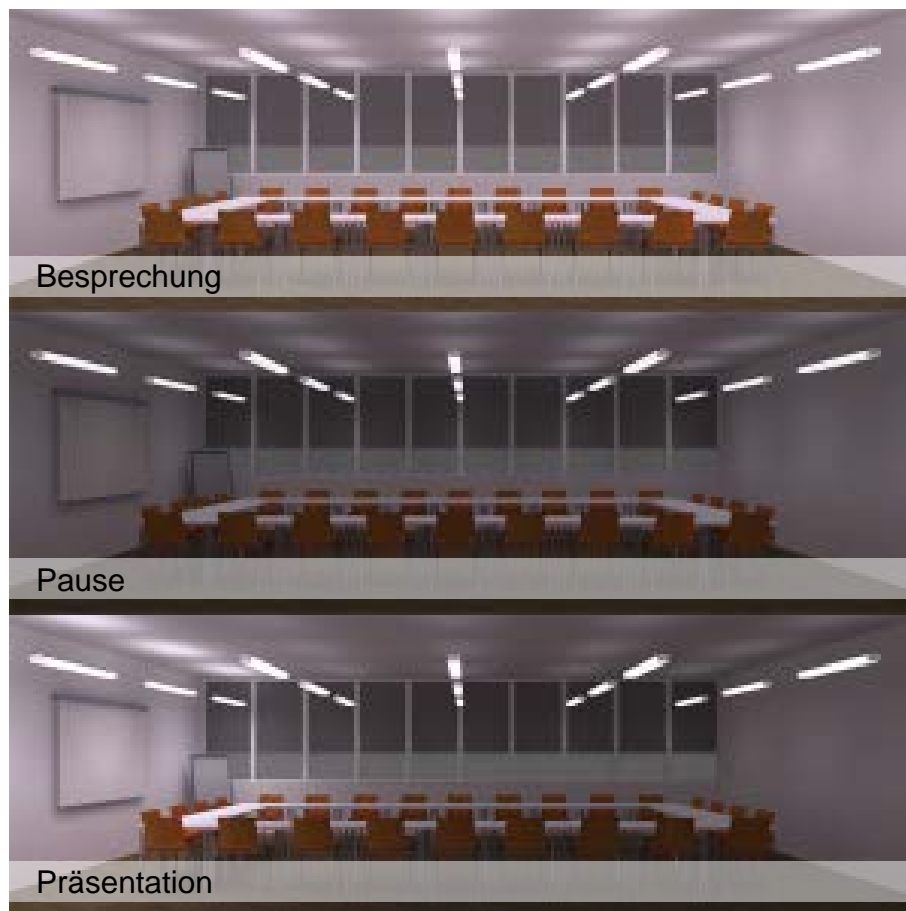
<sup>63</sup> Zumtobel Lightning GmbH 2014, 18-26.

<sup>64</sup> Paulman o.J., <http://www.paulmann.com/de/de/rund-ums-licht/lichtwissen/lichtfarbe.html>, Stand: 01.10.2015



Mit jeder Lichtfarbe werden unterschiedliche Stimmungen verbunden, diese wirken sich dementsprechend auf den Körper des Menschen aus.<sup>65</sup> Warmweißes Licht besteht hauptsächlich aus roten Farbanteilen, dieses vermittelt eine wohnliche und gemütliche Atmosphäre. Einen sachlichen, hellen und einladenden Eindruck erzeugen Leuchten im neutralweißen Bereich. Die Kategorie mit tageslichtweißen Leuchten wirkt anregend und belebend. Die ausgewählten Leuchten erzeugen Licht im Temperaturbereich von etwa 4.000 Kelvin und sind damit für die Bürotätigkeit optimal.

Im Konferenzraum sind die Lichtstimmungen zusätzlich nützlich, um die temporäre Nutzung zu unterstreichen. In der Abbildung 38 sind verschiedene Beispiele für mögliche Lichtstimmungen abgebildet.



*Abbildung 38 – Beispiele für Lichtstimmungen im Konferenzraum*

<sup>65</sup> Zumtobel Lightning GmbH 2014, 9.

Besprechungen benötigen viel Licht im Raum, ein hoher direkter Lichtanteil ist sehr gut geeignet. Teilnehmer schreiben und lesen, sie brauchen für die gute Ausführung ausreichend Beleuchtungsstärke auf ihrer Arbeitsfläche. Zusätzlich steigert das gleichmäßig helle Licht die Aufmerksamkeit. Im mittleren Bild der Abbildung 38 ist eine Lichtstimmung für Pausen dargestellt. Die Beleuchtung arbeitet nicht mit voller Leistung, sondern ist so eingestellt, dass eine angenehme entspannte Atmosphäre vermittelt wird. Die Teilnehmer kommen dadurch zur Ruhe, können abschalten und neue Energie für weitere Aufgaben sammeln.<sup>66</sup>

Bei Präsentationen sind andere Anforderungen zu erfüllen. Helles Licht im Raum kann störend wirken und dafür sorgen, dass die Anzeige an der Leinwand nicht richtig lesbar ist. Eine Lichtstimmung mit viel Licht im Bereich der Leinwand und wenig Licht im restlichen Raum ist sinnvoll. Die eingestellte Lichtverteilung lenkt zudem die Aufmerksamkeit auf das Wesentliche in diesem Moment (der Redner bzw. die Präsentation).

Je nach gewünschten Anforderungen oder Vorlieben können Lichtstimmungen kreiert und die Tätigkeiten unterstützt werden. Eine Erweiterung des Konzeptes wäre die zusätzliche Berücksichtigung des circadianen Rhythmus. Hierbei wäre eine Anpassung der Lichtfarbe an den Farbenverlauf des Sonnenlichtes erforderlich. Unterbewusst wird dieser Vorgang als angenehm empfunden und unterstützt das Aufmerksamkeitsvermögen.<sup>67</sup>

---

<sup>66</sup> Zumtobel Lightning GmbH 2014, 26.

<sup>67</sup> Vgl. licht.de o.J., <http://www.licht.de/de/licht-fuer-zuhause/licht-und-raum/licht-und-farbe/lichtfarben-und-farbwiedergabe/>, Stand: 01.09.2015.

### 5.3.5 Individualität und Flexibilität

Die Nutzer eines Büros haben ganz unterschiedliche Bedürfnisse und Wünsche an ihre Beleuchtung. Die Intensität der Beleuchtungsstärke kann abhängig von der Tätigkeit oder dem Alter eines Mitarbeiters gesteuert werden und seine Anforderungen unterstützen. Das Konzept der Standard- und Eco - Variante ermöglicht das manuelle Zuschalten von künstlichem Licht. Größere Variabilität ist bei den LED - Leuchten durch eine nachträgliche Neuprogrammierung der Leuchtengruppen gegeben. Bei den Standard - Varianten ist durch die Verkabelung nach dem Einbau die Ansteuerung festgelegt. Die Eco Plus - Variante kann nicht nur durch eine ständig ausreichende Beleuchtungsstärke den Nutzer unterstützen, sondern auch durch das Einstellen variabler Lichtstimmungen. Vorzeitige Ermüdung und eine Überanstrengung der Augen kann vorgebeugt werden. Gleichzeitig besteht die Wahl zwischen einer automatischen und manuellen Schaltung, damit bleibt ein maximales Maß von eigener Kontrolle bestehen und kann bei Bedarf abgegeben werden.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit eigene Lichtstimmungen zu programmieren. Voreingestellte Lichtstimmungen können nicht zufriedenstellend sein, eine eigene Programmierung sorgt für eine individuelle und maximale Flexibilität.

Die Entscheidung zwischen Pendel- oder Anbauleuchten unterliegt den Vorzügen des Nutzers. Während Anbauleuchten fixiert an der Decke montiert sind und wenig Spielraum für Veränderung bieten, sind Pendelleuchten in diesem Bereich flexibler aufgestellt. Je nach gewünschter Anforderung und persönlichen Vorlieben sind die Leuchten in ihrer Pendelhöhe anpassungsfähig. Die Höhe der Leuchte oder die Leuchte an sich kann ohne großen Aufwand geändert werden. Neue Leuchten lassen ein vollkommen neues Raumgefühl entstehen und können auf veränderte Nutzungen reagieren. <sup>68</sup>

---

<sup>68</sup> Zumtobel Lighting GmbH 2014, 9.

### 5.3.6 Zusammenfassende Bewertung

Die folgende Bewertung unterscheidet sich in allen sechs Kombinationen. Die Verwendung von Anbau- oder Pendelleuchten ist ausschlaggebend und wird daher separat für Standard-, Eco- und Eco Plus betrachtet. Auf der Skala gibt es Werte zwischen 1 und 5, wobei 5 die beste Bewertungsstufe darstellt.

Die Bewertung im Bereich der Sehleistung zeigt alle Varianten in den Aspekten Beleuchtungsniveau, Farbwiedergabeindex und Blendung sind gleich zu bewerten. Unterschiede im Farbspektrum sind zwischen LEDs und Leuchtstofflampen vorhanden. Bisher besitzt keine Lampe ein mit dem Tageslicht übereinstimmendes Farbspektrum. Aufgrund der Kontinuität sind die Varianten mit LEDs mit 4 Punkten, Varianten mit Leuchtstofflampen mit 3 Punkten zu bewerten.

Nicht nur der Tageslichtanteil, sondern auch die Bereitstellung von flimmerfreiem Licht haben Einfluss auf den Sehkomfort. Eine aussagekräftige Bewertung ist jedoch nur über das bestehende Leuchtdichteverhältnis im Raum zu treffen. Pendelleuchtenkonzepte setzen durch den direkten und indirekten Lichtanteil ein ebenmäßigeres Leuchtdichteverhältnis um und erhalten deshalb 4 Punkte. Die Version mit Anbauleuchten werden mit 3 Punkten bewertet. Eine Bewertung mit der maximalen Punktzahl würde zusätzlich weitere Lichtkomponenten enthalten, wie z. B. eine Akzentbeleuchtung.



Abbildung 39 – Standard - Anbau- und Pendelleuchten

Im Kriterium des Erscheinungsbildes wird lediglich zwischen Anbau- und Pendelleuchte unterschieden. Ausschlaggebend für eine bessere Bewertung der Pendelleuchten ist die Produktion von gleichzeitig indirektem und direktem Licht. Zusätzlich besteht eine weitreichendere Gestaltungsfreiheit bei abgehängten Leuchten. Aus diesen Gründen werden alle Varianten mit Pendelleuchten mit 5 und alle mit Anbauleuchten mit 4 Punkten bewertet.



Abbildung 40 – Eco - Anbau- und Pendelleuchten

Vitalität kann durch die Wahl der richtigen Farbtemperatur erreicht werden. Beide Lampentypen haben einen Wert von ungefähr 4.000 K und sind damit ideal für die Büronutzung geeignet. Durch den großen Vorteil der Steuerungstechnik in den Eco Plus - Varianten sind diese mit 5 Punkten zu bewerten. Die Steuerung sorgt für ein konstantes Beleuchtungsniveau und unterstützt den Nutzer in seiner Tätigkeit. Alle anderen Varianten erhalten 4 Punkte.



Abbildung 41 – Eco Plus - Anbau- und Pendelleuchten

Die größte Flexibilität bietet die Eco Plus - Variante in der Ausführung mit Pendelleuchten (5 Punkte). Varianten übergreifend sind Pendelleuchten angesichts ihrer flexiblen Nutzungsanpassung den Anbauleuchten vorzuziehen. Die selben Einstellungsmöglichkeiten lassen keine Unterscheidung zwischen der Standard und Eco - Variante zu. Version mit Anbauleuchten für Standard und Eco Variante erzielen jeweils 3 Punkte, die Eco Plus - Variante 4 Punkte. Ebenfalls 4 Punkte erhalten die Pendelleuchtenkonzepte der Standard und Eco - Variante.

## **Teil VI**

# **Verifizierung und Falsifizierung der Hypothesen**

Nach der ausführlichen Analyse der einzelnen Varianten in Bezug auf die Nachhaltigkeit müssen die Hypothesen aus Kapitel 3 auf ihre Richtigkeit überprüft werden.

### **Verifizierung Hypothese 1**

In Hypothese 1 wird davon ausgegangen, dass Beleuchtungskonzepte mit LED - Leuchten in der Produktzyklusanalyse ökologischer sind als Beleuchtungssysteme mit Leuchtstofflampen. In Abschnitt 5.1 wurden die einzelnen Faktoren des Produktzyklus genau untersucht. Die Bewertung ergab, dass LEDs durch ihre lange Lebensdauer und den geringeren Energieverbrauch während der Nutzung ökologischer sind als Leuchtstofflampen. Diese Hypothese kann damit bestätigt werden.

### **Falsifizierung Hypothese 2**

Der These zufolge amortisieren sich höhere Erstinvestitionskosten bei einer Beleuchtungsanlage mit LED - Technik bereits nach 3 - 5 Jahren. Die genauere Betrachtung zeigt, dass im Zeitraum von 20 Jahren eine wirtschaftliche Beleuchtung durch LEDs nicht gewährleistet ist. Eine Verifizierung der aufgestellten Hypothese ist nicht möglich, da die angesetzte Amortisationszeit nicht eingehalten werden kann. Der Zeitpunkt der Amortisation ist abhängig von den Betriebsstunden der Beleuchtungsanlage und einer Installation von Steuerungstechnik.

### **Verifizierung Hypothese 3**

LED - Leuchten sind durch ihre effizientere Energieverwertung, wirtschaftlicher als Leuchten mit Leuchtstofflampen. Die weitere Betrachtung der Beleuchtungsvarianten Eco und Eco Plus zeigt einen signifikanten Unterschied. Eingesetzte Steuerungstechnik in der Eco Plus Variante senkt den Energiebedarf um etwa 60%. In der Gesamtauswertung der Ergebnisse bestätigt sich diese These.

### **Verifizierung Hypothese 4**

Studien belegen, dass ein ausgewogenes Verhältnis direkter und indirekter Lichtanteile das Wohlbefinden und die Produktivität der Nutzer steigert. Die Hypothese kann nur aufgrund von externen Quellen als verifiziert gelten. Eine aussagekräftige Beurteilung im sozialen Bereich kann erst nach einer eigenen weiterführenden Analyse erstellt werden, welche jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit ist.



## **Teil VII**

# **Leitfaden**

Ziel des Leitfadens ist es eine praxisorientierte Methode zur nachhaltigen Lichtplanung zu erstellen. Die detaillierte Anleitung ermöglicht die Vergleichbarkeit von Beleuchtungskonzepten. Der Leitfaden erleichtert dem Anwender die Auswahl einer nachhaltigen und anwendungsbezogenen Beleuchtungsanlage für Büro- und Konferenzräume.

## 1. Zieldefinition

Welche Ökologischen Ziele sollen verwirklicht werden?

Welche Effizienzvorgaben werden an die Beleuchtung gestellt?

Welche Anforderungen und Bedürfnisse haben die Nutzer an die Beleuchtungsanlage?

## 2. Projektanalyse

Die Projektanalyse legt alle notwendigen Rahmenbedingungen und Kenndaten fest. Alle Daten werden für die weitere Bearbeitung benötigt.

### **Örtliche Gegebenheiten**

Standort

Stockwerk

Himmelsrichtung

Verschattung (durch äußere Einflüsse)

### **Möblierung**

Möbelliste

Abmessungen (L x B x H)

Oberflächenbeschaffenheit (Reflexionsgrad, Materialität)

Positionierung

### **Geometrie**

Raumgrößen (L x B x H)

Fensterflächen

### **Anforderungen an die Sehaufgabe**

Bestimmung der Mindestbeleuchtungsstärken (nutzungsabhängig)

Reflexionsgrade (Decke, Wand, Boden, Arbeitsfläche)

Farbwiedergabeindex

### **Nutzung**

Arbeitszeit (Uhrzeit, Bsp. 8.00 - 17.00 Uhr)

Arbeitstage

Arbeitsstunden pro Jahr

## **3. Beleuchtungskonzepte**

Nachfolgende Auflistung beschreibt die wesentlichen Parameter zur Festlegung der Beleuchtung. Anhand der gewählten Kriterien können mehrere unterschiedliche Konzepte entwickelt und nachträglich angepasst werden.

### **Leuchtmittelauswahl**

LEDs

Entladungslampen

### **Leuchtenauswahl**

Lichtverteilung (Direkt, Indirekt, Direkt/Indirekt)

Art der Leuchten (Anbauleuchten, Pendelleuchten, Spots, etc.)

Herstellerangaben (Leistung, Lichtausbeute, Leuchtenlichtstrom, etc.)

### **Steuerung**

Steuerungstechnik (vorhanden?)

Art der Steuerungstechnik (Bewegungsmelder, Lichtsensoren, Verschattungssteuerung, etc.)

#### **4. Simulation der Beleuchtung**

Anschließend die Eingabe der Daten zur Berechnung in ein Simulationsprogramm. Programme wie z.B. „DIALux“ oder „Relux“ können zur Tageslicht- und Leuchtenberechnung verwendet werden. Als Resultat definiert das Programm Anzahl und Leuchtenstruktur der betrachteten Räume. Eine manuelle Anpassung der Parameter bei unzureichenden oder nicht zufriedenstellenden Ergebnissen ist möglich.

#### **5. Nachhaltigkeitsbewertung**

Die Beleuchtungskonzepte werden anhand der unten aufgeführten Aspekte der Nachhaltigkeit bewertet und anschließend verglichen. Die ganzheitliche Untersuchung umfasst Kriterien der Ökologie, der Ökonomie und dem Sozialen.

##### **Ökologischer Vergleich**

Der Ökologische Teil betrachtet den kompletten Produktzyklus der Leuchten und führt zusätzlich eine Tageslichtberechnung durch.

Tageslicht (Tageslichtverlauf, Betriebsstunden, notwendigen Kunstlichtanteil)

Herstellung (Temperaturabhängigkeit, Herstellungsenergie)

Nutzung (Nutzenergie, Lichtstrom, Lebenszeit, Einflussfaktoren)

Wartung (Wartungsfaktor, Neuwert)

Recycling (Umweltverträglichkeit, Recyclingverfahren)

##### **Ökonomischer Vergleich**

Bestandteil der ökonomischen Bewertung sind wirtschaftliche Faktoren der ausgewählten Beleuchtungskonzepte.

Energieverbrauch

Systemkosten (Erstinvestitions-, Betriebs-, Instandhaltungskosten)

Amortisation (in Abhängigkeit des Nutzungszeitraumes)

Lampennutzung (Lichtverteilungskurve, Lichtkegel)

Effizienz (Lichtstrom, Betriebswirkungsgrad, Lichtausbeute)

## **Sozialer Vergleich**

Kriterien die das Wohlbefinden und die Produktivität der Nutzer beeinflussen.

Sehleistung (Beleuchtungsniveau, Reflexion, Lichtqualität, Blendung)

Sehkomfort (Leuchtdichteverhältnis, Schattigkeit, Sichtbezug)

Erscheinungsbild (Design, Lichtrichtung)

Vitalität (Farbtemperatur, Lichtstimmung)

Individualität/Flexibilität (Nutzerfreundlichkeit, Variabilität)

## **6. Vergleich und Revision**

Die Nachhaltigkeitsbewertung liefert die Grundlage des weiterführenden Vergleichs. Stärken und Schwachstellen jeder Variante werden konkretisiert. Ebenfalls wird eine Überprüfung der in Schritt 1 vorgenommenen Zieldefinitionen vorgenommen. Gegebenenfalls sind Anpassung der Parameter notwendig. Der Prozess kann bis zur Zielführung beliebig oft wiederholt werden. Abbildung 42 liefert den Graphischen Leitfaden, zur erleichterten Orientierung.

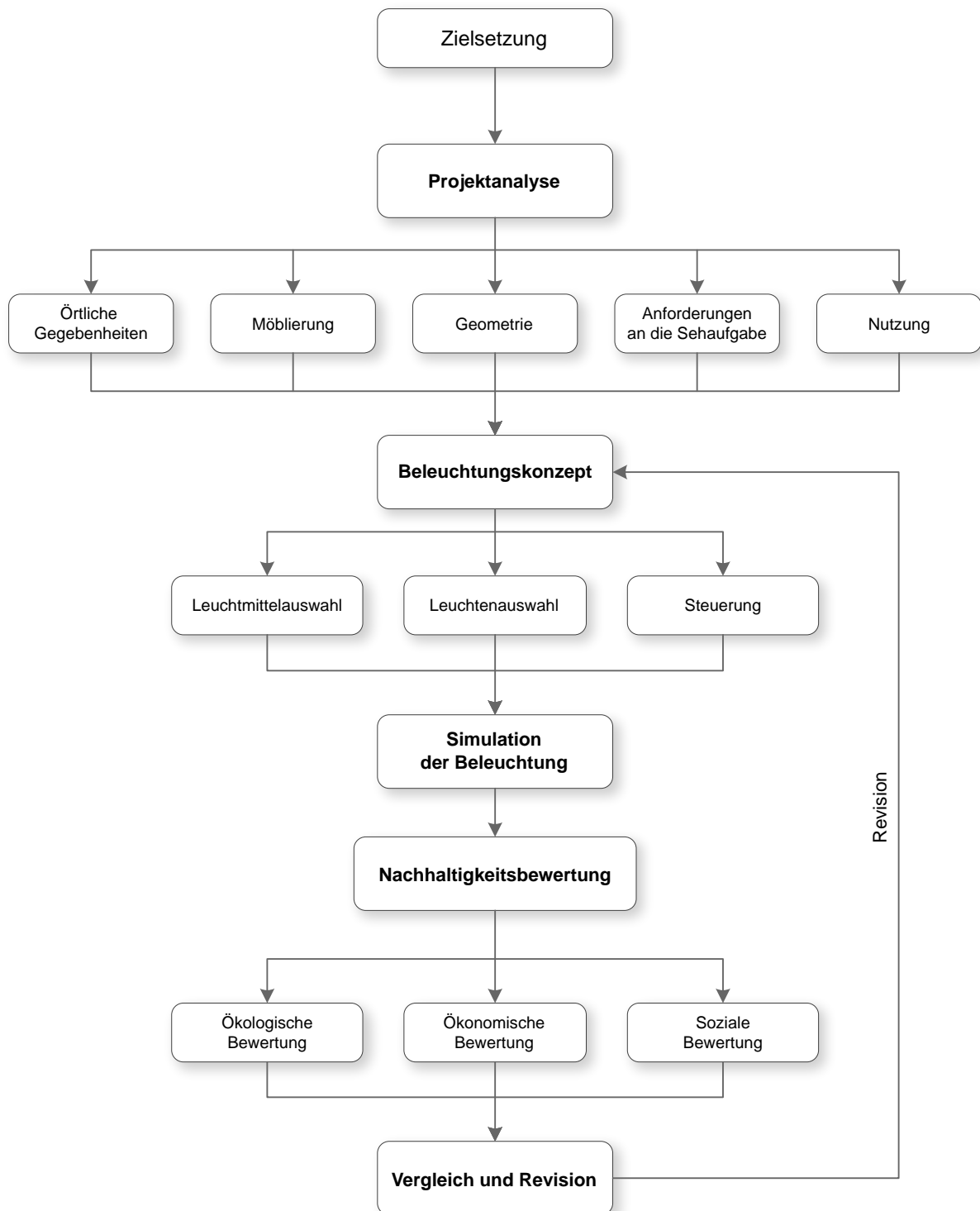


Abbildung 42 – Graphischer Leitfaden

## **Teil VIII**

# **Fazit und Ausblick**

Abschließend ist festzustellen, nachhaltige Lichtplanung ist sehr komplex, sinnvoll, aber auch differenziert zu betrachten. Die Gegenüberstellung der Lichtquellen lässt erkennen, dass LEDs einen ökologischeren Produktzyklus als Leuchtstofflampen aufweisen. Außerdem haben LEDs hat einen wesentlichen Einfluss auf die Energiebilanz. Für die Auswahl der Beleuchtungsanlage sind jedoch die Gesamtkosten essentiell. Faktoren wie Nutzungszeit und Betriebsstunden sind ausschlaggebend für die Rentabilität und die Eignung eines Beleuchtungssystems. Jedes Konzept muss individuell an Gebäudesituationen und Nutzerbedürfnisse angepasst werden. Eine frühzeitige Zusammenarbeit zwischen Projektverantwortlichen und Lichtplanern ist für die Umsetzung eines ganzheitlichen Gebäudekonzept angebracht.

Durch eine voraussichtliche Leistungssteigerung und einer Kostenminderung in den nächsten Jahren, wächst der Marktanteil der LED fortwährend. Die Industrie prognostiziert, dass die Entwicklung der OLED in den kommenden Jahren soweit vorangeschritten sein wird, dass sie für den breiten Markt erschwinglich wird. Der Anwendungsbereich der OLEDs wird durch die fortlaufende Forschung vielseitiger. Tapeten aus OLEDs für Büroräume als Akzent- oder Ambientebeleuchtung befinden sich in der Entwicklung.

Als weiterführende Betrachtung wäre die Integration eines Sonnenschutzsystems interessant. Das Zusammenspiel zwischen Beleuchtungssystem und Sonnenschutz könnte hierbei genauer untersucht und Abhängigkeiten herausgefiltert werden. Zur Belegung der Ergebnisse im sozialen Bereich wäre es sinnvoll eine Versuchsreihe, die Aufschluss über die Auswirkungen der Leuchtmittel auf den Nutzer gibt, durchzuführen.

In Bezug auf die Nachhaltigkeit ist die Entwicklung eines ganzheitliches Konzept für Gebäude erforderlich. Ausreichend ist nicht nur die autarke Betrachtung der Teilbereiche sondern die Verknüpfung der Bereiche untereinander. Das intelligente Büro der Zukunft verbindet die Lichtsteuerung mit den vorhandenen elektronischen Geräten. Der Standby - Modus des Computers dimmt die Beleuchtung bis hin zu einer kompletten Abschaltung des Beleuchtungssystems. Das intelligente System reguliert individuell für jeden Arbeitsplatz die notwendige Energie. Das reduziert Kosten und begünstigt eine längere Lebensdauer der Anlage.



## **Teil IX**

# **Fehlerbetrachtung**

In diesem Teil der Arbeit werden mögliche Fehlschlüsse erörtert. Während der Auswertung wurde darauf geachtet Unstimmigkeiten zu vermeiden, oder die Fehlerquote so gering wie möglich zu halten.

Die in der Simulation entwickelten Grundrisse mit den zugehörigen Kennwerten wurden in DIALux eingegeben und auf ihre Fehlerfreiheit überprüft. Die Eingaben führten zu einer unzureichenden Tageslichtberechnung im Winter. Im Tagesverlauf verursachte das Himmelsmodell „bedeckter Himmel“ Beleuchtungsstärken von 0 Lux auf der Sehaufgabe. Die Problematik wird durch die Anpassung des Himmelsmodells um 8.00 Uhr auf „klarerer Himmel“ bereinigt. Von einer Veränderung der Endergebnisse ist nicht auszugehen, dies kann jedoch nicht garantiert werden.

Die Auswertung des Versuchs baut auf einer stark vereinfachten Tageslichtberechnung auf. Die Berechnung von vier festgelegten Tagen im Jahr ist nur bedingt ausreichend. Außerdem wurden alle Berechnungen nur für eine Himmelsrichtung durchgeführt. Die Tageslichtberechnung sollte eine Vergleichsmöglichkeit für die Simulationsräume schaffen. Für eine aussagekräftige Beurteilung im Einzelfall ist eine Jahresberechnung unerlässlich. Die Berücksichtigung der Himmelsrichtung wird durch die Gebäudeausrichtung vorgegeben. Die vereinfachte Tageslichtberechnung zeigt eine Tendenz in den Auswertungsergebnissen an. Der einheitliche Aufbau erleichtert es allen Anwendern den Leitfaden nachzuvollziehen und eine eigenständige Analyse projektbezogen umzusetzen.

Der fehlende Sonnenschutz kann als mögliche Fehlerquelle angesehen werden. Hohe Beleuchtungsstärken über 2.000 Lux führen zu starken Blendungen. Der Versuch legt sein Augenmerk auf die Umsetzung von Mindestanforderungen und Behaglichkeitsempfindungen. Sonnenschutz ist im betrachteten Variantenvergleich irrelevant. Berücksichtigung findet der Sonnenschutz in einem ganzheitlichen Gebäudekonzept.

Im Bereich der Systemkosten wurde das derzeit gültige Preisniveau angesetzt. In der Bewertung wird ein prozentualer Vergleich vorgenommen, daher sind Richtwerte ausreichend. Kostenveränderungen werden in dieser Auswertung nicht berücksichtigt. Die Kosten für Steuerungstechnik wurden nur überschlägig ermittelt. Die Kostentendenz und die Analyse der Konzepte untereinander ist weiterhin gültig, lediglich eine Aussage über vollständige Gesamtkosten konnte nicht getroffen werden.

Diese Auswertung der sozialen Komponente beruht auf Fakten und Bewertungen aus abgeschlossenen Publikationen. Selbstständige Versuchsreihen zur Bestätigung der Annahmen wurde nicht vorgenommen, da dies nicht Bestandteil der Bearbeitung war. Die Ergebnisse geben einen Überblick, sind jedoch kritisch zu betrachten.

## Literaturverzeichnis

- [1] BAYRISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT: *Energiesparlampe und LED: Energieeffiziente Beleuchtung*, Augsburg 2014.
- [2] BÜROWISSEN.DE: *Beleuchtung für Bildschirmarbeitsplätze*, <http://www.buerowissen.de/Licht/Beleuchtung-von-Bildschirmarbeitsplatzen/>, Stand: 10.09.2015.
- [3] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG: *Organische Lichtemittierende Systeme auf Basis von energie- und kosteneffizienten Materialien und Prozessen (OLYMP)*, o. O. 2013.
- [4] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE: *Energie in Deutschland*, Berlin 2013.
- [5] DAYLIGHTING.DE: *Tageslicht ist die edelste Form der Solarenergie*, [www.daylighting.de](http://www.daylighting.de), Stand: 18.08.2015.
- [6] ERCO: *Lichtsteuerungssysteme - Leuchten und Lichtszenen verwalten*, <http://www.erco.com/guide/lighting-control/lighting-control-systems-2588/de/>, Stand: 07.07.2015.
- [7] ERCO: *Reflexion*, <http://www.erco.com/guide/glossary/r/reflection-1995/de/>, Stand: 01.10.2015.
- [8] ERCO: *Sensoren - Umgebungseinflüsse erfassen*, <http://www.erco.com/guide/lighting-control/sensors-2611/de/>, letzter Zugriff 03.07.2015.
- [9] ERCO: *Größen und Einheiten*, <http://www.erco.com/guide/lighting-technology/dimensions-units-5878/de/pkm1842>, Stand: 01.10.2015.
- [10] ERCO: *Wartungsfaktor*, <http://www.erco.com/guide/simulation-and-calculation/maintenance-factor-2713/de/content-1.php>, Stand: 23.08.2015.
- [11] ETAP BELEUCHTUNG: *Der Wartungsfaktor der LED Beleuchtung*, Leverkusen 2013.
- [12] EUROPÄISCHE UNION: *Richtlinie 2012/19/EU Des Europäischen Parlaments und des Rates*, o. O. 2012.
- [13] GLOBAL LIGHTZ: *LEDs verbrauchen laut einer Studie während der Produktion mehr Energie als Kaltkathodenlampen*, <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/opto/articles/266157/>, Stand: 26.09.2015.

- [14] GRÜNSPAR - GREEN SMART SOLUTIONS: *Green Smart Solutions*, <http://www.gruenspar.de/blog/>, Stand: 01.10.2015.
- [15] KNX DEUTSCHLAND: *KNX eine langfristige und nachhaltige Investitions für Bauherrn und Investoren*, <http://www.knx.de/knx-de/bauen-mit-knx/index.php>, Stand: 10.09.2015.
- [16] LICHT.DE: *licht.wissen 20*, Frankfurt am Main 2014.
- [17] LICHT.DE: *Lichtfarben und Farbwiedergabe*, <http://www.licht.de/de/licht-fuer-zuhause/licht-und-raum/licht-und-farbe/lichtfarben-und-farbwiedergabe/>, Stand: 01.09.2015.
- [18] LICHT.DE: *Lampen: Lange Lebensdauer spart Kosten*, <http://www.licht.de/de/trends-wissen/beleuchtungstechnik/lampen/lebensdauer/>, Stand: 07.08.2015.
- [19] LIGHTCYCLE: *Verwertbare Bestandteile von Altlampen*, <http://www.lightcycle.de/ruecknehmer/altlampen-recycling.html>, Stand: 07.08.2015.
- [20] LIGHTCYCLE: *Wie genau funktioniert das Altlampen-Recycling?*, <http://www.lightcycle.de/ruecknehmer/altlampen-recycling.html> Stand: 14.08.2015.
- [21] LIGHTCYCLE: *Rechtliche Grundlagen*, <http://www.lightcycle.de/ruecknehmer/rechtliche-grundlagen.html>, Stand: 14.08.2015.
- [22] LIGHTMAG: *Lebensdauer von Leuchtmitteln*, <http://www.light11.de/lightMAG/lebensdauer-von-leuchtmitteln/>, Stand: 25.08.2015.
- [23] LIGHTMAG: *Leuchtmittel im Vergleich*, <http://www.light11.de/lightMAG/vergleich/>, Stand: 22.09.2015.
- [24] OESTERREICHISCHE ENERGIEAGENTUR - AUSTRIAN ENERGY AGENCY: *Leitfaden für Energieaudits von Beleuchtungssystemen*, Wien o.J.
- [25] OSRAM: *DALI - Profi - Schnittstelle für alle Beleuchtungskomponenten*, [http://www.osram.de/osram\\_de/news-und-wissen/lichtmanagementsysteme/technologien/dali/index.jsp](http://www.osram.de/osram_de/news-und-wissen/lichtmanagementsysteme/technologien/dali/index.jsp), Stand: 02.09.2015.
- [26] OSRAM: *OIYMP - Projekt soll OLED so effizient machen wie LED*, [http://www.osram.de/osram\\_de/presse/pressemitteilungen/\\_fachpresse/2013/olymp-projekt-soll-oled-so-effizient-machen-wie-led/index.jsp](http://www.osram.de/osram_de/presse/pressemitteilungen/_fachpresse/2013/olymp-projekt-soll-oled-so-effizient-machen-wie-led/index.jsp), Stand: 17.08.2015.
- [27] OSRAM: *LED bei OSRAM - Technologie der Zukunft*, [http://www.osram.de/osram\\_de/news-und-wissen/led-home/professionelles-wissen/index.jsp](http://www.osram.de/osram_de/news-und-wissen/led-home/professionelles-wissen/index.jsp), Stand: 18.08.2015.

- [28] OSRAM: *LED-Lebensdauer: langlebige Lichtqualität*, [http://www.osram.de/osram\\_de/news-und-wissen/led-home/professionelles-wissen/led-grundlagen/lebensdauer/index.jsp](http://www.osram.de/osram_de/news-und-wissen/led-home/professionelles-wissen/led-grundlagen/lebensdauer/index.jsp), Stand: 26.09.2015.
- [29] OSRAM: *Osram baut effizienteste LED-Lampe der Welt*, [http://www.osram.de/osram\\_de/presse/pressemeldungen/\\_fachpresse/2014/osram-baut-effizienteste-led-lampe-der-welt/index.jsp](http://www.osram.de/osram_de/presse/pressemeldungen/_fachpresse/2014/osram-baut-effizienteste-led-lampe-der-welt/index.jsp), Stand: 22.09.2015.
- [30] OSRAM: *Energieeffiziente und bewährte Technologie - dimmbare Betriebsgeräte von OSRAM*, [http://www.osram.de/osram\\_de/news-und-wissen/lichtmanagementsysteme/technologien/1...10v/index.jsp](http://www.osram.de/osram_de/news-und-wissen/lichtmanagementsysteme/technologien/1...10v/index.jsp), Stand: 13.07.2015.
- [31] OSRAM SEMICONDUCTORS: *Life Cycle Assessment of Illuminants*, Regensburg 2009.
- [32] PASCHOTTA, DR. RÜDIGER: *Glühlampe*, <https://www.energie-lexikon.info/gluehlampe.html>, Stand: 26.09.2015.
- [33] PAULMANN: *Licht zum Wohlfühlen*, <http://www.paulmann.com/de/de/rund-ums-licht/lichtwissen/lichtfarbe.html>, letzter Zugriff 01.10.2015.
- [34] REGIOLUX GMBH: *Effiziente Beleuchtung*, Königsberg o.J.
- [35] RICHTERS, CHRISTIAN: *Innovationsoffensive Office 21*, o. O. 2014.
- [36] RIESTE LICHT GMBH: *Die Wirkung der Lichtfarbe auf den Menschen!*, <http://www.rieste.at/Lichtplanung/wirkung-lichtfarbe-auf-den-mensch.html>, Stand: 07.08.2015.
- [37] SASABE, DR. HISAHIRO/KIDO, PROF. DR. JUNJI: *Neue Lichtwellen*, Japan 2014.
- [38] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Preise - Daten zur Energieentwicklung*, Wiesbaden 2015.
- [39] STROM-REPORT.DE: *Strompreise in Deutschland*, <http://strom-report.de/strompreise/>, Stand: 22.09.2015.
- [40] TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN: *Tageslichtnutzung in Gebäuden IV*, [https://www.li.tu-berlin.de/menue/forschung/forschungsprojekte/laufende\\_projekte527511](https://www.li.tu-berlin.de/menue/forschung/forschungsprojekte/laufende_projekte527511), Stand: 18.08.2015.
- [41] THEBEN GMBH: *theMova P360-100 UP WH*, o. O. o. J.
- [42] UMWELTBUNDESAMT: *Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen*, <http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen>, Stand: 26.09.2015.

- [43] UMWELTBUNDESAMT: *Energieverbrauchskennzeichnung*, <http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energiesparen/energieverbrauchskennzeichnung>, Stand: 01.10.2015.
- [44] VÖLKER, STEPHAN/SCHUMACHER, HEIKE: *Jahresbericht 2013*, o. O. 2013.
- [45] ZUMTOBEL GMBH: *Dimlight*, Dornbirn 2008.
- [46] ZUMTOBEL GMBH: *dim2save*, Dornbirn 2011.
- [47] ZUMTOBEL GMBH: *Licht-Handbuch für den Praktiker*, Dornbirn 2013.
- [48] ZUMTOBEL GMBH: *ECOOS*, Dornbirn 2014.
- [49] ZUMTOBEL LIGHTNING GMBH: *Wahrgenommene Lichtqualität im Büro*, Dornbirn 2014.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Titelbild[14] .....	1
Abbildung 2	Energieverbrauch in kWh (25.000 h) .....	9
Abbildung 3	CO <sub>2</sub> - Emissionen in Kg (25.000 h) .....	9
Abbildung 4	Vergleich Ansteuerung analog - digital .....	12
Abbildung 5	Lichtkontrollsystem .....	12
Abbildung 6	Grundriss und Rendering Konferenz- und Besprechungsraum in Blockform	25
Abbildung 7	Grundriss und Rendering Einzelbüro .....	26
Abbildung 8	Grundriss und Rendering Gruppenbüro .....	26
Abbildung 9	Grundriss und Rendering Großraumbüro .....	27
Abbildung 10	Struktur der LED - Pendelleuchten im Konferenz- und Besprechungsraum .	36
Abbildung 11	Struktur der LED - Pendelleuchten im Einzelbüro .....	37
Abbildung 12	Struktur der LED - Pendelleuchten im Gruppenbüro .....	37
Abbildung 13	Struktur der LED - Pendelleuchten im Großraumbüro .....	38
Abbildung 14	Sehaufgabe und Leuchtengruppe im Konferenzraum .....	45
Abbildung 15	Tageslichtverlauf Konferenzraum .....	45
Abbildung 16	Temperaturunterschied T16 / T26 .....	47
Abbildung 17	Lichtstromrückgang der LEDs und T16 - Lampen .....	51
Abbildung 18	Verwertbare Bestandteile von Altlampen .....	53
Abbildung 19	Standard - Anbau- und Pendelleuchten .....	55
Abbildung 20	Eco - Anbau- und Pendelleuchten .....	56
Abbildung 21	Eco Plus - Anbau- und Pendelleuchten .....	56

Abbildung 22	Diagramm Verhältnis von elektrischer Leistung zur Lichtmenge .....	58
Abbildung 23	Dimmkurve der LED - Pendelleuchten .....	59
Abbildung 24	Energieverbrauch pro Jahr im Konferenzraum .....	61
Abbildung 25	Erstinvestitionskosten Konferenzraum .....	63
Abbildung 26	Betriebskosten pro Jahr im Konferenzraum .....	64
Abbildung 27	Gesamtsystemkosten im Konferenzraum - 20 Jahre .....	66
Abbildung 28	Gesamtsystemkosten im Einzelbüro - 20 Jahre .....	67
Abbildung 29	Gesamtsystemkosten im Gruppenbüro - 20 Jahre .....	67
Abbildung 30	Gesamtsystemkosten im Großraumbüro - 20 Jahre.....	68
Abbildung 31	Amortisation Konferenzraum Pendelleuchten - 20 Jahre.....	69
Abbildung 32	Lichtverteilungskurve LED- und Leuchtstoff - Leuchte .....	70
Abbildung 33	Lichtkegel LED- und Leuchtstoff - Leuchte .....	71
Abbildung 34	Standard - Anbau- und Pendelleuchten .....	74
Abbildung 35	Eco - Anbau- und Pendelleuchten .....	75
Abbildung 36	Eco Plus - Anbau- und Pendelleuchten .....	75
Abbildung 37	Farbspektren .....	78
Abbildung 38	Beispiele für Lichtstimmungen im Konferenzraum .....	82
Abbildung 39	Standard - Anbau- und Pendelleuchten .....	85
Abbildung 40	Eco - Anbau- und Pendelleuchten .....	86
Abbildung 41	Eco Plus - Anbau- und Pendelleuchten .....	86
Abbildung 42	Graphischer Leitfaden .....	95



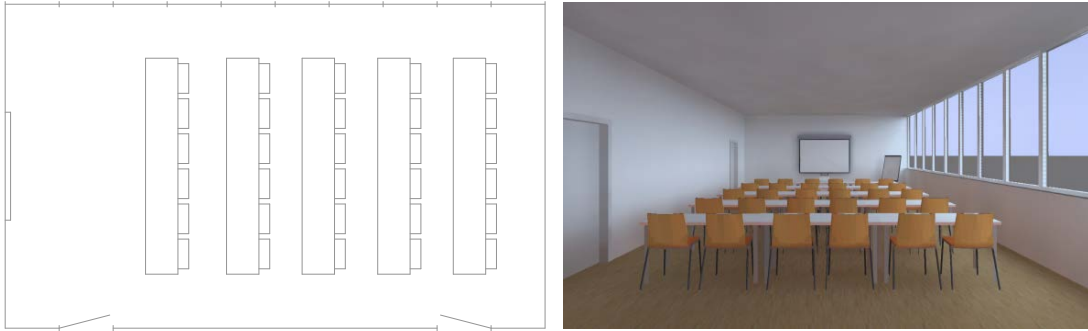
## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Vergleich Lichtausbeute - Farbwiedergabe .....	6
Tabelle 2	Lebensdauer .....	7
Tabelle 3	Örtliche Gegebenheiten .....	19
Tabelle 4	Flächen am Arbeitsplatz .....	20
Tabelle 5	Möblierung .....	21
Tabelle 6	Grundflächen Einzel-, Gruppen-, Großraumbüro .....	22
Tabelle 7	Grundfläche Konferenz- und Besprechungsraum .....	22
Tabelle 8	Lichte Raumhöhe .....	23
Tabelle 9	Fensterflächen .....	24
Tabelle 10	Beleuchtungsstärke .....	28
Tabelle 11	Reflexionsgrad .....	29
Tabelle 12	Farbwiedergabeindex .....	30
Tabelle 13	Nutzerverhalten .....	31
Tabelle 14	Beleuchtungsvarianten .....	32
Tabelle 15	Kenndaten - Anbauleuchte Ausführung Leuchtstofflampe / LED .....	34
Tabelle 16	Kenndaten - Pendelleuchte Ausführung Leuchtstofflampe / LED .....	35
Tabelle 17	Anzahl Leuchten .....	36
Tabelle 18	Kenndaten - Steuerungstechnik .....	39
Tabelle 19	Anzahl Steuerungstechnikmodule .....	40
Tabelle 20	Konstruktion .....	41
Tabelle 21	Tageslichtdaten .....	42

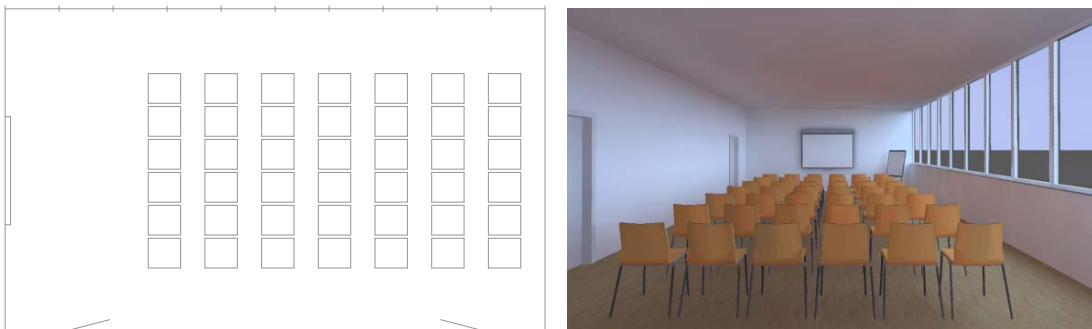
Tabelle 22	Arbeitstage und Betriebsstunden der Beleuchtung .....	46
Tabelle 23	Errechnung der Leistung im Herbst - Tagesverlauf .....	59
Tabelle 24	Gesamtleistung pro Jahr .....	60
Tabelle 25	Listenpreise .....	62
Tabelle 26	Austauschintervall .....	65
Tabelle 27	Instandhaltungskosten .....	65
Tabelle 28	Lichtstrom auf der Sehaufgabe .....	72
Tabelle 29	Lichtfarben künstlicher Lichtquellen .....	81

## Anlage

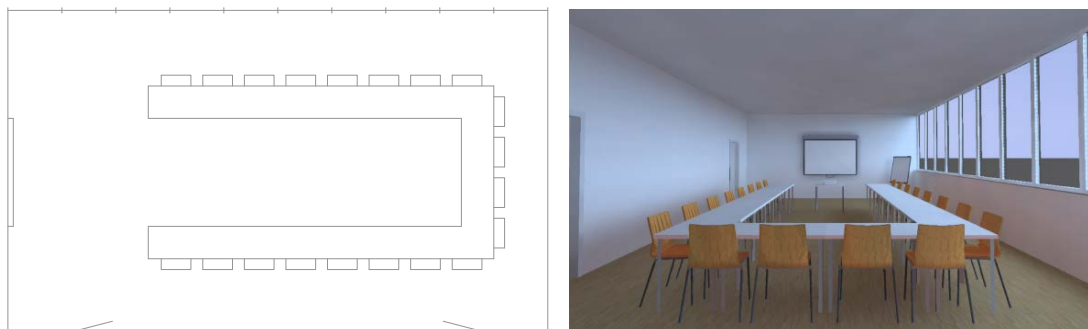
*Anlage 1 – Parlamentarische Bestuhlung im Konferenzraum*



*Anlage 2 – Reihenbestuhlung im Konferenzraum*



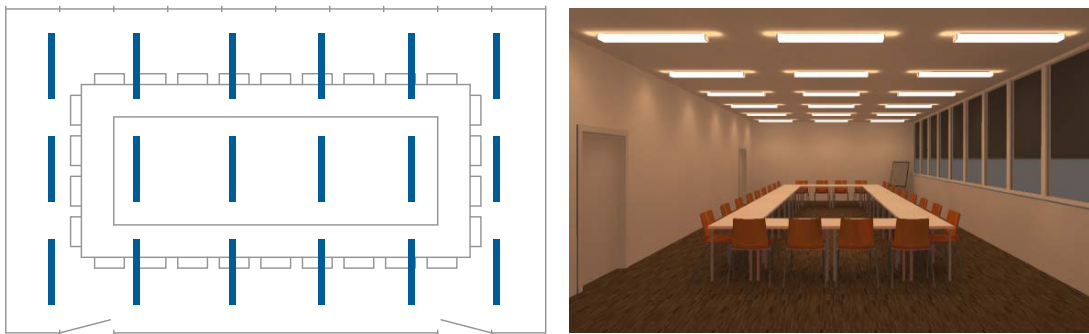
*Anlage 3 – U-Form Bestuhlung im Konferenzraum*



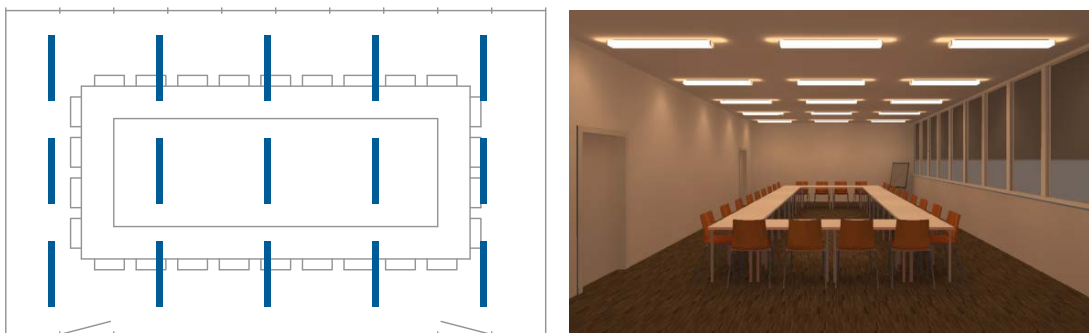
*Anlage 4 – Struktur der Leuchtstoff - Pendelleuchten im Konferenzraum (Blockform)*



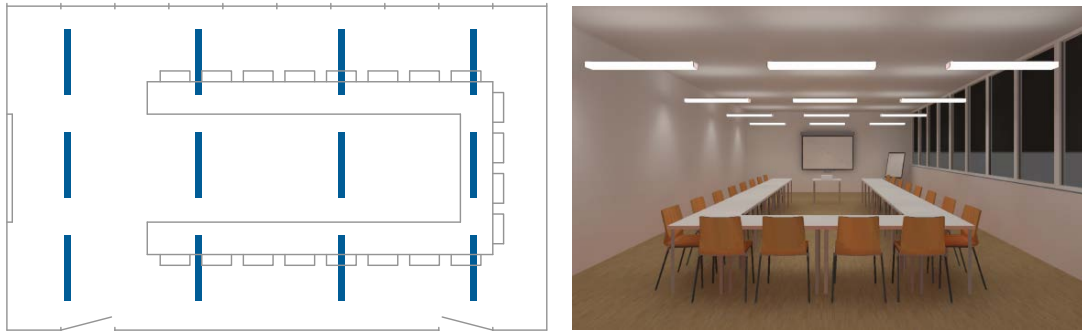
*Anlage 5 – Struktur der LED - Anbauleuchten im Konferenzraum (Blockform)*



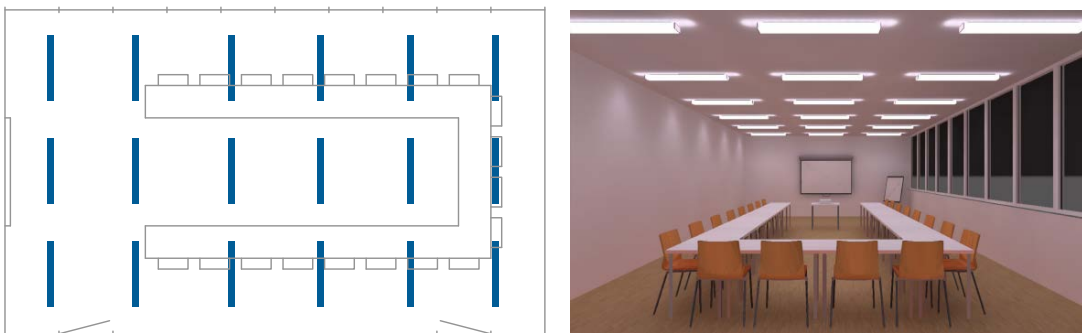
*Anlage 6 – Struktur der Leuchtstoff - Anbauleuchten im Konferenzraum (Blockform)*



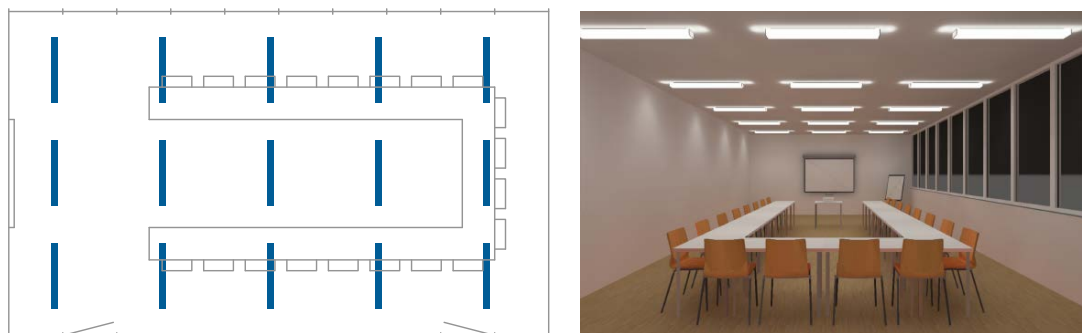
*Anlage 7 – Struktur der Leuchtstoff - Pendelleuchten im Konferenzraum (U-Form)*



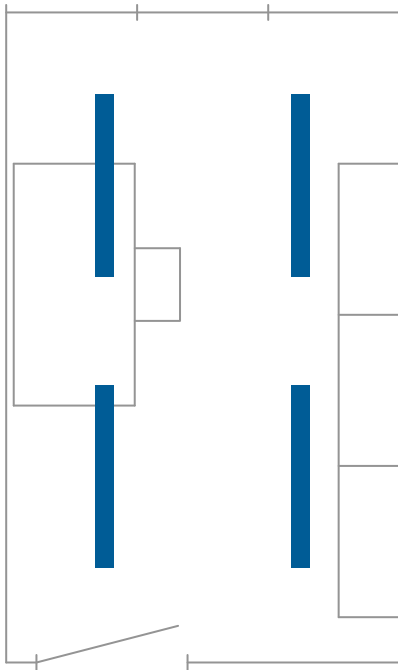
*Anlage 8 – Struktur der LED - Anbauleuchten im Konferenzraum (U-Form)*



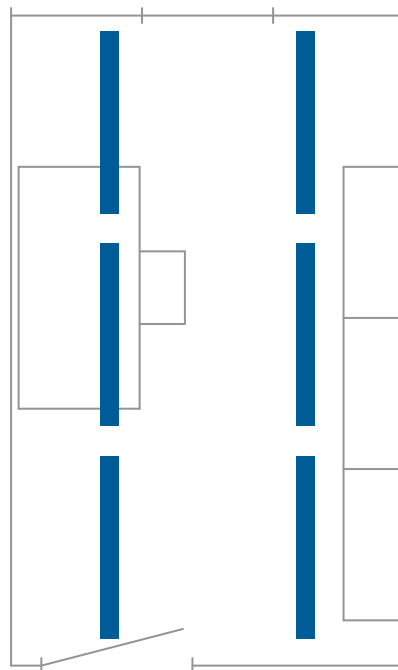
*Anlage 9 – Struktur der Leuchtstoff - Anbauleuchten im Konferenzraum (U-Form)*



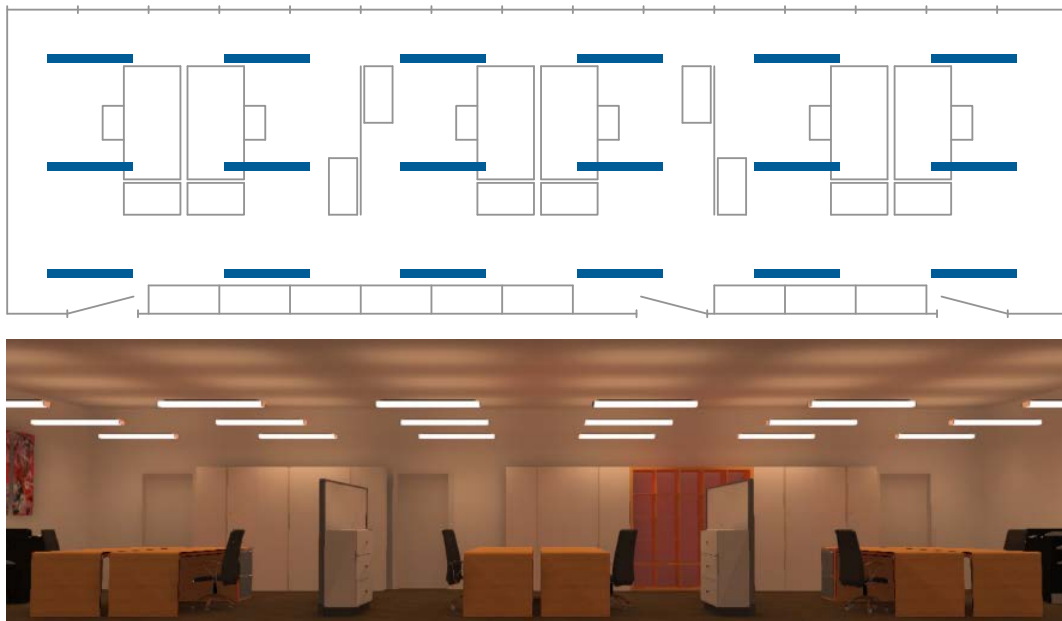
*Anlage 10 – Struktur der Leuchtstoff - Pendelleuchten im Einzelbüro*



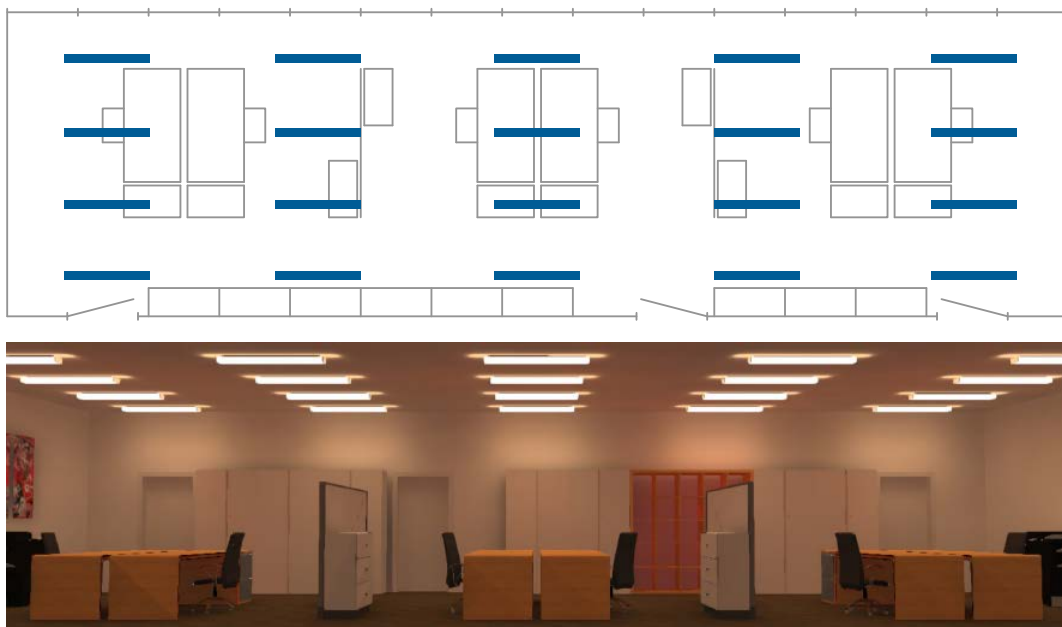
*Anlage 11 – Struktur der LED/Leuchtstoff - Anbauleuchten im Einzelbüro*



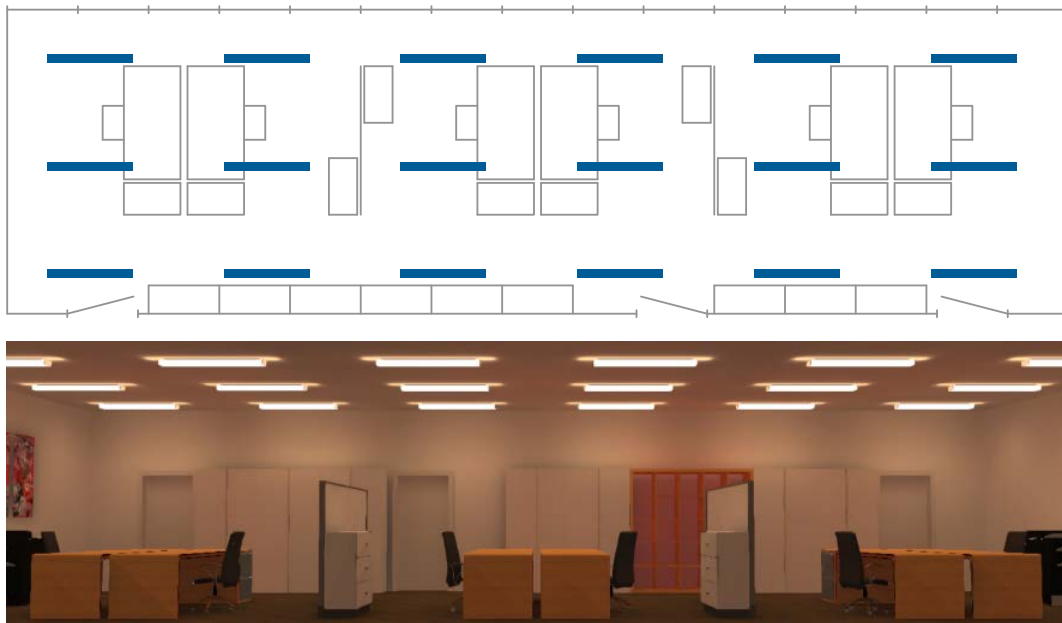
*Anlage 12 – Struktur der Leuchtstoff - Pendelleuchten im Gruppenbüro*



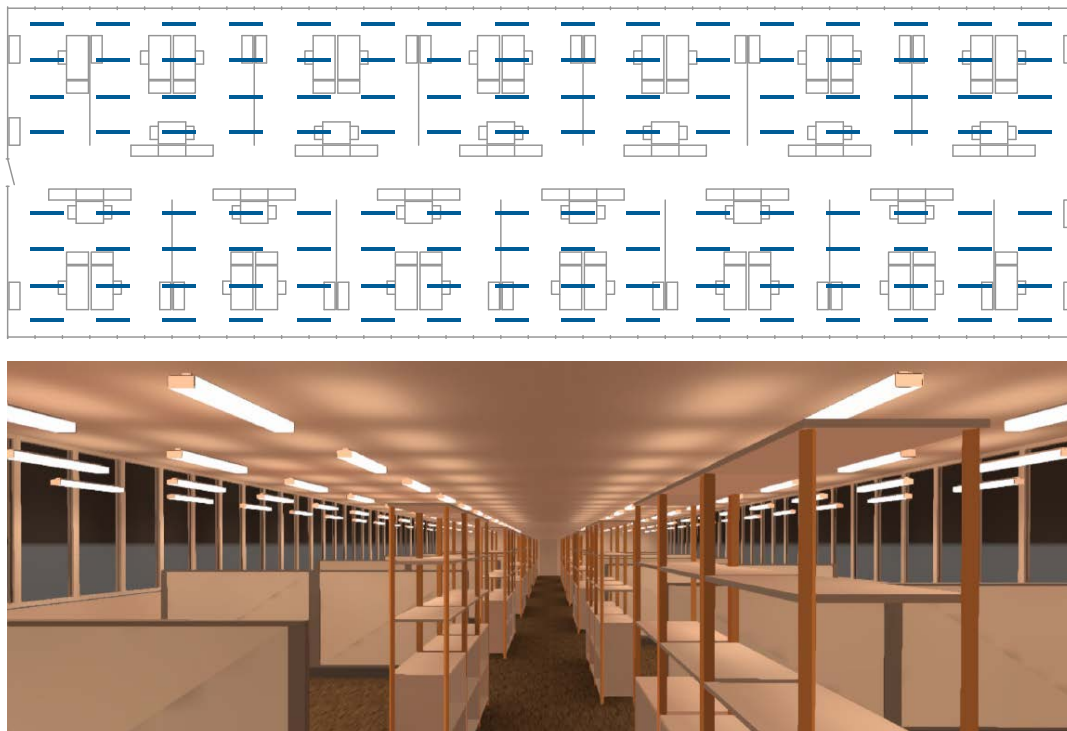
*Anlage 13 – Struktur der LED - Anbauleuchten im Gruppenbüro*



*Anlage 14 – Struktur der Leuchtstoff - Anbauleuchten im Gruppenbüro*

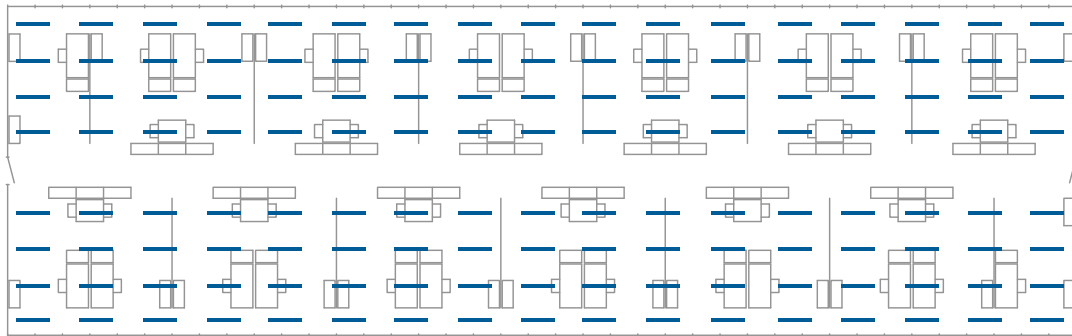


*Anlage 15 – Struktur der Leuchtstoff - Pendelleuchten im Großraumbüro*

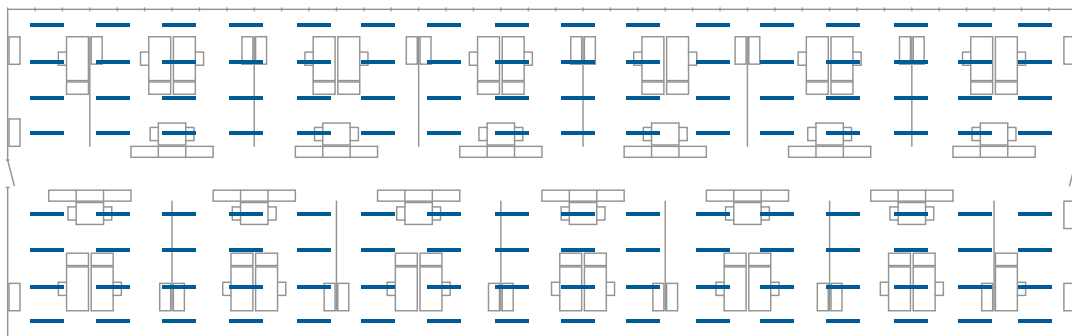




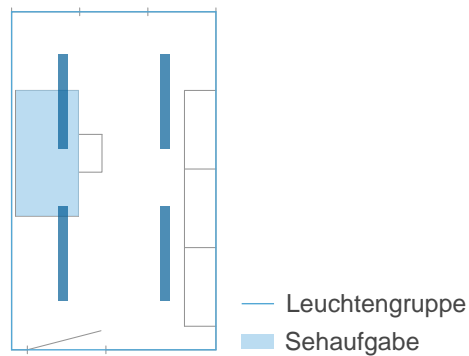
*Anlage 16 – Struktur der LED - Anbauleuchten im Großraumbüro*



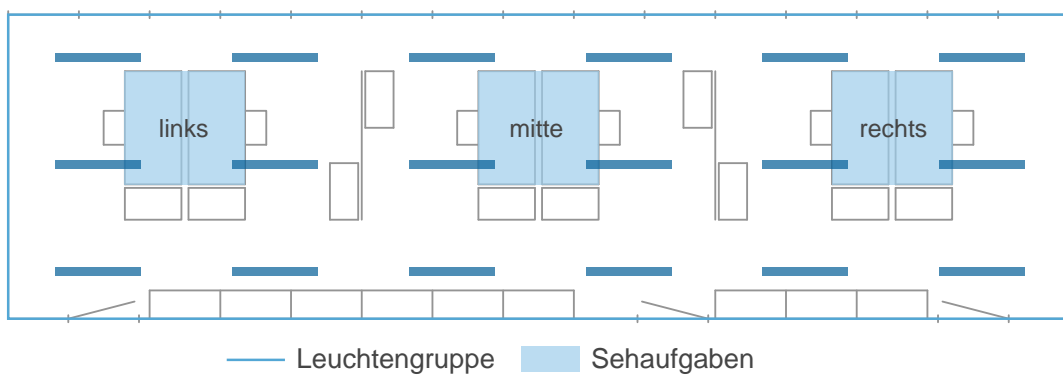
*Anlage 17 – Struktur der Leuchtstoff - Anbauleuchten im Großraumbüro*



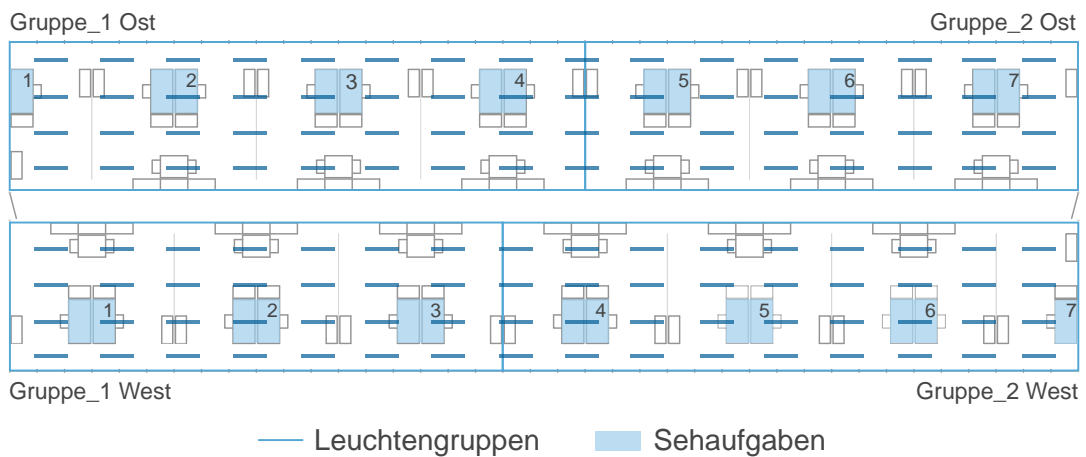
Anlage 18 – Einteilung Leuchtengruppen / Festlegung der Sehaufgabe im Einzelbüro



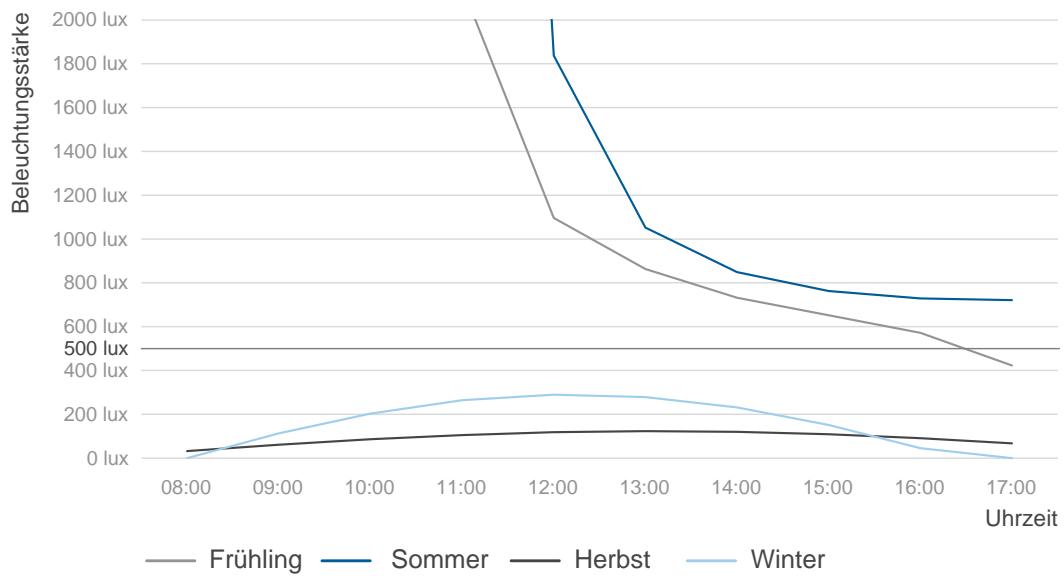
Anlage 19 – Einteilung Leuchtengruppen / Festlegung der Sehaufgabe im Gruppenbüro



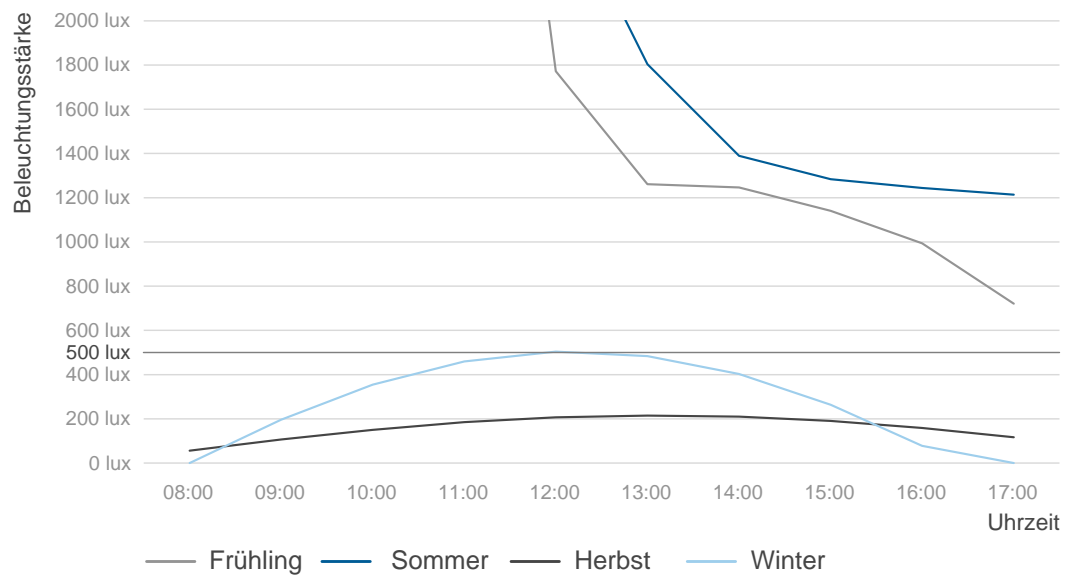
Anlage 20 – Einteilung Leuchtengruppen / Festlegung der Sehaufgabe im Grossraumbüro



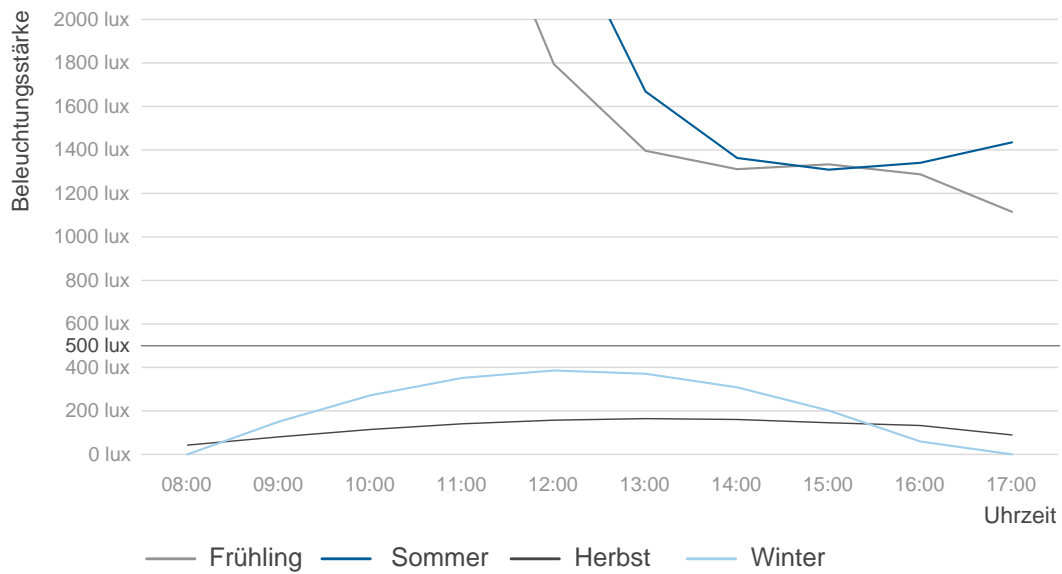
*Anlage 21 – Tageslichtberechnung im Einzelbüro*



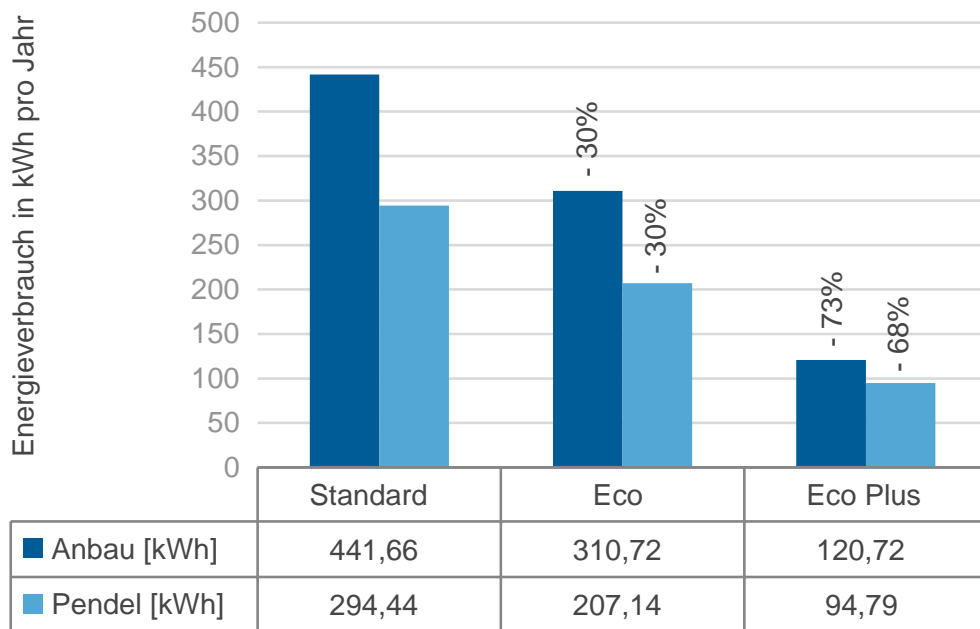
*Anlage 22 – Tageslichtberechnung im Gruppenbüro*



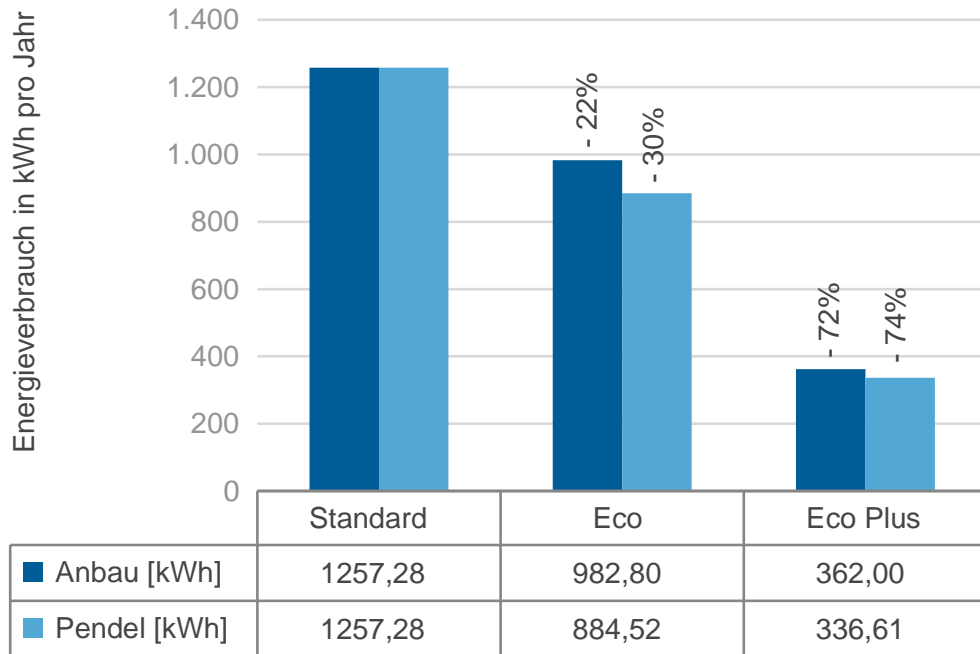
Anlage 23 – Tageslichtberechnung im Grossraumbüro



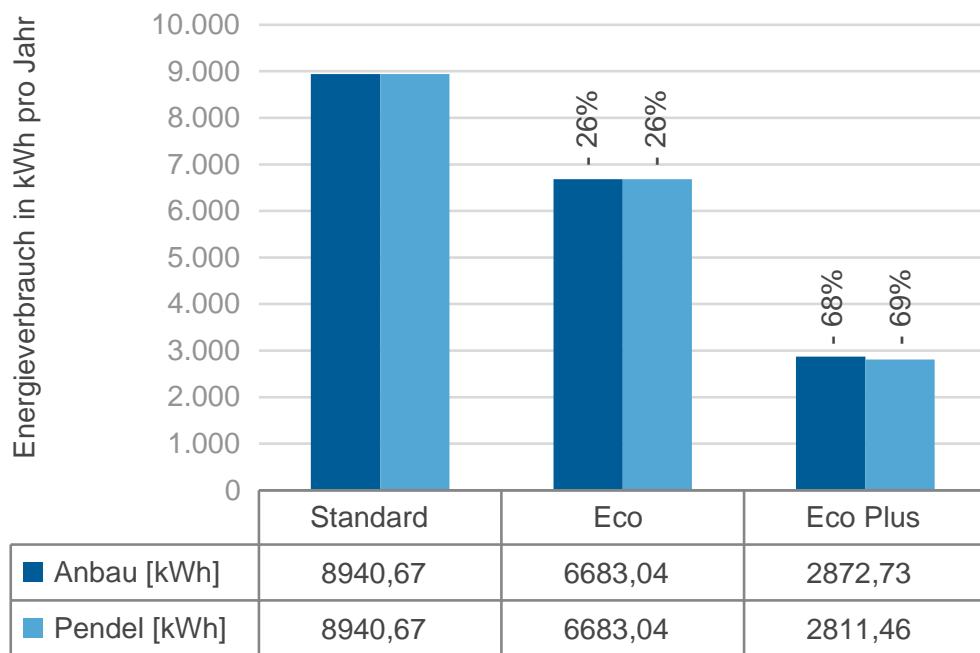
Anlage 24 – Energieverbrauch im Einzelbüro



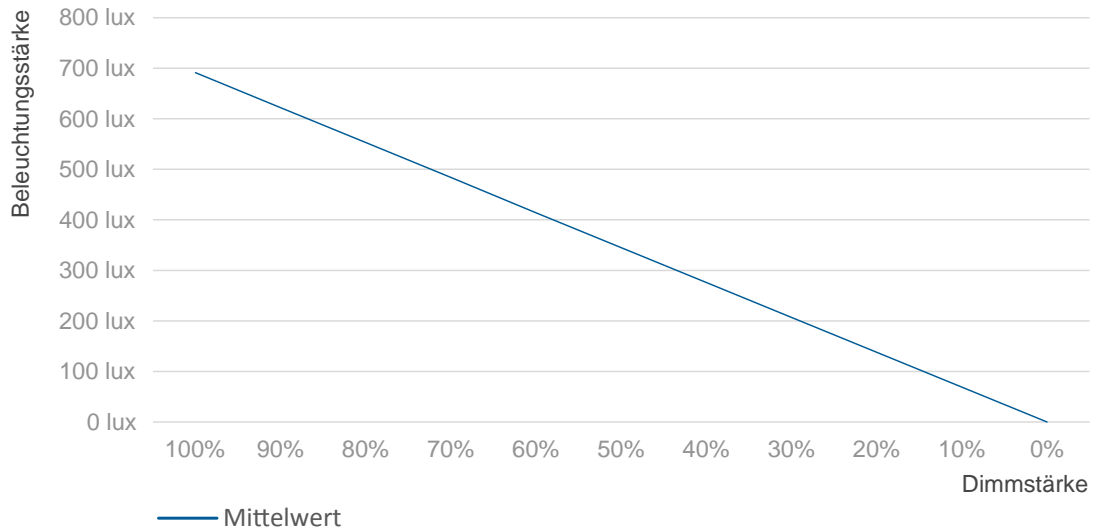
Anlage 25 – Energieverbrauch im Gruppenbüro



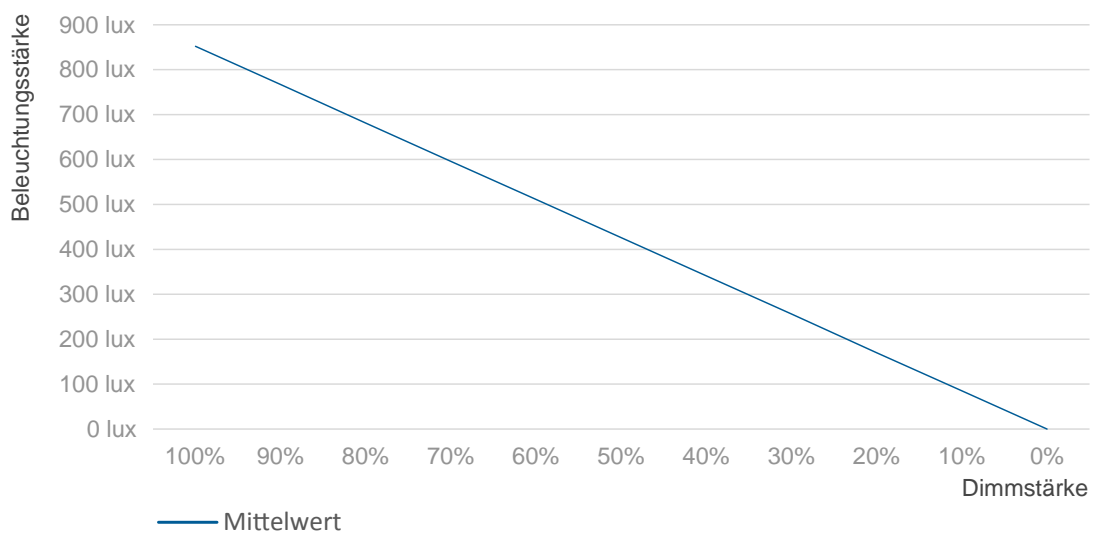
Anlage 26 – Energieverbrauch im Grossraumbüro



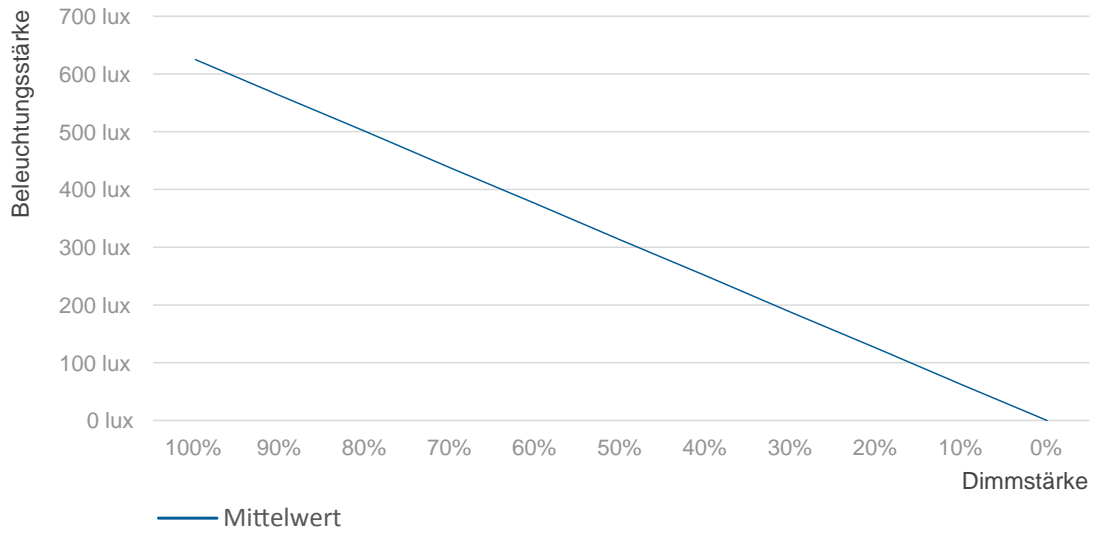
*Anlage 27 – Dimmkurve im Konferenzraum (T16 - Anbauleuchte)*



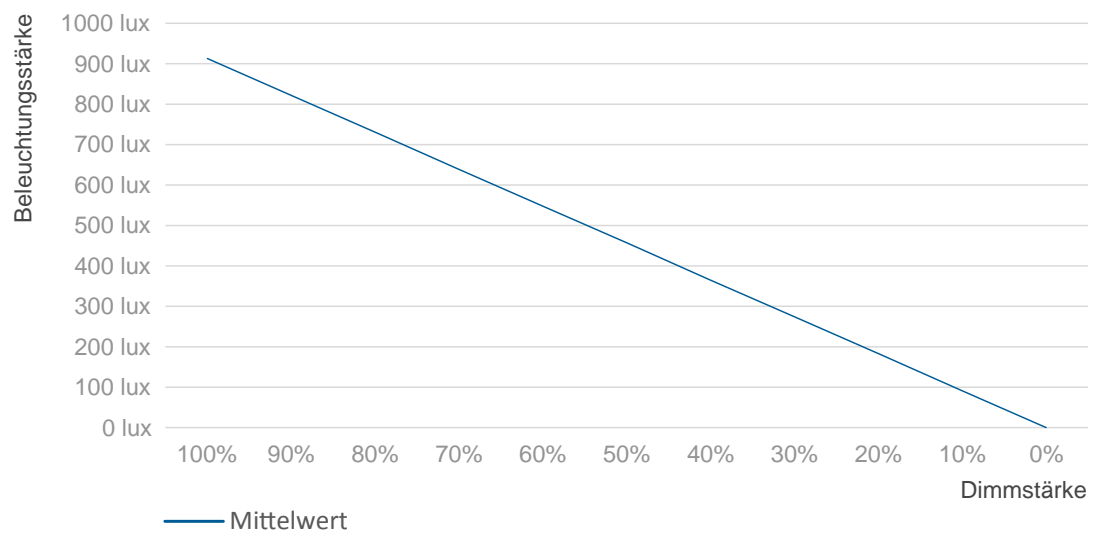
*Anlage 28 – Dimmkurve im Konferenzraum (LED - Anbauleuchte)*



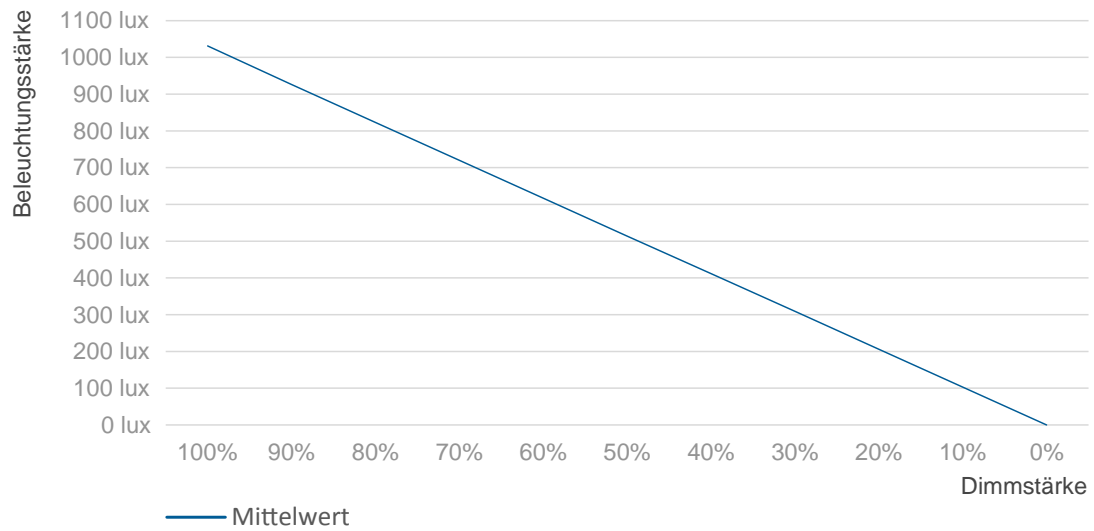
*Anlage 29 – Dimmkurve im Konferenzraum (T16 - Pendelleuchte)*



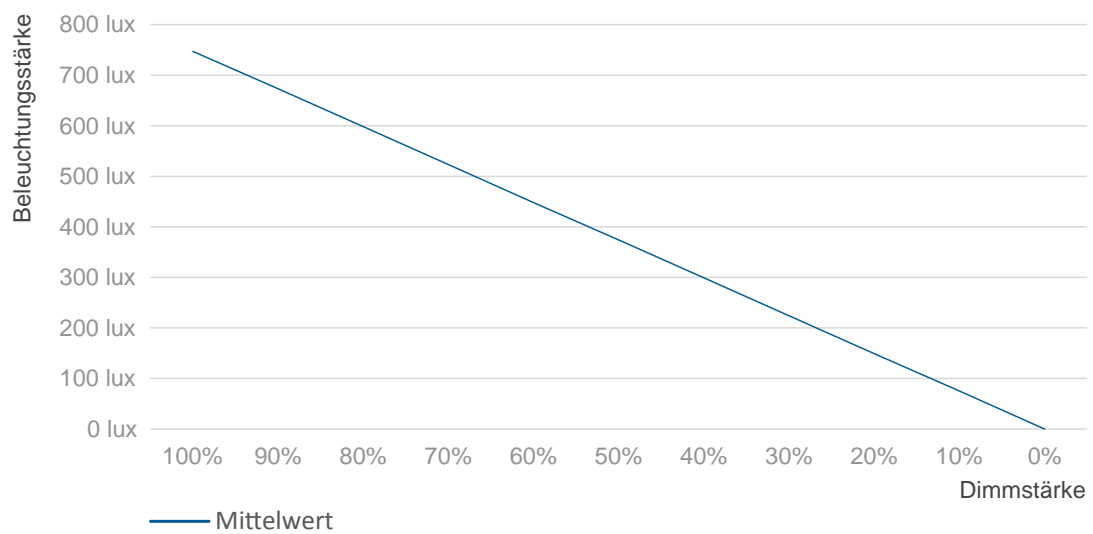
*Anlage 30 – Dimmkurve im Einzelbüro (T16 - Anbauleuchte)*



*Anlage 31 – Dimmkurve im Einzelbüro (LED - Anbauleuchte)*

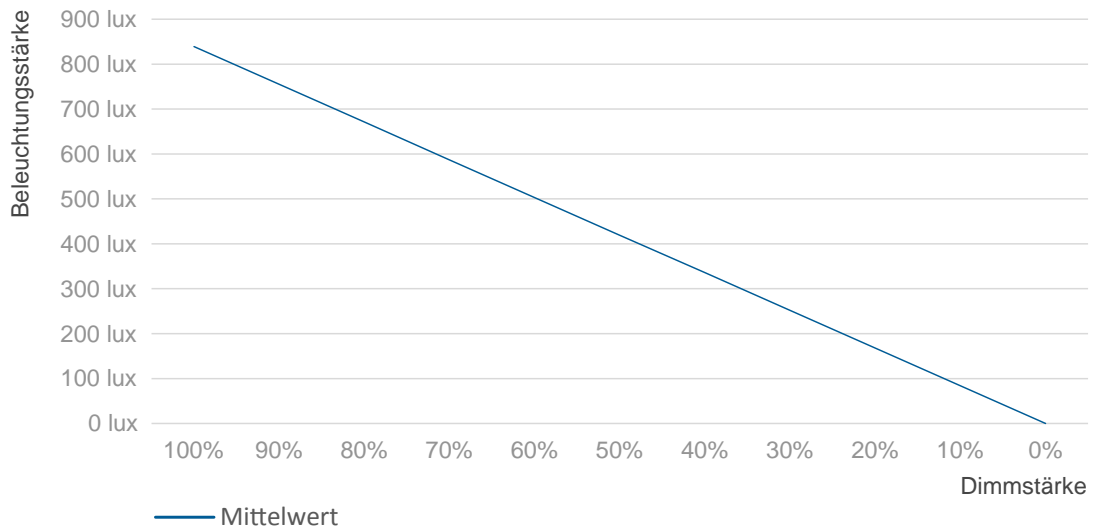


*Anlage 32 – Dimmkurve im Einzelbüro (T16 - Pendelleuchte)*

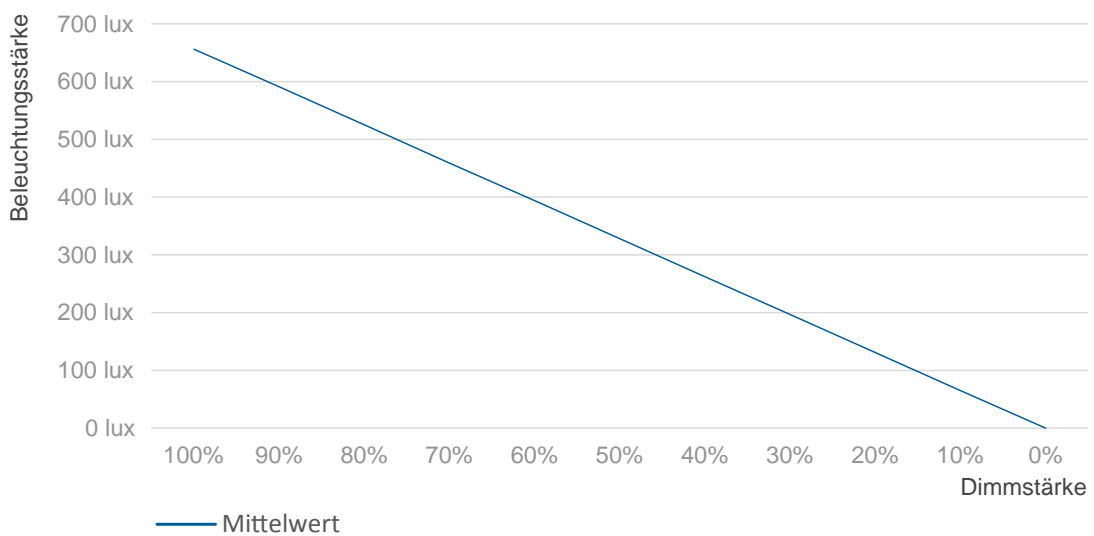




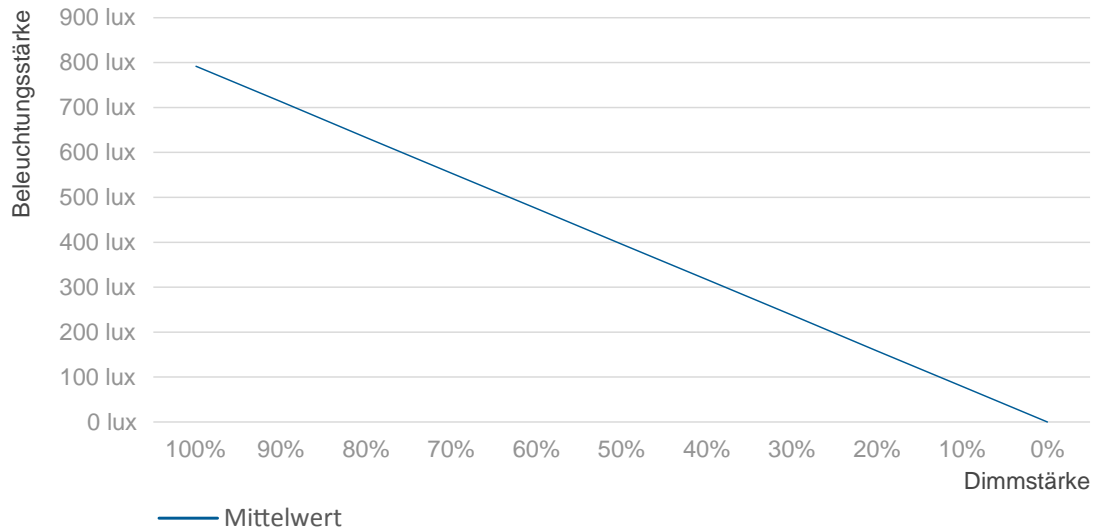
*Anlage 33 – Dimmkurve im Einzelbüro (LED - Pendelleuchte)*



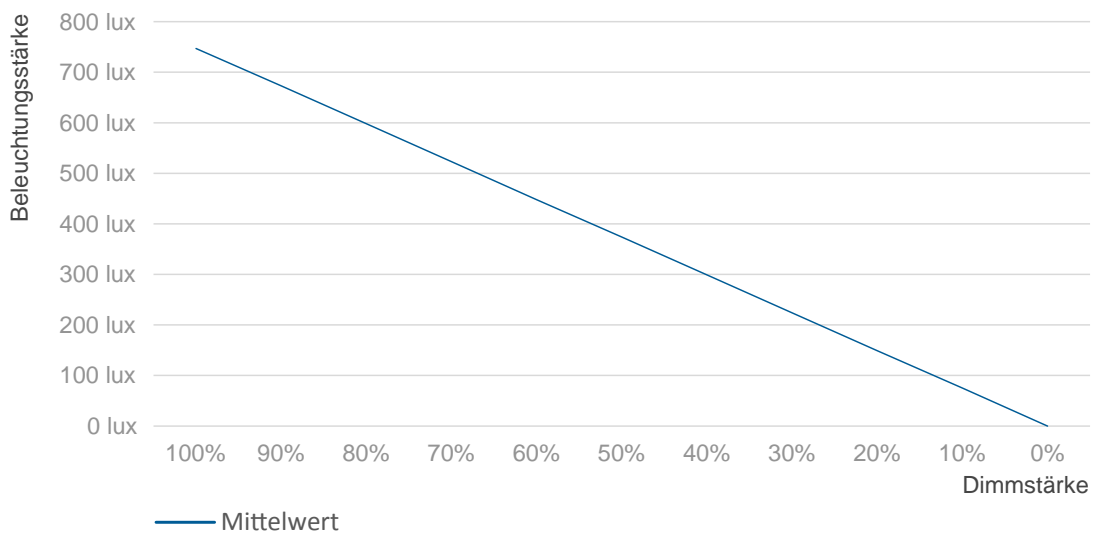
*Anlage 34 – Dimmkurve im Gruppenbüro (T16 - Anbauleuchte)*



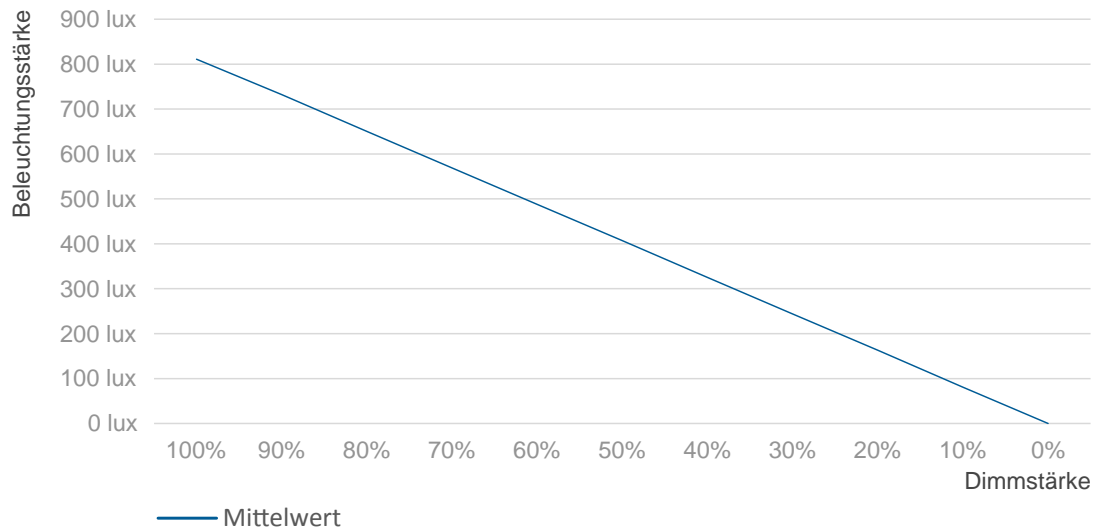
*Anlage 35 – Dimmkurve im Gruppenbüro (LED - Anbauleuchte)*



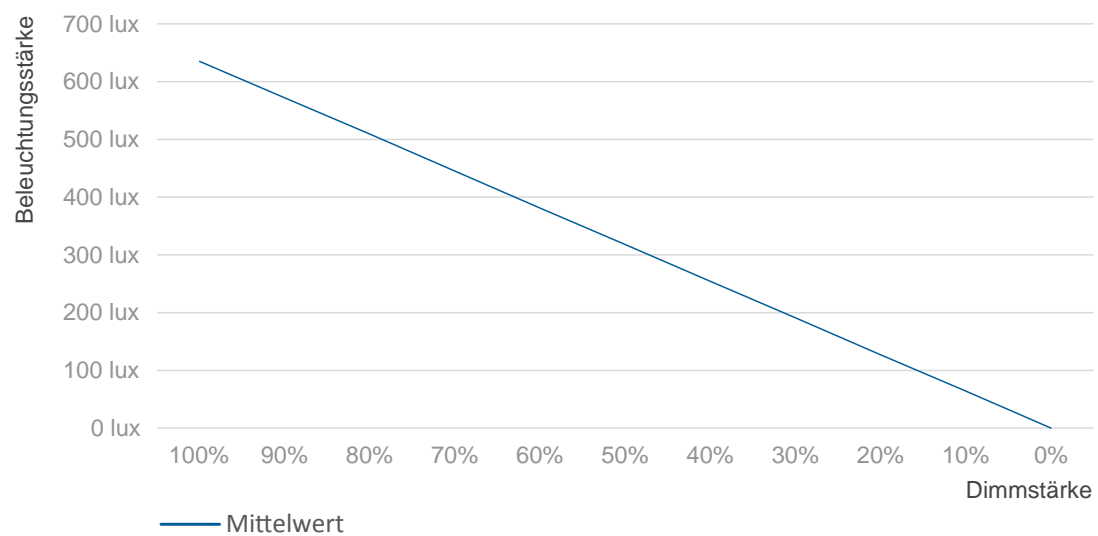
*Anlage 36 – Dimmkurve im Gruppenbüro (T16 - Pendelleuchte)*



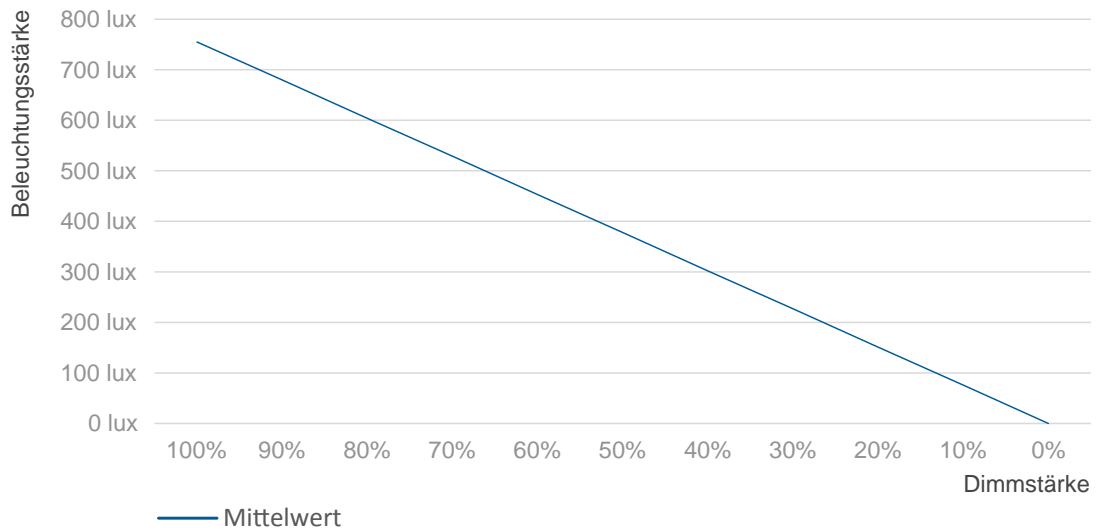
*Anlage 37 – Dimmkurve im Gruppenbüro (LED - Pendelleuchte)*



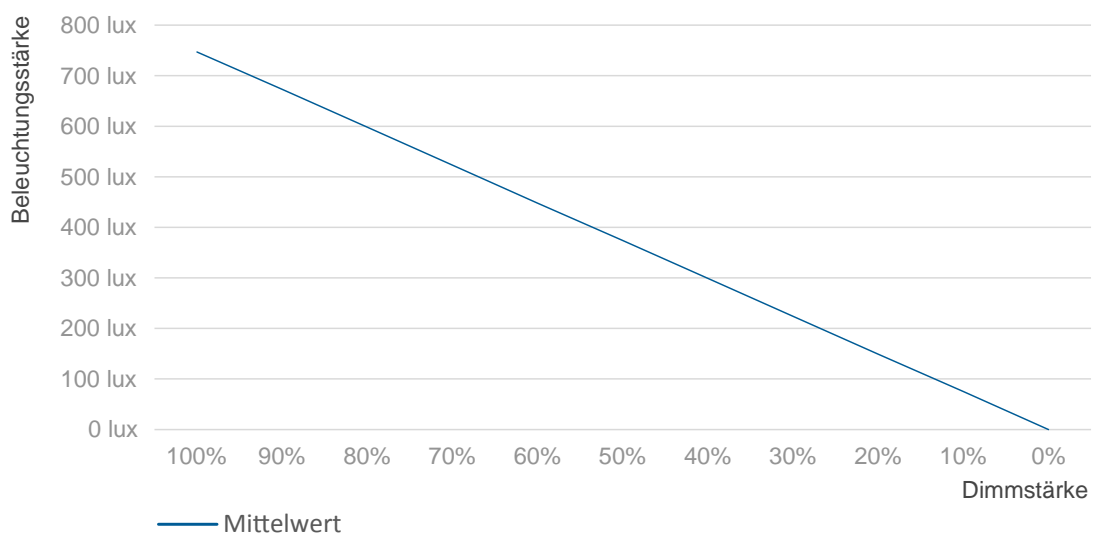
*Anlage 38 – Dimmkurve im Großraumbüro (T16 - Anbauleuchte)*



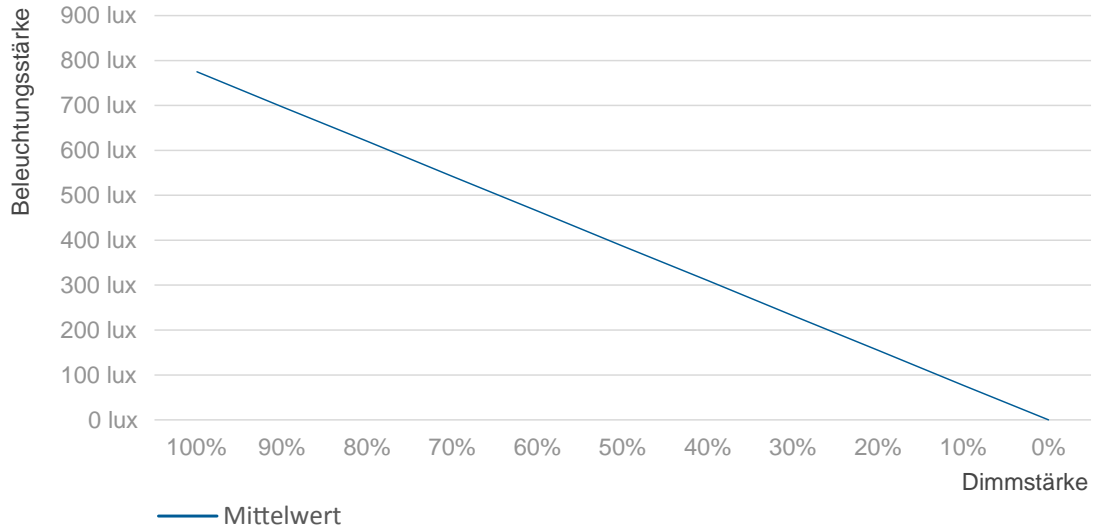
*Anlage 39 – Dimmkurve im Großraumbüro (LED - Anbauleuchte)*



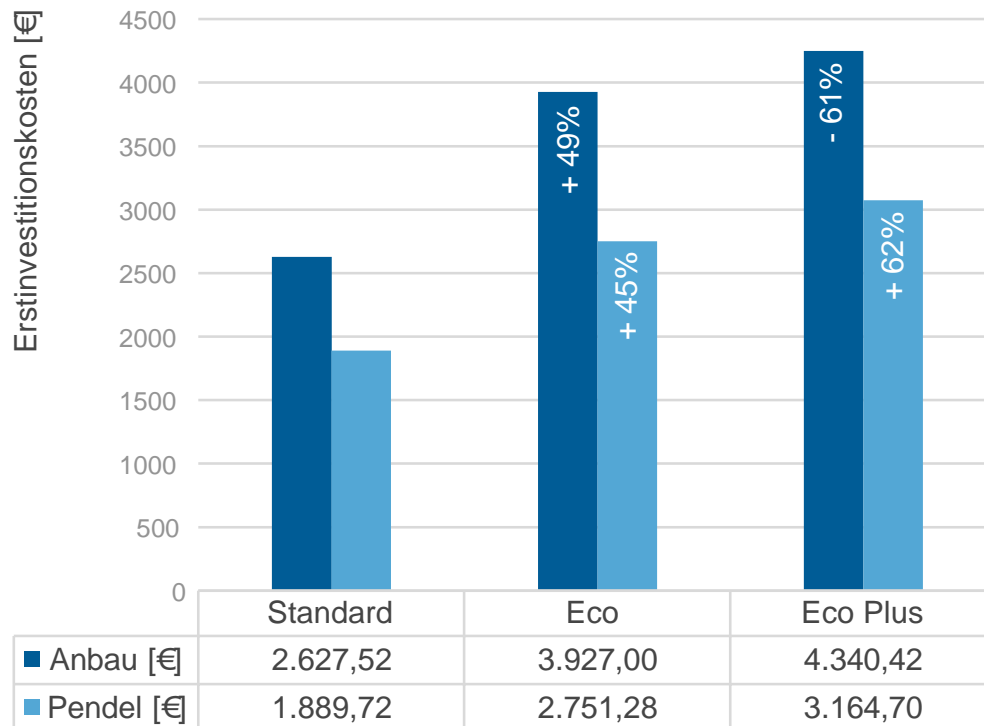
*Anlage 40 – Dimmkurve im Großraumbüro (T16 - Pendelleuchte)*



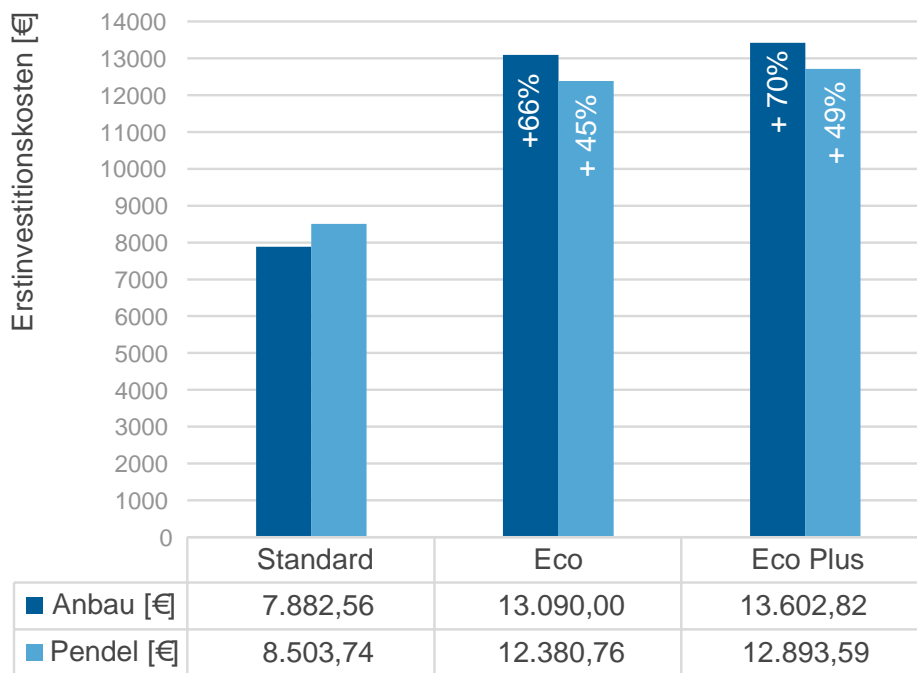
Anlage 41 – Dimmkurve im Großraumbüro (LED - Pendelleuchte)



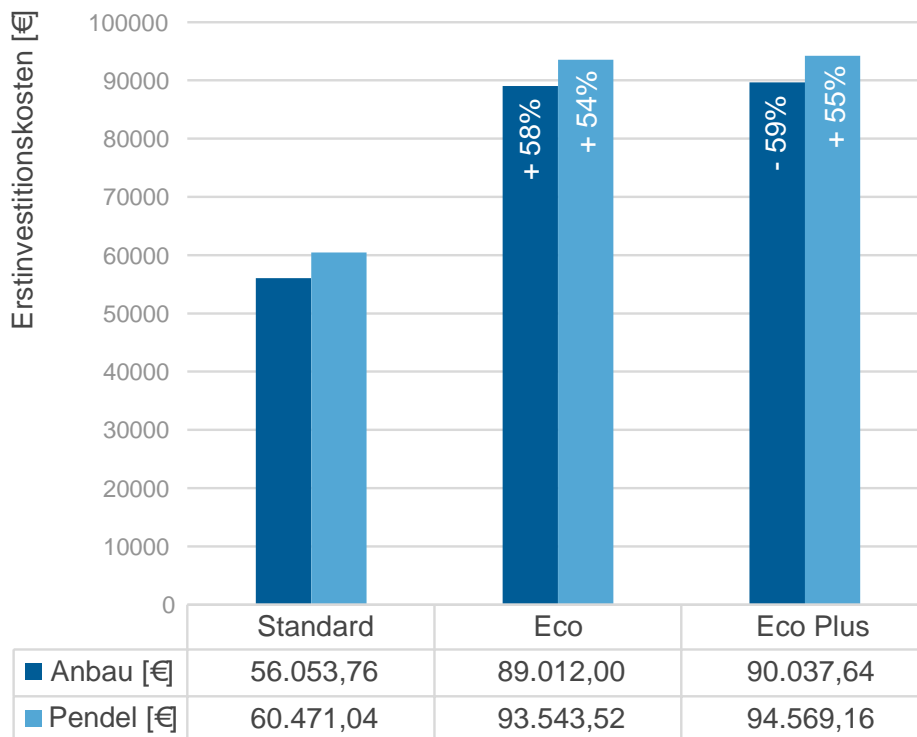
Anlage 42 – Erstinvestitionskosten im Einzelbüro



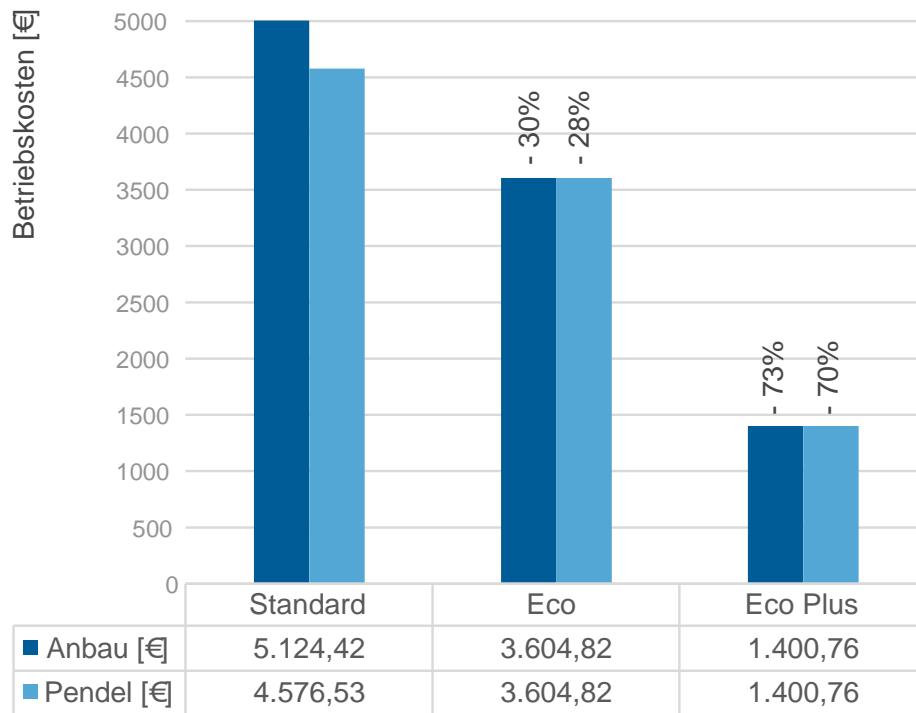
Anlage 43 – Erstinvestitionskosten im Gruppenbüro



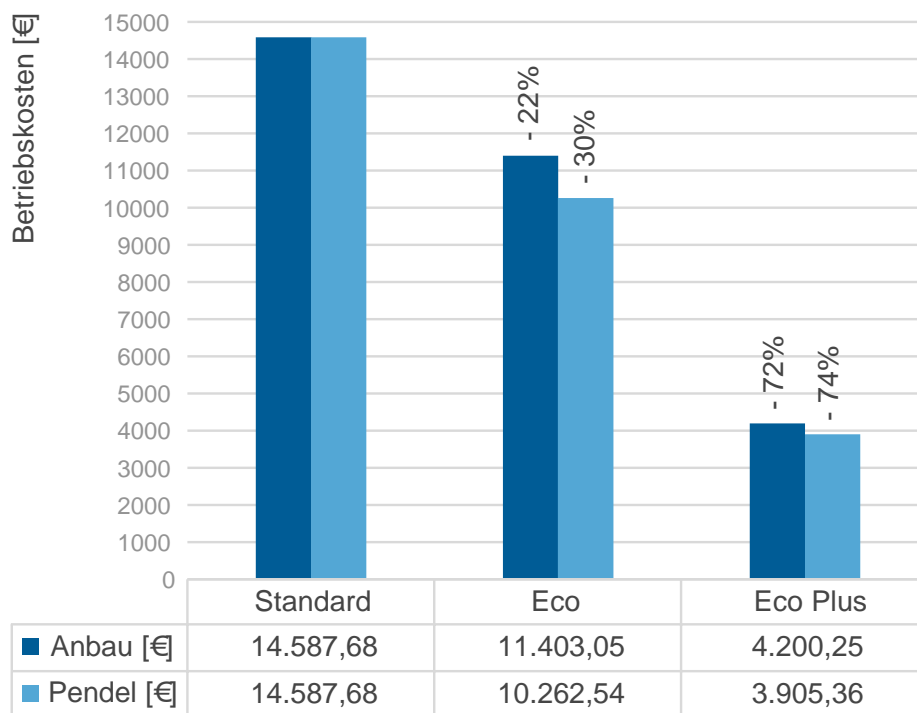
Anlage 44 – Erstinvestitionskosten im Grossraumbüro



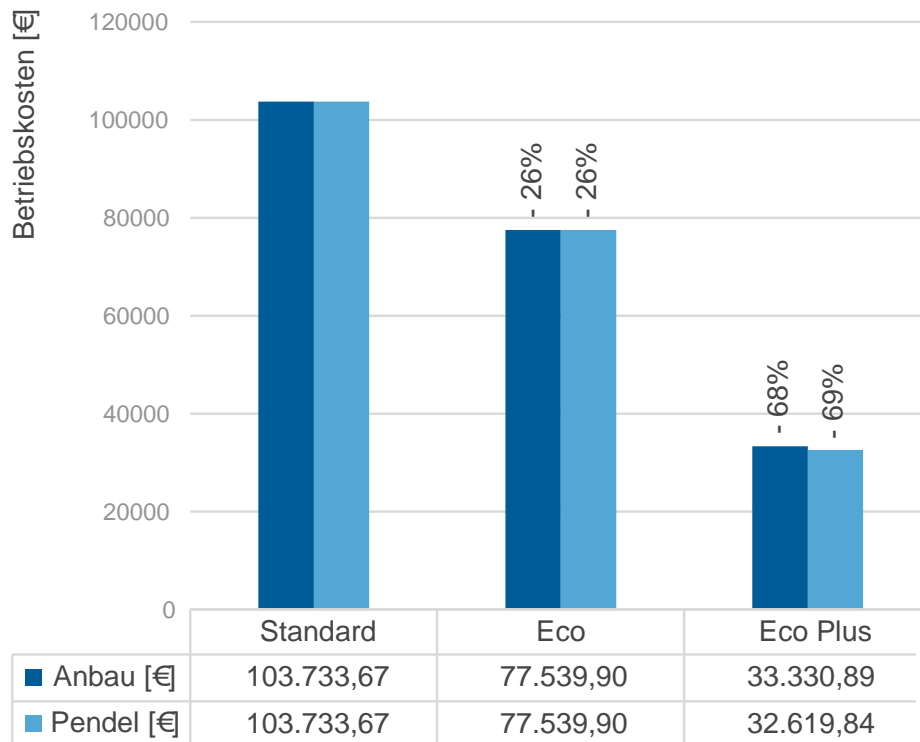
Anlage 45 – Betriebskosten pro Jahr im Einzelbüro



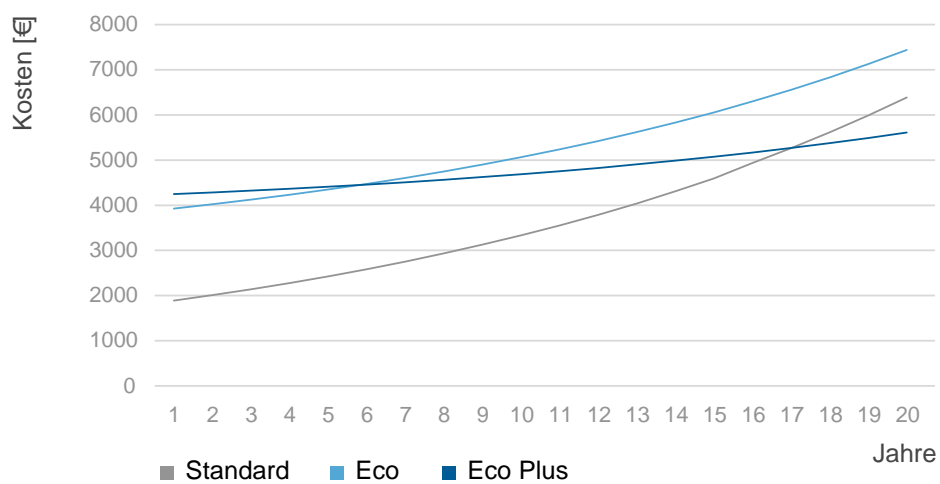
Anlage 46 – Betriebskosten pro Jahr im Gruppenbüro



Anlage 47 – Betriebskosten pro Jahr im Grossraumbüro

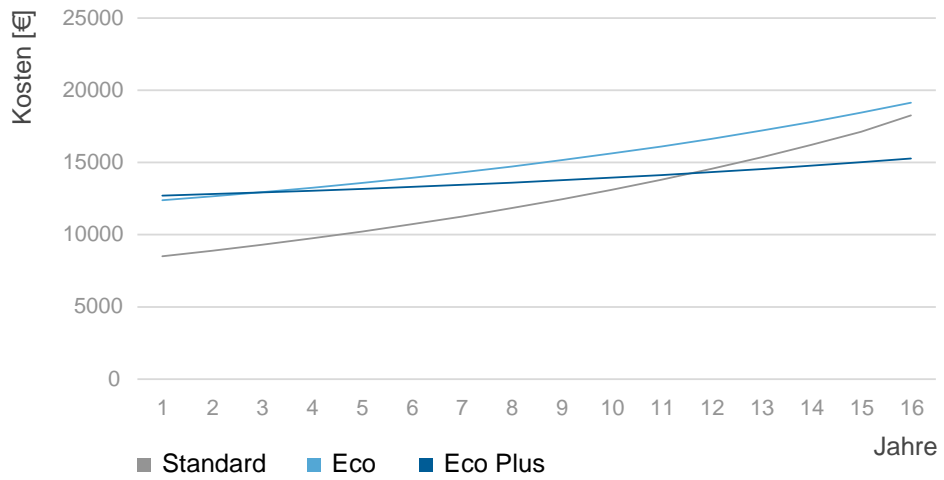


Anlage 48 – Amortisation Einzelbüro Pendelleuchten (Zeitraum 20 Jahre)

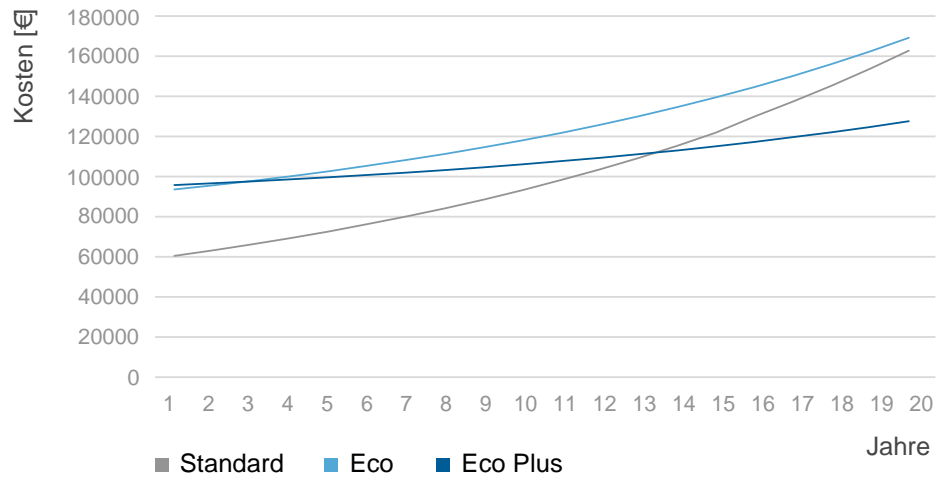




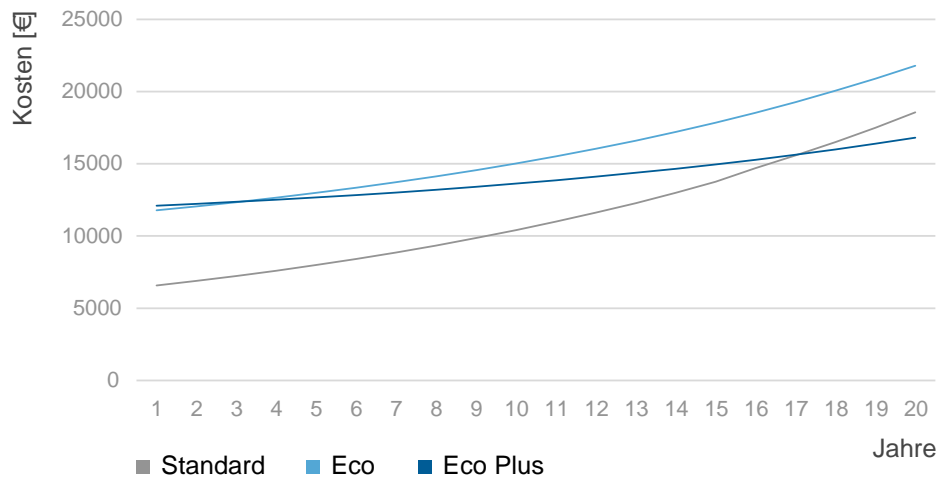
Anlage 49 – Amortisation Gruppenbüro Pendelleuchten (Zeitraum 20 Jahre)



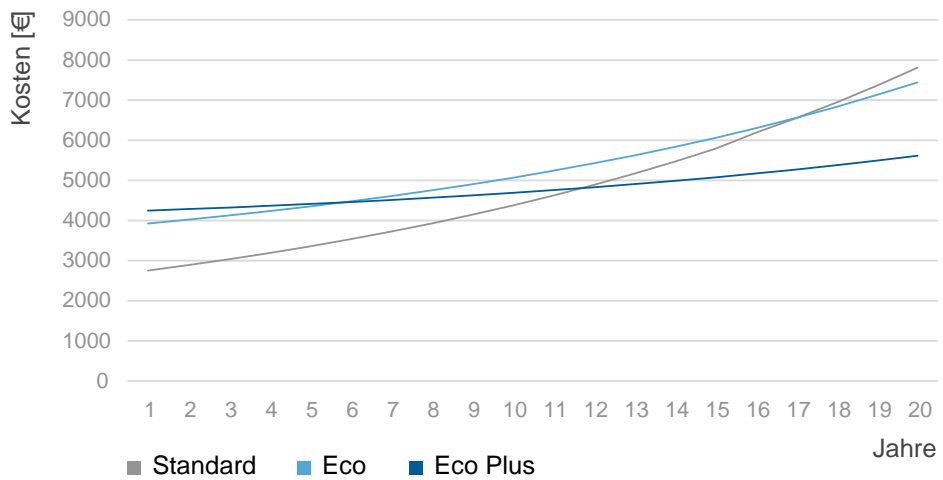
Anlage 50 – Amortisation Grossraumbüro Pendelleuchten (Zeitraum 20 Jahre)



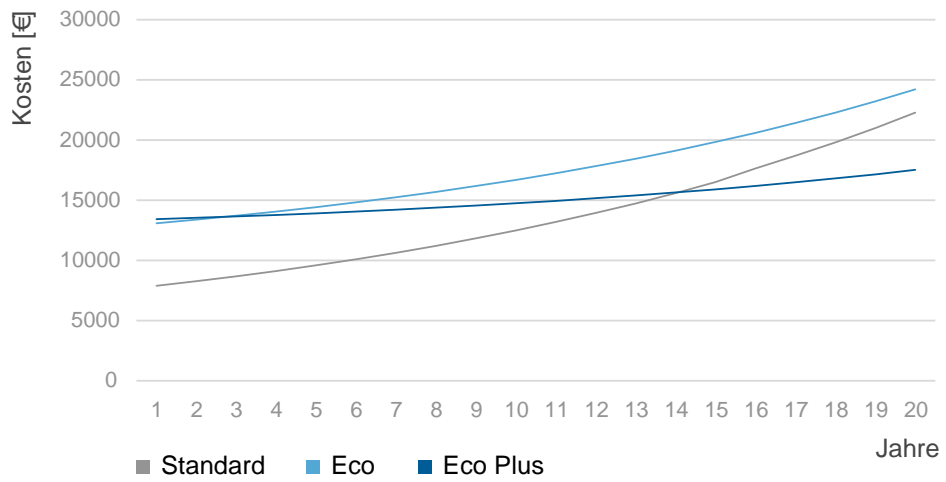
*Anlage 51 – Amortisation Konferenzraum Anbauleuchten (Zeitraum 20 Jahre)*



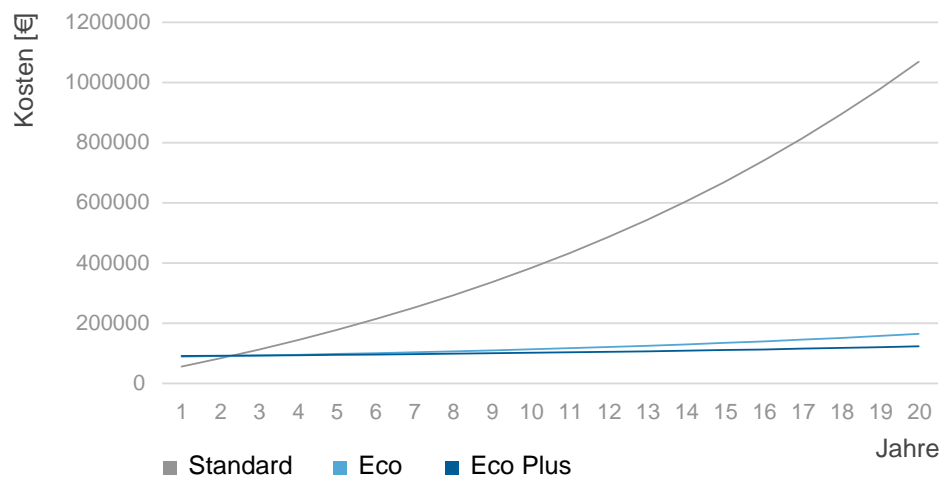
*Anlage 52 – Amortisation Einzelbüro Pendelleuchten (Zeitraum 20 Jahre)*



*Anlage 53 – Amortisation Gruppebüro Pendelleuchten (Zeitraum 20 Jahre)*



*Anlage 54 – Amortisation Grossraumbüro Pendelleuchten (Zeitraum 20 Jahre)*



**Vollständige Tageslicht- und Dimmkurvenberechnungen siehe Anlagen-CD.**