

Samuel Heilein

Autarke Leuchtmodule für smarte Klassenzimmer

Gutes Licht für gute Bildung

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
2.	Entwicklung eines smarten Klassenzimmers.....	2
2.1.	Rahmenbedingungen.....	2
2.1.1.	Physikalische lichttechnische Größen.....	2
2.1.2.	Licht und sein Einfluss auf den Menschen.....	3
2.1.3.	Normen und sonstige Empfehlungen.....	6
2.1.3.1.	<i>Wichtigste Normen.....</i>	<i>6</i>
2.1.3.2.	<i>Sonstige Empfehlungen.....</i>	<i>7</i>
2.2.	Sensorik und darauf abzustimmende Hard- und Software.....	10
2.2.1.	Grundlagen der Lichtmessung.....	10
2.2.2.	Der Fotowiderstand als Lichtmesser.....	12
2.2.2.1.	<i>Aufbau und Funktion.....</i>	<i>12</i>
2.2.2.2.	<i>Kennwerte und Werkstoffe.....</i>	<i>13</i>
2.2.2.3.	<i>Vor- und Nachteile sowie Anwendungsgebiete.....</i>	<i>14</i>
2.2.3.	Einfluss der Vorwiderstände auf die Lichtmessung.....	15
2.2.3.1.	<i>Aufbau und Ablauf der Untersuchung.....</i>	<i>16</i>
2.2.3.2.	<i>Resümee.....</i>	<i>16</i>
2.2.4.	Platzierung der LDRs im Klassenzimmer.....	18
2.3.	Modell eines smarten Klassenzimmers.....	19
2.3.1.	Beachtung der Rahmenbedingungen.....	19
2.3.2.	Entwicklung autarker Leuchtmodule.....	20
2.3.3.	Steuerung und dazu verwendete Mikrocontroller.....	22
2.3.4.	Modellaufbau und Raummaße des Klassenzimmers.....	22
2.3.5.	Festlegung von Soll- und Bezugswerten.....	24
2.3.6.	Bestimmung geeigneter Vorwiderstände.....	25

2.4.	Gutes Licht für gute Bildung.....	26
2.4.1.	Der Klausurmodus.....	27
2.4.2.	Der Unterrichtmodus.....	28
2.4.3.	Der Vortragsmodus.....	29
2.4.4.	Der Fade-out Ruhemodus.....	29
2.4.5.	Der Stuhlkreismodus.....	31
2.4.6.	Der Pausenmodus.....	31
2.5.	Ausblick.....	32
3.	Nachwort.....	33
4.	Quellenverzeichnis.....	34
4.1.	Bücher.....	34
4.2.	Internetadressen.....	35
4.3.	Expertengespräche.....	36
4.4.	Bildquellenverzeichnis.....	37

1. Einleitung

Die meisten Lebewesen, wie Pflanzen, Tiere und auch der Mensch, sind auf das Licht und die Wärme der Sonne angewiesen. Doch Licht hat neben seiner existenziellen Bedeutung weitere verblüffende Einflüsse auf den Menschen. So kann Licht sich etwa bemerkenswert auf unsere Gesundheit und Emotionen, sowie auf unser Wohlbefinden und Konzentrationsvermögen auswirken. Viele dieser Wirkungen sind den meisten Menschen unbekannt und werden demnach zu wenig in unserem Alltag berücksichtigt und genutzt, obwohl es gerade hier zahlreiche Beispiele für die Wirksamkeit von Licht gibt. Insbesondere wirken dunkle, düstere Räume häufig beängstigend und verunsichernd. Auch können schwachbeleuchtete Räume Müdigkeit auslösen und Konzentration und Motivation senken. Demgegenüber unterstützt ein hell beleuchteter Raum die Vitalität und die Leistungsbereitschaft eines Menschen. Als ein klassisches Beispiel kann folgende Situation aus der Schule aufgeführt werden: Wenn Schüler morgens ihr Klassenzimmer betreten, herrscht bei vielen meist eine müde, passive Stimmung. Durch das zu diesem Zeitpunkt üblicherweise noch abgeschaltete Kunstlicht sowie durch die morgendliche Sonneneinstrahlung, die den Raum bestenfalls nur mäßig ausleuchtet, wird diese Stimmung zusätzlich verstärkt. Mit Aktivierung der künstlichen Raumbelichtung lässt sich dieser Stimmung stets entscheidend entgegenwirken. Dies zeigt beispielhaft, dass uns Licht auch in gewohnten Situationen wie dem Schulalltag beeinflusst.

Anlass für diese Arbeit ist die aus dieser Begebenheit resultierende Fragestellung: **Unter welchen Rahmenbedingungen, insb. an Sensorik und Leuchtmitteln, ist ein smartes Klassenzimmer mit einem „intelligenten“ Lichtmanagementsystem realisierbar und inwieweit bietet sich dadurch eine geeignete, lernfördernde Alternative für bestehende Klassenzimmer?**

Frei nach dem Motto: „Gutes Licht für gute Bildung“ wird dabei zunächst auf die biologischen Einflüsse des Lichts auf den Menschen sowie auf die wichtigsten Normen und sonstigen Empfehlungen zur Ausleuchtung von Klassenräumen eingegangen. Im Anschluss daran werden die für smarte Lichtmanagementsysteme erforderlichen Sensoren aufgeführt und die Möglichkeiten der Lichtmessung mit Fotowiderständen untersucht. Unter Einbeziehung der gewonnenen Erkenntnisse folgt ein weiterer Schwerpunkt

der Seminararbeit, welcher in der Entwicklung autarker Leuchtmodule und deren Einsatzmöglichkeiten in smarten Klassenzimmern liegt. Dabei wurden nicht zuletzt die Eindämmung der Systemkosten durch reduzierten Montageaufwand und Energieverbrauch berücksichtigt. In einem Ausblick wird schließlich das in dieser Arbeit vorgestellte Klassenzimmerkonzept als zukunftsweisende Alternative zu bestehenden Klassenzimmern zusammenfassend betrachtet.

2. Entwicklung eines smarten Klassenzimmers

2.1. Rahmenbedingungen

Aufgrund des Mottos „Gutes Licht für gute Bildung“ ist es zweckmäßig, sich vorab mit den für die Lichttechnik wichtigen physikalischen Größen der Radiometrie und der Photometrie auseinanderzusetzen.

2.1.1. Physikalische lichttechnische Größen

Bei den Größen der Radiometrie handelt es sich um energetische Strahlungsgrößen. Den Richtlinien der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) zufolge werden alle radiometrischen Größen mit den Index „e“ für „Energie“ bzw. „energetisch“ versehen.¹⁾

In der *Radiometrie* ist vor allem die Strahlungsleistung Φ_e (welche auch Strahlungsfluss genannt wird) von Bedeutung. Sie beschreibt die von einer Lichtquelle ausgehende Strahlungsenergie dQ_e im jeweiligen Zeitintervall dt :

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$$

Die Strahlungsleistung wird in der Einheit Watt (W) angegeben, sagt aber nichts über die spektrale Verteilung, also über die farbliche Zusammensetzung, oder die Strahlungsrichtung aus.²⁾

¹⁾ Vgl. Hilgers, Hans Gerd / Wosnitza, Franz: Energieeffizienz und Energiemanagement, Ein Überblick heutiger Möglichkeiten und Notwendigkeiten, Wiesbaden 2012, S. 311.

²⁾ Ebd., S. 312.

Die Bestrahlung H_e gibt die Strahlungsenergie pro Fläche an. Die Einheit ist somit Joule pro Quadratmeter (J/m^2):

$$H_e = \frac{dQ_e}{dA}$$

Die Bestrahlungsstärke E_e bezeichnet die gemessene Strahlungsleistung pro Fläche. Die Einheit ist somit Watt pro Quadratmeter (W/m^2):

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$$

In der *Photometrie* beschränkt man sich auf den für das menschliche Auge sichtbaren Spektralanteil (von 380 nm bis 780 nm) und berücksichtigt zudem den subjektiven Helligkeitseindruck eines Beobachters. Auf diese Weise kann jede radiometrische Größe einer gewichteten Größe, welche die spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges berücksichtigt, zugeordnet werden.¹⁾

Nachdem auf diese Weise der Helligkeitseindruck quantitativ beschrieben werden kann, werden überwiegend photometrische Größen in der Lichttechnik gebraucht. Sie werden deshalb auch als lichttechnische Größen bezeichnet. Lichttechnische Größen werden mit dem Index „v“ für „visuell“ versehen, um besser von den radiometrischen Größen unterschieden werden zu können.²⁾

Die der Strahlungsleistung Φ_e entsprechende photometrische Größe ist der Lichtstrom Φ_v mit der Einheit Lumen (lm). Analog ergibt sich die Belichtung H_v mit der Einheit Luxsekunde ($lx \cdot s$). Die wichtigste lichttechnische Größe ist die der Bestrahlungsstärke E_e entsprechenden Beleuchtungsstärke E_v , die in Lux (lx) angegeben wird.

2.1.2. Licht und sein Einfluss auf den Menschen

Verantwortlich für die biologische Wirksamkeit von Licht ist ein dritter Fotorezeptor im Auge, der von Wissenschaftlern erst 2002 entdeckt wurde. Bis dahin waren nur die Zapfen für das Farbsehen und die lichtempfindlicheren Stäbchen für das Helligkeitssehen bekannt. Beim dritten Fotorezeptor handelt es sich um spezielle Ganglienzel-

¹⁾ Vgl. Kark, Klaus: Antennen und Strahlungsfelder, Elektromagnetische Wellen auf Leitungen, im Freiraum und ihre Abstrahlung, 5. Auflage, Wiesbaden 2014, S. 423.

²⁾ Ebd., S. 423.

len. Diese Zellen registrieren ausschließlich die Umgebungshelligkeit und dienen nicht dem Sehen.¹⁾ Sie liefern dem Gehirn aber wichtige Helligkeitsinformationen, die unter anderem darüber entscheiden, ob wir wach oder müde sind.²⁾

Genauere Untersuchungen der Netzhaut (Retina) zeigten, dass diese speziellen Rezeptoren das Protein Melanopsin enthalten³⁾, wobei mit Opsin allgemein ein lichtempfindlicher Farbstoff (Fotopigment) bezeichnet wird. Auch Melanopsin ist ein sogenanntes Fotopigment und lichtempfindlich, besonders für Licht mit einer Wellenlänge von ca. 464 nm, also im blauen Farbspektrum. Der Farbstoff verleiht den melanopsinhaltigen Ganglienzellen somit eine eigene (intrinsische) Lichtempfindlichkeit, weshalb diese Rezeptoren auch als intrinsisch photosensitive retinale Ganglienzellen (ipRGC) bezeichnet werden.⁴⁾

Die entdeckten Rezeptoren sind zwar über die gesamte Netzhaut verteilt, doch sind etwa nur ein bis drei Prozent der Ganglienzellen melanopsinhaltig. Besonders zu beachten beim Entwerfen einer biologisch wirksamen Beleuchtung wird die Tatsache sein, dass diese nicht-visuellen Fotorezeptoren besonders empfindlich im jeweils nasenseitig liegenden (nasalen) Bereich der Retina reagieren (Abb.1).⁵⁾

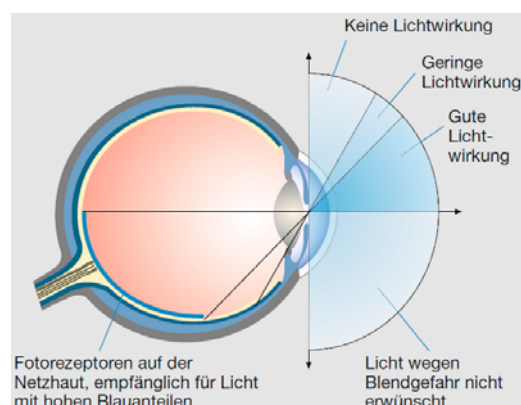


Abb.1 Lichtwirkung in Abhängigkeit des Einfallswinkels.⁶⁾

¹⁾ Vgl. Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI e.V. – (Hrsg., 2014): licht.wissen 19, Wirkung des Lichts auf den Menschen, Heft 19, Frankfurt am Main; http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/1403_lw19_Wirkung_auf_Mensch_web.pdf, Zugriff vom 04.11.2016, 20:17 Uhr; S. 15.

²⁾ Vgl. Licht.de – eine Brancheninitiative des ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., Licht taktet die innere Uhr; <http://www.licht.de/de/trends-wissen/licht-specials/human-centric-lighting/mensch-und-licht/licht-taktet-die-innere-uhr/>, Zugriff vom 04.11.2016, 20:14 Uhr.

³⁾ Ebd.

⁴⁾ Vgl. OSRAM AG (Hrsg., 2012): Licht in seiner dritten Dimension, Der biologische Aspekt in der Lichtplanung für mehr Lebensqualität, Broschüre No. 7ZZK008DE 04/12 CO OSRAM CMK MK AB, München; <http://www.osram.de/media/resource/HIRES/337328/1934101/applikationsbroschre-licht-und-lebensqualitt-d.pdf>, Zugriff vom 16.10.2016, 15:34 Uhr; S. 18.

⁵⁾ Vgl. Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI e.V. – (Hrsg., 2014): licht.wissen 19, Wirkung des Lichts auf den Menschen, Heft 19, Frankfurt am Main; http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/1403_lw19_Wirkung_auf_Mensch_web.pdf, Zugriff vom 04.11.2016, 20:17 Uhr; S. 15.

⁶⁾ Quelle: Ebd.; S. 21.

Tagsüber erscheint (bei geringer Bewölkung) die Erdatmosphäre als blaue Himmelskuppel (Abb.2). Sie erscheint breitflächig auf der Netzhaut des unteren Halbraumes des Augapfels und reizt dort die vielen blauempfindlichen Ganglienzellen. Im Laufe eines Tages verändert die Himmelskuppel ihre Farbe, weshalb die melanopsinhaltigen Ganglienzellen je nach Tageszeit unterschiedlich gereizt werden. Die Rezeptoren eignen sich somit besonders als externe Zeitgeber. Die Verwendung der blauempfindlichen Fotopigmente und die erhöhte Empfindlichkeit der Rezeptoren im nasalen Bereich unterstützen diese Funktion ideal.



Abb.2 Erdatmosphäre als blaue Himmelskuppel¹⁾

Einer der wichtigsten Vorgänge, den diese nicht-visuellen Fotorezeptoren steuern, ist der circadiane Rhythmus. Diese biologische Uhr regelt zum Beispiel aktive und passive Phasen, und ist auch für tägliche Leistungshochs und -tiefs zuständig.²⁾ Hormone fungieren hier als Botenstoffe, wobei beim Menschen Melatonin und Cortisol die zwei wichtigsten Hormone darstellen. Melatonin macht müde, senkt die Aktivität, und sorgt dafür, dass viele Stoffwechselfvorgänge zurückgefahren werden.³⁾

Cortisol hingegen ist ein Stresshormon und fungiert hier als Gegenspieler und gilt deshalb auch als Gradmesser für menschliche Aktivität. Der circadiane Rhythmus ist zwar in seinen Grundzügen genetisch vorgegeben, doch dauert er nicht exakt 24 Stunden, weshalb er täglich aufs Neue durch das Tageslicht synchronisiert werden muss. Diese Aufgabe erledigen die melanopsinhaltigen Ganglienzellen wie nachfolgend beschrieben. Werden sie durch Lichtquanten angeregt, schicken sie elektrische Signale an zentrale Steuerzentren im Gehirn⁴⁾, die daraufhin die Produktion von Melatonin hemmen und das Hormon Cortisol produzieren. Melatonin wird erst wieder am Abend mit zunehmender

¹⁾ Eigenes Foto.

²⁾ Vgl. Licht.de – eine Brancheninitiative des ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., Circadianer Rhythmus; <http://www.licht.de/de/trends-wissen/wissen-kompakt/lichtlexikon/de-tails-lichtlexikon/circadianer-rhythmus/>, Zugriff vom 04.11.2016, 20:11 Uhr.

³⁾ Vgl. Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI e.V. – (Hrsg., 2014): licht.wissen 19, Wirkung des Lichts auf den Menschen, Heft 19, Frankfurt am Main; http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/1403_lw19_Wirkung_auf_Mensch_web.pdf, Zugriff vom 04.11. 2016, 20:17 Uhr; S.17.

⁴⁾ Für die genauen Hirnbereiche und Nervenbahnen sei auf entsprechende Fachliteratur verwiesen.

Dunkelheit produziert. Biologisch effektives Licht am Tag sorgt auch für eine bessere Erholung, da es die nächtliche Ausschüttung an Melatonin erhöht. Die Schlafphasen eines Menschen sind tiefer und erholsamer, zudem sind die Einschlafzeiten verkürzt.¹⁾

Darüber hinaus kann Licht uns positiv stimmen, indem es die Bildung des Glückshormons Serotonin fördert. Ferner findet Licht mit ausgeprägtem Blauanteil über die iPRGCs effektiven Eingang in viele aktivierende Gehirnzentren. Dadurch kann die Vitalität sowie die Konzentrationsfähigkeit bemerkenswert erhöht werden.²⁾

2.1.3. Normen und sonstige Empfehlungen

Lichtplaner müssen beim Entwerfen von Beleuchtungskonzepten vor allem geltende Normen beachten. Auch haben etliche Verbände und Versicherungen empirische Empfehlungen herausgegeben.

2.1.3.1. Wichtigste Normen

Eine häufige Planungsgrundlage stellt die europaweit gültige Norm DIN EN 12464-1 dar. Sie trägt den Titel: „Licht und Beleuchtung, Teil 1: Beleuchtung von Arbeitsstätten in Innenräumen“ und enthält auch Normwerte für die Ausleuchtung von Klassenräumen. Dementsprechend soll in Unterrichtsräumen von weiterführenden Schulen mindestens eine Beleuchtungsstärke von 300 lx herrschen. Weiterhin wird für Abendklassen und für die Erwachsenenbildung ein Wartungswert von 500 lx genannt.³⁾

Unter dem Wartungswert versteht man die Beleuchtungsstärke einer Anlage, die unter Berücksichtigung von Alterung oder Verschmutzung im Rahmen der Wartungszyklen nicht unterschritten werden darf.⁴⁾

¹⁾ Vgl. OSRAM AG (Hrsg., 2012): Licht in seiner dritten Dimension, Der biologische Aspekt in der Lichtplanung für mehr Lebensqualität, Broschüre No. 7ZZK008DE 04/12 CO OSRAM CMK MK AB, München; <http://www.osram.de/media/resource/HIRES/337328/1934101/applikationsbroschre-licht-und-lebensqualitt-d.pdf>, Zugriff vom 16.10.2016, 15:34 Uhr; S. 4f.

²⁾ Ebd.; S. 4f.

³⁾ Vgl. Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI e.V. – (Hrsg., 2012): licht.wissen 02, Besser lernen mit gutem Licht, Heft 02, Frankfurt am Main; http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/Lichtwissen02_Besser-lernen.pdf, Zugriff vom 16.10.2016, 15:39 Uhr; S. 44 ff.

⁴⁾ Schild, Kai / Brück, Henrik: Energie-Effizienzbewertung von Gebäuden, Anforderungen und Nachweisverfahren gemäß EnEV 2009, 1.Auflage, Wiesbaden 2010, S. 205.

Die mittlere vertikale Beleuchtungsstärke¹⁾ für Präsentationsflächen, wie die Tafel, soll 500 lx betragen. Die Gleichmäßigkeit, also das Verhältnis der minimalen zur mittleren Beleuchtungsstärke auf einer Fläche, sollte auf Präsentationsflächen bei mind. 0,7 liegen.^{2) 3)} Ebenfalls werden in der DIN EN 12464-1 explizit helle Wände und Decken gefordert, wobei die Gleichmäßigkeit auf diesen Oberflächen nicht unter 0,1 liegen soll.⁴⁾ Wände sollen mit mind. 75 lx und die Decke mit mind. 50 lx ausgeleuchtet werden.⁵⁾ Des Weiteren sollen in Klassenzimmern die Gleichmäßigkeit mind. 0,6 und der allgemeine Farbwiedergabeindex R_a minimal 80 betragen.⁶⁾

Der allgemeine Farbwiedergabeindex gibt die Qualität der Farbwiedergabe bei künstlicher Beleuchtung in Bezug auf eine Referenzlichtquelle an. Der maximale Güteindex liegt bei 100, wenn die Farbwiedergabe identisch mit der der Referenzlichtquelle ist. Meist handelt es sich hierbei um das natürliche Sonnenlicht oder um das Licht einer Glühlampe.⁷⁾ Die Farbwiedergabe wird maßgeblich von der spektralen Zusammensetzung des künstlichen Lichts beeinflusst.⁸⁾

2.1.3.2. *Sonstige Empfehlungen*

In den zuvor genannten europäischen Normen wird zwar für Klassenräume weiterführender Schulen eine Beleuchtungsstärke von 300 lx verlangt. Doch ist dieser Normwert als Mindestwert aufzufassen. Die meisten Menschen empfinden höhere Beleuchtungsstärken bei der Arbeit als angenehm und motivierend, weshalb häufig zu einer Be-

¹⁾ Gemeint ist die durchschnittliche Beleuchtungsstärke, mit der eine vertikal stehende Fläche ausgeleuchtet wird.

²⁾ Vgl. Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI e.V. – (Hrsg., 2012): licht.wissen 02, Besser lernen mit gutem Licht, Heft 02, Frankfurt am Main; http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/Lichtwissen02_Besser-lernen.pdf, Zugriff vom 16.10.2016, 15:39 Uhr; S. 12.

³⁾ Vgl. Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI e.V. – (Hrsg., 2012): licht.wissen 04, Licht im Büro, motivierend und effizient, Heft 04, Frankfurt am Main; http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/1204_lichtwissen04_WEB_index.pdf, Zugriff vom 04.11.2016, 20:18 Uhr; S. 34.

⁴⁾ Ebd.; S. 45f.

⁵⁾ Ebd.; S. 34.

⁶⁾ Vgl. Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI e.V. – (Hrsg., 2012): licht.wissen 02, Besser lernen mit gutem Licht, Heft 02, Frankfurt am Main; http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/Lichtwissen02_Besser-lernen.pdf, Zugriff vom 16.10.2016, 15:39 Uhr; S. 47.

⁷⁾ Vgl. Jüstel, Thomas / Schwung, Sebastian: Leuchtstoffe, Lichtquellen, Laser, Lumineszenz, Berlin Heidelberg 2016, S. 52.

⁸⁾ Vgl. Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI e.V. – (Hrsg., 2012): licht.wissen 02, Besser lernen mit gutem Licht, Heft 02, Frankfurt am Main; http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/Lichtwissen02_Besser-lernen.pdf, Zugriff vom 16.10.2016, 15:39 Uhr; S. 44.

leuchtungsstärke von 500 lx geraten wird.¹⁾ Rechtfertigen lässt sich dieser Wert mit der entsprechend geforderten Beleuchtungsstärke von 500 lx für Unterrichtsräume von Abendklassen bzw. der Erwachsenenbildung sowie für Lesebereiche in Bibliotheken und für Hörsäle.²⁾ Auch die Beleuchtungsstärken der Wände und Decken sollten über den genannten Mindestwerten liegen, um so den Sehkomfort zu erhöhen.³⁾

Ansonsten können zu große Leuchtdichteunterschiede in einem Raum das Auge belasten, da es sich ständig an die Lichtverhältnisse anpassen muss. Dieser Prozess, bei dem das Auge seine Lichtempfindlichkeit ändert, wird Adaption genannt.⁴⁾ Um zu verhindern, dass das Auge infolge von Adaption ermüdet und damit die Konzentration der Schüler beeinträchtigt wird, ist ein Beleuchtungskonzept sinnvoll, das bei unterschiedlichster Anordnung der Schülerpulte überall gleich gute Lichtbedingungen schafft. Dies erleichtert eine flexible Raumnutzung und unterstützt somit moderne Unterrichtsformen. Die vorrangige Aufgabe einer Klassenzimmerbeleuchtung besteht demnach in der gleichmäßigen Ausleuchtung des Raumes, entsprechend der jeweiligen Unterrichtssituation.⁵⁾

Klassische Wandtafeln bzw. moderne Whiteboards gehören zur Standardausrüstung eines Klassenzimmers. Anschriften müssen von allen Plätzen aus gut lesbar sein. Deshalb ist es sinnvoll, die Tafel durch eine separate Lichtanlage zu beleuchten, wobei bei Tafeln, die aufgeklappt oder nach oben verschoben werden können, auf eine ausreichend flächige Beleuchtung zu achten ist. Für Whiteboards gelten weitgehend dieselben Empfehlungen, jedoch benötigen sie weniger Licht und sind anfälliger für Reflexionen. Deshalb ist bei Whiteboards drauf zu achten, dass Lichtquellen gut abgeschirmt sind und Spiegelungen schon durch die Anordnung der Leuchten vermieden werden. Für Vorträge

¹⁾ Vgl. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), (Hrsg., 2012): Klasse(n) – Räume für Schulen, Empfehlungen für gesundheits- und lernfördernde Klassenzimmer, Berlin; <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/si-8094.pdf>, Zugriff vom 04.11.2016, 20:06 Uhr; S. 17.

²⁾ Vgl. Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI e.V. – (Hrsg., 2012): licht.wissen 02, Besser lernen mit gutem Licht, Heft 02, Frankfurt am Main; http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/Lichtwissen02_Besser-lernen.pdf, Zugriff vom 16.10.2016, 15:39 Uhr; S. 11.

³⁾ Vgl. Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI e.V. – (Hrsg., 2012): licht.wissen 04, Licht im Büro, motivierend und effizient, Heft 04, Frankfurt am Main; http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/1204_lichtwissen04_WEB_index.pdf, Zugriff vom 04.11.2016, 20:18 Uhr; S. 34.

⁴⁾ Vgl. Jüstel, Thomas / Schwung, Sebastian: Leuchtstoffe, Lichtquellen, Laser, Lumineszenz, Berlin Heidelberg 2016, S. 4.

⁵⁾ Vgl. Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI e.V. – (Hrsg., 2012): licht.wissen 02, Besser lernen mit gutem Licht, Heft 02, Frankfurt am Main; http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/Lichtwissen02_Besser-lernen.pdf, Zugriff vom 16.10.2016, 15:39 Uhr; S. 11.

sollte die Raumbelichtung separat gedimmt oder ausgeschaltet werden können. Außerdem sollte die Möglichkeit bestehen, Flipcharts oder aufgehängte Landkarten mit Hilfe von Wandflutern auszuleuchten.¹⁾

Die Lichtfarbe einer Lichtquelle kann durch die Farbtemperatur in der Einheit Kelvin (K) gekennzeichnet werden. Bei Temperaturstrahlern entspricht diese annähernd der tatsächlichen Temperatur des Glühwendels. Handelt es sich nicht um einen Temperaturstrahler, wird die Temperatur angegeben, bei der ein sog. Schwarzer Strahler das Licht einer vergleichbaren Farbe abgibt.²⁾

In Klassenzimmern sollten Lampen eingesetzt werden, deren gemittelte Farbtemperatur größer als 4.000 Kelvin ist. Wichtig ist, dass stets nur Lampen einer Farbtemperatur zum Einsatz kommen, da eine gleichzeitige Mischung die Sehleistung negativ beeinträchtigen kann.³⁾

An einem sonnigen Tag werden im Freien Beleuchtungsstärken von bis zu 100.000 lx erzielt. In Innenräumen muss der Mensch mit wesentlich weniger Licht auskommen. Aufgrund der großen Lichtstärke und der optimalen Farbwiedergabe des Sonnenlichts empfiehlt es sich, das Klassenzimmer mit entsprechend großen Fensterflächen auszustatten, die eine Versorgung mit natürlichem Tageslicht gewährleisten.⁴⁾ Es sollte aber auch die Möglichkeit bestehen, das einstrahlende Sonnenlicht mit Hilfe von Vorhängen, Markisen oder Jalousien zu regulieren, um so die störende und Konzentration beeinträchtigende Blendung zu vermeiden.⁵⁾ Auch aus ökonomischer und ökologischer Sicht rentiert es sich, Sonnenlicht zu verwenden. Das Tageslicht kann teilweise sogar die künstliche Beleuchtung ersetzen. Mit einem entsprechenden Lichtsteuerungssystem und dimmbaren Leuchten kann auf diese nachhaltige Weise Energie gespart werden.

¹⁾ Vgl. Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI e.V. – (Hrsg., 2012): licht.wissen 02, Besser lernen mit gutem Licht, Heft 02, Frankfurt am Main; http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/Lichtwissen02_Besser-lernen.pdf, Zugriff vom 16.10.2016, 15:39 Uhr; S. 12 f.

²⁾ Vgl. Theiß, Erik: Beleuchtungstechnik, neue Technologien der Innen- und Außenbeleuchtung, Gebäudetechnik Band 1, München 2000, S. 22f.

³⁾ Vgl. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), (Hrsg., 2012): Klasse(n) – Räume für Schulen, Empfehlungen für gesundheits- und lernfördernde Klassenzimmer, Berlin; <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/si-8094.pdf>, Zugriff vom 04.11.2016, 20:06 Uhr; S. 18.

⁴⁾ Ebd.; S. 17.

⁵⁾ Vgl. Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI e.V. – (Hrsg., 2012): licht.wissen 02, Besser lernen mit gutem Licht, Heft 02, Frankfurt am Main; http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/Lichtwissen02_Besser-lernen.pdf, Zugriff vom 16.10.2016, 15:39 Uhr; S. 11.

2.2. Sensorik und darauf abzustimmende Hard- und Software

Tageslicht berücksichtigende Lichtsteuerungssysteme können nicht ohne Sensoren und eine darauf abgestimmte Hard- und Software funktionieren. Als automatische Lichtschalter ist der Einsatz von Anwesenheitssensoren bekannt. Für die sinnvolle Lichtsteuerung finden vor allem Sensoren zur Lichtmessung Verwendung. Zusätzlichen Komfort kann eine Fernbedienung bieten. Üblicherweise handelt es sich hierbei um Infrarotfernbedienungen. Dementsprechend benötigt man zusätzlich einen Infrarotempfänger als Sensor.

Im später beschriebenen Modell eines smarten Klassenzimmers (siehe Kapitel 2.3.) finden Fotowiderstände als Sensoren zur Lichtmessung Verwendung, deren Empfindlichkeit mittels geeigneter Vorwiderstände (Hardware) abzustimmen und deren Steuerungsfunktion durch anwendungsspezifische Sollwerte in einer Software zu hinterlegen war. Die dabei zu berücksichtigenden Grundlagen der Lichtmessung, der Fotowiderstand als Lichtmesser, die durchgeführte Untersuchung und das daraus erhaltene Resümee für das Klassenzimmermodell seien nachfolgend beschrieben.

2.2.1. Grundlagen der Lichtmessung

In der Lichtmessung mit Hilfe von Sensoren wird der photoelektrische Effekt, auch Fotoeffekt genannt, ausgenutzt. Allgemein unterscheidet man zwischen dem inneren und dem äußeren Fotoeffekt. Diese Phänomene sollen im Folgenden erläutert werden.

Durch das Auftreffen eines Photons mit entsprechend hoher Energie kann ein Elektron vollständig aus einem Festkörper geschlagen werden. Dieses Phänomen wird äußerer Fotoeffekt genannt. Der innere photoelektrische Effekt hingegen bezieht sich auf den Fall, dass die Energie des Photons nicht ausreicht, um das Elektron aus dem Festkörper zu schlagen. Stattdessen werden Elektronen so angeregt, dass sich die elektrische Leitfähigkeit des Materials verändert. Nimmt man zum Beispiel als Festkörper einen Halbleiter, so können energetisch geeignete Photonen ihre Energie an die gebundenen Valenzelektronen abgeben. Dadurch werden die Elektronen so angeregt, dass sie sich aus

den Bindungen im Kristallgitter lösen und schließlich als freie Ladungsträger im Halbleiter bewegen können.^{1) 2)}

Mit Hilfe des Kristallgittermodells lässt sich die photoelektrisch bedingte Zunahme der Konzentration an freien Elektronen in einem Halbleiter erklären. Doch besonders hier lohnt es sich, dieses Phänomen auch mit Hilfe des Bändermodells zu beschreiben, da dadurch zum Beispiel quantitative Aussagen über die Energie der Photonen getroffen werden können.

Elektronen vermögen nur diskrete Energiezustände einzunehmen. Diese Energieniveaus können auf einer sog. Energieliste angeordnet werden. Da in einem Festkörper sehr viele Elektronen in Wechselwirkung miteinander sind, kommt es gemäß dem Bändermodell zu einer Verbreiterung dieser erlaubten Energieniveaus zu sog. Energiebändern. Bei den Halbleitern sind alle energetisch tiefliegenden Bänder, die sog. Valenzbänder, mit Elektronen gefüllt. Das oberste, vollständig gefüllte Valenzband ist durch eine Energielücke, die sog. verbotene Zone, mit der Breite E_g von höher liegenden, leeren Bändern, die als Leitungsband bezeichnen werden, getrennt.³⁾ Alle Elektronen mit Energien in den Leitungsbandern können sich frei im Festkörper bewegen, sind aber an den Festkörper als Ganzes gebunden und können ihn nicht ohne weiteres verlassen.⁴⁾

Beim inneren Fotoeffekt werden letztlich Elektronen im Valenzband durch auftreffende Photonen angeregt und in das Leitungsband gehoben (Abb.3). Dafür müssen die Photonen mindestens die Energie E_g aufbringen, um die Energiedifferenz zwischen Leiter- und Valenzband ausgleichen zu können.

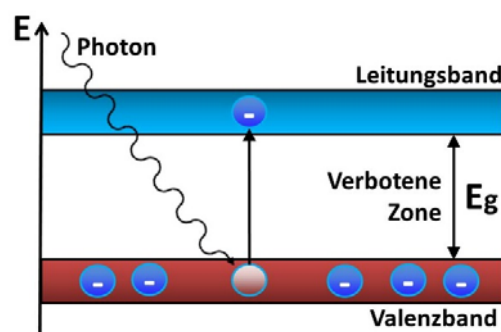


Abb.3 Darstellung des Fotoeffekts.⁵⁾

¹⁾ Vgl. Hering, Ekbert / Bressler, Klaus / Gutekunst, Jürgen: Elektrotechnik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 5. Auflage, Berlin Heidelberg 2005, S. 266.

²⁾ Vgl. Young, Matt: Optik, Laser, Wellenleiter, Berlin Heidelberg 1997, S. 90.

³⁾ Vgl. Hering, Ekbert / Bressler, Klaus / Gutekunst, Jürgen: Elektrotechnik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 5. Auflage, Berlin Heidelberg 2005, S. 56.

⁴⁾ Vgl. Young, Matt: Optik, Laser, Wellenleiter, Berlin Heidelberg 1997, S. 92.

⁵⁾ Eigene Grafik.

Es gilt also:

$$E_{\text{ph}} = \frac{h \cdot c}{\lambda} = h \cdot f \geq E_{\text{g}}$$

Bei diesem Phänomen treten mit den freien Ladungsträgern zusätzlich sogenannte Defektelektronen auf, die auch als Löcher bezeichnet werden. Sie weisen eine positive Ladung auf und stellen den übrig gebliebenen, positiv geladenen Raum da, der durch die Ionisierung der Atome entstanden ist.

In einem reinen Halbleiter beruht die elektrische Leitfähigkeit auf der Anzahl an Elektronen im Leiterband. Bei Lichteinstrahlung vergrößern sich deshalb infolge des Photoeffekts die Menge an frei beweglichen Ladungsträgern und somit auch die Eigenleitfähigkeit. Dieser Vorgang tritt generell bei Halbleiterwerkstoffen auf,^{1) 2)} weshalb Halbleiter nicht nur in der Lichtmesstechnik eine wichtige Rolle spielen.³⁾

2.2.2. Der Fotowiderstand als Lichtmesser

„Ein Fotowiderstand (Light Dependent Resistor, LDR) oder Fotoleiter ist ein passives Bauelement, dessen elektrischer Widerstand sich bei Bestrahlung verringert.“⁴⁾

2.2.2.1. Aufbau und Funktion

Maßgebend für das elektrische Verhalten ist die Halbleiterkristallschicht (Nr. 1 in Abb.4) zwischen den zwei kammähnlichen Leiterstücken (Nr. 2 in Abb.4). Liegt an den zwei Anschlüssen (Nr. 3 in Abb.4) eine Spannung an, so fällt bei Abdunkelung des Sensors ein Großteil der angelegten Spannung über der Halbleiterkris-

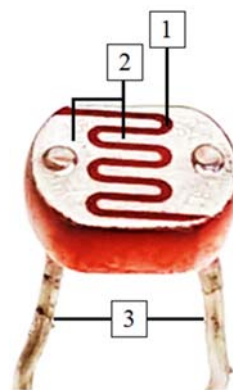


Abb.4 Handelsüblicher Fotowiderstand.⁵⁾

¹⁾ Vgl. Beuth, Klaus / Beuth, Olaf: Elementare Elektronik, 8. Auflage, Würzburg 2013, S. 309.

²⁾ Vgl. Hering, Ekbert / Bressler, Klaus / Gutekunst, Jürgen: Elektrotechnik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 5. Auflage, Berlin Heidelberg 2005, S. 57.

³⁾ Zur Bedeutung des Rechtsschutzes für integrierte Halbleiterschaltkreise in der Praxis siehe Heilein, Ernst-Peter, Wettbewerbsrechtliche Studien Band 5, Frankfurt am Main, 2003.

⁴⁾ Ebd., S. 57.

⁵⁾ Eigenes Foto.

tallschicht ab. Denn diese hat eine schlechte Eigenleitfähigkeit, weil bei Dunkelheit der innere Fotoeffekt kaum auftritt und somit nur wenig freie Ladungsträger zur Verfügung stehen. Bei Beleuchtung hingegen kommt es zu einer stärkeren Ausprägung des inneren Fotoeffekts, was zu einer größeren Anzahl an frei beweglichen Elektronen führt. Infolge der erhöhten Eigenleitfähigkeit des Halbleitermaterials sinkt der elektrische Widerstand des LDRs.

2.2.2.2. Kennwerte und Werkstoffe

Ausgehend von der Funktionsweise der Fotowiderstände lassen sich einige wichtige Kennwerte und Grenzwerte formulieren.

Der Dunkelwiderstand R_0 ist der Widerstandwert, den ein LDR bei Dunkelheit hat. Bei der Messung des Dunkelwiderstandes ist allerdings eine Wartezeit von einer Minute einzuhalten, weil sich bei Änderung der Beleuchtung der entsprechende Widerstandswert erst mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung einstellt. Die Widerstandsänderung erfolgt also nicht trägheitslos. Der Hellwiderstand R_{1000} hingegen gibt den zu erwartenden Widerstandswert bei einer Beleuchtungsstärke von 1000 lx an. Mit Hilfe von R_0 und R_{1000} lässt sich die Ansprechzeit t_r bestimmen, die die Zeit angibt, die ab dem Einschalten einer Beleuchtungsstärke von 1000 lx bei anfänglicher Dunkelheit vergehen muss, bis der Strom 65 % seines Wertes bei R_{1000} erreicht hat.¹⁾ Je kürzer diese Ansprechzeit ist, desto geringer ist die elektrische Trägheit des jeweiligen Fotowiderstandes.

Generell ist die Empfindlichkeit als Quotient aus Ursache und Wirkung definiert. Für Fotowiderstände ist dies das Verhältnis zwischen dem Widerstandswert R des LDRs und der Beleuchtungsstärke B_S . Für die Empfindlichkeit S eines Fotowiderstandes gilt somit:²⁾

$$S = \frac{R}{B_S}$$

Die Empfindlichkeit ist jedoch nicht für alle Lichtwellenlängen gleich. Die Empfindlichkeit eines Fotowiderstandes für eine bestimmte Wellenlänge wird relative spek-

¹⁾ Vgl. Beuth, Klaus / Beuth, Olaf: Elementare Elektronik, 8. Auflage, Würzburg 2013, S. 311f.

²⁾ Vgl. Fischer, Hans / Hofmann, Hansgeorg / Spindler, Jürgen: Werkstoffe in der Elektrotechnik, Grundlagen – Aufbau – Eigenschaften – Prüfung – Anwendung – Technologie, 6. Auflage, München 2007, S. 219f.

trale Empfindlichkeit S_{rel} genannt. Tritt bei einer bestimmten Wellenlänge das Empfindlichkeitsmaximum auf, so wird diese Wellenlänge als Wellenlänge der maximalen Fotoempfindlichkeit λ_{ES} bzw. λ_{Smax} bezeichnet.¹⁾

Wie im Kapitel 2.2.1. erwähnt, können Photonen Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband heben. Dazu muss das auftreffende Photon jedoch die dafür notwendige Energie besitzen. Daraus leitet sich eine charakteristische Werkstoffkenngröße ab, nämlich die Grenzwellenlänge λ_g . Besitzt ein Photon eine Wellenlänge, die größer ist als λ_g , so ist es energieärmer als ein Photon mit der Grenzwellenlänge und nicht mehr in der Lage, den Übergang eines Elektrons in das Leitungsband zu ermöglichen.²⁾

Für Fotowiderstände werden allgemein Werkstoffe verwendet, bei denen der innere photoelektrische Effekt besonders stark ausgeprägt ist.³⁾ Dazu gehören unter anderem Werkstoffe wie Cadmiumsulfid (CdS), Cadmiumselenid (CdSe), Bleisulfid (PbS), Bleiselenid (PbSe) und Bleitellurid (PbTe). Im Sinne des isotropen Verhaltens des Fotowiderstandes werden meist polykristalline Halbleiterwerkstoffe verwendet, die durch Aufdampfen, Aufspritzen oder Pressen hergestellt werden und somit eine amorphe Gesamtstruktur aufweisen.⁴⁾ Diese Substanzen werden anschließend auf einen Keramikkörper, der als Träger dient, aufgebracht. Durch Länge, Dicke und Breite der Halbleiterkristallschicht, sowie durch den verwendeten Werkstoff, sind die Eigenschaften des Fotowiderstandes bestimmt.⁵⁾

2.2.2.3. Vor- und Nachteile sowie Anwendungsgebiete

Der größte Nachteil der Fotowiderstände ist ihre bereits erwähnte Trägheit, weshalb sie nur dort eingesetzt werden, wo Verzögerungen von wenigen Millisekunden bei der Messung unbedeutend sind.⁶⁾ Obendrein sind Fotowiderstände temperaturabhängig, da Wärme bei Halbleitern, ebenso wie Licht, die Eigenleitfähigkeit erhöht. In Bereichen

¹⁾ Vgl. Beuth, Klaus / Beuth, Olaf: Elementare Elektronik, 8. Auflage, Würzburg 2013, S. 311.

²⁾ Vgl. Fischer, Hans / Hofmann, Hansgeorg / Spindler, Jürgen: Werkstoffe in der Elektrotechnik, Grundlagen – Aufbau – Eigenschaften – Prüfung – Anwendung – Technologie, 6. Auflage, München 2007, S. 219.

³⁾ Vgl. Beuth, Klaus / Beuth, Olaf: Elementare Elektronik, 8. Auflage, Würzburg 2013, S. 310.

⁴⁾ Vgl. Fischer, Hans / Hofmann, Hansgeorg / Spindler, Jürgen: Werkstoffe in der Elektrotechnik, Grundlagen – Aufbau – Eigenschaften – Prüfung – Anwendung – Technologie, 6. Auflage, München 2007, S. 219.

⁵⁾ Vgl. Beuth, Klaus / Beuth, Olaf: Elementare Elektronik, 8. Auflage, Würzburg 2013, S. 310.

⁶⁾ Ebd., S. 311f.

von hohen Temperaturschwankungen kann es somit zu verfälschten Messergebnissen kommen.

Ein wichtiger Vorteil der Fotowiderstände ist ihre Unabhängigkeit von der Stromrichtung. Ein LDR kann somit sowohl in Gleich- als auch in Wechselstromkreisen eingesetzt werden. Des Weiteren ist es möglich, die spektrale Empfindlichkeit von Fotowiderständen durch eine geeignete Zusammensetzung der Halbleiterverbindungen von vornherein bei ihrer Herstellung festzulegen.¹⁾

LDRs sind sehr günstig, leicht zu erwerben und bieten viele Anwendungsmöglichkeiten. So werden beispielsweise Fotowiderstände in großer Zahl zur Messung der Beleuchtungsstärke oder Lichtmenge oder eben zur Regelung einer Raumbelichtung verwendet. Des Weiteren kommen auch in Dämmerungsschaltern und in Bestandteilen von Alarmanlagen wie Lichtschranken oder Flammenwächtern LDRs vor.^{2) 3) 4)}

2.2.3. Einfluss der Vorwiderstände auf die Lichtmessung

Wie sich in einem Expertengespräch⁵⁾ herausstellte, sind bei der Lichtmessung Fotowiderstände meist mit Vorwiderständen (Arbeitswiderständen) in Reihe zu schalten. Erst eine solche Anordnung ermöglicht eine Aufteilung der Gesamtspannung auf beide Widerstände (Abb.5). Wenn sich nun der Widerstandswert des LDRs ändert, kommt es zu einer messbaren Spannungsänderung über diesen Sensor, die anschließend weiterverarbeitet werden kann. Folgende Untersuchung soll klären, inwiefern

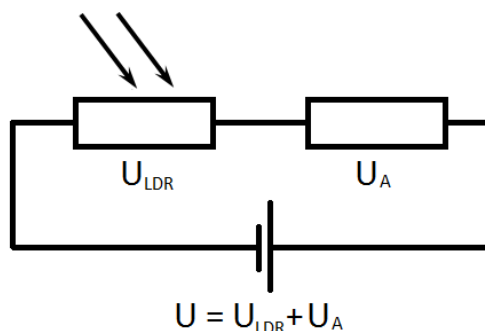


Abb.5 Aufteilung der Gesamtspannung.⁶⁾

¹⁾ Vgl. Stiny, Leonhard: Passive elektronische Bauelemente, Aufbau, Funktion, Eigenschaften, Dimensionierung und Anwendung, 2. Auflage, Wiesbaden 2015, S. 142.

²⁾ Ebd., S. 142.

³⁾ Vgl. Beuth, Klaus / Beuth, Olaf: Elementare Elektronik, 8. Auflage, Würzburg 2013, S. 312.

⁴⁾ Vgl. Fischer, Hans / Hofmann, Hansgeorg / Spindler, Jürgen: Werkstoffe in der Elektrotechnik, Grundlagen – Aufbau – Eigenschaften – Prüfung – Anwendung – Technologie, 6. Auflage, München 2007, S. 220.

⁵⁾ Hr. Yair Maryanka, Geschäftsführer der YAMAR Electronics Ltd., Tel-Aviv, Israel, vgl. <http://yamar.com/home/>; Expertengespräch vom 26.02.2016 in Unterschleißheim.

⁶⁾ Eigene Grafik.

sich der Wert des Arbeitswiderstandes auf die Messergebnisse auswirkt.

2.2.3.1. Aufbau und Ablauf der Untersuchung

Bei unterschiedlicher Beleuchtungsstärke E_v wurde jeweils die Spannung U_{LDR} gemessen. Dieser Vorgang wurde mit verschiedenen Arbeitswiderständen R_A (Nr. 1 in Abb.6) durchgeführt. Zur Bestimmung der Beleuchtungsstärken wurde ein Luxmeter (Nr. 2 in Abb.6) verwendet. Ein MEGA 2560 Mikrocontrollerboard (Nr. 3 in Abb.6), wie es im Modell eines smarten Klassenzimmers verwendet wurde (vgl. Kapitel 2.3.3.), diente – entsprechend verschaltet (Abb. 7) – sowohl als Spannungsquelle von 5 V als auch als Messgerät. Hierzu konnte die Spannung U_{LDR} am analogen Pin A_0 eingelesen werden.

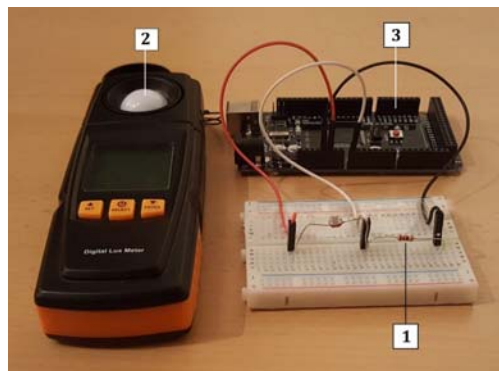


Abb.6 Aufbau der Untersuchung.¹⁾

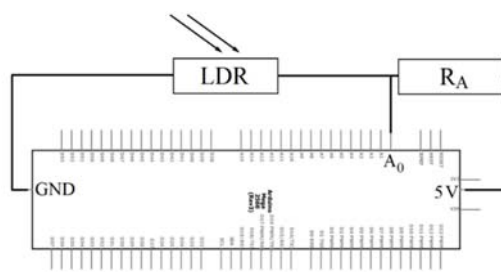


Abb.7: Schaltplan der Untersuchung.²⁾

2.2.3.2. Resümee

Bei Betrachtung der entstandenen Messergebnisse (Abb.8) lässt sich ein sehr starker Einfluss des Vorwiderstandes R_A auf die Spannungsmesswerte, insbesondere auf die Empfindlichkeit S (vgl. Kapitel 2.2.2.2) der Messanlage feststellen.

E_v / R_1	220 Ω	470 Ω	800 Ω	1 k Ω	3,9 k Ω	5,6 k Ω	10 k Ω	15 k Ω
0 lx	$\approx 5,00$	$\approx 5,00V$	$\approx 5,00V$	$\approx 5,00V$	$\approx 5,00V$	$\approx 5,00V$	4,99V	4,98V
100 lx	4,60V	4,20V	3,78V	3,55V	1,95V	1,50 V	0,98V	0,69V
300 lx	4,29V	3,73V	3,18V	2,91V	1,34V	1,03V	0,64V	0,43V
500 lx	4,08V	3,40V	2,81V	2,55V	1,08V	0,79V	0,47V	0,32V
800 lx	3,93V	3,18V	2,54V	2,29V	0,89V	0,65V	0,38V	0,26V
1000 lx	3,85V	3,04V	2,39V	2,14V	0,81V	0,59V	0,34V	0,23V
1500 lx	3,70V	2,88V	2,24V	1,96V	0,71V	0,52V	0,30V	0,20V

Temperatur: 24,7°C

Abb.8 Tabelle der Messergebnisse.³⁾

¹⁾ Eigenes Foto.

²⁾ Eigene Grafik – teilweise mit „Fritzing“ erstellt.

³⁾ Eigene Tabelle.

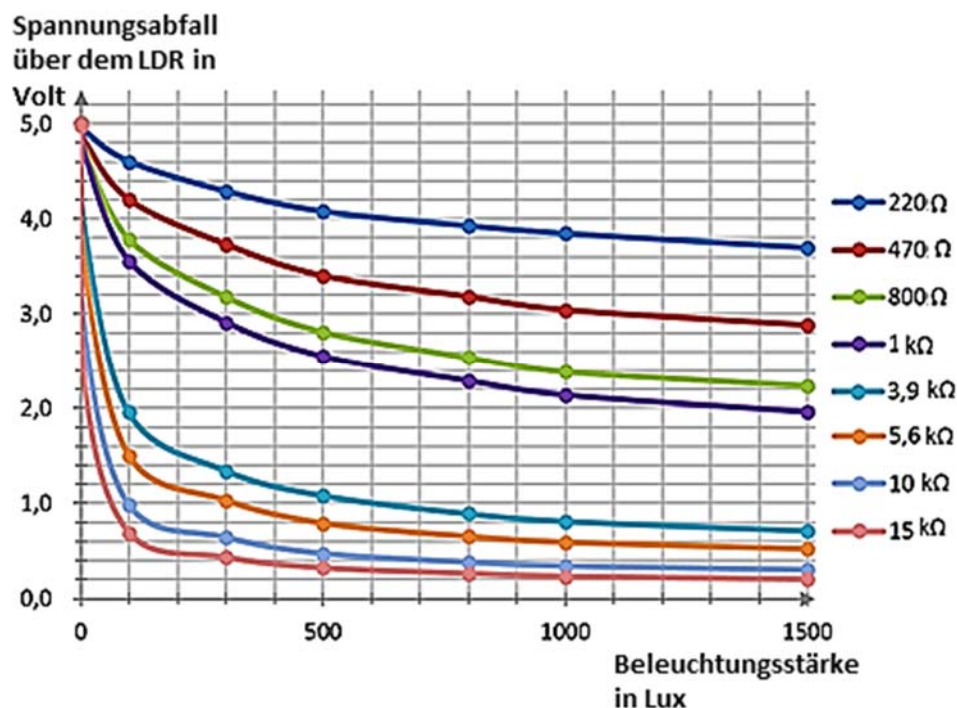


Abb.9 Diagramm der Messergebnisse ¹⁾

Die Empfindlichkeit eines Messgeräts ist besonders groß, wenn eine kleine Änderung der Eingangsgröße eine große Änderung der Ausgangsgröße hervorruft. Dies ist z.B. bei der Verwendung des 15 Kiloohmwiderstandes deutlich zu erkennen. Im Intervall von 0 lx bis 200 lx sind bei einer Änderung der Beleuchtungsstärke die Unterschiede der gemessenen Spannungen und demnach auch die Empfindlichkeit des Messgerätes sehr groß (Abb.9). Für Beleuchtungsstärken, die größer als 200 lx sind, ist die Empfindlichkeit jedoch sehr gering, da selbst Beleuchtungsunterschiede von 500 lx nur Spannungsänderungen von wenigen Millivolt hervorrufen. Der Einsatz von 15 kΩ Vorwiderständen wäre demnach nur bei einer zu erwartenden Lichtmessung im Wertebereich zwischen 0 lx und 200 lx empfehlenswert. Andererseits eignen sich 1 kΩ Arbeitswiderstände für Messungen bei Lichtstärken von 0 lx bis 800 lx. Für die Lichtmessung im geplanten Modell eines smarten Klassenzimmers empfiehlt es sich ebenfalls einen geeigneten Arbeitswiderstand zu wählen, der die Empfindlichkeit der Messanlage im zu erwartenden Messwertebereich positiv beeinflusst. Hiermit stellt sich die Frage, welchen Widerstandswert ein solcher Vorwiderstand haben muss.

¹⁾Eigene Grafik.

2.2.4. Platzierung der LDRs im Klassenzimmer

Für die Bestimmung des gesuchten optimalen Vorwiderstandes ist es zuerst wichtig, die Beleuchtungsstärken zu kennen, denen der Sensor im Betrieb ausgesetzt sein wird. Die Lichtverhältnisse werden vor allem durch die Platzierung der Fotowiderstände bestimmt. Deshalb ist es empfehlenswert, Möglichkeiten der Platzierung der Sensoren zu betrachten.

Bei der Messung der Beleuchtungsstärke im Arbeitsbereich ergibt sich folgende Problematik: Eine Anbringung von Sensoren im Bestuhlungsbereich scheidet aus, da die Anbringung von Sensoren an Schülerpulten mit einem Verlust an Mobilität verbunden wäre, denn die Sensoren müssten mit einer Stromquelle bzw. dem Steuergerät verbunden sein. Da sich somit direkte Messungen der Beleuchtungsstärke im Arbeitsbereich als problematisch erweisen, muss die Beleuchtungsstärke indirekt ermittelt werden.

Bereits bekannte Lichtsteuerungssysteme für Klassenzimmer schlagen die Montage von Lichtsensoren an der Raumdecke vor (Abb.10 und Abb.11). Die Folge sind „raum-spezifisch“ angepasste Lichtsteuerungssysteme:

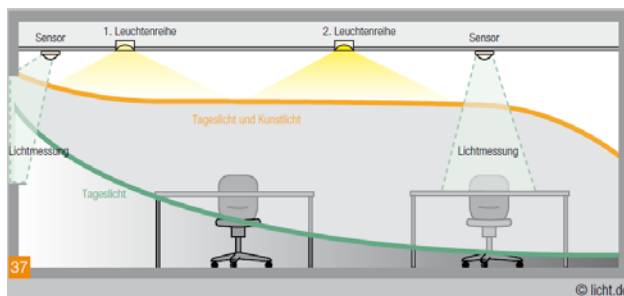


Abb.10 Modell nach licht.wissen 02.¹⁾

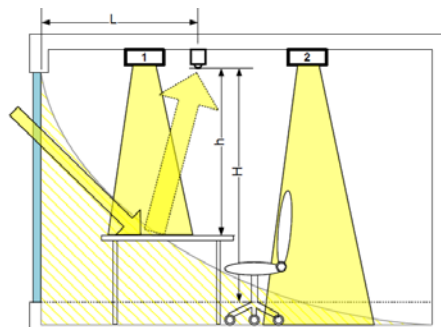


Abb.11 Modell nach OSRAM.²⁾

¹⁾Quelle: Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI e.V. – (Hrsg., 2012): licht.wissen 02, Besser lernen mit gutem Licht, Heft 02, Frankfurt am Main; http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/Lichtwissen02_Besser-lernen.pdf, Zugriff vom 16.10.2016, 15:39 Uhr; S. 24.

²⁾Quelle: OSRAM GmbH (Hrsg., 2010): Anwendungshinweise DALI PROFESSIONAL System, München; https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKewjCjK-baypLQAhUkIcAKHXiKAXQQFgggMAE&url=https%3A%2F%2Fdammedia.osram.info%2Fmedia%2Fbinx%2Fosram-dam-528924%2Fdali-professional-system-anwendungshinweise--de.pdf&usg=AFQjCNESgcScAI8o19iysEkFlh1PeQUiTA&sig2=QgZydT_slhHVw2kMdNCehA&bvm=bv.137904068,d.ZGg, Zugriff vom 05.11.2016, 22:43 Uhr; S. 11.

2.3. Modell eines smarten Klassenzimmers

2.3.1. Beachtung der Rahmenbedingungen

Wie oben insb. im Kapitel 2.1.2. und Abb.1 beschrieben, weisen die nicht-visuellen Fotorezeptoren eine erhöhte Empfindlichkeit im nasalen Bereich der Netzhaut auf. Deshalb ist darauf zu achten, dass biologisch wirksames Licht breitflächig in den unteren Bereich des Augapfels gelangt, um so eine optimale biologische Wirkung zu erzielen. Demnach ist dem Modell zu dieser Arbeit ein Beleuchtungskonzept zugrunde gelegt worden, welches neben der direkten Beleuchtung zusätzlich eine indirekte, getrennt steuerbare Beleuchtung aufweist. Während durch direkte Lichtanteile eine normgerechte Ausleuchtung eines Arbeitsbereiches gewährleistet wird, lässt sich durch die indirekte Beleuchtung die Decke ausleuchten. Dieses indirekte, von der Decke reflektierte Licht erscheint anschließend breitflächig im oberen Bereich der Sichtfelder der im Arbeitsbereich anwesenden Schüler. Mit Hilfe von verschiedenfarbigen, indirekten Lichtanteilen können bedarfsweise blaue oder andere Himmelfarben simuliert werden.

Aus Aspekten der Energieeffizienz und Nachhaltigkeit wurde dem Modell zu dieser Arbeit zudem ein „raum-unabhängiges“ Lichtmanagementsystem zugrunde gelegt, welches das direkte Kunstlicht automatisch in Abhängigkeit vom einfallenden Tageslicht und dem ausgewählten Anwendungsmodus (siehe unten Kapitel 2.4.) regelt. Um das Umrüsten bestehender Klassenzimmer zu erleichtern, erschien es schließlich zweckmäßig, in sich autarke Leuchtmodule zu entwickeln, welche sämtliche elektrische Bauelemente (Bauteile) und Sensoren umfassen. Solch ein autarkes Modul vereint vorteilhaft sowohl alle indirekten und direkten Leuchtkörper, sowie die dazugehörigen Widerstände, als auch die entsprechenden Sensoren, die zum Regeln der Raumausleuchtung benötigt werden. Bestehende raum-spezifische Lichtsteuerungssysteme, die insbesondere mit einer Montage von Sensoren an der Raumdecke verbunden sind und infolge dessen vor einer Inbetriebnahme aufwändig kalibriert werden müssen¹⁾, lassen sich nun durch autarke

¹⁾Siehe dazu exemplarisch: Lindermuth, F., Messung von Beleuchtungsanlagen in Innenräumen, in: Arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse Nr. 84 – Forschungsergebnisse für die Praxis, Bundesanstalt für Arbeit (Hrsg., 1992) Dortmund; http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjJi6uP5o_QAhUkIsAKHZv6DZ0QFggBMAA&url=hattp%3A%2F%2Fwww.baua.de%2Fde%2FPublikationen%2FAWE%2FBand3%2FAWE108.pdf%3F__blob%3DpublicationFile&usg=AFQjCNHW9gr4oHBcfdr1OqzVC7id0Ba6g&bvm=bv.137904068,d.d24, Zugriff vom 25.09.2016, 21:28 Uhr.

Leuchtmodule ersetzen. Da autarke Leuchtmodule aber weder mit weiteren Sensoren zu verbinden noch zu kalibrieren sind, dürften diese den Einzug „guten Lichtes für gute Bildung“ in Klassenzimmer spürbar vereinfachen und vorantreiben.

2.3.2. Entwicklung autarker Leuchtmodule

Für die modellhafte Entwicklung autarker Leuchtmodule wurden jeweils zwei Steckbretter (sog. Breadboards) als Grundkörper verwendet. Die Boards wurden an ihren Rückseiten zusammengeklebt und zusätzlich mit einem umlaufenden, silbrigen Klebeband fixiert (Abb.12).



Abb.12 Autarkes Leuchtmodul.¹⁾

Sie stellen den Träger der gesamten elektrischen Bauelemente dar. Für die Bereitstellung indirekter Lichtkomponenten wurden an der Trägeroberseite, entlang dessen Längsachse, Leuchtkörper aus zyklisch angeordneten Gruppen von diffusen Leuchtdioden (LED) fixiert. Dabei besteht jede dieser Gruppen aus jeweils einer blauen, einer neutralweißen und einer gelben LED. Unterseitig des Trägers befindet sich zur direkten Ausleuchtung des Arbeitsbereiches – ebenfalls entlang der Längsachse – regelmäßig platzierte Gruppen aus je einer kalt- und einer warmweißen LED. Auf der Ober- und Unterseite des Trägers befinden sich jeweils lediglich drei solcher Gruppierungen.

Zur späteren Demonstration verschiedener Anwendungsmodi (siehe unten Kapitel 2.4.) war dies im vorliegenden Modellaufbau ausreichend. In der Praxis würden re-

¹⁾Eigenes Foto.

ale Leuchtmodule freilich durchgängig angeordnete Gruppierungen an LEDs aufweisen. Alle LEDs einer Art sind zweckmäßiger Weise zueinander parallel verschaltet (Abb.13) und können somit als Einheit unabhängig von anderen LED-Gruppen angesteuert werden.

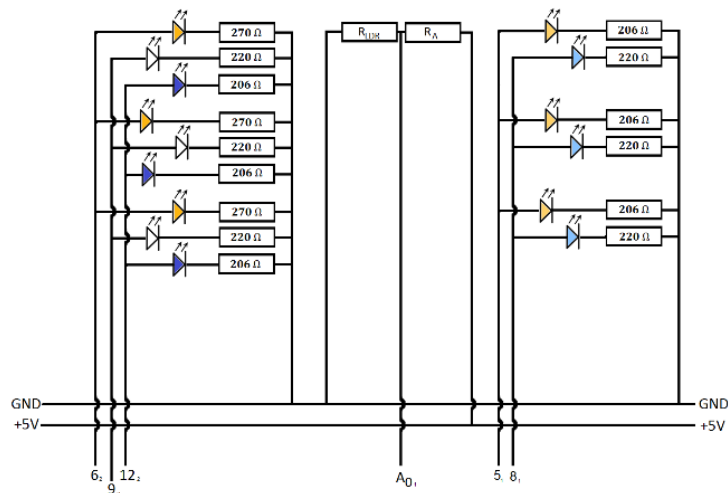


Abb.13 Schaltplan eines autarken Leuchtmoduls.¹⁾

Die im nachfolgend beschriebenen Modellaufbau eines smarten Klassenzimmers (siehe Kapitel 2.3.4.) verbauten Leuchtmodule repräsentieren mit ihrer Länge von 16,5 cm im verwendeten Maßstab von 1:15 etwa einen 2,5 m langen Abschnitt eines realen Leuchtbandes. Das Ende eines Leuchtmoduls im Modell repräsentiert somit in Realität dessen Mitte. Deshalb konnte an den Enden der drei im Modell verbauten Leuchtmodule jeweils ein Fotowiderstand als Lichtmesser (siehe oben Kapitel 2.2.2.) zwischen den beiden Steckbrettern befestigt werden. Diese Anbringung ist nicht nur gut sichtbar, sondern erlaubt zu Präsentationszwecken ein jedes Leuchtmodul autark manuell abzudunkeln. Außerdem wurde so eine Abschirmung der Fotosensoren vor direktem Lichteinfall durch die Leuchtdioden überflüssig, was die Herstellung beispielhafter Leuchtmodule für das Projekt vereinfachte. Fällt nun Tageslicht auf die Oberfläche des Arbeitsbereiches, wird dieses idealerweise diffus gestreut (Abb.14). Die Sensoren messen nun das reflektierte Streulicht und können nach einer erfolgten Kalibrierung die ungefähre Beleuchtungsstärken am Arbeitsplatz ermitteln und dazu passend das direkte Kunstlicht steuern.

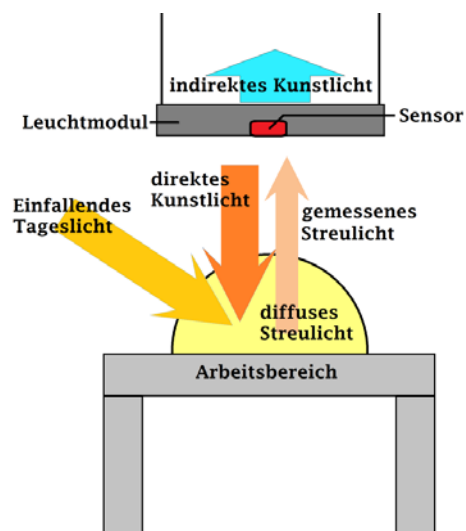


Abb.14 Messprinzip autarker Leuchtmodule.²⁾

¹⁾ Eigene Grafik.

²⁾ Eigene Grafik.

Dabei versuchen die Sensoren das Licht immer so zu regeln (Abb. 15), dass ein eingetragener Sollwert erreicht wird. Hierbei handelt es sich um den Wert, den die über den Fotowiderstand abfallende Spannung bei der gewünschten Beleuchtungsstärke (z.B. 500 lx) infolge des gemessenen Streulichts annimmt.

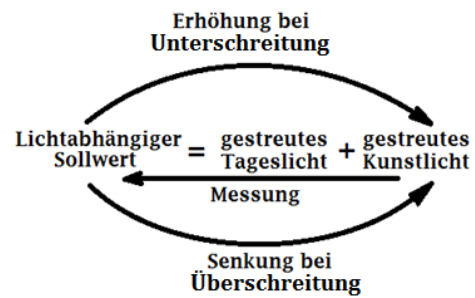


Abb.15 Regelkreis autarker Leuchtmodule.¹⁾

2.3.3. Steuerung und dazu verwendete Mikrocontroller

Für die Steuerung der autarken Leuchtmodule wurden zwei Mikrocontrollerboards MEGA 2560 verwendet (Abb.16). Dabei handelt es sich um Arduino-kompatible Boards, die also mit der offiziellen Arduino Software programmiert



Abb.16 Mikrocontrollerboard MEGA 2560.²⁾

und gesteuert werden können. Die zwei Boards können so miteinander kommunizieren, dass eines der Mikrocontrollerboards die indirekte Beleuchtung regelt, während das andere für die Auswertung und Verarbeitung von Messergebnissen, sowie für die Steuerung der direkten Leuchtkörper zuständig ist. Während Ersteres noch als externer Zeitgeber fungieren könnte, kann Letzteres zusätzlich noch die Infrarotsignale einer Fernbedienung empfangen bzw. verarbeiten.

2.3.4. Modellaufbau und Raummaße des Klassenzimmers

Gemäß § 2 Abs. 1 der Bayerischen Schulbauverordnung sollen die Grundfläche eines Klassenzimmers mind. 2 m² und der Luftraum 6 m³ je Schüler betragen.³⁾ Daraus ergeben sich für 32 Schüler eine Grundfläche von mind. 64 m² und eine Raumhöhe von 3 m. Typische Klassenzimmer mögen daher 10 m tief und 7,8 m breit sein. Um wie bei

¹⁾ Eigene Grafik.

²⁾ Eigenes Foto.

³⁾ Vgl. Schulbauverordnung (SchulbauV) vom 30. Dezember 1994 (GVBl 1995 S. 61) BayRS 2230-1-1-3-K; <http://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/BaySchulBauV>true>, Zugriff vom 04.11.2016, 20:15 Uhr.

einem Querschnitt einen Einblick in ein Klassenzimmer mit Blickrichtung auf die Tafel zu erlauben, wurde in dem zu dieser Arbeit aufgebauten Modell lediglich ein halbes, also etwa 5,25 m tiefes und 7,8 m breites Klassenzimmer realisiert. Im verwendeten Maßstab von 1:15 weist das entsprechende Modell somit eine Breite von etwa 52 cm und eine Tiefe von etwa 35 cm auf. Als Raumhöhe ergäben sich 20 cm. Aufgrund der Verwendung handelsüblicher Boards und Bauteile für die Leuchtmodule steht deren sich ergebende Modulhöhe von ungefähr 3,7 cm allerdings nicht im Verhältnis zum verwendeten Maßstab.

Daher war die Raumhöhe im Modell insgesamt größer zu wählen und bei der Auswahl der Höhe darauf zu achten, dass im verwendeten Maßstab die Abstände der LED-Leuchtkörper zur Decke und zum Boden denen eines gewöhnlich 10 cm dicken Leuchtmoduls eines realen Leuchtbandes entsprechen. Der Abstand der LED-Leuchtkörper zum Boden beträgt im Modell folglich etwa 16 cm (was real 2,45 m entspricht) und die Distanz zur Decke ca. 3 cm (was real 0,45 m entspricht). Da ein reales Leuchtmodul mit einer Dicke von 10 cm im Modellmaßstab 0,7 cm entspricht und das im Modell aufgebaute Leuchtmodul aber tatsächlich 3 cm zu hoch ist, wurde im Modell des smarten Klassenzimmers schließlich eine Raumhöhe von 23 cm gewählt.

Die Kreidetafel im Modell ist 8 cm hoch und im eingeklappten Zustand 13,5 cm lang. Das entspricht den realen Maßen von etwa 1,2 m Höhe und etwa 2 m Länge. Links in Blickrichtung zur Tafel befindet sich die einzige Fensterfront des Klassenraumes.

Die Fläche der Fensterfront sollte mindestens in einem Verhältnis von 1:10 zur Raumgrundfläche stehen.¹⁾ Dies entspricht bei Einbeziehung des gesamten Klassenraums einer Fläche von mind. 374,4 cm². Für das Modell und den gezeigten Ausschnitt des Klassenraumes wurde eine lichtdurchlässige Fläche von ca. 200 cm² gewählt. Diese wurde wie nachfolgende ersichtlich (Abb.17) aufgeteilt.

¹⁾ Vgl. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), (Hrsg., 2012): Klasse(n) – Räume für Schulen, Empfehlungen für gesundheits- und lernfördernde Klassenzimmer, Berlin; <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/si-8094.pdf>, Zugriff vom 04.11.2016, 20:06 Uhr; S. 33.

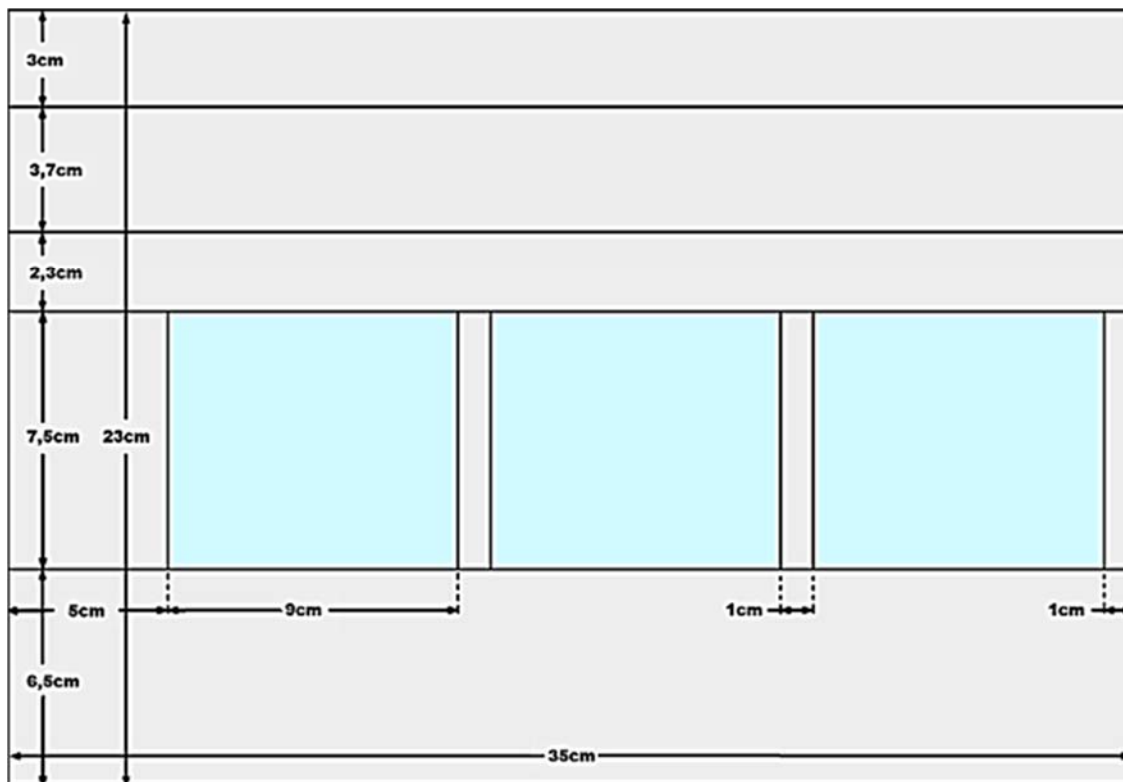


Abb.17 Raummaße und Fensterflächen.¹⁾

2.3.5. Festlegung von Soll- und Bezugswerten

Mit den im Modell verbauten autarken Leuchtmodulen können Beleuchtungsstärken um die 130 lx im Arbeitsbereich gewährleistet werden (Abb.18). Es soll ein niedrigerer geschätzter Wartungswert von 110 lx für die Anlage angenommen werden.



Abb.18 Messgerät und -beleg.²⁾

Dieser Wartungswert steht im Modell nun als Referenzwert für die in der Realität geforderten 500 lx. Bei gleichem Verhältnis gilt entsprechend für 300 lx ein Referenzwert von: $\frac{3}{5} \cdot 110 \text{ lx} \approx 70 \text{ lx}$ im Modell. Es ergeben sich somit 110 lx bzw. 70 lx als Sollwerte für die Beleuchtungsstärken im Arbeitsbereich. Nun galt es die entsprechenden Be-

¹⁾ Eigene Grafik.

²⁾ Eigenes Foto.

leuchtungsstärken im Anbringungsbereich der Fotowiderstände, also in Höhe der autarken Leuchtmodule, für den jeweiligen Sollwert zu ermitteln. Gemessen wurden die Bezugswerte für 110 lx und 70 lx.

Hierbei ergaben sich im Rahmen der Messgenauigkeiten für 110 lx ca. 20 lx und für 70 lx etwa 10 lx als Bezugswerte. Zum Schluss muss noch ein geeigneter Vorwiderstand ausgewählt werden, der die Empfindlichkeit in einem die Bezugswerte einschließenden Bereich (ungefähr 0 lx bis 30 lx) maximal steigert und somit vernünftige Messungen ermöglicht.

2.3.6. Bestimmung geeigneter Vorwiderstände

Um den optimalen Vorwiderstand ermitteln zu können, ist es erforderlich, den Widerstandswert des LDRs bei Betriebsverhältnissen zu kennen. Hierzu wurde eine Messung durchgeführt. Mittels eines Multimeters (Nr. 1 in Abb.19) wurde der Widerstand des LDRs (2) ermittelt. Unter Verwendung einer dimmbaren Stehlampe konnten bestimmte Beleuchtungsstärken im Bereich von 0 bis 30 lx erreicht werden, welche unter Verwendung des Luxmeters (3) überprüft wurden.



Abb.19 Aufbau der Messung.¹⁾

Daraus ergaben sich die in nebenstehender Tabelle verzeichneten Messergebnisse (Abb.20). Um nun den Arbeitswiderstand zu ermitteln ist es sinnvoll, die bei der Lichtmessung zu erwartenden Beleuchtungsstärken (0 lx bis 30 lx) bzw. Widerstandswerte (1,2 M Ω bis 10 k Ω) auf den möglichen Messergebnisbereich (5 V bis 0 V als Spannung, die über dem Fotowiderstand abfällt) zu übertragen. Für die Lichtmessung ist es besonders wichtig, die 10 lx von den 20 lx klar unterscheiden zu können. Demnach wird der Mittelwert des Wertebereichs, also 2,5 V, dem Mittelwert der Beleuchtungsstärke von 15 lx zu-

¹⁾Eigenes Foto.

geordnet. Damit nun bei einem Fotowiderstandswert von 15,2 kΩ nur die Hälfte der anliegenden Spannung (5 V) über dem LDR abfällt, ist ein Vorwiderstand zu wählen, dessen Widerstandswert dem des LDRs entspricht. Werte unterhalb von 15 lx können der unteren Hälfte des Wertebereichs zugeordnet werden. Werte über 15 lx können dem oberen Wertebereich zugeordnet werden. Damit lassen sich die Bezugswerte 10 und 20 lx klar voneinander trennen.

Beleuchtungsstärke	Widerstandswert des LDRs
1 lx	1,2 MΩ
5 lx	50 kΩ
6 lx	35 kΩ
10 lx	22,5 kΩ
15 lx	15,2 kΩ
20 lx	13,4 kΩ
26 lx	11 kΩ
30 lx	10 kΩ
Temperatur: T = 25,4°C	

Abb.20 Tabelle mit Messergebnissen.¹⁾

Um ein Flackern der Lampen im autarken Leuchtmodul zu verhindern, sollte um den jeweiligen Bezugswert ein Toleranzbereich gebildet werden. Bei einem verwendeten Vorwiderstand von 15,2 kΩ fallen bei 20 lx ungefähr $\frac{13,4}{15,2+13,4} \cdot 5,0\text{V} = 2,34\text{ V}$ über dem LDR ab. Bei einer Toleranz von $\pm 5\%$ ergibt sich daraus ein Toleranzbereich von 2,22 V bis 2,46 V. Diesen Bereich kann man nun als Sollwertebereich für den Wartungswert 110 lx im Modell einstellen. Ähnlich verfährt man beim Toleranzbereich für 10 lx. Hier fallen etwa $\frac{22,5}{15,2+22,5} \cdot 5,0\text{ V} = 3,0\text{ V}$ über dem Fotowiderstand ab. Somit ergibt sich ein Wertebereich von 2,85 V bis 3,15 V.

2.4. Gutes Licht für gute Bildung

Der erläuterte Aufbau autarker Leuchtmodule (siehe oben Kapitel 2.3.2.) erlaubt dem Benutzer verschiedene Lichtszenarien, sog. Anwendungsmodi, die je nach Bedarf entsprechend „gutes Licht für gute Bildung“ bereitstellen. Folgende Tabelle fasst die wichtigsten Anwendungsfälle – wie sie auch im Modell gezeigt werden – aus beleuchtungstechnischer Sicht zusammen. Die Prozentangaben stellen hierbei das Verhältnis der jeweilig maximal festgelegten Strahlungsleistung zur maximal möglichen Strahlungsleistung der jeweiligen Lampenart dar.

¹⁾Eigenes Foto.

	Anwendungsfall	Lichtmanagement					
		Biologische Wirksamkeit			Tageslichtergänzung		
		Indirekte Beleuchtung			Direkte Beleuchtung		
		B	W	G	KW	WW	Lux-S
I.	Klausurmodus	100 %	100 %	---	100 %	100 %	---
II.	Unterrichtsmodus	50 %	50 %	---	0 - 100 %	0 - 50 %	500 lx
III.	Vortragsmodus	20 %	15 %	---	20 %	15 %	---
IV.	Fade-out Ruhemodus:	-> 0 %	->20%	-> 100 %	-> 0 %	-> 100 %	---
V.	Stuhlkreismodus	---	50 %	50 %	0 - 50 %	0 - 100 %	300 lx
VI.	Pausenmodus	---	15 %	20 %	15 %	20 %	150 lx
Legende:		B = Blaue LEDs W = Weiße LEDs G = Gelbe LEDs		KW = kaltweiße LEDs (6500K) WW = warmweiße LEDs (3000K) Lux-S = Sensor, der die direkte Beleuchtung [in lx] auf den angegebenen Sollwert [in V] steuert			

Abb.21 Tabelle mit Anwendungsparametern.¹⁾

2.4.1. Der Klausurmodus

Im Anwendungsfall **Klausurmodus** (Abb.22) wird die Decke mit maximaler Leistung der oberseitigen blauen und weißen LEDs beleuchtet, sodass ein kaltweißer Farbeindruck entsteht. Das reflektierte Licht enthält viele Blauanteile und erhält somit effektiven Eingang in die vielen aktivierenden Zentren des Gehirns. Die Schüler werden aktiviert und können konzentrierter und besser arbeiten. Auch die Bestandteile der direkten Beleuchtung laufen in diesem Modus auf maximaler Leistung. Dadurch wird einerseits die biologische Wirkung des Lichts, die neben der Wellenlänge auch von der Beleuchtungsstärke beeinflusst wird, unterstützt. Andererseits wird so auch der Arbeitsbereich heller ausgeleuchtet, was die Sehaufgaben erleichtert. Durch die Mischung warmweißer und kaltweißer LEDs ergibt sich bei Verwendung eines Diffusors (z.B. Milchglas) zudem ein homogener, tageslichtweißer Farbeindruck und auf Grund der unterschiedlichen Emissions-



Abb.22 Klausurmodus.²⁾

¹⁾ Eigene Tabelle.

²⁾ Eigenes Foto.

spektren der beiden Leuchtmittel eine gute, normgerechte Farbwiedergabe. Diese Einstellung ermöglicht folglich optimales Arbeiten, indem Konzentration, Vitalität, und Leistungsbereitschaft positiv durch maximale Ausleuchtung des Arbeitsplatzes beeinflusst werden. Da der Mensch bei hohen Beleuchtungsstärken effizienter und motivierter ist, wird die direkte Beleuchtung konstant betrieben („Lichtdusche“) und nicht vom LDR gesteuert. Es liegt also mindestens der Wert von 500 lx am realen Arbeitsplatz (bzw. 110 lx im Modell) vor. Diese Beleuchtungsstärke wird durch einfallendes Tageslicht additiv erhöht. Die Anwendung dieses Lichtprofils sollte bei Klausuren und ggf. in den Morgenstunden bzw. zu Beginn der letzten Unterrichtseinheit am Vormittag geschehen. So können bessere Leistungen erreicht oder der Einstieg in den Schultag erleichtert bzw. auch Müdigkeit und Demotivation entgegengewirkt werden. Aufgrund der maximalen Arbeitsleistung der Leuchtkörper ist dieser Modus jedoch nicht sehr energiesparend und sollte nur in den genannten Szenarien angewendet werden.

2.4.2. Der Unterrichtsmodus

Für normale Schulstunden reicht nämlich der **Unterrichtsmodus** (Abb. 23) aus. Er bietet einen guten Kompromiss aus Energieeffizienz und Leistungsförderung. Energie wird hier nicht verschwendet, da die Lichtemission der indirekten Beleuchtung sowie die der warmweißen, direkten Komponenten auf je die



Abb.23 Unterrichtsmodus.¹⁾

Hälfte begrenzt werden. Besonders energiesparend wirkt sich zusätzlich die Steuerung des direkten Lichts mit Hilfe der angebrachten Fotowiderstände aus. Die indirekte Beleuchtung erfüllt dieselben Aufgaben wie bei dem oben beschriebenen Klausurmodus (Abb.22), unterscheidet sich aber vor allem in der Helligkeit mit der die Decke ausgeleuchtet wird. Die direkte Beleuchtung erscheint aufgrund der höheren Intensität der kaltweißen Komponente eher bläulich. Der aktivierende bläuliche Farbeindruck wirkt sich sowohl auf biologischer als auch auf emotionaler Ebene positiv aus.

¹⁾Eigenes Foto.

2.4.3. Der Vortragsmodus

Einen speziellen Anwendungsfall stellt der **Vortragsmodus** (Abb.24) dar. Hier werden die Decke und der Arbeitsplatz nur schwach beleuchtet, um das Bild des Projektors nicht negativ zu beeinflussen. Die schwache Ausleuchtung der Decke mit weißem und blauem Licht



*Abb.24 Vortragsmodus.*¹⁾

soll die Zuschauer vor Müdigkeit bewahren. Zugleich ermöglicht die schwache direkte, eher kaltweiße Beleuchtung das Anfertigen von Notizen bzw. Mitschriften und fördert ebenfalls die Konzentration. Eine tageslichtabhängige Steuerung ist hier nicht sinnvoll, da im Vortragsmodus ohnehin der Klassenraum normalerweise abgedunkelt wird.

2.4.4. Der Fade-out Ruhemodus

Für Abendklassen wird noch ein besonderer **Fade-out Ruhemodus** vorgestellt. In der Literatur finden sich Empfehlungen für eine tagessynchrone Beleuchtung, die den circadianen Rhythmus unterstützt und deshalb niedrigere Beleuchtungsstärken und höhere Rotanteile aufweist. Sie soll den Menschen auf seine Schlafphase vorbereiten.²⁾ Jedoch ist dies nur für Menschen sinnvoll, die sich überwiegend den ganzen Tag in einem Klassenraum aufhalten und anschließend nach Hause gehen, um sich auszuruhen. Doch für späte Abendklassen ist ein derartiges Lichtkonzept eher kontraproduktiv. Die Teilnehmer von Abendklassen haben das Problem, dass sie zu später Stunde noch Leistung abrufen müssen. Zudem kommen viele direkt aus der Arbeit oder von Zuhause, wobei zumindest Letztere in Laufe des Tages nicht mit biologisch wirksamen Licht unterstützt wurden. Diesen Teilnehmern ein Lichtprofil bereitzustellen, das sie bereits auf die Schlafphase vorbereitet, erscheint nicht zielführend.³⁾ Die Teilnehmer dürften nämlich haupt-

¹⁾ Eigenes Foto.

²⁾ Siehe: Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI e.V. – (Hrsg., 2014): licht.wissen 19, Wirkung des Lichts auf den Menschen, Heft 19, Frankfurt am Main; http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/1403_1w19_Wirkung_auf_Mensch_web.pdf, Zugriff vom 04.11. 2016, 20:17 Uhr; S. 20-22 und S. 31f.

³⁾ So auch die Einschätzung von Fr. Dr. Hanne Nuss, welche als Lehrbeauftragte und Dozentin an verschiedenen Bildungseinrichtungen langjährig einschlägige Erfahrungen in der Unterrichtung von Erwachsenen in Tages- und Abendkursen sowie an Sommerakademien besitzt; Expertengespräch vom 15.10.2016 in Unterschleißheim.

sächlich viel Wissen aus den späten Abendstunden mitnehmen wollen. Außerdem gehen sie nach dem Unterricht auch nicht sofort ins Bett, sondern müssen anschließend noch heimfahren, etwas essen oder sich auf den nächsten Tag vorbereiten. Es wäre für diese Teilnehmer besser, wenn sie von einem aktivierenden Licht empfangen werden und durch aktivierende Impulse möglichst lange in ihrer Konzentrationsfähigkeit unterstützt werden. Deshalb wird im Modell für Abendklassen keine grundsätzliche Abweichung von den im Lichtmanagementsystem bereitgestellten Anwendungsmodi vorgesehen.

Um dennoch die Teilnehmer einer Abendklasse nicht abrupt aus dem aktivierenden Licht z.B. eines Unterrichtsmodus in den Abend zu entlassen, wird vorgeschlagen, diese entsprechend vorzubereiten. Dazu

wurde, speziell für Abendklassen, ein sogenannter **Fade-out Ruhemodus** (Abb.25) entworfen, welcher in den letzten 10 Minuten der letzten Unterrichtsstunde vom aktuell eingestellten Modus in einen Ruhemodus wechselt. Dabei werden die kaltweißen Lichtanteile des Direktlichts sukzessive abgeschaltet, so dass nur noch die warmweißen Lichtanteile für eine Ausleuchtung des Arbeitsplatzes sorgen. Zudem wird das indirekte Licht zur Erzeugung einer entspannenden Atmosphäre genutzt: die aktivierenden blauen LEDs werden sukzessive ausgeschaltet und zeitgleich die weißen LEDs auf eine niedrigere Leistung gedrosselt. Parallel dazu werden die gelben LEDs hinzugeschaltet, die schließlich für die Erzeugung der gewünschten Atmosphäre tragend sind. Dieser Fade-out Mix dürfte den Menschen initialisieren, sich auf die nächtliche Regenerationsphase einzustellen.

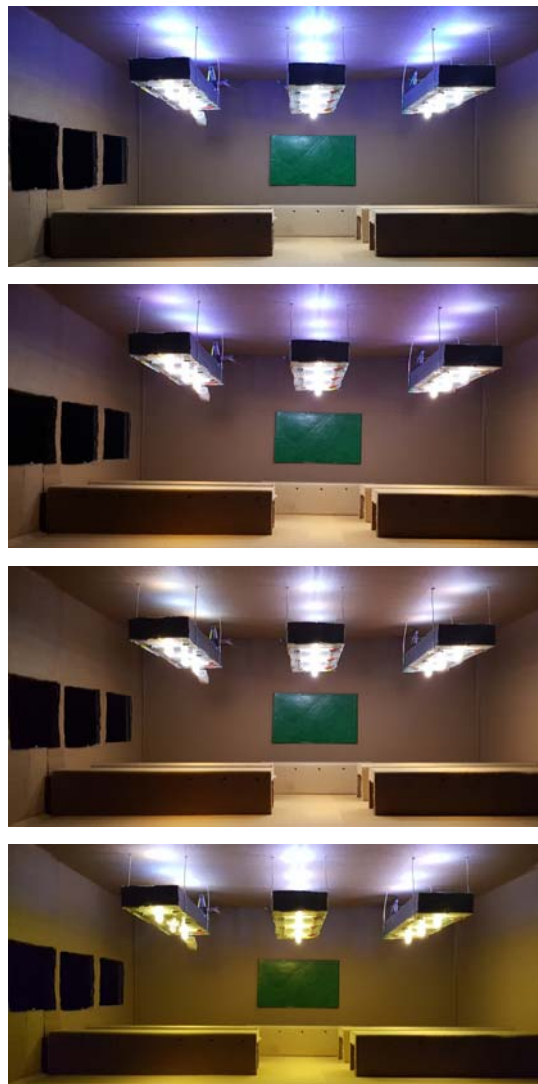


Abb.25 Fade-out Ruhemodus.¹⁾

¹⁾Eigene Fotos.

2.4.5. Der Stuhlkreismodus

Auch im **Stuhlkreismodus** (Abb.26) werden die indirekten, gelben Leuchtdioden verwendet. In Kombination mit den weißen Leuchtdioden wird somit eine lockere Atmosphäre erzeugt. Warmweiße Lichtanteile überwiegen die der kaltweißen Lichtanteile in der direkten Beleuchtung. Das Lichtmanagementsystem versucht in Ergänzung zum Tageslicht in diesem Modus nur 300 lx im realen Bestuhlungsbereich (bzw. 70 lx im Modell) aufrechtzuerhalten. Denn dieser Modus bietet sich für Stuhlkreise sowie Situationen an, indem nicht anspruchsvolle Sehaufgaben gestellt sondern die Kommunikation unter den Teilnehmern gefördert werden sollen.



*Abb.26 Stuhlkreismodus.*¹⁾

2.4.6. Der Pausenmodus

Der **Pausenmodus** (Abb.27) schließlich stellt einen sehr energiesparenden Anwendungsfall dar. Die indirekte Beleuchtung ist dabei auf eine nur sehr schwache Helligkeit eingestellt. Auch die direkte Beleuchtung arbeitet nur mit minimaler Leistung der kalt- und warmweißen LEDs. In diesem Modus dürften in Ergänzung zum einfallenden Tageslicht 150 lx am realen Arbeitsplatz (bzw. 33 lx im Modell) ausreichend sein.



*Abb.27 Pausenmodus.*²⁾

Da am Carl-Orff-Gymnasium (COG) Unterschleißheim es zumindest den Schülern der Oberstufe gestattet ist, sich in den Pausen im Klassenzimmer aufzuhalten, wäre es zweckdienlich, wenn benutzte Plätze auch im Pausenmodus (Abb.27) intensiver ausgeleuchtet würden. Dies kann durch die Anbringung von Anwesenheitssensoren an einem

¹⁾Eigenes Foto.

²⁾Eigenes Foto.

jeden autarken Leuchtmodul erfolgen. Solche Sensoren erkennen die Anwesenheit von Personen in ihrem Messbereich und würden bei einer erkannten Anwesenheit die direkte Beleuchtung des autarken Leuchtmoduls beispielsweise auf Stuhlkreismodus (300 lx real bzw. 70 lx im Modell) anheben und bei längerer Abwesenheit im jeweiligen Erfassungsbereich die Helligkeit des Leuchtmoduls wieder auf Pausenmodus (Abb.27) begrenzen. Es werden also nur benutzte Arbeitsplätze intensiv ausgeleuchtet. Dies setzt aber auch voraus, dass die einzelnen Leuchtkörper in einem Leuchtmodul individuell gesteuert werden können, was technisch möglich, im hier vorgestellten Modell aber nicht realisiert ist.

2.5. Ausblick

Der im Modell gewählte Montageort des Fotosensors zeigt eine vereinfachte Variante der Lichtmessung. Dessen Präzision kann – hier als Ausblick – durch die Anordnung eines Sensorfeldes mit mehreren Fotosensoren (rote Flächen in Abb.28) pro Leuchtband gesteigert werden.

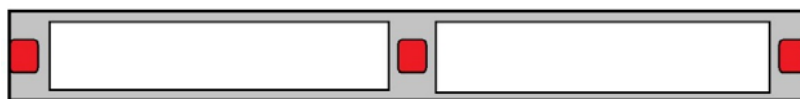


Abb.28: Vorschlag eines Sensorfeldes für reale autarke Leuchtmodule.¹⁾

Ein solches Sensorfeld hätte zum Vorteil, dass nicht nur quer zur Fensterfront Tageslichteinfall Berücksichtigung findet, sondern auch bei Klassenzimmern mit Eckfenster und/oder Oberlichtern eine Dynamik auch innerhalb des/der autarken Leuchtmodule aussteuerbar sein kann, ohne die Idee zu verlassen, Sensor und Leuchtmittel in einem Gehäuse zu vereinbaren.

Anders als in diesem Modell realisiert, welches auf diskrete Bauelemente zurückgreift, wäre freilich auch eine Integration insb. der Steuerschaltung (vgl. oben Kapitel 2.3.3.) und der Vorwiderstände (siehe oben Kapitel 2.3.6.) auf einer eigenen Leiterplatte, einem sog. printed circuit board (PCB), erstrebenswert.²⁾

¹⁾ Eigene Grafik.

²⁾ So die Expertenempfehlung von Hr. Yair Maryanka, Geschäftsführer der YAMAR Electronics Ltd., Tel-Aviv, Israel, vgl. <http://yamar.com/home/>; in der sich an das Expertengespräch vom 26.02.2016 in Unterschleißheim anschließenden E-Mail Korrespondenz vom 10. und 11.03.2016.

3. Nachwort

Diese Arbeit befasste sich mit der Entwicklung eines smarten Klassenzimmers, in dessen Zentrum autarke Leuchtmodule stehen, die allein eine „intelligente“ Ausleuchtung übernehmen können. Wie anhand des Modells eines smarten Klassenzimmers eindrücklich verdeutlicht, erlauben autarke Leuchtmodule die biologische Wirkung des Lichts optimal in Schulräume umzusetzen. Die seitens licht.wissen (Abb.10) und OS-RAM (Abb.11) vorgeschlagenen Lichtsteuerungssysteme wurden dagegen „raum-spezifisch“ zu Studienzwecken konzipiert, weshalb smarte Lichtsteuerungssysteme leider noch nicht weitverbreitet anzutreffen sind.

Lichtmanagementsysteme mit autarken Leuchtmodulen – wie in dieser Arbeit vorgestellt – bieten dagegen eine gute Möglichkeit, nicht nur „gutes Licht für gute Bildung“ bedarfsgerecht bereitzustellen, sondern auch energieeffizient zu arbeiten. Deshalb sollten sie in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Vor allem in Bezug auf die Energiewende dürfte man um Lichtmanagementsysteme auch in Schulen nicht umhinkommen. Der wichtigste Vorteil der hier vorgestellten autarken Leuchtmodule verknüpft die biologische Wirkung von Licht, die sich motivierend, aktivierend und leistungsfördernd auswirkt, mit einer deutlich erleichterten Montage für bestehende oder neu errichtete Klassenräume.

Deswegen würde ich mich freuen, wenn sich Bildungseinrichtungen und -ministerien dazu entscheiden würden, vermehrt autarke Leuchtmodule zu installieren, um so ihre Klassenräume „intelligenter“ zu machen. Denn gute Bildung bleibt das wichtigste Ziel einer jeden Generation.

Samuel Heilein

4. Quellenverzeichnis

4.1. Bücher:

1. Beuth, Klaus / Beuth, Olaf: Elementare Elektronik, 8. Auflage, Würzburg 2013.
2. Fischer, Hans / Hofmann, Hansgeorg / Spindler, Jürgen: Werkstoffe in der Elektrotechnik, Grundlagen – Aufbau – Eigenschaften – Prüfung – Anwendung – Technologie, 6. Auflage, München 2007.
3. Heilein, Ernst-Peter, Die Bedeutung des Rechtsschutzes für integrierte Halbleiterschaltkreise in der Praxis, Prognose und Probleme eines sondergesetzlichen Schutzes, Wettbewerbsrechtliche Studien Band 5, Frankfurt am Main, 2003.
4. Hering, Ekbert / Bressler, Klaus / Gutekunst, Jürgen: Elektrotechnik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 5. Auflage, Berlin Heidelberg 2005.
5. Hilgers Hans Gerd / Wosnitza, Franz: Energieeffizienz und Energiemanagement, Ein Überblick heutiger Möglichkeiten und Notwendigkeiten, Wiesbaden 2012.
6. Jüstel, Thomas / Schwung, Sebastian: Leuchtstoffe, Lichtquellen, Laser, Lumineszenz, Berlin Heidelberg 2016.
7. Kark, Klaus: Antennen und Strahlungsfelder, Elektromagnetische Wellen auf Leitungen, im Freiraum und ihre Abstrahlung, 5. Auflage, Wiesbaden 2014.
8. Schild, Kai / Brück, Henrik: Energie-Effizienzbewertung von Gebäuden, Anforderungen und Nachweisverfahren gemäß EnEV 2009, 1. Auflage, Wiesbaden 2010.
9. Stiny, Leonhard: Passive elektronische Bauelemente, Aufbau, Funktion, Eigenschaften, Dimensionierung und Anwendung, 2. Auflage, Wiesbaden 2015.
10. Theiß, Erik: Beleuchtungstechnik, Neue Technologien der Innen- und Außenbeleuchtung, Gebäudetechnik Band 1, München 2000.
11. Young, Matt: Optik, Laser, Wellenleiter, Berlin Heidelberg 1997.

4.2. Internetadressen:

1. Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI e.V. – (Hrsg., 2014): licht.wissen 19, Wirkung des Lichts auf den Menschen, Heft 19, Frankfurt am Main; http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/1403_lw19_Wirkung_auf_Mensch_web.pdf, Zugriff vom 04.11.2016, 20:17 Uhr.
2. Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI e.V. – (Hrsg., 2012): licht.wissen 02, Besser lernen mit gutem Licht, Heft 02, Frankfurt am Main; http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/Lichtwissen02_Besser-lernen.pdf, Zugriff vom 16.10.2016, 15:39 Uhr.
3. Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI e.V. – (Hrsg., 2012): licht.wissen 04, Licht im Büro, motivierend und effizient, Heft 04, Frankfurt am Main; http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/1204_lichtwissen04_WEB_index.pdf, Zugriff vom 04.11.2016, 20:18 Uhr.
4. OSRAM AG (Hrsg., 2012): Licht in seiner dritten Dimension, Der biologische Aspekt in der Lichtplanung für mehr Lebensqualität, Broschüre No. 7ZZK008DE 04/12 CO OSRAM CMK MK AB, München; <http://www.osram.de/media/resource/HIRES/337328/1934101/applikationsbroschre-licht-und-lebensqualitt-d.pdf>, Zugriff vom 16.10.2016, 15:34 Uhr.
5. OSRAM GmbH (Hrsg., 2010): Anwendungshinweise DALI PROFESSIONAL System, München; https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwjCjKbaypLQAhUkIcAKHXiKAXQQFgggMAE&url=https%3A%2F%2Fdammedia.osram.info%2Fmedia%2Fbinx%2Fosram-dam-528924%2Fdali-professional-system-anwendungshinweise--de.pdf&usq=AFQjCNESgcScAI8o19iysEkFlh1PeQUiTA&sig=2=QgZydT_slnHVw2kMdNCehA&bvm=bv.137904068,d.ZGg, Zugriff vom 05.11.2016, 22:43 Uhr.
6. Licht.de – eine Brancheninitiative des ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., Licht taktet die innere Uhr; <http://www.licht.de/de/trends-wissen/licht-specials/human-centric-lighting/>

- mensch-und-licht/licht-taktet-die-innere-uhr/, Zugriff vom 04.11.2016, 20:14 Uhr.
7. Licht.de – eine Brancheninitiative des ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., Circadianer Rhythmus; <http://www.licht.de/de/trends-wissen/wissen-kompakt/lichtlexikon/detail-s-lichtlexikon/circadianer-rhythmus/>, Zugriff vom 04.11.2016, 20:11 Uhr.
 8. Schulbauverordnung (SchulbauV) vom 30. Dezember 1994 (GVBl 1995 S. 61) BayRS 2230-1-1-3-K; <http://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/BaySchulBauV>true>, Zugriff vom 04.11.2016, 20:15 Uhr.
 9. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), (Hrsg., 2012): Klasse(n) – Räume für Schulen, Empfehlungen für gesundheits- und lernfördernde Klassenzimmer, Berlin; <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/si-8094.pdf>, Zugriff vom 04.11.2016, 20:06 Uhr.
 10. Lindermuth, F., Messung von Beleuchtungsanlagen in Innenräumen, in: Arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse Nr. 84 – Forschungsergebnisse für die Praxis, Bundesanstalt für Arbeit (Hrsg., 1992) Dortmund; http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjJi6uP5o_QAhUkIsAKHZv6DZ0QFggBMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.baua.de%2Fde%2FPublikationen%2FAWE%2FBand3%2FAWE108.pdf%3F__blob%3DpublicationFile&usg=AFQjCNHW9gr4oHBcfdr1OqzVC7id0Ba6g&bvm=bv.137904068,d.d24, Zugriff vom 25.09.2016, 21:28 Uhr.

4.3. Expertenbefragungen:

1. Hr. Yair Maryanka, Geschäftsführer der YAMAR Electronics Ltd., Tel-Aviv, Israel, vgl. <http://yamar.com/home/>; Expertengespräch vom 26.02.2016 in Unterschleißheim, und sich daran anschließender E-mail Korrespondenz vom 10. und 11.03.2016.
2. Fr. Dr. Hanne Nuss, welche als Lehrbeauftragte und Dozentin an verschiedenen Bildungseinrichtungen langjährig einschlägige Erfahrungen in der Unterrichtung von Erwachsenen in Tages- und Abendkursen sowie an Sommerakademien besitzt; Expertengespräch vom 15.10.2016 in Unterschleißheim.

4.4. Bildquellenverzeichnis:

Abb.0 Titelbild, eigenes Foto.

Abb.1 *Lichtwirkung in Abhängigkeit des Einfallswinkels*, Quelle: Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI e.V. – (Hrsg., 2014) licht.wissen 19, Wirkung des Lichts auf den Menschen, Heft 19, Frankfurt am Main, http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/1403_lw19_Wirkung_auf_Mensch_web.pdf; Zugriff vom 04.11. 2016, 20:17 Uhr, S. 21.

Abb.2 *Erdatmosphäre als blaue Himmelskuppel*; eigenes Foto.

Abb.3 *Darstellung des Fotoeffekts*; eigene Grafik.

Abb.4 *Handelsüblicher Fotowiderstand*; eigenes Foto.

Abb.5 *Aufteilung der Gesamtspannung*; eigene Grafik.

Abb.6 *Aufbau der Untersuchung*, eigenes Foto.

Abb.7 *Schaltplan der Untersuchung*, eigene Grafik.

Abb.8 *Tabelle der Messergebnisse*, eigene Tabelle.

Abb.9 *Diagramm der Messergebnisse*, eigene Grafik.

Abb.10 *Modell nach licht.wissen 02*, Quelle: Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI e.V. – (Hrsg., 2012): licht.wissen 02, Besser lernen mit gutem Licht, Heft 02, Frankfurt am Main; http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/Lichtwissen02_Besser-lernen.pdf, Zugriff vom 16.10.2016, 15:39 Uhr; S. 24.

Abb.11 *Modell nach OSRAM*, Quelle: OSRAM GmbH (Hrsg., 2010): Anwendungshinweise DALI PROFESSIO NAL System, München; https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwjCjKbaypLQAhUkIcAKHXiKAXQQFgggMAE&url=https%3A%2F%2Fdammedia.osram.info%2Fmedia%2Fbinx%2Fosram-dam-528924%2Fdali-professional-system-anwendungshinweise--de.pdf&usg=AFQjCNESgcScAI8o19iysEkFlh1PeQUiTA&sig2=QgZydT_slnHVw2kMdNCehA&bvm=bv.137904068,d.ZGg, Zugriff vom 05.11.2016, 22:43 Uhr; S. 11.

Abb.12 *Autarkes Leuchtmodul*, eigenes Foto.

Abb.13 *Schaltplan eines autarken Leuchtmoduls*, eigene Grafik.

Abb.14 *Messprinzip autarker Leuchtmodule*, eigene Grafik.

Abb.15 *Regelkreis autarker Leuchtmodule*, eigene Grafik.

Abb.16 Mikrocontrollerboard MEGA 2560, eigenes Foto.

Abb.17 Raummaße und Fensterflächen, eigene Grafik.

Abb.18 Messgerät und -beleg, eigenes Foto.

Abb.19 Aufbau der Messung, eigenes Foto.

Abb.20 Tabelle mit Messergebnissen, eigene Tabelle.

Abb.21 Tabelle mit Anwendungsparametern, eigene Tabelle.

Abb.22 Klausurmodus, eigenes Foto.

Abb.23 Unterrichtsmodus, eigenes Foto.

Abb.24 Vortragsmodus, eigenes Foto.

Abb.25 Fade-out Ruhemodus, eigene Fotos.

Abb.26 Stuhlkreismodus, eigenes Foto.

Abb.27 Pausenmodus, eigenes Foto.

Abb.28 Vorschlag eines Sensorfeldes für reale autarke Leuchtmodule, eigene Grafik.