Energieoptimiertes Bauen – EnEff:Schule
Neubau der St. Franziskus-Grundschule in Halle (Saale)
als Nullenergiehaus in Holzbauweise

Abschlussbericht
Teil 11: Beleuchtung und Verschattung

Prof. Dr.-Ing. K. Jagnow
Dipl.-Ing. (FH) K. Gebhardt, M. Eng.

Die Verantwortung für den Inhalt
des Berichtes liegt bei den Verfassern.

Magdeburg, September 2018

unter dem Förderkennzeichen
FKZ 0327430O
gefördert durch das:
Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Impressum

Projektförderung:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
unter dem Förderkennzeichen FKZ 0327430O
Im Förderprogramm Energieoptimiertes Bauen (EnOB) – EnEff: Schule

Projektträger:

Projektträger Jülich (PTJ)
Wilhelm-Johnen-Straße
52428 Jülich

Projektlaufzeit:

01.04.2013 - 31.03.2018

Fördermittelnehmer und Forschungskooperationspartner:

Edith-Stein-Schulstiftung des Bistums Magdeburg
Max-Josef-Metzger-Str. 1
39104 Magdeburg

Verantwortliche Berichtverfasser:

Prof. Dr.-Ing. Kati Jagnow
Dipl.-Ing. (FH) Katharina Gebhardt, M. Eng.
Fachbereich Wasser, Bau, Umwelt und Sicherheit
Hochschule Magdeburg/Stendal
Breitscheidstraße 2, 39114 Magdeburg

Projektbearbeiter:

Prof. Dr.-Ing. Kati Jagnow
Dipl.-Ing. (FH) Katharina Gebhardt, M. Eng.
Ina Asmussen, M. Eng.
Julia Benn, M. Eng.
Florian Hallensleben, M. Eng.

Datenstand:

Magdeburg, 30.09.2018

Inhalt

Impressum 3

1 Zusammenfassung 7

2 Beleuchtungsplanung 15
2.1 Sollwerte Beleuchtungsstärken 15
2.2 Simulationsergebnisse 15
2.3 Verallgemeinerung und Fazit 20

3 Komponenten und Bauteile 21
3.1 Übersichtspläne 21
3.2 Installierte Lampen und Leuchten 23
3.3 Verschattung Klassenräume 28
3.4 Verschattung Aula 29
3.5 Verschattung andere Räume 30

4 Regelung und Steuerung 33
4.1 Bewegungsmelder 33
4.2 Lichtszenarien Klassenräume 33
4.3 Verschattung Klassenräume 36
4.4 Problemfälle und Verbesserungsansätze 36

5 Tages- und Kunstlichtmessung 37
5.1 Messorte und Messtechnik 37
5.2 Auswertung Tageslichtmessung 45
5.3 Auswertung Kunstlichtmessung 50
5.4 Vergleich mit Planwerten 62
5.5 Abgleich zur Simulation 63
5.6 Verallgemeinerung und Fazit 65

6 Messergebnisse Funktion 67
6.1 Messorte und Messtechnik 67
6.2 Typischer Tagesverlauf 69
6.3 Typischer Wochenverlauf 71
6.4 Jahresverlauf 74
6.5 Nutzerbefragungen April 2015 76
6.6 Nutzerbefragungen September 2017 76
6.7 Probleme und Verbesserungsansätze 79
6.8 Verallgemeinerung und Fazit 80

7 Bedarfsprognose 81
7.1 Bedarf nach DIN V 18599-4 81
7.2 Bedarf nach PHPP 81
7.3 Ingenieurmäßige Abschätzung 81
7.4 Abgleich mit Messwerten 82
7.5 Verallgemeinerung und Fazit 82

8 Messergebnisse Energie 83
8.1 Messorte und Messtechnik 83
8.2 Monats- und Jahresverbrauch der Klassenräume im Vergleich 83
8.3 Auswertung Nordklassenraum 84
8.4 Auswertung Südklassenraum 86
8.5 Problemfälle und Verbesserungsansätze 87
8.6 Verallgemeinerung und Fazit 87

9 Außenbeleuchtung 89
9.1 Komponenten 89
9.2 Regelung 90
9.3 Bedarfsprognose 90
9.4 Messorte und Messtechnik 91
9.5 Energieverbrauch 91
9.6 Problemfälle und Verbesserungsansätze 93
9.7 Verallgemeinerung und Fazit 93

10 Anhang 95
10.1 **Literatur 95**
10.2 Nomenklatur 96
10.3 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis 97
10.4 Verantwortliche Planer und Ausführende 100
10.5 Überblick über separate Anhänge 100

1 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht beschreibt detailliert das Beleuchtungskonzept der Schule hinsichtlich der Tageslichtversorgung und der Kunstlichtbeleuchtung mit den hierfür zum Einsatz kommenden Leuchtenkomponenten. Simulationen, Prognosen und Messungen zur Funktion und zum Energieverbrauch untermauern das Konzept mit den notwendigen Zahlenwerten. Ebenso werden die Verschattungseinrichtungen beschrieben und Schwierigkeiten mit dem gewählten System thematisiert.

Beleuchtungsplanung und Simulation

Die Beleuchtung der Gebäudebereiche erfolgt in Anlehnung an die in Tabelle 1-1 aufgeführten Sollwerte für die Beleuchtungsstärken.

Tabelle 1-1: Beleuchtungsstärken der Bereiche [1] [2]

Gebäudebereich	Beleuchtungsstärke
Klassenräume, Horträume	300 lx
Fachunterrichtsraum Werken 2.17	500 lx
Fachunterrichtsraum Kunst 2.14	750 lx
Sanitärräume	200 lx
Flure	100 lx

Die Simulationsergebnisse für die ausgewählten Klassenräume 1.08 und 2.01, das Mädchen-WC 1.10 sowie den Flur im Klassenbereich sind sehr zufriedenstellend.

Die empfohlenen Beleuchtungsstärken von 300 lx werden in den Klassenzimmern im Arbeitsplatzbereich mit Werten von im Mittel ca. 670 lx und Teilbereichen über 750 lx deutlich überschritten, siehe Abbildung 1-1. Auch die PC-Arbeitsplätze und die allgemeine Umgebung sind heller als gefordert. Lediglich der Bereich der Mappenregale ist mit < 100 lx etwas schwächer ausgeleuchtet als für den Umgebungsbereich der Sehaufgabe gefordert (Sollwert 200 lx), jedoch wird dieser Bereich nur kurzzeitig zum Holen und Wegstellen von Dingen genutzt.

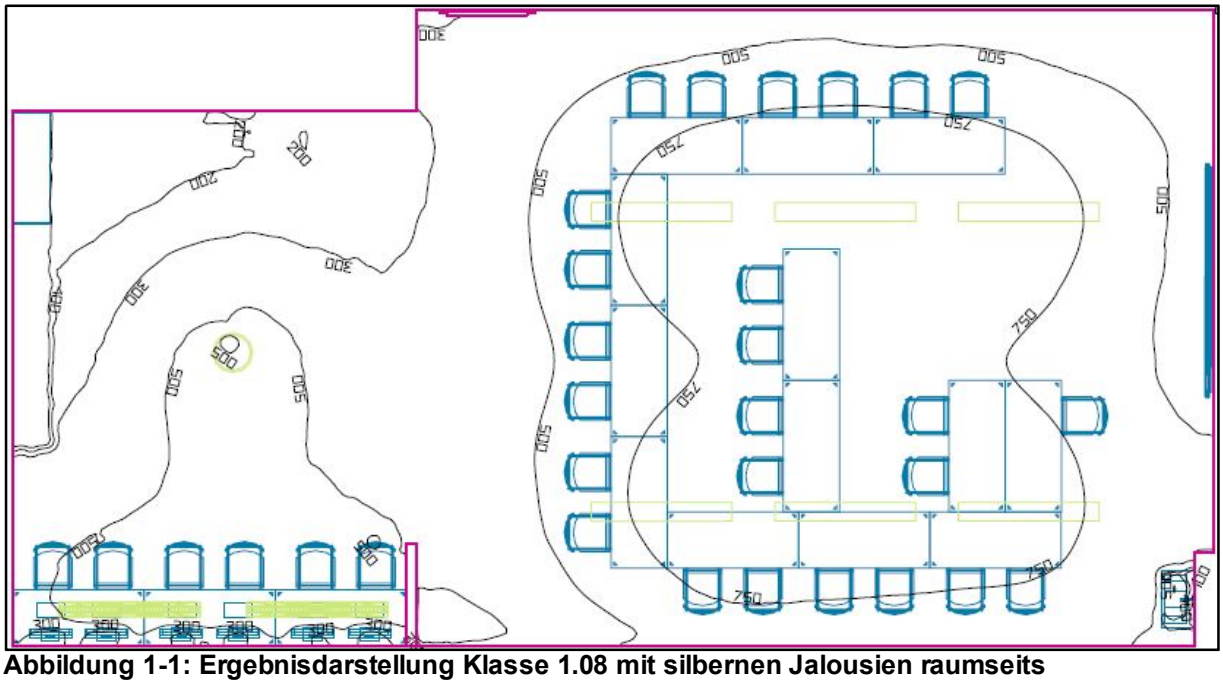

Abbildung 1-1: Ergebnisdarstellung Klasse 1.08 mit silbernen Jalousien raumseits

Das simulierte Mädchen-WC 1.10 ergab überwiegend die empfohlene Beleuchtungsstärke von 200 lx. Lediglich im Bereich der Waschbecken waren zu geringe Beleuchtungsstärken zu verzeichnen, was im Bedarfsfall durch das Nachrüsten von Leuchten behoben werden könnte. Im messtechnisch untersuchten Mädchen-WC im Erdgeschoss zeigte sich dieses Problem jedoch nicht, siehe Kapitel 5.3.

Der untersuchte Flur erfüllte die Anforderungen an eine Beleuchtungsstärke von 50 lx (Flure ohne Stufen) bzw. den Planwert von 100 lx (Flure inkl. Treppenhäuser) deutlich.

Komponenten und Bauteile

Es wurden 403 Stück Leuchten im Innenbereich und 14 Stück im Außenbereich der Schule installiert, die sich auf 19 verschiedene Leuchtentypen reduzieren lassen. Überwiegend wurden Leuchtstoffröhren als Leuchtmittel eingesetzt, jedoch kamen auch LED zum Einsatz. Die Gesamtleistung der Leuchtmittel beträgt ca. 22 kW.

In den Klassenzimmern kann zwischen direkter Arbeitsplatzbeleuchtung und indirekter Raumbeleuchtung gewählt werden. Auch eine Kombination aus beidem ist möglich.

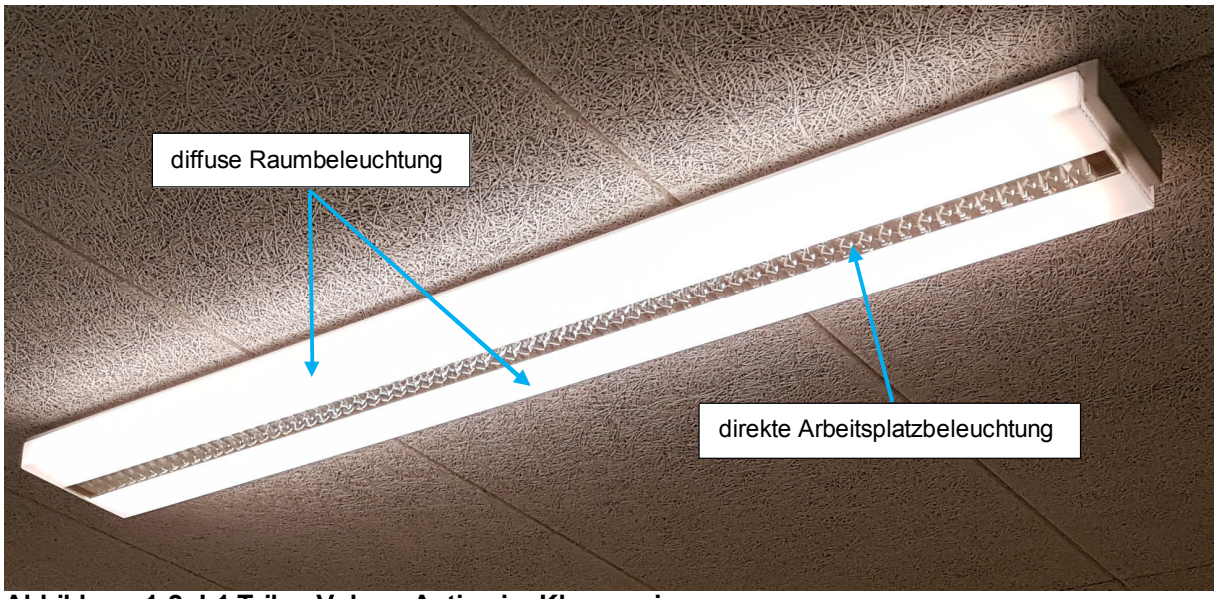

Abbildung 1-2: L1 Trilux Valuco Active im Klassenzimmer

Regelung und Steuerung

Damit das Ausschalten des Lichtes nach Verlassen der Räume oder nach Schulende nicht vergessen wird, ist die Schule mit Bewegungsmeldern ausgestattet. In den Klassenräumen erfolgt dabei eine tageslichtabhängige Konstantlichtregelung, während die Beleuchtung in Fluren und Sanitärbereichen lediglich automatisch ein- und ausgeschaltet wird. Die Lehrer können vom Lehrerpult aus zwischen einer direkten Arbeitsplatzbeleuchtung, einer diffusen Raumbeleuchtung oder einer Kombination aus beidem wählen, die Helligkeit hoch- und runterdimmen sowie die Lichtautomatik manuell übersteuern. Weiterhin befinden sich am Lehrertisch die Wippschalter für die Jalousien in den Kastenfenstern.

Das Personal hat teilweise Schwierigkeiten, die Bedienung der umfangreichen Beleuchtungsmöglichkeiten in den Klassenräumen mit nur zwei Tastern umzusetzen, siehe Nutzerbefragung in Kapitel 6 und Abbildung 1-3. Es wurde angemerkt, dass eine Aufteilung der Funktionen auf mehr als zwei Schalter besser verständlich wäre. Alternativ könnte es ein Bedienpanel geben, auf dem verschiedene Szenarien gespeichert sind und direkt angesteuert werden können.

Da eine bauliche Veränderung der Bedienungssituation unwahrscheinlich ist, wird es eine erneute Einweisung und eine schriftliche Anleitung geben, die die Funktionen nochmals erklärt.

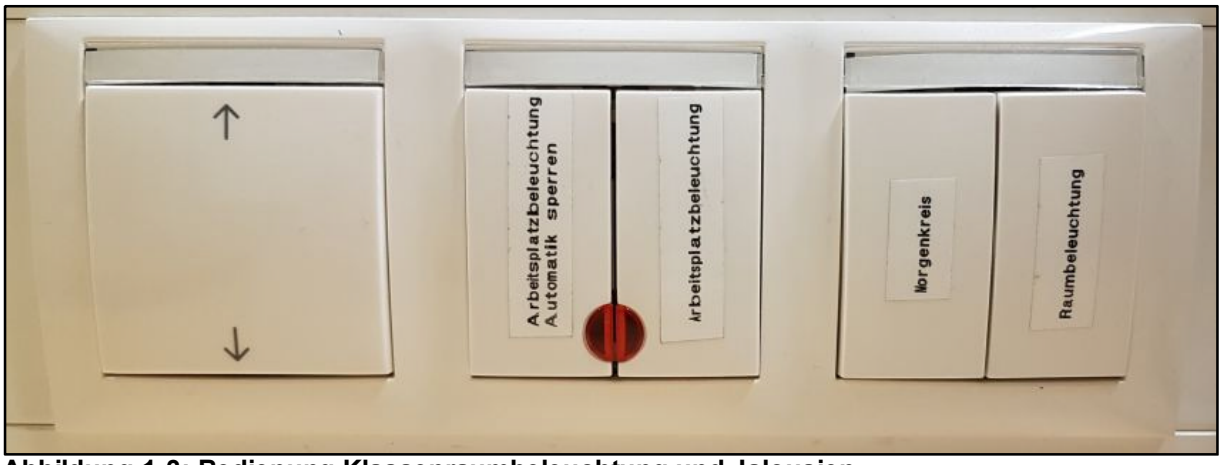

Abbildung 1-3: Bedienung Klassenraumbeleuchtung und Jalousien

Die Beleuchtungsautomatik wird als sehr gut eingeschätzt und von einigen Lehrern dem manuellen Betrieb vorgezogen. Wird die Automatik jedoch übersteuert, passiert es gelegentlich, dass das Licht bei Verlassen des Raumes nicht ausgeschaltet wird, was aus energetischer Sicht ungünstig ist. Wird das Licht hingegen bei Unterrichtsschluss bei gesperrter Automatik manuell ausgeschaltet, so muss es auch morgens bei Betreten des Raumes manuell eingeschaltet werden. Im Winter muss demnach der Weg bis zum Lehrertisch im Dunkeln zurückgelegt werden. Dieses Problem wäre z. B. lösbar, indem eine zentrale Steuerung außerhalb der Nutzungszeit alle Einstellungen auf Automatik zurücksetzt. Dies wurde im Rahmen der Monitoringphase nicht umgesetzt.

Probleme mit den Bewegungsmeldern wurden lediglich durch die Reinigungskräfte berichtet. Im Einzugsbereich der großen Treppe im Gebäudeteil A befindet sich kein Bewegungsmelder, sodass die Beleuchtung nach 5 Minuten ausschaltet und die Reinigungskraft beim Wischen der Treppe plötzlich im Dunkeln steht. Sie selbst oder eine Kollegin müssen dann erst im Flur „Präsenz zeigen“, um das Licht wieder zu aktivieren. Da dies ein Sicherheitsrisiko darstellt, müsste ein Bewegungsmelder nachgerüstet oder die Beleuchtungsdauer – zumindest in der Zeit der Reinigung nachmittags – deutlich verlängert werden.

Tageslicht- und Kunstlichtmessung

Aula: Die Aula verfügt über eine 6,15 m hohe Fensterfront, welche einen sehr guten Einfallswinkel für Tageslicht ermöglicht. Der gemessene Tageslichtquotient D von 3,65 % bedeutet, dass der Raum auch an bewölkten Tagen mit einer Außenbeleuchtungsstärke von 10.000 lx im Mittel mit noch etwa 365 lx in Höhe der Nutzebene versorgt wird (Sollwert 200 lx). Im Falle der untersuchten Kunstlichtvariante wurden mit einem Mittelwert von 257 lx sehr gute Ergebnisse nachgewiesen. Sowohl die durchschnittliche Beleuchtungsstärke als auch die Gleichmäßigkeit sind zufriedenstellend.

Klassenraum 1.08: Die empfohlene Beleuchtungsstärke von 300 lx konnte bei der Tageslichtmessung im Arbeitsbereich im Mittel knapp, für einige Sitzplätze jedoch nicht erzielt werden, während eine Außenbeleuchtungsstärke von im Mittel 14500 lx (leicht bewölkt) vorlag, siehe Abbildung 1-4. Die Tische in der Nähe der Flurwand des 6,78 m tiefen Klassenraumes waren nicht ausreichend ausgeleuchtet. Die tageslichtgeführte Beleuchtungsregelung sorgt jedoch in diesem Fall im Automatikmodus für eine konstant ausreichende Beleuchtung der Arbeitsplätze.

Während an bedeckten Tagen ein Stromverbrauch für Beleuchtung entsteht, führt an sonnigen Tagen die Blendung bzw. die Notwendigkeit des sommerlichen Wärmeschutzes zum Schließen der Jalousien, was ebenfalls ggf. das Einschalten der Beleuchtung nach sich zieht. Aus baulicher Sicht sind die Klassenräume bereits mit einem hohen Fensterflächenanteil von 17 % der Grundfläche ausgestattet. Die mögliche Sturzhöhe als maßgeblicher Faktor für den Einfallswinkel des Lichtes wurde mit 2,76 m ausgereizt.

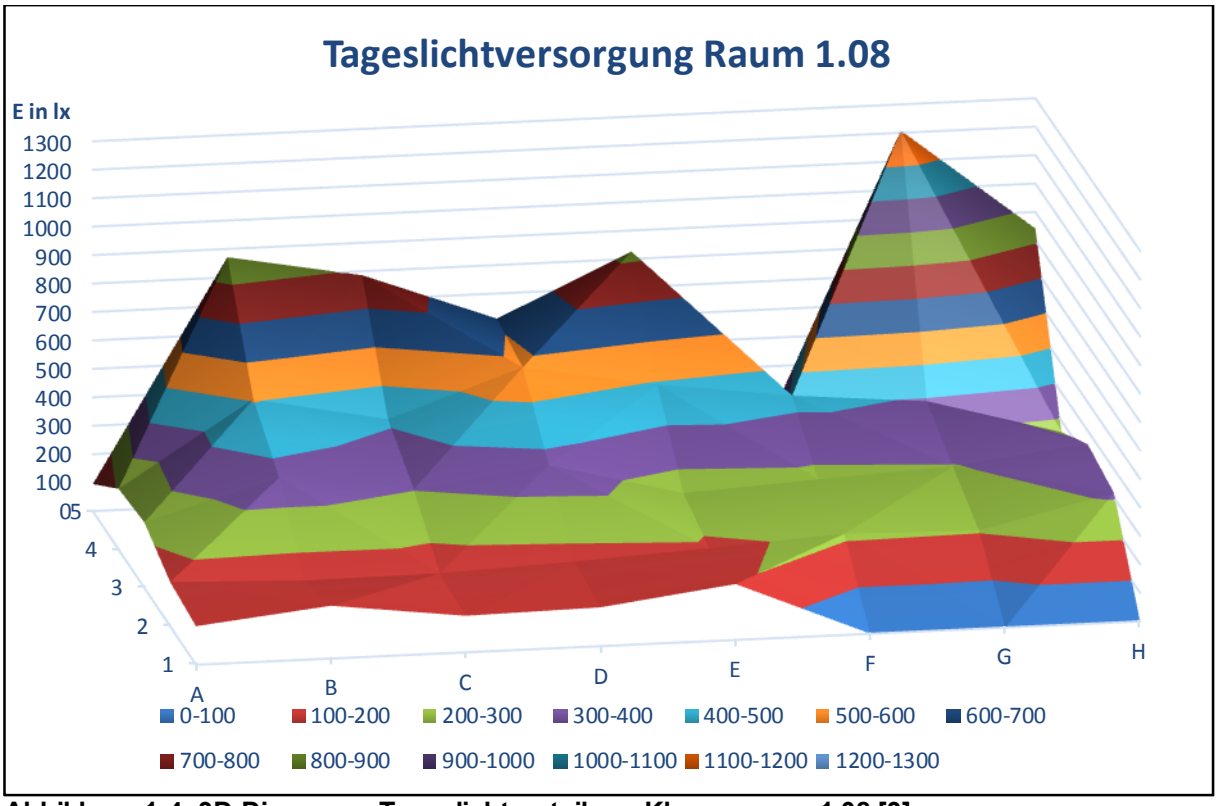

Abbildung 1-4: 3D-Diagramm Tageslichtverteilung Klassenraum 1.08 [3]

Klassenraum 2.01: Zur Tageslichtversorgung kann festgehalten werden, dass diese im Raum 2.01 sowie höchstwahrscheinlich in allen nach Norden gelegenen Klassenräumen nicht ausreicht. Aus diesem Grund ist eine automatische Zuschaltung des Kunstlichts wahrscheinlicher als in den südlichen Klassenzimmern. Der Fensterflächenanteil ist jedoch auch hier bereits recht hoch, sodass baulich keine Verbesserungsvorschläge zu nennen sind. Der enorme Unterschied zwischen Nord- und Südklassenraum sollte als Anlass genommen werden, bei der Planung weiterer Schulen die Möglichkeit einer Ost-West-Ausrichtung zu prüfen.

Flure: Die Anforderungen an die Beleuchtungsstärke im Flurbereich sind mit einem Sollwert von 50 lx gering. Mit der installierten Beleuchtung werden diese so weit übererfüllt, dass der Fußboden im erweiterten Flurbereich mit einer mittleren Beleuchtungsstärke von 400 lx bei den Schülern für das stille Arbeiten sehr beliebt ist. Die eingesetzten Leuchtmittel besitzen mit 21 W eine recht geringe Leistung. Das Energieeinsparpotential ist daher vergleichsweise gering. Sehr positiv werden die großzügigen Verglasungen zu den Klassenräumen empfunden, wodurch die Flure zusätzliches Tageslicht erhalten.

WC Mädchen: Zwar ist die Beleuchtungsstärke im WC-Bereich mit einem Mittelwert von 380 lx annähernd doppelt so hoch wie notwendig, jedoch sind die installierten Deckeneinbauleuchten „Tecnolight DE 321“ mit 27 W starken Leuchtmitteln recht sparsam. Somit besteht zunächst kein Optimierungsbedarf.

Fazit: Die Messung der Tages- und Kunstlichtversorgung in den Räumen 1.08, 2.01 sowie in der Aula, im Flur und einem Sanitärraum ergibt eine mehr als ausreichende Beleuchtungsstärke sowie eine gute Wirksamkeit der Verschattung.

Bedarfsprognose

Die Strombedarfsprognose ergab je nach Kenntnisstand der installierten Lampen (Stand 2015 bzw. Stand 2018) und je nach Bilanzierungsverfahren sehr unterschiedliche Werte – wobei nach DIN V 18599 trotz möglichst realitätsnaher Abbildung des Gebäudes und Anpassung des Nutzerverhaltens (Beratungsmodus) die höchsten Bedarfswerte zu verzeichnen sind, siehe Tabelle 1-2.

Der spezifische Strombedarf für Beleuchtung – bezogen auf die Energiebezugsfläche von 3095,02 m² – bewegt sich zwischen 4,4…7,6 kWh/(m²a).

Tabelle 1-2: Vergleich der Strombedarfsprognosen verschiedener Verfahren

Verfahren	Strombedarf [kWh/a]	spezifischer Strombedarf [kWh/(m²a)]
DIN V 18599 Mini-Tool, Stand 2015	23416,8	7,6
DIN V 18599, Stand 2015	19632,5	6,3
DIN V 18599 mit Norm-Nutzerprofil, Stand 2018	20231,5	6,8
DIN V 18599, Beratungsmodus, Stand 2018	20190,8	6,5
PHPP, Stand 2018	16683,2	5,6
Ingenieurmäßige Abschätzung, Stand 2018	14749,3	4,8

Messergebnisse Funktion

Die Beleuchtungssituation ist insgesamt als sehr gut einzuschätzen und bietet zahlreiche Einstellungsmöglichkeiten für individuelle Nutzerwünsche. Jedoch gibt es Schwierigkeiten und Berührungsängste bei der Bedienung der verschiedenen Funktionen, welche durch Aufklärung der Nutzer behoben werden können.

Die Tageslichtversorgung wird in den südorientierten Klassenräumen als mehr als genug eingeschätzt. In den nordorientierten Klassenräumen ist die Tageslichtversorgung gering, hier kommt das Kunstlicht an bewölkten Tagen häufiger zum Einsatz. Die hohe Tageslichtversorgung führt in den südorientierten Räumen dazu, dass die Jalousien meistens geschlossen bleiben müssen, damit das Tafelbild (Smartboard) erkennbar ist. In diesem Zusammenhang wäre es bei Folgeprojekten gut, wenn sich die Verdunkelung für jedes Fenster separat bedienen ließe und nicht automatisch alle Fenster des Raumes verdunkelt würden. So könnte man das Fenster in Tafelnähe verdunkeln und die Schülertische weiterhin mit Tageslicht versorgen (siehe Tagesverläufe im Sommer in Abbildung 1-5).

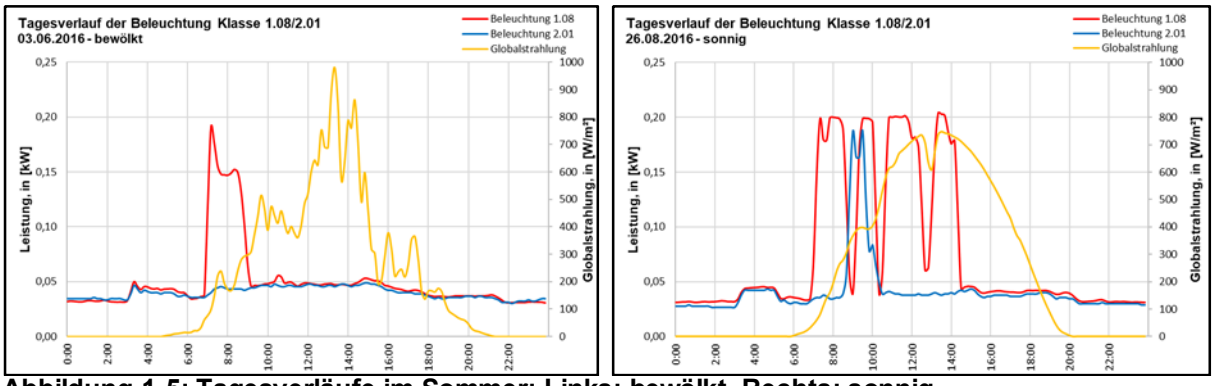

Abbildung 1-5: Tagesverläufe im Sommer; Links: bewölkt, Rechts: sonnig

Die Nutzererfahrungen zeigen, dass eine Mobilität des Lehrertisches von Vorteil ist. Nicht nur aufgrund der eigenen Gestaltungsvorlieben im Klassenraum, sondern im Fall der südorientierten Räume aufgrund der hier vorhandenen Blendung auf dem Lehrerlaptop. Die Lehrertische lassen sich aufgrund der Bodenverkabelung jedoch nur drehen, aber nicht verrücken.

Bei Vorortbesuchen fiel auf, dass die Türen zu den Sanitärräumen häufig offenstehen, da sie für Kinder schwer zu schließen sind. Dies führt dazu, dass das Licht angeht, wenn jemand auf dem Flur vorbeigeht. Die Türen sollten so eingestellt werden, dass sie leicht schließen.

Bezüglich der Jalousien besteht der große Wunsch der Nutzer, die Jalousien auch in halbhoher Stellung nutzen zu dürfen, sodass im oberen Bereich der Blendschutz genutzt wird, aber im unteren Bereich noch ein Außenbezug möglich ist. Diese Stellung ist aufgrund von in der Vergangenheit aufgetretenen Motorendefekten und gerissenen Scheiben untersagt.

Laut Wartungsfirma der Jalousien nehmen die Motoren der Jalousien keinen Schaden bei Hitze. Die Defekte resultieren aus Überspannung – zwei Metallteile treffen aufeinander und es besteht kein korrekter Potentialausgleich. Insofern sollte diese Handlungsanweisung zurückgenommen werden. Dass der Außenbezug deutlich zum Wohlbefinden beiträgt, zeigt sich auch an der Kritik, dass die Lamellenbreite mit nur 25 mm zu dem Gefühl führt, „eingesperrt zu sein“. Hier hätten breitere Lamellen größere Zwischenräume für Durchblicke ermöglicht.

In Folgeprojekten sollten Jalousien dieser Bauart eine größere Lamellenbreite aufweisen, um den Außenbezug besser zu wahren.

Messergebnisse Energie

Entgegen der Erwartungen hat der südorientierte Klassenraum 1.08 trotz der besseren Tageslichtversorgung einen höheren Stromverbrauch für Beleuchtung aufzuweisen als der nordorientierte Klassenraum 2.01. Die Untersuchung der Abhängigkeit von der Globalstrahlung ergab, dass es sich bei den Leistungsspitzen vor allem um sonnige Tage handelte, an denen demzufolge die Jalousien im Klassenraum geschlossen bleiben mussten, sodass das Kunstlicht zum Einsatz kam. Möglicherweise ließe sich der Einsatz der Arbeitsplatzbeleuchtung an sonnigen Tagen reduzieren, wenn man den Nutzern eine halbhohe Stellung der Jalousien ermöglicht, sodass im unteren Bereich noch eine gewisse Tageslichtnutzung möglich ist. Dies ist von den Nutzern auch aufgrund des Außenbezuges gewünscht. Abbildung 1-6 zeigt einen Jahresverlauf für die Nutzungszeit (Schultage 7 bis 15 Uhr) vom 02.05.2016 bis 23.06.2017.

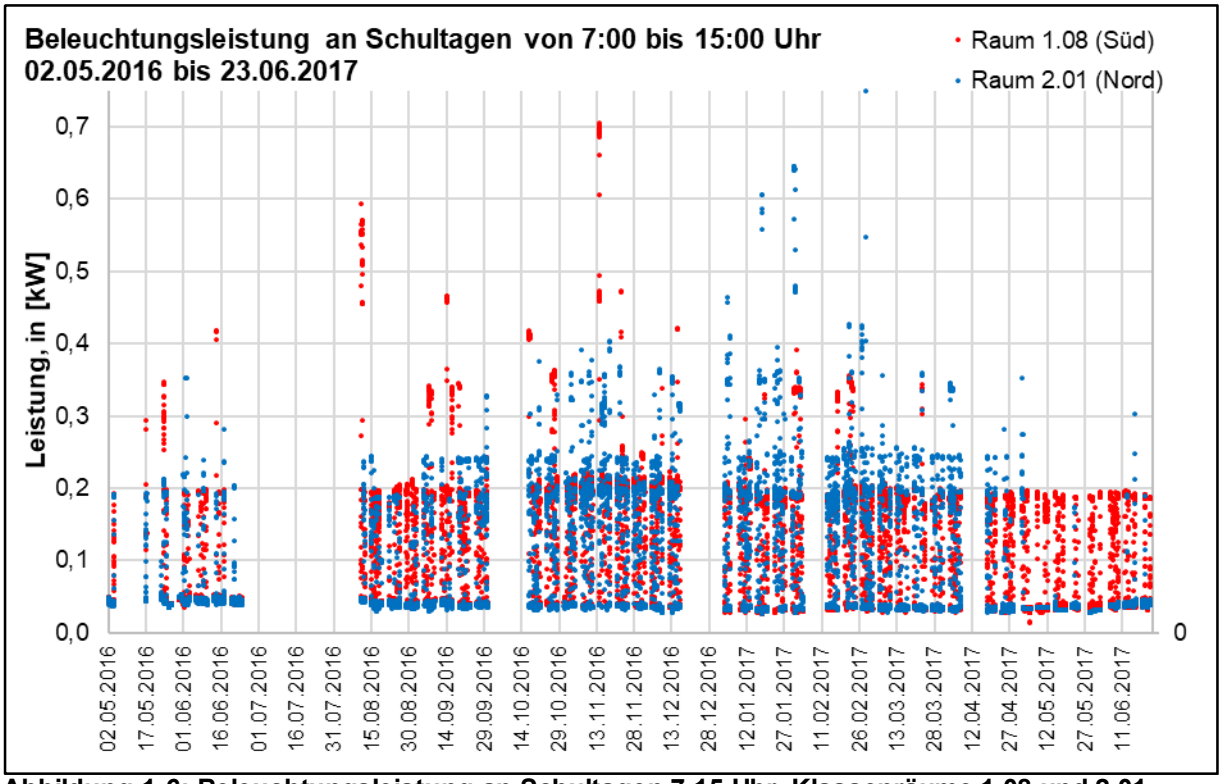

Abbildung 1-6: Beleuchtungsleistung an Schultagen 7-15 Uhr, Klassenräume 1.08 und 2.01

Aufgrund erheblicher Unstimmigkeiten bei den Messwerten im ausgeschalteten Zustand der Beleuchtung wurden zunächst hohe Stillstandsverluste durch Vorschaltgeräte, Präsenzmelder u. ä. vermutet (erfasste Dauerleistung von ca. 100 W). Eine professionelle Nachmessung ergab, dass neben der Wirkleistung in jedem Betriebszustand noch eine zusätzliche Blindleistung erfasst wurde, die zu einer zu hohen Scheinleistung führte. Für die Übertragung auf andere Monitoringprojekte ergibt sich: bei der Inbetriebnahme ist eine professionelle Einstufungsmessung (mit Bekanntgabe des Leistungsfaktors LF, am besten für verschiedene Lastzustände) sinnvoll, damit später keine falschen Schlüsse gezogen werden.

Die Messwerte für den Beleuchtungsstromverbrauch der Klassenräume lagen mit 380 … 454 kWh/Jahr je Raum im Bereich der Erwartungen aus der ingenieurmäßigen Abschätzung mit 455 kWh/Jahr je Raum. Die Leistungsdaten zeigen zudem, dass die Beleuchtung überwiegend im tageslichtabhängigen Automatikmodus betrieben wird und selten Leistungsspitzen (z. B. durch händisches Hochdimmen) auftreten.

Außenbeleuchtung

Bei der Auswertung der Monitoringdaten der Außenbeleuchtung musste festgestellt werden, dass die virtuellen Zähler, welche die Stromstärkemessungen in Leistungsangaben umrechnen, fehlerhaft programmiert waren. Für die Auswertungen konnten lediglich die Stromstärkemessungen genutzt werden.

Der Stromverbrauch für die Außenbeleuchtung ist mit 1393 kWh/a etwa 5 % geringer als in der Simulation mit 1459 kWh/a prognostiziert wurde. Während die Simulation in der dunkleren Jahreszeit etwas höhere Werte ergab, war hier ein möglicher Standby-Verbrauch nicht angesetzt worden. Beides gleicht sich in etwa aus.

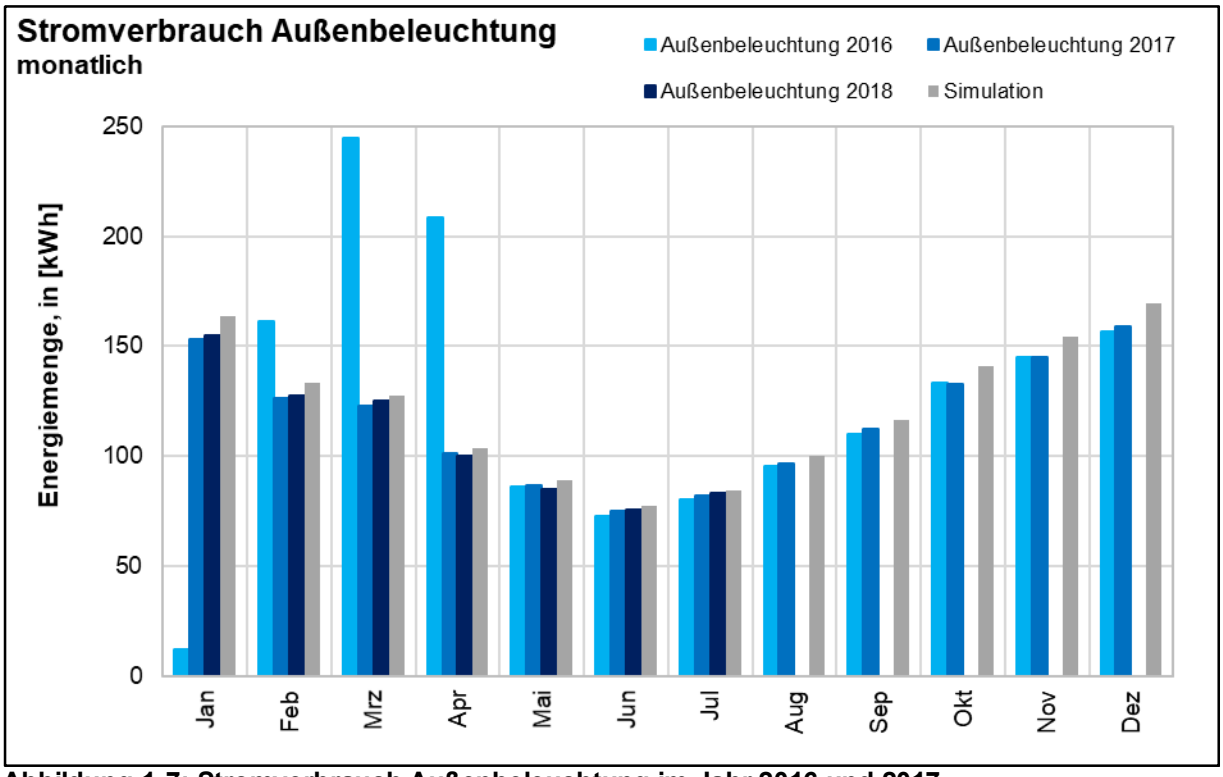

Abbildung 1-7: Stromverbrauch Außenbeleuchtung im Jahr 2016 und 2017

Da es sich um sehr sparsame Leuchten handelt und der Anteil der Außenbeleuchtung am Gesamtstromverbrauch der Schule vergleichsweise gering ist, wird kein Optimierungsbedarf gesehen.

2 Beleuchtungsplanung

Zunächst wird eine Übersicht über die vom Elektroplaner angesetzten Sollwerte gegeben. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse der Simulation vorgestellt und mit den Sollwerten verglichen.

2.1 Sollwerte Beleuchtungsstärken

Die Beleuchtung der Gebäudebereiche erfolgt unter Berücksichtigung der DIN EN 12464 Teil 1 – Beleuchtung von Arbeitsstätten, welche in ihrem Abschnitt 5.3 die in Tabelle 2-1 aufgeführten Beleuchtungsstärken für die im Schulgebäude vorkommenden Sehaufgaben empfiehlt [4]. Die Empfehlungen decken sich mit denen der Technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR) A3.4 [2]. Die Planung erfolgte durch das Büro AIB GmbH Bautzen.

Tabelle 2-1: Beleuchtungsstärken der Bereiche [1] [2]

Gebäudebereich	Beleuchtungsstärke
Klassenräume, Horträume	300 lx
Fachunterrichtsraum Werken 2.17	500 lx
Fachunterrichtsraum Kunst 2.14	750 lx
Sanitärräume	200 lx
Flure	100 lx

2.2 Simulationsergebnisse

Im Rahmen der Masterarbeit „Energetische Bewertung der Beleuchtung in einer Passivhausschule“ wurden im Jahr 2015 durch Ina Asmussen Beleuchtungssimulationen ausgewählter Räume vorgenommen [5]. Diese erfolgten mit der Software DIALux evo 5.0 [6]. Hierzu wurde eine 3D-Gebäudekubatur des Gebäudes inklusive der Möblierung erstellt. Oberflächenfarben und -materialien wurden definiert, um die Reflexionen der Oberflächen berücksichtigen zu können. Die Leuchten wurden positioniert und – sofern bekannt – die hinterlegten Herstellerdaten durch die technischen Daten der tatsächlich installierten Leuchtmittel ersetzt.

Klassenräume

Für die Klassenzimmer wurden zwei Varianten untersucht, da die Jalousien in geschlossenem Zustand entweder eine silber-reflektierende oder – um 180° gedreht – eine mattschwarze Oberfläche aufweisen können (Abbildung 2-1). Als Bewertungsflächen der Sehaufgabe wurden die Schultische und Computertische auf einer Nutzebene von 0,80 m sowie das Smart Board (vertikale Ebene) definiert. Da die Sitzanordnung in den Klassenräumen nicht bekannt war bzw. sich flexibel ändern kann, wurde der Raum um die Schülertische abzüglich eines 0,5 m breiten Randstreifens (Umgebungsbereich) als Arbeitsbereich angenommen.

Abbildung 2-1: Links: silber-reflektierende Oberfläche innen, Rechts: schwarze Oberfläche innen

Abbildung 2-2 zeigt beispielhaft den Klassenraum 2.01 als 3D-Rendering aus DIALux evo 5.0.

Abbildung 2-2: Rendering des Klassenraums 2.01 aus DIALux evo 5.0

Die Ergebnisse in der Grundrissdarstellung sind in Abbildung 2-3 bis Abbildung 2-6 zu sehen. Die höchsten Beleuchtungsstärken wurden erwartungsgemäß im Bereich der Schultische und der PC-Tische erreicht, wobei die Anforderung von 300 lx deutlich übererfüllt wurde. In Umgebungsbereichen sind 200 lx empfohlen, welche lediglich im hinteren Bereich des Raumes an den Mappenregalen unterschritten wurden. Dies ist unkritisch.

Im Vergleich wird deutlich, dass die innere Oberfläche der komplett geschlossenen Jalousien keinen maßgeblichen Einfluss auf die Verteilung der Beleuchtungsstärke im Raum hat. Dies geht auch aus den Zahlenwerten in Tabelle 2-3 hervor. Die Beleuchtungsstärke unterscheidet sich im Variantenvergleich nur um 1 … 9 lx, wobei die Variante mit der silber-reflektierenden Oberfläche (gewählter Reflexionsgrad 32 %) erwartungsgemäß die etwas höheren Werte liefert als die Variante mit der mattschwarzen Oberfläche (gewählter Reflexionsgrad 4 %).

Die Ergebnisse werden zudem für beide Varianten vergleichbar in Tabelle 2-2 bzw. Tabelle 2-3 wiedergegeben. Die Sollwerte darin basieren auf den Empfehlungen der DIN EN 12464 Teil 1 [4]. Die Istwerte der mittleren Beleuchtungsstärke beider Simulationsvarianten erfüllen die Anforderungen deutlich, bereichsweise sogar um den Faktor 3.

Zum Smart Board (interaktive Tafel) sei angemerkt, dass der Sollwert von 500 lx für eine klassische Wandtafel zitiert wird, die üblicherweise eines separaten Tafellichtes bedarf. Das Smart Board hat jedoch im eingeschalteten Betrieb die Beamerprojektion als eigene Lichtquelle, die in der Simulation nicht modelliert wurde. Die Istwerte der Simulation bilden somit die Beleuchtungsstärke an der Projektionsfläche bei ausgeschaltetem Beamer ab.

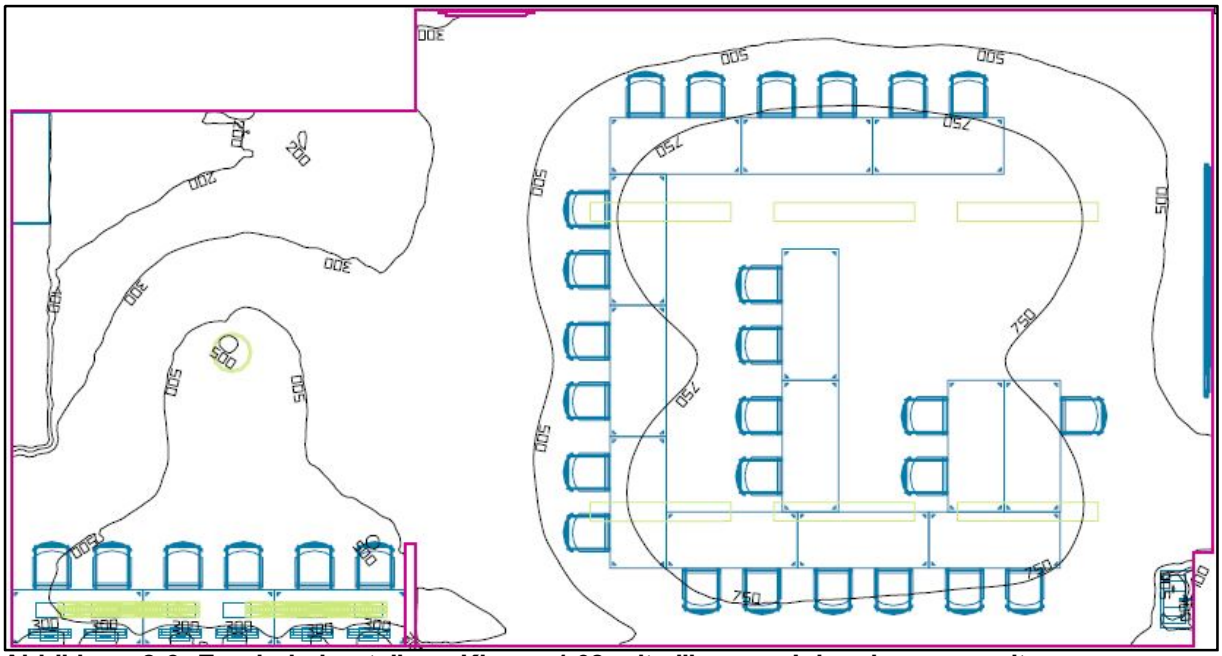

Abbildung 2-3: Ergebnisdarstellung Klasse 1.08 mit silbernen Jalousien raumseits

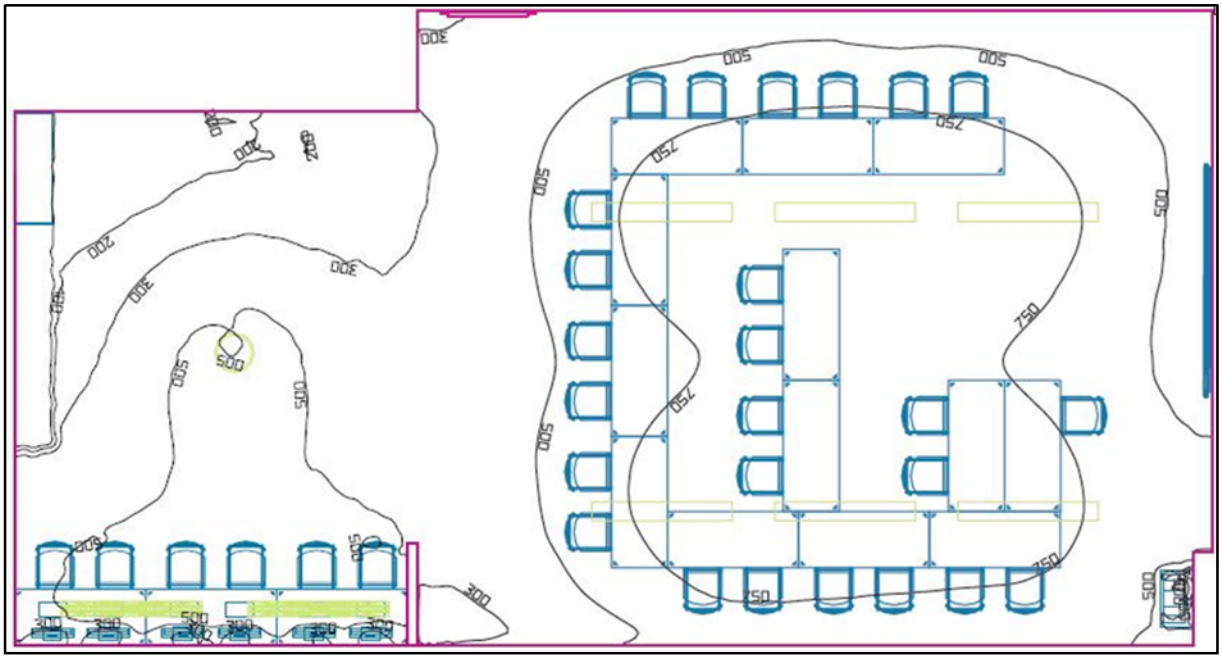

Abbildung 2-4: Ergebnisdarstellung Klasse 1.08 mit schwarzen Jalousien raumseits

Tabelle 2-2: Ergebnisübersicht Klassenräume 1.08

Fläche	Sollwert aus DIN EN 12464-1 Beleuchtungs-stärke [lx]	Istwert aus Simulation reflektierende Seite innen Beleuchtungsstärke Mittel [lx]	Istwert aus Simulation schwarze Seite innen Beleuchtungsstärke Mittel [lx]
Klassenzimmer 1.08			
Nutzebene	300	571	569
Computerbereich	300	393	390
Umgebungsbereich PC	200	502	499
Klassenbereich	300	702	701
Umgebungsbereich Klasse	200	645	643
Smart Board (aus)	500	462 (im Betrieb unkritisch)	461 (im Betrieb unkritisch)

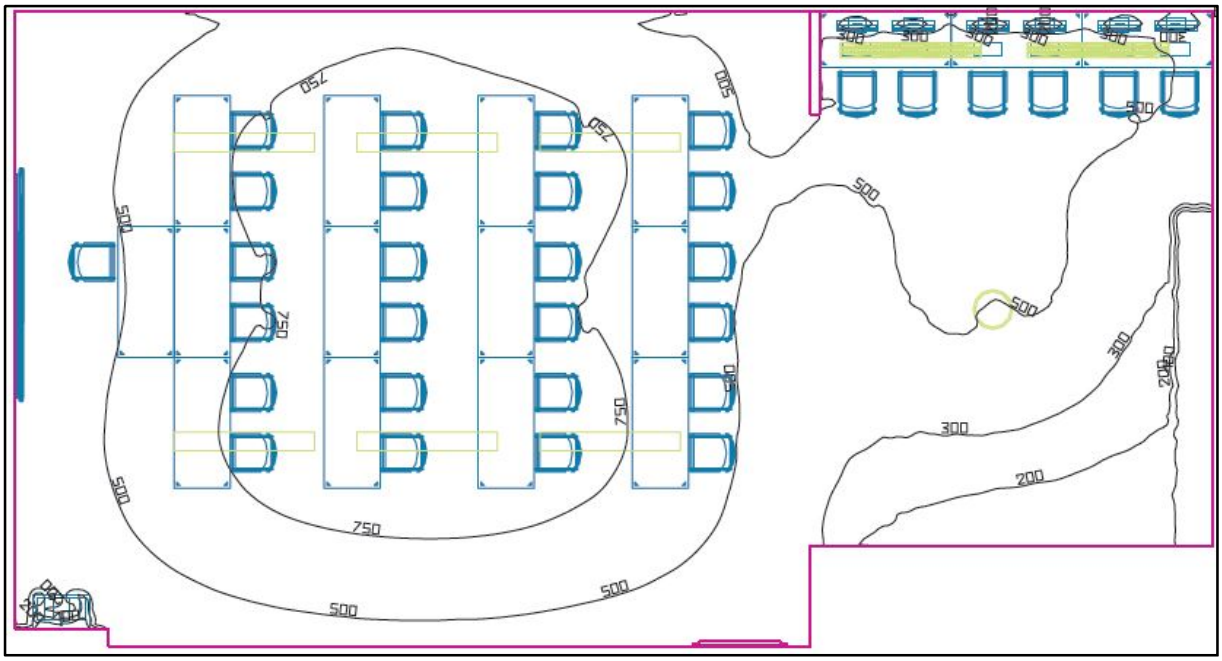

Abbildung 2-5: Ergebnisdarstellung Klasse 2.01 mit silbernen Jalousien raumseits

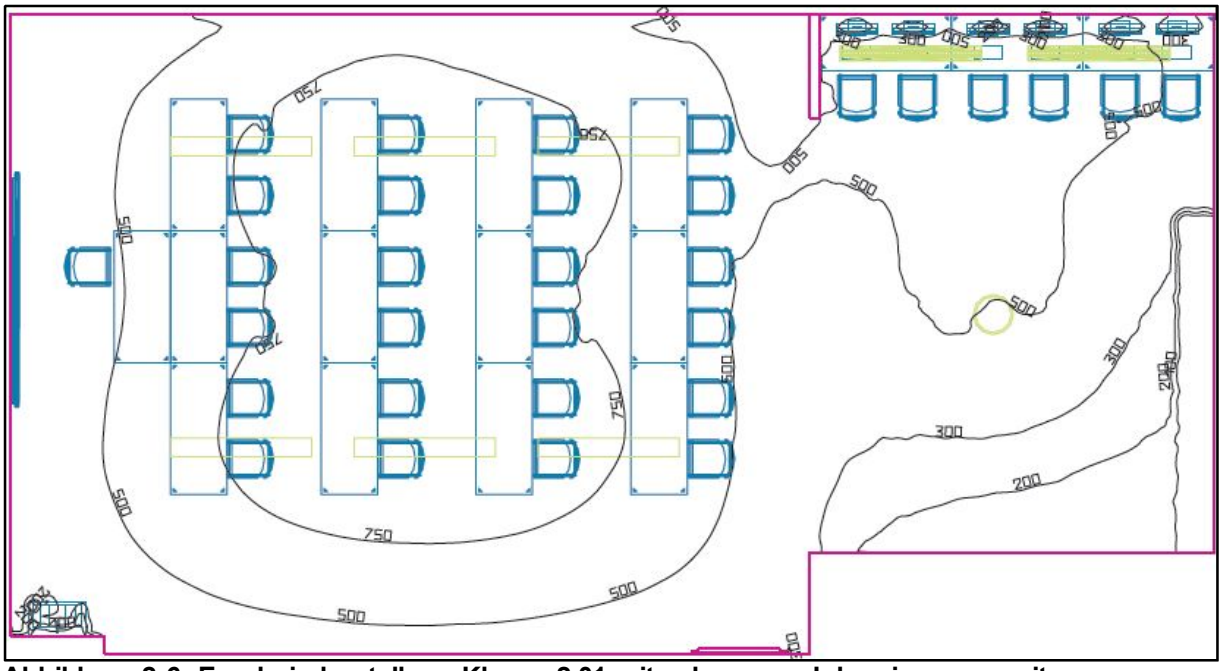

Abbildung 2-6: Ergebnisdarstellung Klasse 2.01 mit schwarzen Jalousien raumseits

Tabelle 2-3: Ergebnisübersicht Klassenräume 2.01

Fläche	Sollwert aus DIN EN 12464-1 Beleuchtungs-stärke [lx]	Istwert aus Simulation reflektierende Seite innen Beleuchtungsstärke Mittel [lx]	Istwert aus Simulation schwarze Seite innen Beleuchtungsstärke Mittel [lx]
Klassenzimmer 2.01	**300**		
Nutzebene	300	561	555
Computerbereich	300	385	378
Umgebungsbereich PC	200	520	512
Klassenbereich	300	672	667
Umgebungsbereich Klasse	200	461	455
Smart Board (aus)	500	387 (im Betrieb unkritisch)	382 (im Betrieb unkritisch)

Sanitärbereich

Die Höhe der Nutzebene für Sanitärbereiche wurde gemäß der DIN V 18599-4 mit 0,8 m angenommen. Das Simulationsergebnis zeigt Abbildung 2-7.

Die Simulation mit DIALux zeigt, dass die Beleuchtungsstärke mit einem mittleren Wert von 192 lx nicht ausreichend ist, wobei insbesondere die Waschbecken zu wenig Licht erhalten. Aber auch Bereiche des Vorraums und der Toilettenkabinen weisen eine geringere Beleuchtungsstärke als die in der DIN empfohlenen 200 lx auf. Nichts desto trotz gibt das Programm bei der alleinigen Betrachtung des Toilettenraumes 1.10 an, dass die Beleuchtungsstärke als ausreichend anzusehen ist. Dementsprechend wäre bei Bedarf eine Überprüfung der Lichtverhältnisse im Vorraum 1.10a im Bereich der Waschbecken angebracht.

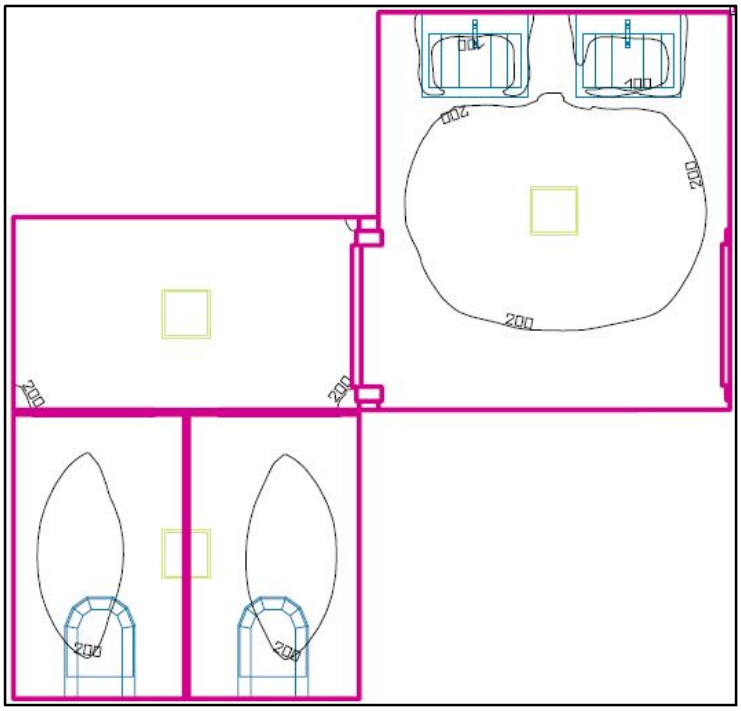

Abbildung 2-7: Ergebnisdarstellung WC Mädchen 1.10

Flurabschnitt

Gemäß den Vorgaben für die Simulation von Verkehrswegen wurde die Höhe des Berechnungsobjektes auf die Oberkante des Fertigfußbodens (OKFF) gesetzt. Die Software unterteilt den betrachteten Teilbereich des Flurabschnittes automatisch in einen Bereich der Sehaufgabe und einen Umgebungsbereich. Abbildung 2-8 zeigt die Ergebnisse der Simulation. Die mittlere Beleuchtungsstärke von 198 lx liegt deutlich über den in der Planung angestrebten 100 lx, wobei die ASR 3.4 für stufenlose Flure nur 50 lx angibt. Klar erkennbar sind die punktuell höheren Beleuchtungsstärken > 200 lx unmittelbar unter den Einbauleuchten im schmalen Flurabschnitt. In diesem Abschnitt gibt es minimale Bereiche mit Werten unter 100 lx. Im breiten Flurabschnitt vor den Klassenzimmern ist die Ausleuchtung sehr gut und gleichmäßig.

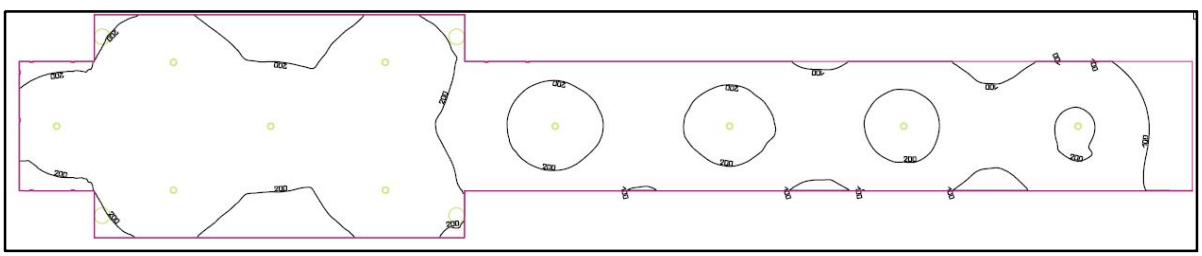

Abbildung 2-8: Ergebnisdarstellung Flurabschnitt

Die Ergebnisse der vertikalen Beleuchtungsstärken an den Türoberflächen zeigt Tabelle 2-4.

Tabelle 2-4: vertikale Beleuchtungsstärke im Türbereich der Flure

Fläche	vertikale Beleuchtungsstärke Mittel [lx]
Tür 1.01	125
Tür 1.02	100
Tür 1.03	89
Tür 1.04	92
Tür 1.06	149
Tür 1.07	113
Tür 1.08	100
Tür 1.09	95

2.3 Verallgemeinerung und Fazit

Die Simulationsergebnisse für die ausgewählten Klassenräume 1.08 und 2.01, das Mädchen-WC 1.10 sowie den Flur im Klassenbereich sind sehr zufriedenstellend.

Die empfohlenen Beleuchtungsstärken von 300 lx werden in den Klassenzimmern im Arbeitsplatzbereich mit Werten von im Mittel ca. 670 lx und Teilbereichen über 750 lx deutlich überschritten. Auch die PC-Arbeitsplätze und die allgemeine Umgebung sind heller als gefordert. Lediglich der Bereich der Mappenregale ist mit < 100 lx etwas schwächer ausgeleuchtet als für den Umgebungsbereich der Sehaufgabe gefordert (Sollwert 200 lx), jedoch wird dieser Bereich nur kurzzeitig zum Holen und Wegstellen von Dingen genutzt.

Das simulierte Mädchen-WC 1.10 ergab überwiegend die empfohlene Beleuchtungsstärke von 200 lx. Lediglich im Bereich der Waschbecken waren zu geringe Beleuchtungsstärken zu verzeichnen, was im Bedarfsfall durch das Nachrüsten von Leuchten behoben werden könnte. Im messtechnisch untersuchten Mädchen-WC im Erdgeschoss zeigte sich dieses Problem jedoch nicht, siehe Kapitel 5.3.

Der untersuchte Flur erfüllte die Anforderungen an eine Beleuchtungsstärke von 50 lx (Flure ohne Stufen) bzw. den Planwert von 100 lx (Flure inkl. Treppenhäuser) deutlich.

3 Komponenten und Bauteile

Dieses Kapitel gibt eine Übersicht über die installierten Leuchten, die technischen Daten der eingesetzten Leuchtmittel und die baulichen Komponenten der Verschattungseinrichtungen.

3.1 Übersichtspläne

Die folgenden Übersichtspläne Abbildung 3-1 bis Abbildung 3-6 der installierten Beleuchtung geben einen Überblick über die Leuchtenausstattung der Grundschule.

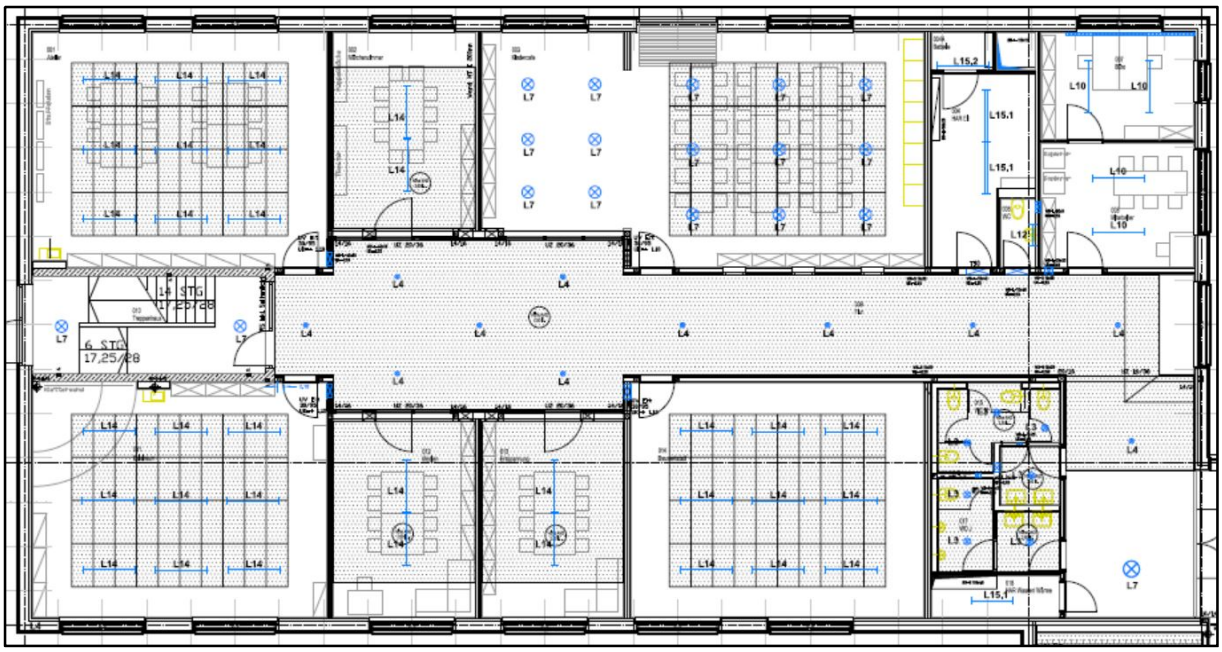

Abbildung 3-1: Installationsplan Beleuchtung EG Gebäudeteil B (Hort) [1]

Abbildung 3-2: Installationsplan Beleuchtung EG Gebäudeteil A (Aula und Küche) [1]

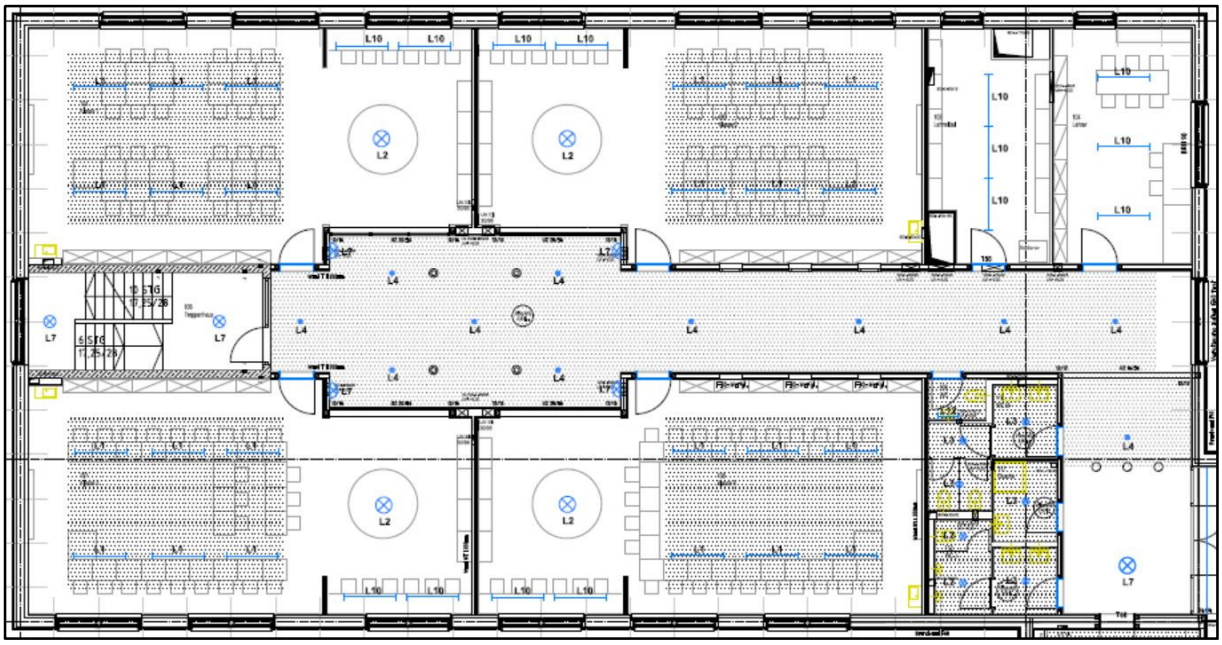

Abbildung 3-3: Installationsplan Beleuchtung 1. OG Gebäudeteil B (Klassen) [1]

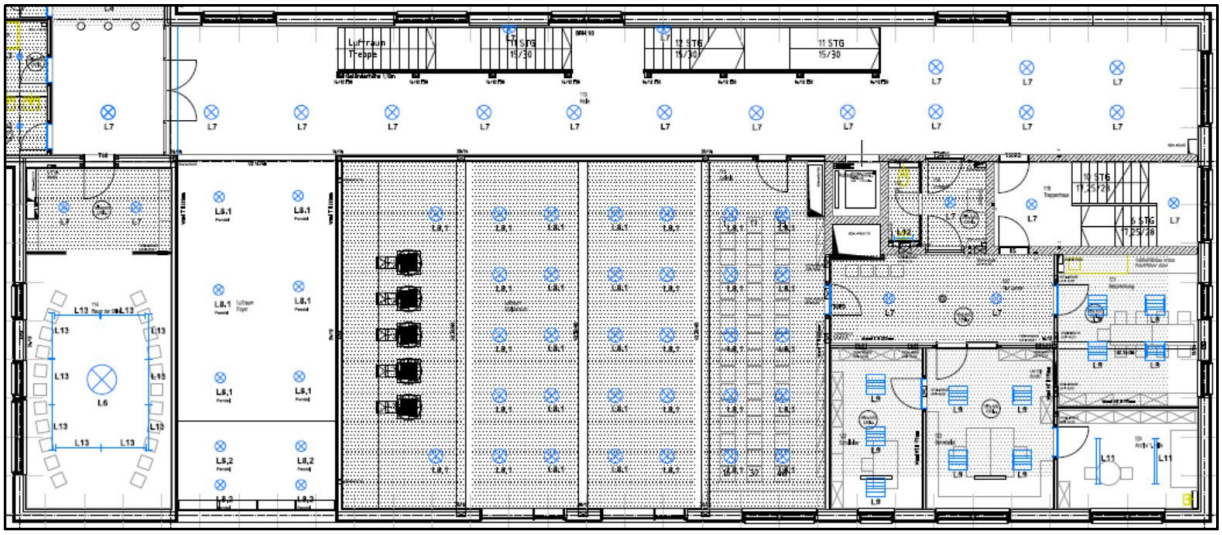

Abbildung 3-4: Installationsplan Beleuchtung 1.OG Gebäudeteil A (Aula und Verwaltung) [1]

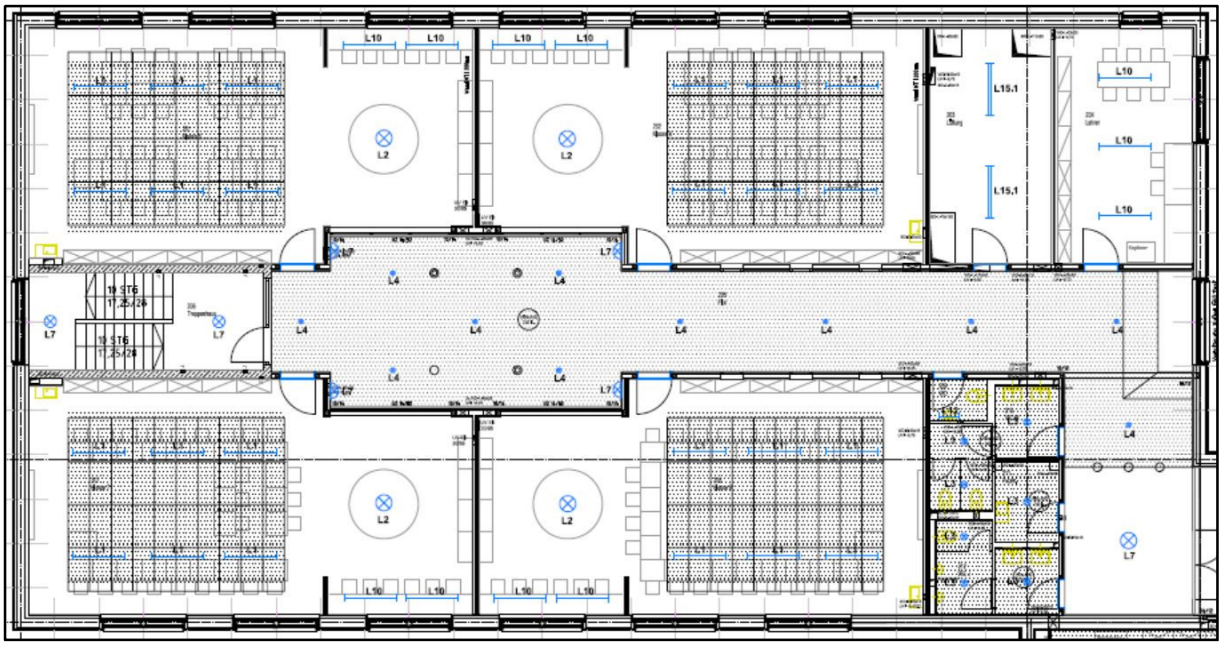

Abbildung 3-5: Installationsplan Beleuchtung 2. OG Gebäudeteil B (Klassen) [1]

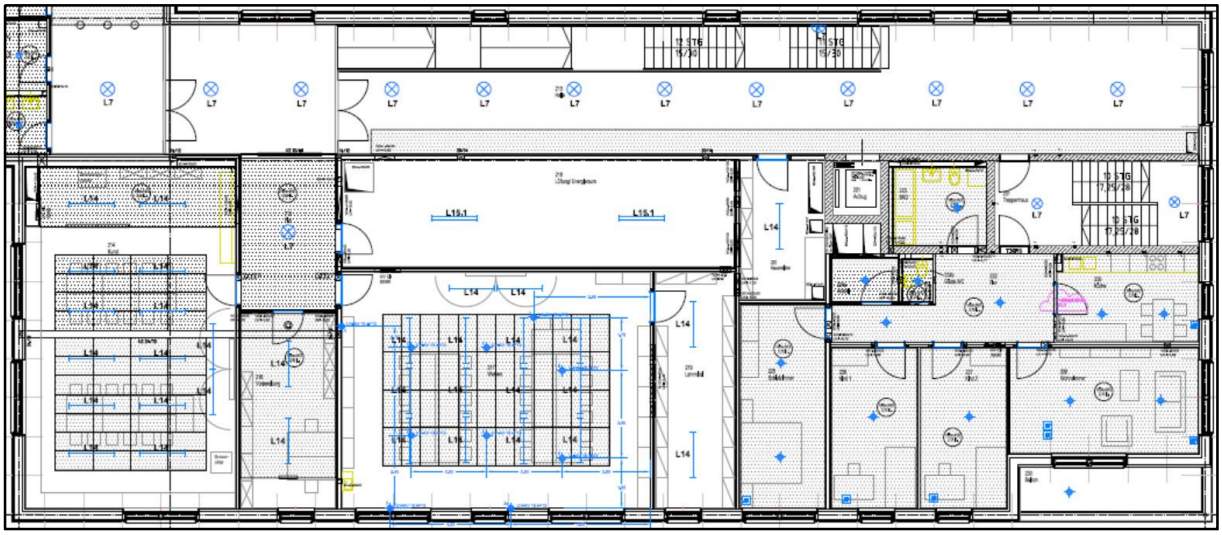

Abbildung 3-6: Installationsplan Beleuchtung 2.OG Gebäudeteil A (Fachunterrichtsräume) [1]

3.2 Installierte Lampen und Leuchten

Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über die installierten Leuchtentypen. Die Angaben zur maximalen Anschlussleistung sind den Installationsplänen des Büros AIB GmbH Bautzen [1] entnommen, die Leistung der tatsächlich eingesetzten Leuchtmittel wurde im Rahmen des Monitorings am 17.07.2015 vor Ort aufgenommen, um für die Strombedarfssimulation realistische Ausgangsdaten zu haben.

Wo eine Kontrolle des Leuchtmittels nicht möglich war, wurde eine Bestückung mit dem Maximum angenommen. Besonders bei der in hoher Stückzahl in den Fluren installierten Leuchte L07 (RZB Flat Polymero Kreis), die eine Anschlussleistung von 255 W hat, aber nur mit Leuchtmitteln von 2x18 W bestückt ist, zeigte sich die Sinnhaftigkeit dieser Stichproben.

Tabelle 3-1: Installierte Leuchtentypen

	Bezeichnung	Lichtaustritt	Leuchtmittel	Form	Anzahl	P_{max} [W]	$P_{leuchtmittel}$ [W]
L01	Trilux Valuco Active	direkt/ indirekt	Leuchtstoff	stabförmig	48	168	108
L02	Tecnolight FA 748	direkt	Leuchtstoff	ringförmig	8	62	40
L03	Tecnolight DE321	direkt	Leuchtstoff	kompakt	21	27	26
L04	Trilux Inperla LED	direkt	LED		33	21	21
L05	Trilux 7132/58	direkt	Leuchtstoff	stabförmig	7	112	58
L06	RZB Flat Polymero D=1m	direkt	Leuchtstoff	ringförmig	1	76	76
L07	RZB Flat Polymero Kreis	direkt	Leuchtstoff	ringförmig	99	255	36
L08.1	Tecnolight DA - D=500 mm	direkt/ indirekt	Leuchtstoff	ringförmig	40	72	36
L08.2	Tecnolight DA - D=400 mm	direkt/ indirekt	Leuchtstoff	ringförmig	9	60	62
L09	Trilux 3623 RMV	direkt	Leuchtstoff	kompakt	11	42	42
L10	Trilux 5041 RMV	direkt	Leuchtstoff	stabförmig	29	78	72
L11	Trilux 3452N/58	direkt	Leuchtstoff	stabförmig	2	134	116
L12	Trilux 6651	direkt	Leuchtstoff	stabförmig	5	30	14
L13	Trilux 3451N/58 dimmbar DALI	direkt	Leuchtstoff	stabförmig	10	67	62
L14	Trilux Valuco D	direkt	Leuchtstoff	stabförmig	66	56	56
L15.1	Trilux Aragon - 2x58 W	direkt	Leuchtstoff	stabförmig	8	134	116
L15.2	Trilux Aragon - 1x58 W	direkt	Leuchtstoff	stabförmig	2	67	58
	RZB Bühnenstrahler	direkt			4	100	100
au- ßen	Cariboni Levante 06LV1B0007A	direkt			14	23	20

3.2.1 Klassenräume

In den Klassenräumen sind drei verschiedene Leuchtentypen installiert, welche im Folgenden detailliert beschrieben werden.

L1 – Trilux Valuco Active: Bei der Trilux Valuco Active handelt es sich um eine Deckenanbauleuchte für die Klassenzimmer mit 168 W inkl. EVG, welche zwei Lichtkomponenten zu einer tageslichtähnlichen Beleuchtung verbindet, die Konzentration und Aufmerksamkeit der Schüler aktivieren sollen. Sie kombiniert gerichtetes Licht (Arbeitsplatzbeleuchtung, mittlere Leuchtstoffröhre) mit diffusem Licht (Raumbeleuchtung), das einen höheren Blauanteil hat. Der diffuse Taghimmel wird durch das Streulicht (Skywhite, 2 Lampen) gebildet, der direkten Sonneneinstrahlung wird durch das gerichtete Licht (Arbeitsplatzbeleuchtung) mit geringer Farbtemperatur (Neutralweiß, 1 Lampe) entsprochen.

Abbildung 3-7 zeigt die Leuchte mit aktivierter Raumbeleuchtung, die Arbeitsplatzbeleuchtung ist hier ausgeschaltet.

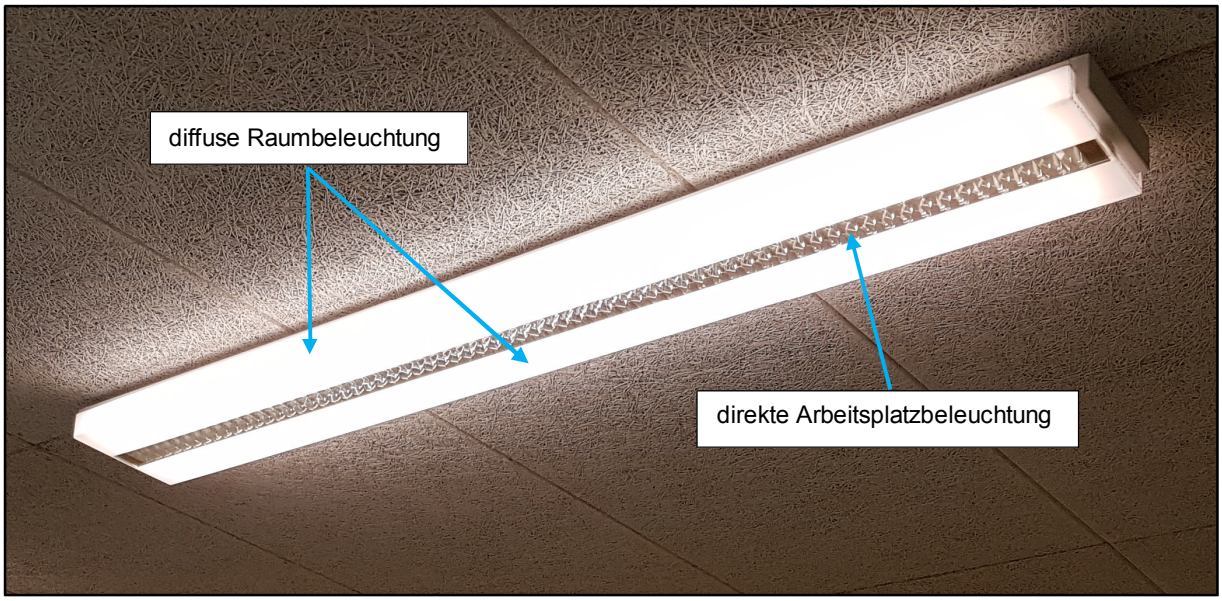

Abbildung 3-7: L1 Trilux Valuco Active

L2 – Tecnolight FA 748: Über dem Morgenkreis befindet sich eine einzelne Deckenanbauleuchte des Typs FA 748 mit 62 W inkl. EVG mit einer ringförmigen Leuchtstoffröhre (Abbildung 3-8 links). Zur Bedienung reicht ein einzelner Tastendruck, eine Dimmung ist über das Gedrückthalten des Tasters möglich. Zusätzlich ist die Morgenkreisbeleuchtung mit dem Präsenzmelder gekoppelt.

L10 – Trilux 5041 RMV: Die Klassenräume sind mit vier Computerarbeitsplätzen ausgestattet, welche über eine separate Beleuchtung verfügen, die nicht über die Präsenzmelder angesteuert wird. In jedem Klassenraum befinden sich über den Arbeitsplätzen zwei Leuchten des Types 5041 RMV der Firma Trilux (Abbildung 3-8 rechts). Sie sind speziell für Bildschirmarbeitsplätze konzipiert und kommen daher auch in den Büros zum Einsatz. Eine Dimmung dieser Leuchten ist nicht möglich.

L14 – Trilux Valuco D: Die Deckenanbauleuchte Valuco D wurde in den Horträumen, den Facharbeitsräumen für Kunst und Werken sowie in der Hausmeisterwerkstatt installiert (Abbildung 3-9).

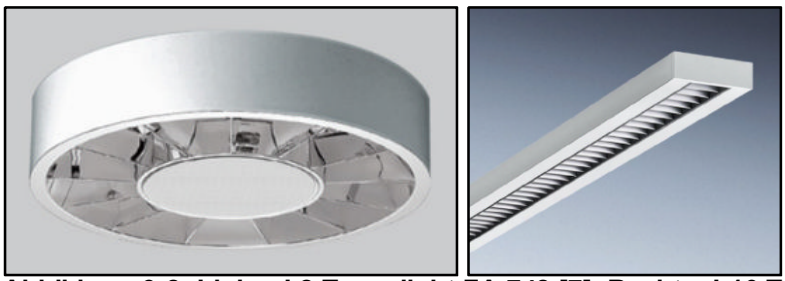
Abbildung 3-8: Links: L2 Tecnolight FA 748 [7]; Rechts: L10 Trilux 5041 RMV [8]

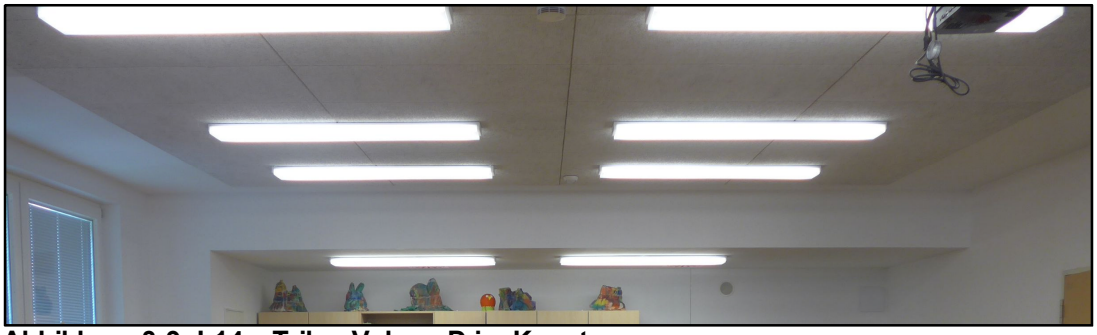
Abbildung 3-9: L14 – Trilux Valuco D im Kunstraum

3.2.2 Aula, Foyer und Galerie

L8 – Tecnolight DA 400 bzw. 500 mm: In der Aula wurde lediglich ein Leuchtentyp in zwei verschiedenen Größen installiert. Die Deckenanbauleuchte Tecnolight DA 400 bzw. 500 mm, die sowohl direkt als auch indirekt Licht abgibt, wurde außerdem für das Foyer sowie für die Galerie ausgewählt. Die Anschlussleistung ist mit 62 W je Leuchte für beide Typen identisch.

Abbildung 3-10: L8.1 Tecnolight DA 500 mm

Da die Aula ebenfalls die Funktion eines Aufführungssaales innehat, sind zu den Leuchten zusätzlich vier Bühnenstrahler installiert. Über ein Bedienpanel können verschiedene Lichteinstellungen vorgenommen werden, siehe Abbildung 3-11. Des Weiteren sind die Tecnolight DA Leuchten über das Paneel dimmbar. Bei den Bühnenstrahlern ist eine Dimmung nicht möglich.

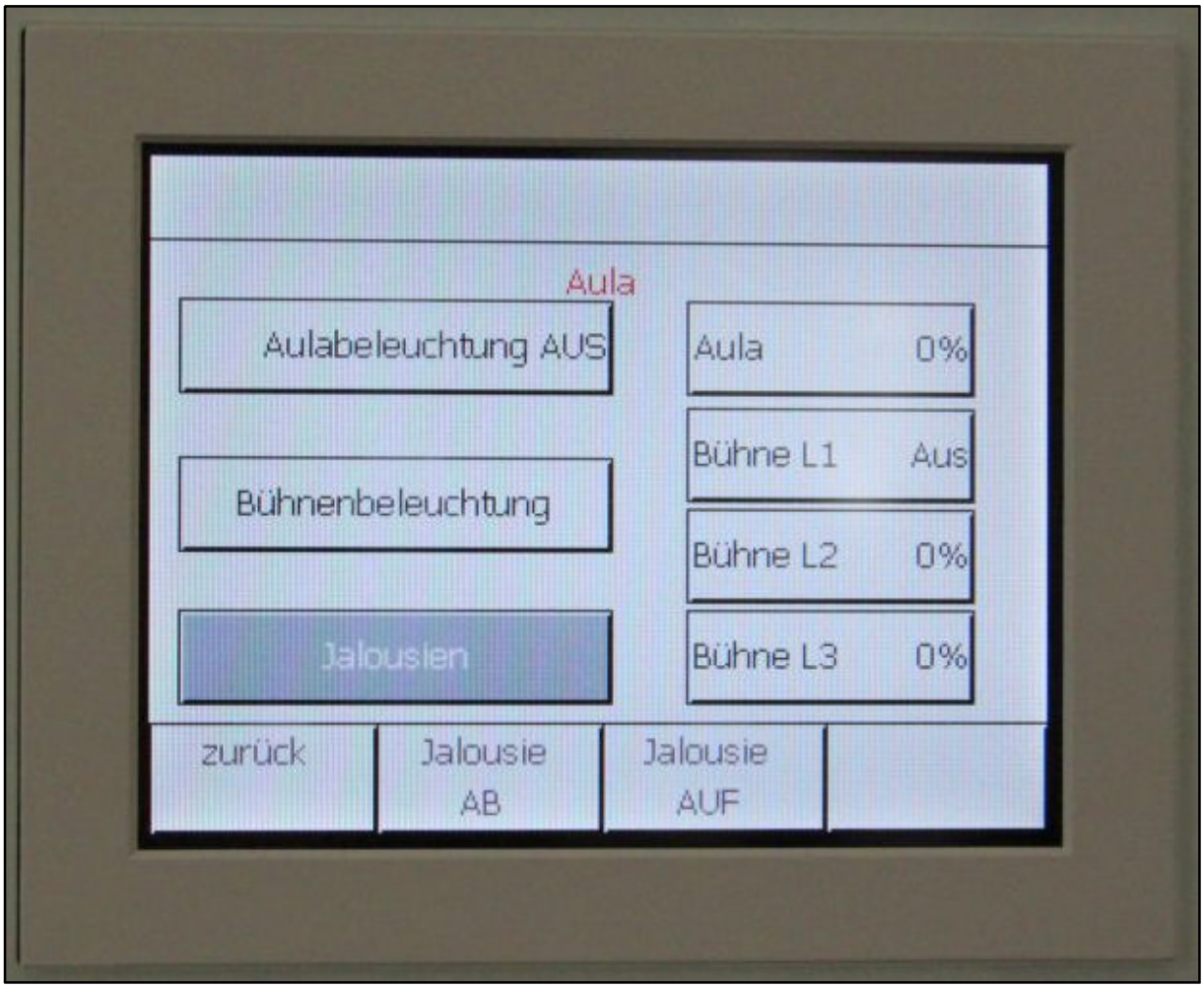

Abbildung 3-11: Bedienung Aulabeleuchtung und Jalousien

3.2.3 Flure

L4 – Trilux Inperla LED: Hierbei handelt es sich um ein Einbau-Downlight mit neutralweißer Leuchtdiode, welche stufenlos dimmbar ist.

L7 – RZB Flat Polymero Kreis: Diese Deckenanbauleuchte wurde in den Fluren des Gebäudeteils A, im Eingangsbereich, in den Treppenhäusern, Garderoben, sowie im Kindercafé und dem Raum der Stille eingesetzt. Sie gehört mit 255 W inkl. EVG zu den potentiell leistungsintensivsten Leuchten der Grundschule und kam mit 99 Stück am häufigsten zum Einsatz. Als Leuchtmittel wurden hier jedoch zwei sparsame 18 W Leuchtstoffröhren eingesetzt (ringförmig).

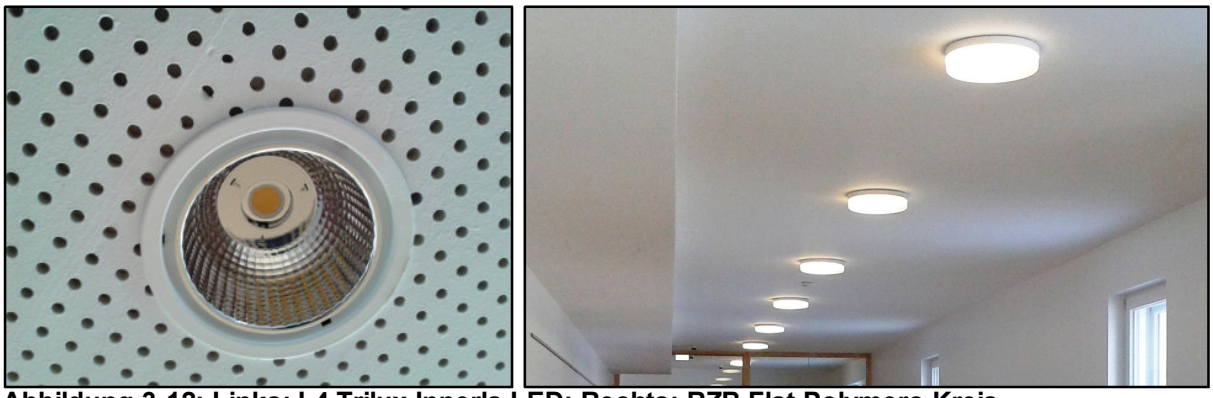

Abbildung 3-12: Links: L4 Trilux Inperla LED; Rechts: RZB Flat Polymero Kreis

3.2.4 Sanitärbereiche

L3 – Tecnolight DE 321: Die Deckeneinbauleuchte DE 321 mit 27 W inkl. EVG kommt in den Sanitärbereichen des Klassentraktes zum Einsatz.

L5 – Trilux 7132/58: Bei der Trilux 7132/58 handelt es sich um eine Feuchtraum-Anbauleuchte mit 112 W inkl. EVG, die im Küchentrakt bei Deckenmontage zum Einsatz kommt. Als Leuchtmittel werden zwei Leuchtstofflampen à 58 W eingesetzt.

L12 – Trilux 6651: Die Wandanbauleuchte Trilux 6651 befindet sich jeweils in den Vorräumen der Personal-WCs über dem Waschbecken.

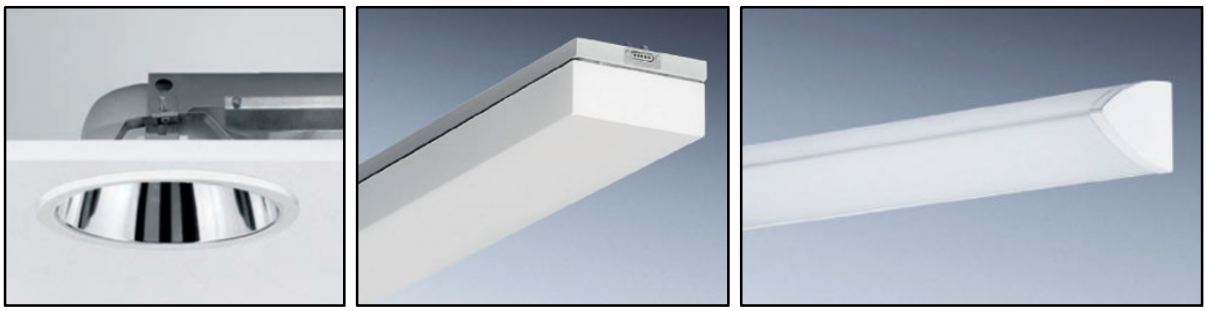

Abbildung 3-13: v.l.n.r. L3 Tecnolight DE 321 [7], L5 Trilux 7132/58 [8], L12 Trilux 6651 [8]

3.2.5 Raum der Stille

L6 – RZB Flat Polymero D = 1 m: Diese Leuchte erzeugt die entspannende Stimmung im Raum der Stille.

L13 – Trilux 3451N/58 dimmbar DALI: Die Wand- und Deckenleuchte wurde seitlich in das Deckensegel des Raumes der Stille eingesetzt und ermöglicht somit eine indirekte Beleuchtung des Raumes bei gleichzeitiger Dimmbarkeit.

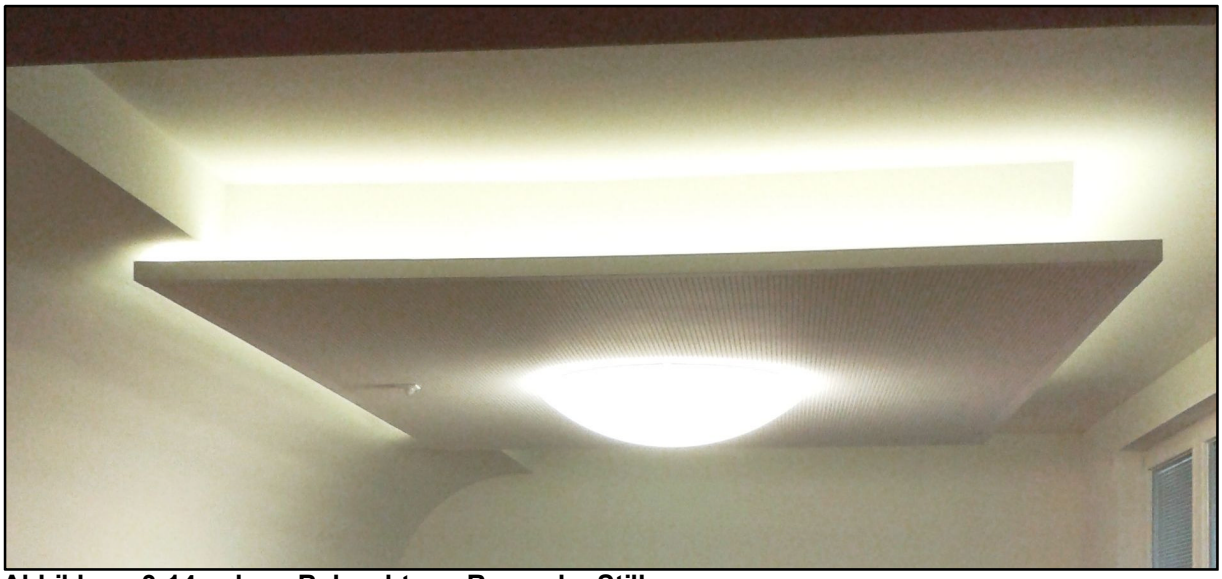

Abbildung 3-14: v.l.n.r. Beleuchtung Raum der Stille

3.2.6 Sonstige Räume

L9 – Trilux 3623 RMV: Die Deckenanbauleuchte Trilux 3623 RMV wurde für die Räume der Schulleitung mit 48 W inkl. EVG ausgewählt. Als Leuchtmittel kommen Leuchtstofflampen zum Einsatz.

L11 – Trilux 3452N/58: Die Trilux 3452N/58 wurde ausschließlich im Erste-Hilfe-Raum des Verwaltungsbereiches eingesetzt. Sie verfügt über zwei Leuchtstofflampen und hat eine Anschlussleistung inkl. EVG von 134 W.

L15 – Trilux Aragon: In den Hausanschlussräumen und Lüftungszentralen fiel die Entscheidung auf die Trilux Aragon mit 1 bzw. 2x58 W Leuchtstoffbestückung.

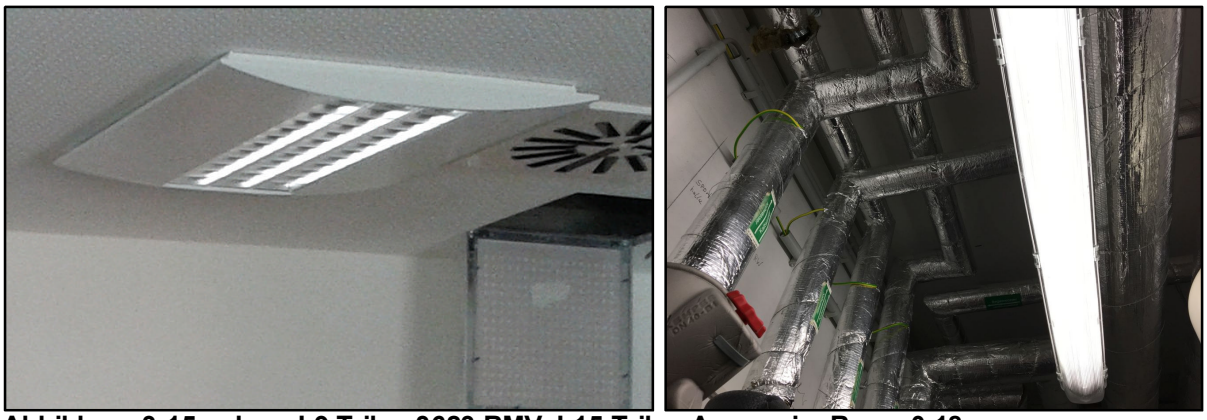

Abbildung 3-15: v.l.n.r. L9 Trilux 3623 RMV, L15 Trilux Aragon im Raum 0.18

3.3 Verschattung Klassenräume

Die Klassenräume sind mit Jalousien im Kastenbereich der Kastenfenster ausgestattet. Die elektrisch angetriebene Jalousette vom Fabrikat Faltenbacher Jalousie F-02 ist am inneren Fensterflügel befestigt. Wird dieser geöffnet, bewegt sich demnach auch die Verschattung mit (Abbildung 3-16 links) – ist somit auch nicht störend, wenn der äußere Fensterflügel geöffnet werden soll. Die Lamellenbreite beträgt 25 mm.

Die Jalousetten weisen eine Absorberseite (schwarz) und eine Reflektorseite (silber-reflektierend) auf. Zeigt die reflektierende Oberfläche nach außen, soll die Reflexion den sommerlichen Wärmeschutz unterstützen, wohingegen die absorbierende schwarze Seite zur besseren Ausnutzung der solaren Wärmegewinne führen soll.

Abbildung 3-16: Links: Blick in Fensterkasten mit hochgefahrener Jalousie, Rechts: Raum 2.07 mit defekter Jalousie

Die Bedienung erfolgt manuell durch die Nutzer über einen Wipptaster am Lehrerpult oder an den Computerarbeitsplätzen (Abbildung 4-6 auf Seite 35), wobei es fünf mögliche Neigungswinkel gibt: waagerecht sowie 45° bzw. 90° Neigung jeweils in beide Richtungen. Abbildung 2-1 auf Seite 15 zeigt beide komplett geschlossenen Jalousiestellungen im Vergleich.

Wie in Abbildung 3-16 rechts zu erkennen ist, kommt es gelegentlich zu Defekten an den Jalousien. In diesem Fall wird gewartet, bis dies mehrere Fenster betrifft, damit sich der Reparaturauftrag lohnt.

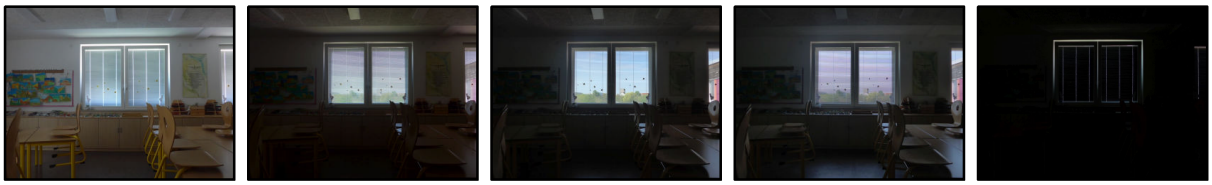

Abbildung 3-17: Kunstraum 2.14, v.l.n.r. silber innen, 45 °, 90°, 45°, schwarz innen

3.4 Verschattung Aula

Im Scheibenzwischenraum der in Abbildung 3-18 dargestellten Pfosten-Riegel-Fassade der Aula befindet sich eine innenliegende Jalousie vom Typ Isolette, welche mit einem Jalousieantrieb Encoder BA 11-300/500 bewegt wird. Die Bedienung der Verschattung erfolgt über ein Tableau, welches rechts von der Bühne an der Wand montiert ist (Abbildung 3-11, Seite 26).

Durch den hermetischen Einbau ist die Jalousie vor äußeren Einflüssen geschützt und gemäß Herstellerangaben wartungsfrei. Jedoch kam es bei einer Scheibe bereits zu einem Defekt, der den Ausbau der Scheibe, die Öffnung des Randverbundes und eine Reparatur des Antriebs notwendig machte, was für die Edelgasfüllung von Nachteil ist. Seither herrscht die globale Anweisung des Schulträgers, den Sonnenschutz nicht mehr hoch- und runterzufahren, sondern nur noch den Drehwinkel zu bedienen.

Abbildung 3-18: Pfosten-Riegel-Fassade Aula von innen

Abbildung 3-19: Pfosten-Riegel-Fassade Aula von außen mit einer defekten Jalousie

3.5 Verschattung andere Räume

Der Eingangsbereich verfügt oberhalb des Windfangs über eine Zwischenscheibenverschattung wie in der Aula in Kapitel 3.4 beschrieben, siehe Abbildung 3-20.

Die verglasten Außentüren hingegen, häufig mit feststehenden Seitenelementen, sind nicht mit Verschattungsmöglichkeiten ausgestattet.

Abbildung 3-20: Eingang mit geschlossenen Jalousetten, rechts mit Solar- und Aulafassade

Bei allen anderen Fensteröffnungen des Gebäudes handelt es sich um Kastenfenster (ausführliche Beschreibung siehe Abschlussbericht Teil 6), die mit den in Kapitel 3.3 beschriebenen Jalousien im Kastenbereich ausgestattet sind. Eine Ausnahme bilden die ostorientierten Brandschutzfenster in den Fluren des Gebäudeteils B, sie lassen sich nicht verschatten.

Abbildung 3-21: Links: Kastenfenster mit gekipptem Außenflügel, Rechts: Detail der Jalousie

4 Regelung und Steuerung

Dieses Kapitel beschreibt das Konzept zur Beleuchtungsregelung und Bedienung der Verschattung. Dabei wird auf die damit verbundenen Vor- und Nachteile der gewählten Steuerung eingegangen.

4.1 Bewegungsmelder

Damit das Ausschalten des Lichtes nach Verlassen der Räume oder nach Schulende nicht vergessen wird, ist die Schule mit zwei verschiedenen Typen von Bewegungsmeldern ausgestattet.

Die Präsenzmelder mit 360°-Bereich enthalten gleichzeitig die Tageslichtsensoren. Diese erfassen die Helligkeit im Klassenraum - welche sich aus Tageslicht und Kunstlicht zusammensetzt – und regeln die Beleuchtungsstärke entsprechend der Nutzeranforderung nach. Sie wurden 35 Mal installiert, insbesondere in den acht Klassenräumen, in sieben Horträumen sowie im WC-Bereich. Hier werden jedoch die Tageslichtsensoren nicht angesprochen, da sich in den Sanitärräumen keine Fenster befinden. Grund für den Einbau dieses Fabrikats war hier die Präsenzerkennung durch Wärme, welche dazu führt, dass bei längerem Aufenthalt die Beleuchtung nicht vorzeitig ausgeschaltet wird.

Der in die Sensoreinheit integrierte Lichtsensor bewertet die Helligkeit der Fläche unterhalb des Sensors mit einem Öffnungswinkel von 20° (Durchmesser von 8 m bei Deckenmontage von 2,7 m) [8]. Der Abgleich von Sollwert und Messwert führt dann ggf. zum Ein- /Ausschalten oder zur Nachregelung des Kunstlichtes.

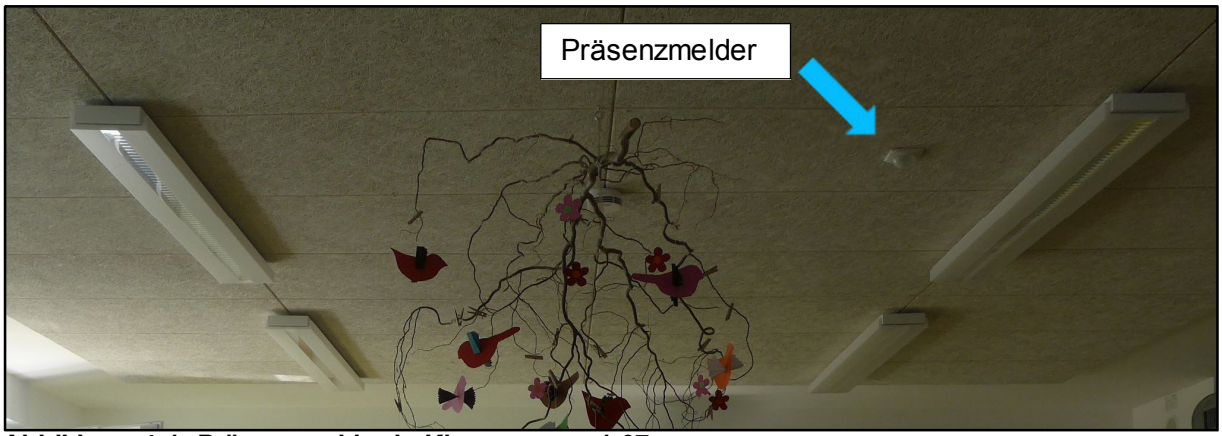

Abbildung 4-1: Präsenzmelder in Klassenraum 1.07

Die einfachen Präsenzmelder hingegen erfassen Bewegungen im Raum und schalten die Beleuchtung bei Bedarf ein bzw. nach 5 Minuten wieder aus. Hiervon wurden in den Verkehrsflächen und einigen Sanitärräumen insgesamt 26 Melder installiert.

Die Büros, Küche sowie Hausmeisterwohnung sind nicht mit Bewegungsmeldern ausgestattet.

4.2 Lichtszenarien Klassenräume

Die Klassenräume sind mit den in 3.2 aufgeführten Leuchten ausgestattet. Die Lehrer steuern das Licht in den Klassenzimmern vom Lehrerpult aus, die Kinder sollen die Schalter nicht ungefragt bedienen.

Die Leuchte Trilux Valuco Active über dem Unterrichtsbereich hat folgende Grundfunktionen:

- das Streulicht mit hohem Blauanteil bildet den diffusen Taghimmel nach (kaltweiß, zwei Lampen), hier als „Raumbeleuchtung“ bezeichnet, siehe Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3
- das gerichtete Licht höherer Farbtemperatur entspricht der direkten Sonneneinstrahlung (neutralweiß, eine Lampe), hier als „Arbeitsplatzbeleuchtung“ bezeichnet, siehe Abbildung 4-4

Abbildung 4-2: diffuse Raumbeleuchtung minimal (links) und maximal (Mitte), rechts: kombiniert

Abbildung 4-3: diffuse Raumbeleuchtung minimal (links) und maximal (rechts)

Abbildung 4-4: Arbeitsplatzbeleuchtung minimal (links) und maximal (rechts)

Abbildung 4-5: v.l.n.r.: nur Raumbeleuchtung, nur Arbeitsplatzbeleuchtung, kombiniert

Für die Bedienung der Valuco Active sind am Lehrerpult die Taster „Arbeitsplatzbeleuchtung“ und „Raumbeleuchtung“ vorgesehen (Abbildung 4-6). Der Taster „Automatik sperren“ führt zur Deaktivierung der tageslichtabhängigen Regelung, wodurch ein manuelles Regulieren der Beleuchtung ermöglicht wird. Der Morgenkreis wird ebenfalls vom Lehrerpult gesteuert.

Abbildung 4-6: Bedienung Klassenraumbeleuchtung und Jalousien

Folgende Funktionen haben die Taster am Bedientableau im Einzelnen:

Schalter "Automatik sperren"

- rot = die Automatik ist gesperrt, d. h. manuelle Bedienung und keine Reaktion auf Bewegungsmelder
- aus = Automatik ist aktiv, d. h. Einregelung auf definierte Beleuchtungsstärke und Reaktion auf Bewegungsmelder

Schalter "Morgenkreis"

- kein Automatikmodus
- nach oben
    - Tippen = an im Minimum
    - Drücken = heller bis Maximum
- nach unten
    - Tippen = aus
    - Drücken = dunkler bis Minimum, dann aus

Schalter "Raumbeleuchtung"

- steuert die beiden äußeren Lampen jeder Fassung an, welche diffuses Licht aussenden
- Sollwert im Automatikmodus 300 lx
- nach oben (im Automatikmodus, rote Lampe aus)
    - Tippen = an im Maximum
    - Drücken = heller bis Maximum
- nach unten (im Automatikmodus, rote Lampe aus)
    - Tippen = aus
    - Drücken = dunkler bis Minimum, dann aus
- nach oben (im manuellen Modus, d. h. rote Lampe leuchtet)
    - Tippen = an im Maximum
    - Drücken = an im Minimum, dann heller bis Maximum
- nach unten (im manuellen Modus)
    - Tippen = aus
    - Drücken = dunkler bis Minimum, dann aus

Schalter "Arbeitsplatzbeleuchtung"

- steuert die mittlere Lampe jeder Fassung an, welche direktes Licht aussendet
- Sollwert im Automatikmodus 500 lx
- nach unten (im Automatikmodus, rote Lampe leuchtet)
    - Tippen = an auf Maximum
    - nächstes Tippen = aus
- nach unten (im manuellen Modus, rote Lampe aus)
    - Tippen = an auf Maximum
    - nächstes Tippen = aus

4.3 Verschattung Klassenräume

Die Jalousien werden durch einen Wippschalter am Lehrerpult bedient, siehe Abbildung 4-3. Die Bedienung erfolgt folgendermaßen:

Tippschalter abwärts
- länger drücken, wenn Jalousie oben ist = runterfahren
- während des Rauffahrens antippen = Zwischenstopp
- antippen, wenn Jalousie unten ist = Drehung 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100%

Tippschalter aufwärts
- länger drücken, wenn Jalousie unten ist = rauffahren
- während des Runterfahrens antippen = Zwischenstopp
- antippen, wenn Jalousie unten ist = Drehung 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100%

4.4 Problemfälle und Verbesserungsansätze

Das Personal hat teilweise Schwierigkeiten, die Bedienung der umfangreichen Beleuchtungsmöglichkeiten in den Klassenräumen mit nur zwei Tastern umzusetzen, siehe Nutzerbefragung in Kapitel 6. Es wurde angemerkt, dass eine Aufteilung der Funktionen auf mehr als zwei Schalter besser verständlich wäre. Alternativ könnte es ein Bedienpanel geben, auf dem verschiedene Szenarien gespeichert sind und direkt angesteuert werden können. Da eine bauliche Veränderung der Bedienungssituation unwahrscheinlich ist, wird es eine erneute Einweisung und eine schriftliche Anleitung geben, die die Funktionen nochmals erklärt.

Die Beleuchtungsautomatik wird als sehr gut eingeschätzt und von einigen Lehrern dem manuellen Betrieb vorgezogen. Wird die Automatik jedoch übersteuert, passiert es gelegentlich, dass das Licht bei Verlassen des Raumes nicht ausgeschaltet wird, was aus energetischer Sicht ungünstig ist. Wird das Licht hingegen bei Unterrichtsschluss bei gesperrter Automatik manuell ausgeschaltet, so muss es auch morgens bei Betreten des Raumes manuell eingeschaltet werden. Im Winter muss demnach der Weg bis zum Lehrertisch im Dunkeln zurückgelegt werden. Dieses Problem wäre z. B. lösbar, indem eine zentrale Steuerung außerhalb der Nutzungszeit alle Einstellungen auf Automatik zurücksetzt. Diese Option wurde im Rahmen der Monitoringphase noch nicht umgesetzt.

Probleme mit den Bewegungsmeldern wurden lediglich durch die Reinigungskräfte berichtet. Im Einzugsbereich der großen Treppe im Gebäudeteil A befindet sich kein Bewegungsmelder, sodass die Beleuchtung nach 5 Minuten ausschaltet und die Reinigungskraft beim Wischen der Treppe plötzlich im Dunkeln steht. Sie selbst oder eine Kollegin müssen dann erst im Flur „Präsenz zeigen“, um das Licht wieder zu aktivieren. Da dies ein Sicherheitsrisiko darstellt, müsste ein Bewegungsmelder nachgerüstet oder die Beleuchtungsdauer deutlich verlängert werden.

5 Tages- und Kunstlichtmessung

Dieses Kapitel beschreibt die Tages- und Kunstlichtmessungen, welche im Rahmen der Masterarbeit „Optimierung der Verschattungs- und Beleuchtungsanlagen für eine Passivhausschule“ von Julia Benn durchgeführt wurden [3].

Die allgemeinen Anforderungen an das Tageslicht in Innenräumen regelt die DIN 5034 Teil 1. Die Tageslichtmessung dient zum einen der Überprüfung der Einhaltung der aus psychischer Sicht erforderlichen ausreichenden Mindesthelligkeit (Messung des Tageslichtquotienten an zwei Referenzorten). Zum zweiten wurde untersucht, ob von einer ausreichenden Tageslichtversorgung ausgegangen werden kann. Hierzu wurde überprüft, ob der Tageslichtquotient in Raummitte und an allen Schülertischen mindestens 2 % beträgt. Dieser ist durch das Verhältnis zwischen der Innenbeleuchtungsstärke E_{innen} [lx] zur Außenbeleuchtungsstärke $E_{außen}$ [lx] definiert. Die ermittelten Tageslichtquotienten ermöglichen über die Aussage „ausreichende Tageslichtversorgung“ hinaus eine Einschätzung der Güte der Tageslichtversorgung. Die DIN 18599 Teil 4 kennt die in Tabelle 5-1 aufgeführte Klassifizierung für die Tageslichtversorgung:

Tabelle 5-1: Klassifizierung der Tageslichtversorgung über den Tageslichtquotienten [9]

Tageslichtquotient $D_{Rb,j}$	Klassifizierung der Tageslichtversorgung
$D_{Rb,j} \geq 6$ %	gut
6 % > $D_{Rb,j} \geq 4$ %	mittel
4 % > $D_{Rb,j} \geq 2$ %	gering
$D_{Rb,j} < 2$ %	keine

5.1 Messorte und Messtechnik

Die Tages- und Kunstlichtmessungen wurden am 28.02.2017 im Rahmen des Monitorings in der Aula, dem südorientierten Klassenraum 1.08, dem nordorientierten Klassenraum 2.01, dem Flur im 1. Obergeschoss und dem innenliegenden Mädchen-WC 1.10 (nur Kunstlichtmessung) durchgeführt. In den jeweiligen Räumen erfolgte eine Ermittlung des Tageslichtquotienten D, der Verteilung des Tageslichtes sowie der Kunstlichtbeleuchtung mit unterschiedlichen Szenarien.

Es kamen zwei Luxmeter FLA623VL der Fa. Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH zum Einsatz. Die Markierung der Messpunkte im Raum erfolgte durch Klebeband. Die Höhe der jeweiligen Bezugsebene wurde mithilfe eines Stativs eingestellt und waagerecht ausgerichtet.

5.1.1 Tageslichtmessung

Die Tageslichtmessung erfolgte in Anlehnung an die DIN 5034 Teil 5 [10] und den EnOB:Monitor Leitfaden „Tageslichtnutzung in Gebäuden – Anleitung zu Lichtmessungen“ [11]. Für die Tageslichtmessung erfolgten zwei parallele Messungen: Eine Person erfasste die Beleuchtungsstärke im Außenbereich mit ausreichendem Abstand vom Gebäude. Von einer Messung auf dem Dach wurde abgesehen, da die Grundschule über ein sehr großzügiges, unverbautes Außengelände verfügt. Die andere Person erfasste exakt zeitgleich die Beleuchtungsstärke an den markierten Messpunkten des zu bewertenden Innenraumes in der Arbeitsebene bei ausgeschaltetem Kunstlicht und geöffneter Sonnenschutzvorrichtung. In beiden Fällen ist darauf zu achten, dass die messende Person keinen Einfluss auf das Messergebnis hat und sich möglichst unter dem Erfassungsbereich befindet. Die Übermittlung der Messwerte erfolgte über Mobiltelefon, die Ergebnisse wurden sofort unter Angabe der Uhrzeit in einer EXCEL Tabelle protokolliert, welche die Aufteilung des Messfeldes widerspiegelt.

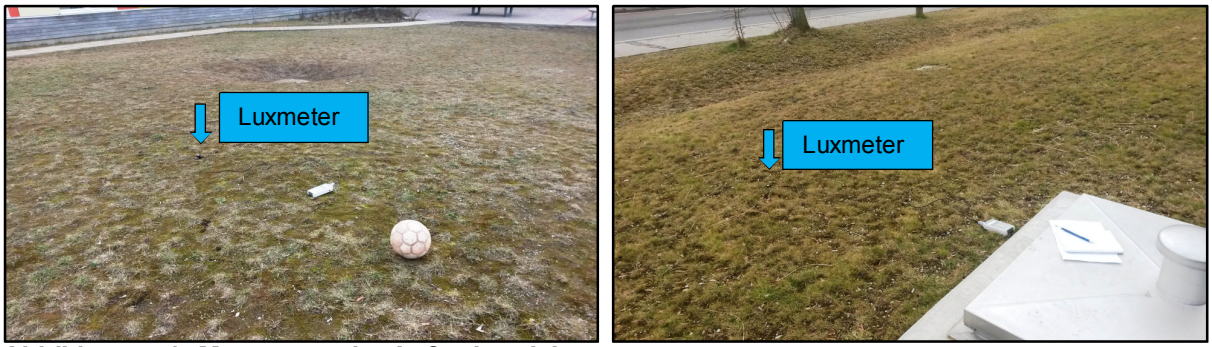

Abbildung 5-1: Messungen im Außenbereich

Die Voraussetzungen für die Tageslichtmessung waren zunächst nicht optimal, da für die Messung im Außenbereich eine möglichst geschlossene Wolkendecke vorhanden sein sollte. Um die Tageslichtmessung durchzuführen, musste gewartet werden, bis der Himmel bedeckt war. Die Außenbeleuchtungsstärken lagen zwischen 6650 (bewölkt) und 16960 lx (leicht bewölkt).

5.1.2 Kunstlichtmessung

Die Messung der Beleuchtungsstärke erfolgte nach DIN 5035-6 [12]. Im zu bewertenden Raum ist dabei das Kunstlicht eingeschaltet und die Sonnenschutzvorrichtung geschlossen. Dabei war darauf zu achten, dass die Leuchtmittel bereits „eingebrannt“ sind, d.h. so weit erwärmt, dass sich die Beleuchtungsstärke nicht mehr ändert. Es wurden dieselben Messhöhen und Messpunkte wie bei der Ermittlung der Tageslichtwerte verwendet.

5.1.3 Messaufbau Aula/Speisesaal

Die Aula wird hauptsächlich als Speiseraum genutzt, weshalb die Messhöhe auf 75 cm (sitzende Tätigkeit) festgelegt wurde. Die Bestuhlung wurde beräumt und mit dem Stativ gearbeitet. Es wurde an den in Abbildung 5-4 dargestellten Punkten gemessen, welche auf dem Fußboden durch Klebezettel markiert wurden (Abbildung 5-6). Der Arbeitsbereich ist im Grundriss gelb hinterlegt.

Abbildung 5-2: Aula mit üblicher Bestuhlung als Speisesaal

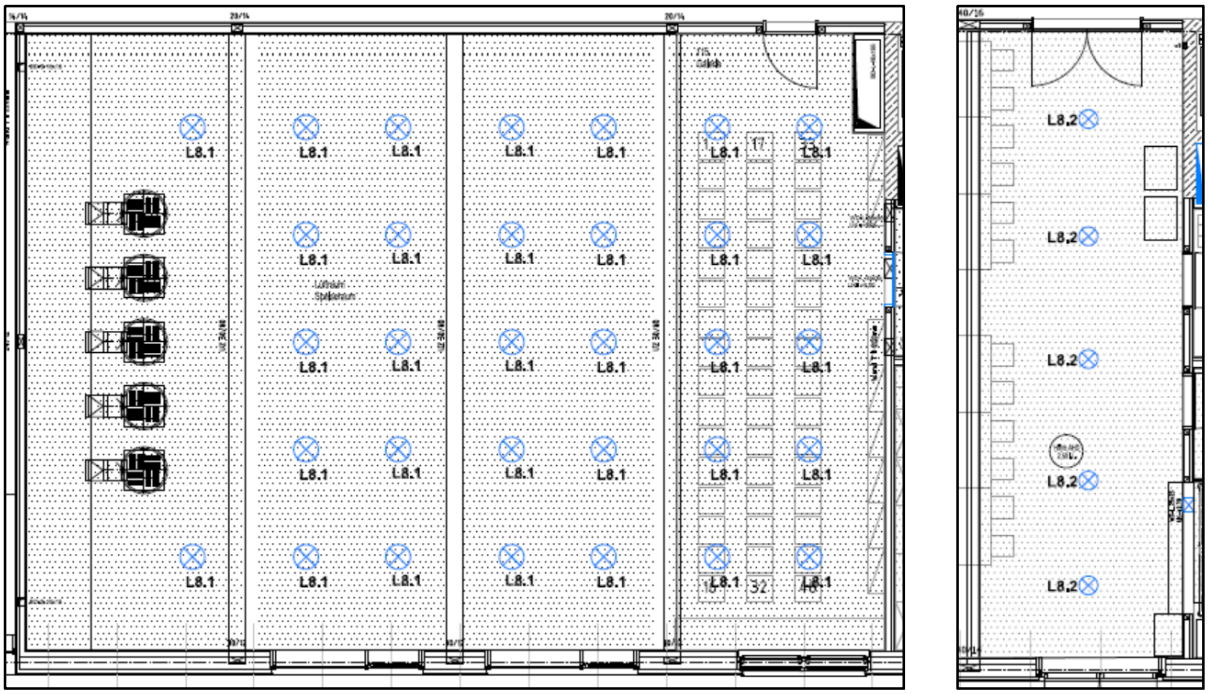

Abbildung 5-3: Installationsplan Aula [1], Links: Luftraum 1. OG, Rechts: EG unter Galerie

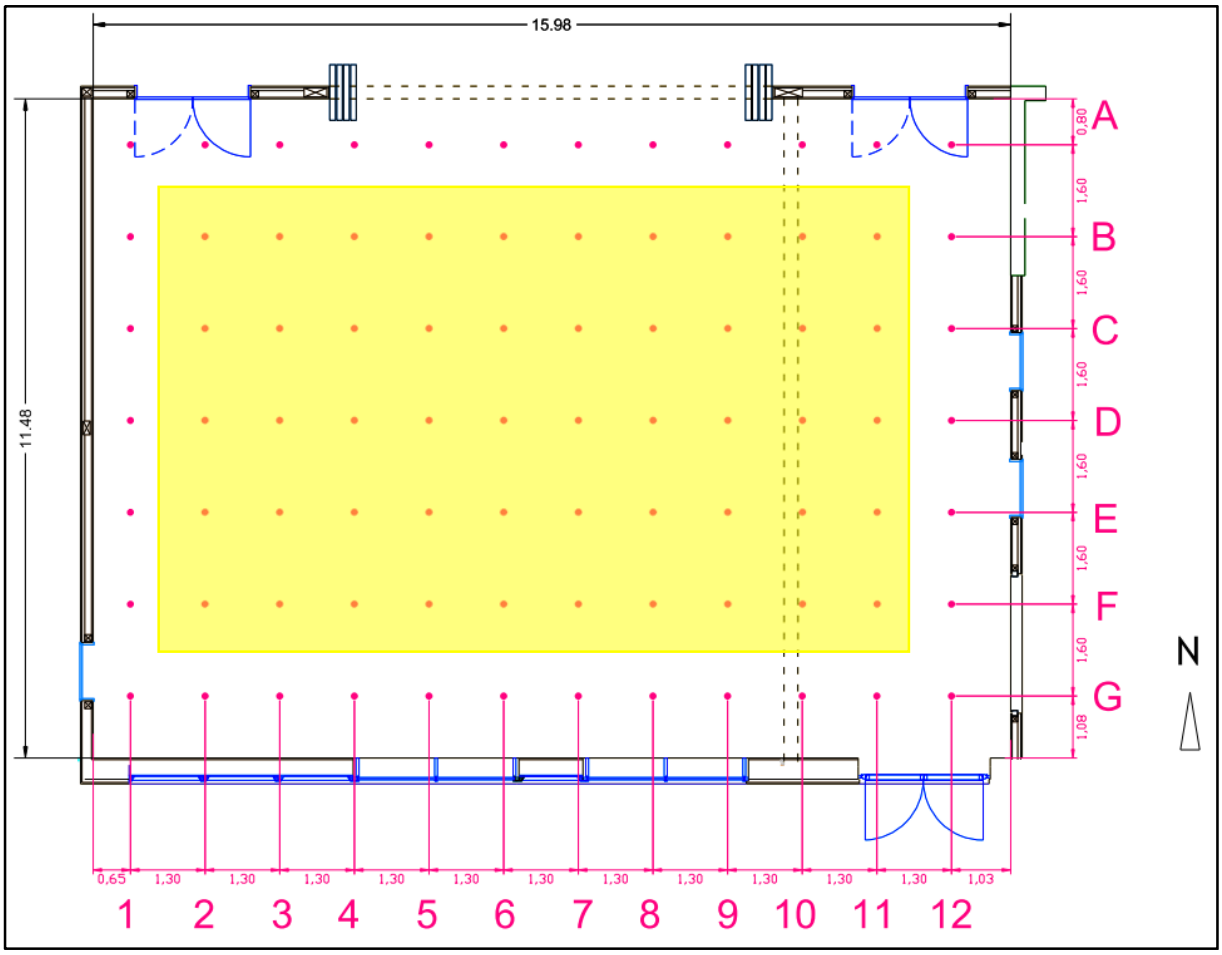

Abbildung 5-4: Messraster Aula [3]

Zur Ermittlung der Beleuchtungsstärke des Kunstlichts wurden die Jalousien geschlossen, sodass die silberne Seite nach innen zeigte. Eine komplette Verdunklung konnte nicht hergestellt werden, da die verglaste Außentür an der Südseite nicht über eine Jalousie verfügt. Die Beleuchtung wurde vollständig eingeschaltet, die Möglichkeit der Dimmung wurde nicht genutzt.

Abbildung 5-5: Aula am Tag der Beleuchtungsmessung [3]

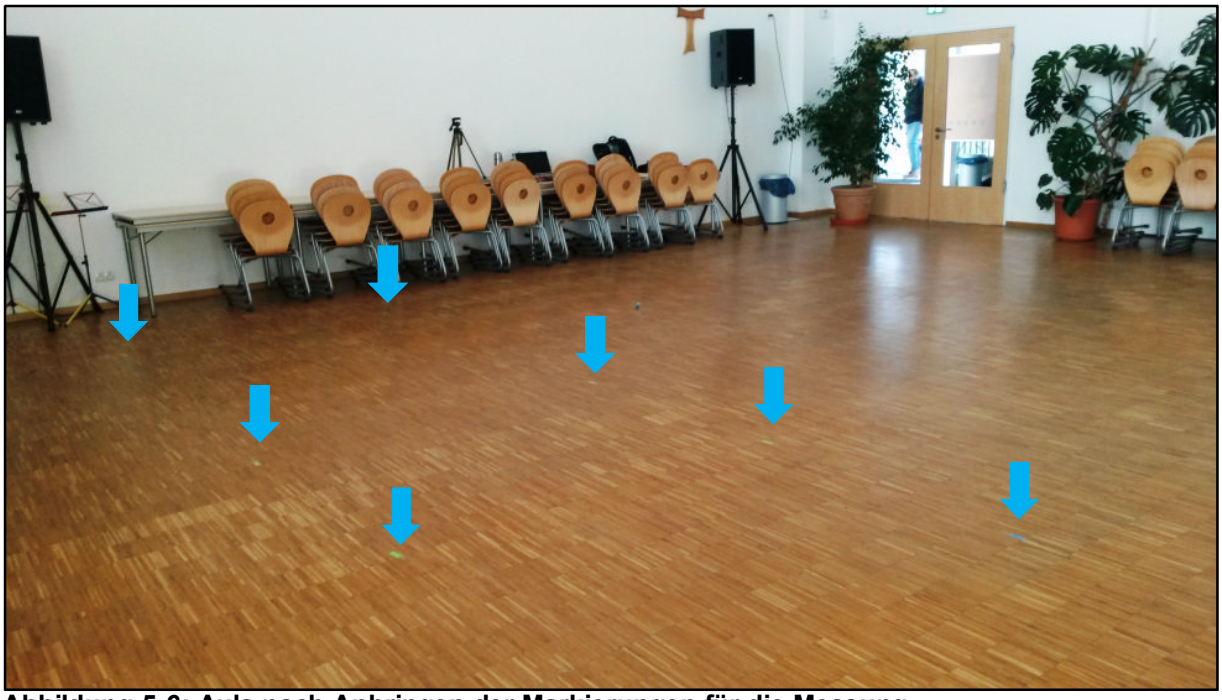

Abbildung 5-6: Aula nach Anbringen der Markierungen für die Messung

5.1.4 Messaufbau Klassenraum 1.08

Alle acht Klassenzimmer in Gebäudeteil B sind in Größe und Form identisch, sodass die Messung des Raumes 1.08 repräsentativ für alle vier südorientierten Klassenräume ist. Die Messpunkte wurden gemäß Abbildung 5-9 gleichmäßig im Klassenraum 1.08 verteilt. Anders als in der ASR A3.4 vorgesehen, wurde die Messhöhe von 75 cm auf die vorgefundene Tischhöhe von 65 cm angepasst. Lediglich die Arbeitsebene an den Computerarbeitsplätzen wurde auf einer Höhe von 75 cm belassen. Die Möblierung im Klassenraum blieb zum Zeitpunkt der Messung stehen (Abbildung 5-8). In unmöblierten Bereichen kam das Stativ zum Einsatz.

Die installierten Leuchten können dem Grundriss Abbildung 5-8 entnommen werden.

Abbildung 5-7: Klassenraum 1.08 am Tag der Messung, hinten: Morgenkreis und PC-Tische [3]

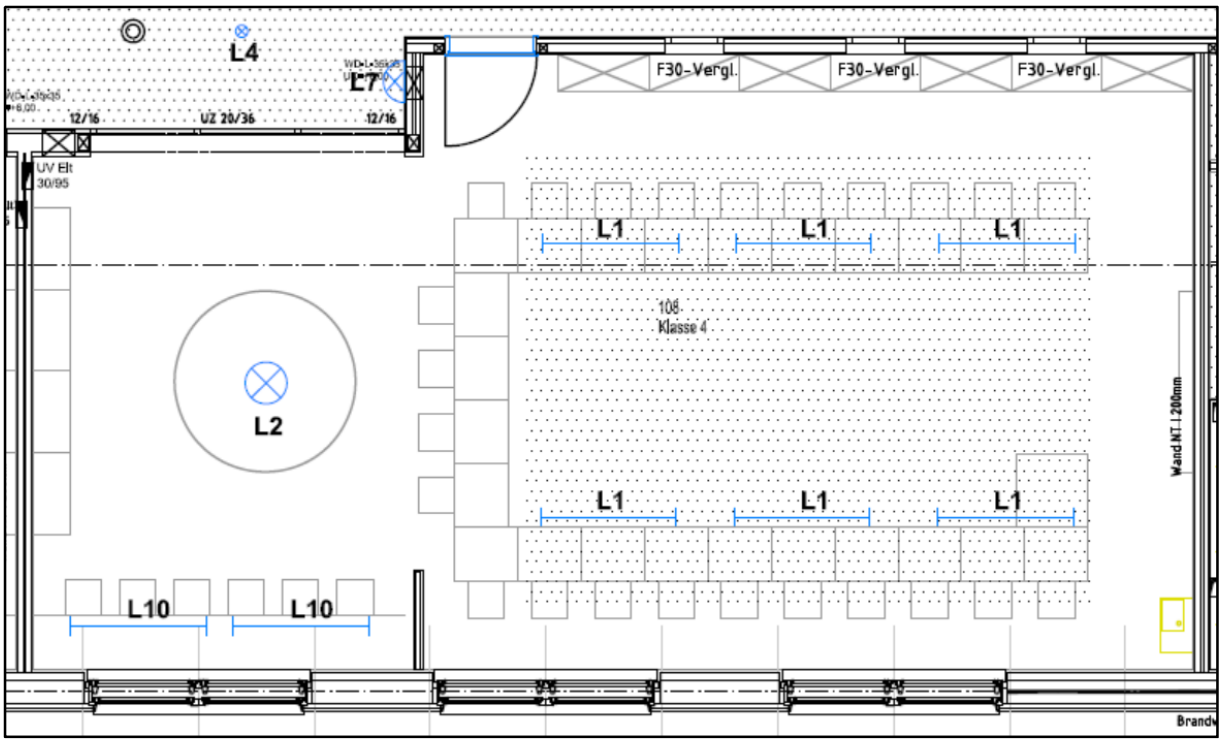

Abbildung 5-8: Installationsplan Klassenraum 1.08 [1]

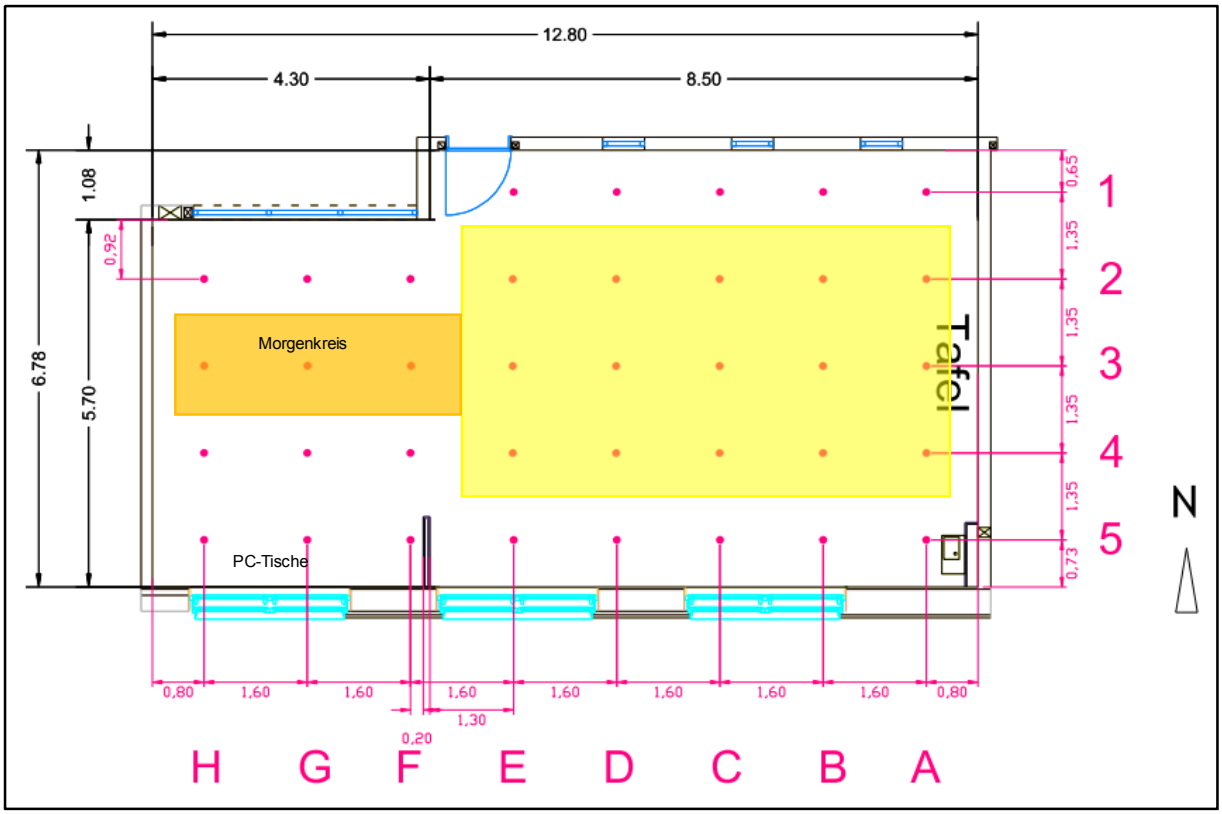

Abbildung 5-9: Messraster Klassenraum 1.08 [3]

5.1.5 Messaufbau Klassenraum 2.01

Der Versuchsaufbau erfolgte analog zum Klassenraum 1.08 für den nordorientierten Klassenraum 2.01, siehe Abbildung 5-11.

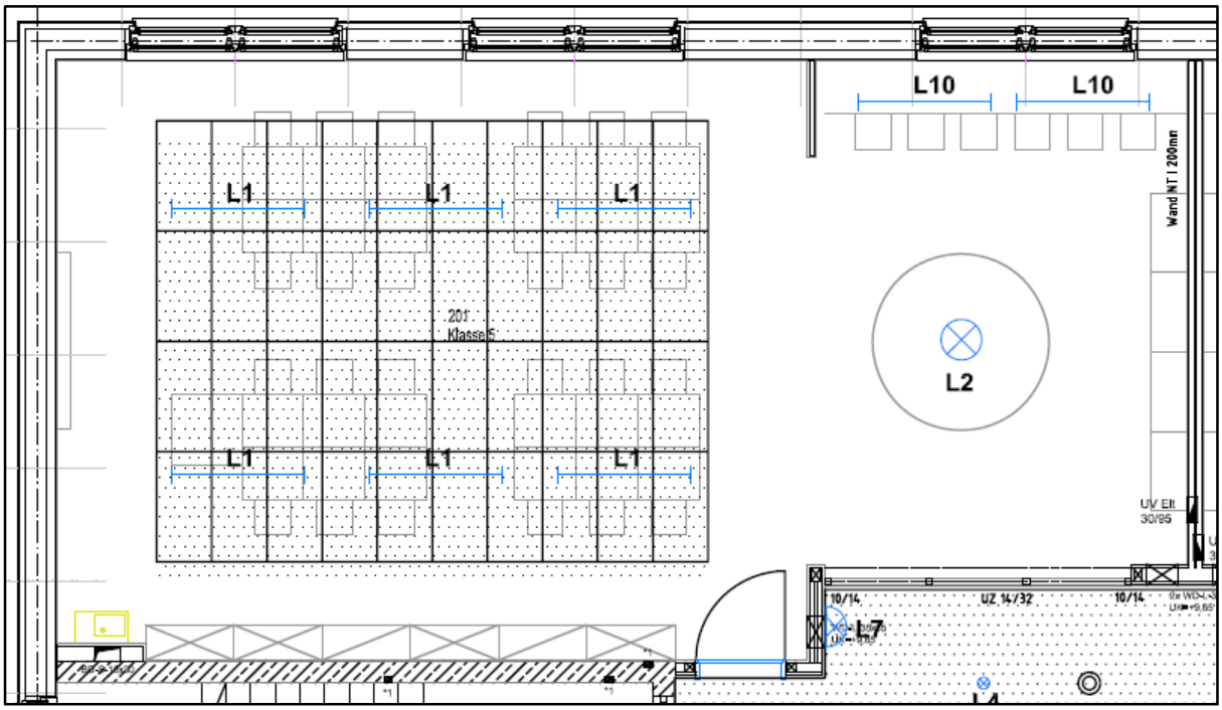

Abbildung 5-10: Installationsplan Klassenraum 2.01 [1]

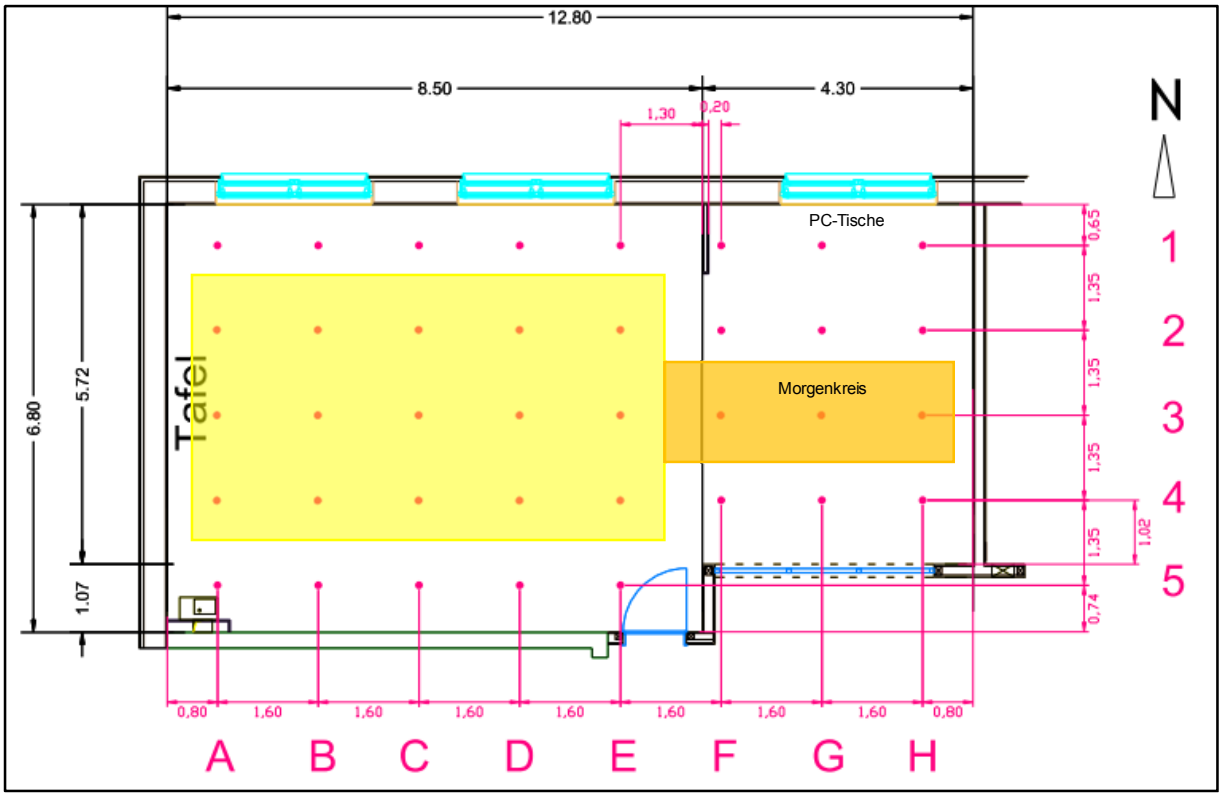

Abbildung 5-11: Messraster Klassenraum 2.01 [3]

5.1.6 Messaufbau Flur 1. OG

Das Messraster im zu bewertenden Flur des Klassenbereiches wurde wie in Abbildung 5-13 festgelegt. Laut ASR A3.4 beträgt die Bezugshöhe zur Messung der Beleuchtungsstärke in Fluren < 20 cm. Die Positionierung der Luxmeter fand direkt auf dem Fußboden statt (Höhe ca. 3 cm). Abbildung 5-12 zeigt die installierten Leuchten im Grundriss.

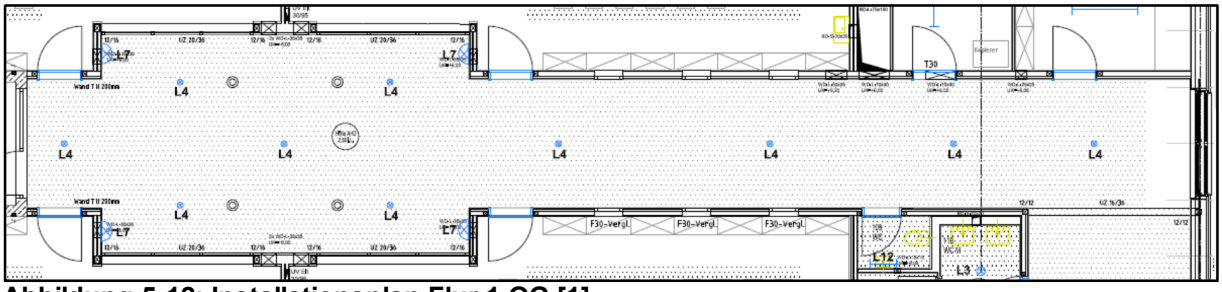

Abbildung 5-12: Installationsplan Flur 1.OG [1]

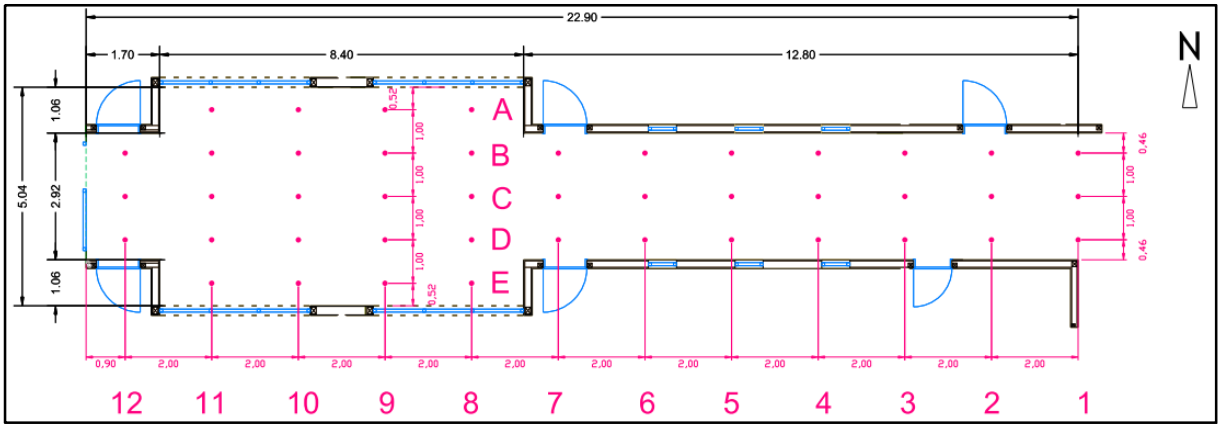

Abbildung 5-13: Messraster Flur 1. OG [3]

Abbildung 5-14: Messung im Flur 1. OG [3]

5.1.7 Messaufbau WC Mädchen

Beim WC handelt es sich um einen innenliegenden Raum ohne Fenster, daher wurde nur eine Kunstlichtmessung vorgenommen. Die Arbeitshöhe betrug 75 cm. Aufgrund der zahlreichen Trennwände wurde das Messraster erst vor Ort wie folgt festgelegt (Abbildung 5-15):

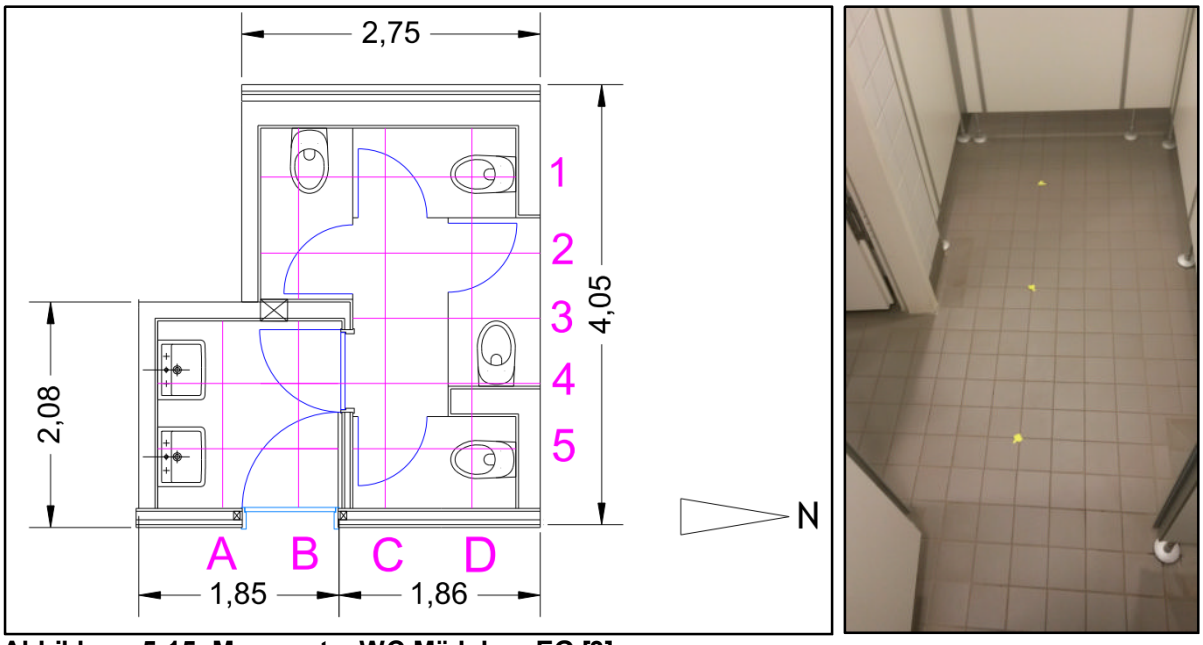

Abbildung 5-15: Messraster WC Mädchen EG [3]

5.2 Auswertung Tageslichtmessung

5.2.1 Aula/Speisesaal

Bei der Erfassung der Messwerte in der Aula mit einer Raumtiefe von 11,48 m ergaben sich für die Messpunkte (Messraster siehe Abbildung 5-4, Seite 39) die in Tabelle 5-2 aufgeführten Beleuchtungsstärken, wobei Spalte G die Fensterfront darstellt (Sturzhöhe 6,15 m). Die Zeilen 10 bis 12 befinden sich unter der Galerie, während die Zeilen 1 bis 9 im zweigeschossigen Raum liegen. Die ASR3.4 sieht einen Sollwert für die Beleuchtungsstärke von Kantinen mit 200 lx vor, welche insbesondere im gelb markierten Bereich erreicht werden sollte. Tatsächlich wurden hier minimal 165 lx und maximal 654 lx, im Mittel 303 lx gemessen. Der Mittelwert des gesamten Raumes beträgt 290 lx. In der Darstellung als 3D-Oberfläche mit Hilfe von EXCEL kann die Tageslichtverteilung anschaulich dargestellt werden (siehe Abbildung 5-16).

Tabelle 5-2: Beleuchtungsstärken Tageslichtmessung Aula [3]

Beleuchtungsstärke [lx] Innenraum			**Tiefe 11,48 m**						
			A	B	C	D	E	F	G
			0,8 m	2,4 m	4 m	5,6 m	7,2 m	8,8 m	10,4 m
Breite 15,98 m	12	14,95 m	150	88	120	180	294	433	808
	11	13,65 m	203	179	200	236	234	351	884
	10	12,35 m	271	227	165	222	233	306	243
	9	11,05 m	363	274	310	376	366	462	275
	8	9,75 m	350	323	355	254	330	441	286
	7	8,45 m	265	350	412	494	197	654	301
	6	7,15 m	260	322	344	407	432	499	471
	5	5,85 m	249	289	310	341	350	379	427
	4	4,55 m	171	190	265	222	355	247	161
	3	3,25 m	175	262	275	275	266	205	120
	2	1,95 m	182	202	205	205	200	169	130
	1	0,65 m	170	249	227	236	204	161	97

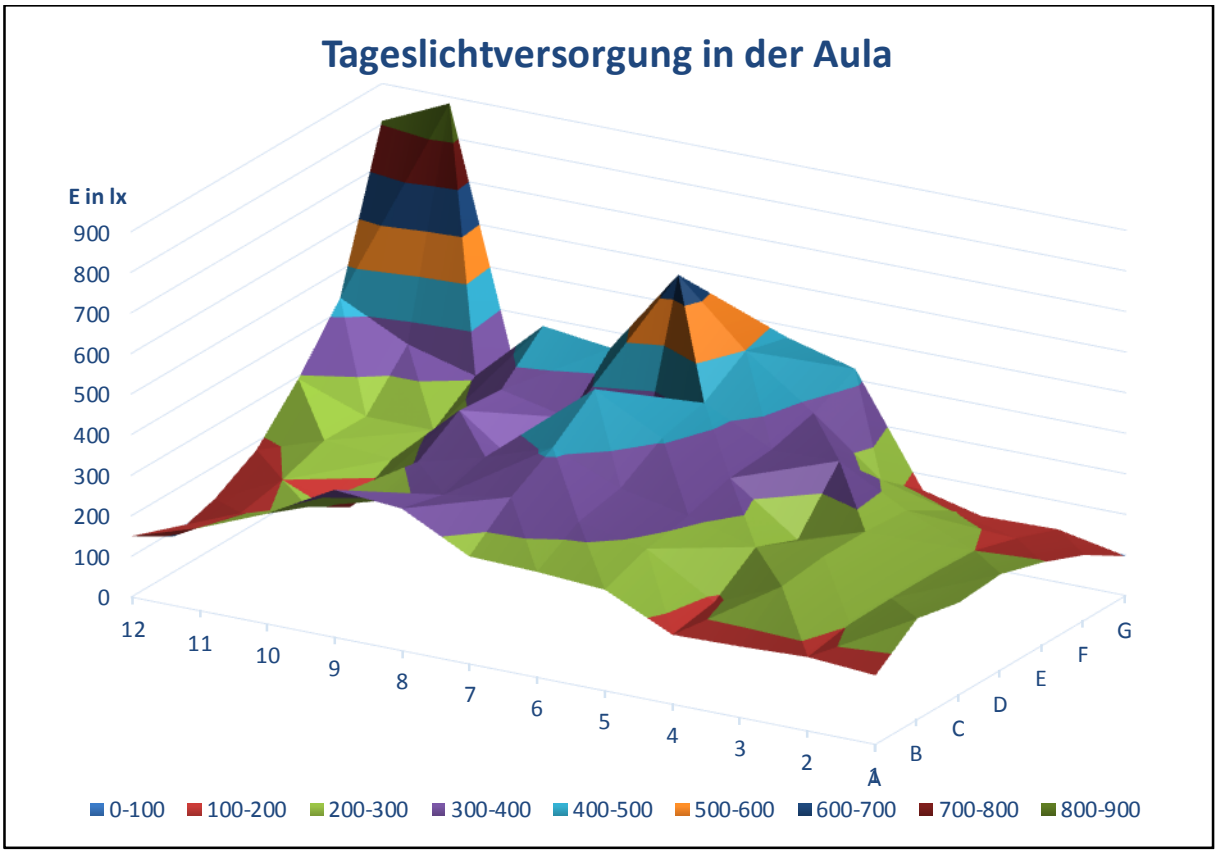

Abbildung 5-16: 3D-Diagramm Tageslichtverteilung Aula [3]

Die auffallend hohen Messwerte befinden sich unmittelbar in Fensternähe bzw. an der verglasten Außentür (ohne Verschattungsmöglichkeit). Abgesehen von diesen Beleuchtungsspitzen ist die Raummitte durch Tageslicht gut ausgeleuchtet. Die Ecken (rot dargestellt) sind nur unzureichend mit Tageslicht versorgt.

Um den Tageslichtquotienten zu berechnen, wurden gleichzeitig zu den Beleuchtungsstärken im Inneren auch die Werte im Außenbereich erfasst. Diese lagen zwischen 6650 und 9250 lx, was einem bewölkten Himmel entspricht. Die daraus errechneten Tageslichtquotienten sind Tabelle 5-3 zu entnehmen. Aus allen Tageslichtquotienten wird ein Mittelwert gebildet, welcher im Falle der Aula bei 3,65 % liegt. Der Raum wird somit an bewölkten Tagen mit einer Außenbeleuchtungsstärke von 10.000 lx im Mittel mit noch etwa 365 lx in Höhe der Nutzebene versorgt. Zum Vergleich: bei Sonnenschein werden außen bis zu 100.000 lx erreicht.

Tabelle 5-3: Tageslichtquotienten Aula [3]

Tageslichtquotient D			A	B	C	D	E	F	G
			0,8 m	2,4 m	4 m	5,6 m	7,2 m	8,8 m	10,4 m
	12	14,95 m	2,26%	1,31%	1,77%	2,63%	4,25%	6,17%	11,36%
	11	13,65 m	2,49%	2,27%	2,54%	3,01%	3,02%	4,58%	11,69%
	10	12,35 m	3,28%	2,71%	1,95%	2,58%	2,68%	3,50%	2,76%
	9	11,05 m	4,04%	3,06%	3,46%	4,21%	4,11%	5,20%	3,11%
	8	9,75 m	3,90%	3,61%	3,96%	2,88%	3,77%	5,12%	3,34%
	7	8,45 m	3,36%	4,40%	5,12%	6,04%	2,38%	7,82%	3,55%
	6	7,15 m	3,35%	4,23%	4,56%	5,47%	5,85%	6,85%	6,51%
	5	5,85 m	3,51%	4,09%	4,39%	4,83%	4,94%	5,33%	5,98%
	4	4,55 m	2,39%	2,65%	3,67%	3,05%	4,82%	3,32%	2,15%
	3	3,25 m	2,12%	3,20%	3,37%	3,40%	3,30%	2,58%	1,54%
	2	1,95 m	2,17%	2,41%	2,42%	2,41%	2,33%	1,96%	1,50%
	1	0,65 m	1,84%	2,71%	2,49%	2,62%	2,28%	1,81%	1,09%

Die Ermittlung der durchschnittlichen Beleuchtungsstärke kann jedoch ebenfalls Auskunft darüber geben, ob ausreichend Tageslicht in den Raum gelangt. Im Falle der Aula lag die durchschnittliche Beleuchtungsstärke aller gemessenen Werte für den gesamten Raum bei Tageslicht bei 290 lx. Dieser Wert liegt über den in der ASR A3.4 geforderten 200 lx.

Eine Beurteilung der Gleichmäßigkeit wird für die Tageslichtversorgung von Räumen mit seitlichem Lichteinfall nicht vorgenommen, da keine Gleichmäßigkeit entstehen kann. Die Beleuchtungsstärke nimmt typischer Weise in Richtung der den Fenstern gegenüberliegenden Seite ab.

5.2.2 Klassenzimmer 1.08 (südorientiert)

Tabelle 5-4 zeigt die Messergebnisse für den Klassenraum mit einer Raumtiefe von 6,78 m, wobei Achse 5 an der Fensterfront liegt (Sturzhöhe 2,76 m) und Achse 1 an der Flurwand (Messraster siehe Abbildung 5-9, Seite 42). Die Punkte F1 bis H1 existieren aufgrund der Raumgeometrie nicht. Gelb hinterlegt sind die Werte im Bereich der Schülertische, orange im Bereich des Morgenkreises. Für den unmittelbaren Arbeitsbereich der Schüler (gelb) sieht die ASR 3.4 einen Mindestwert von 300 lx vor [2], welcher hier in 8 von 15 Punkten des Sitzbereiches (A4 bis E2) nicht erreicht wurde, wobei hauptsächlich die Schülertische in der Nähe der Flurwand betroffen sind. Die Werte fallen naturgemäß von der Fensterseite zur Flurseite ab.

Die Mittelwertberechnung der Beleuchtungsstärke ergibt für den gesamten Raum einen Wert von 363 lx, jedoch wird dieser durch die sehr hohen Werte an der Fensterfront beeinflusst. Die Berechnung des Mittelwerts für den Bereich der Schülertische (gelb) ergibt exakt 300 lx, wobei hier der Minimalwert bei 139 lx und der Maximalwert bei 575 lx liegen. Dies deutet darauf hin, dass die ausreichende Beleuchtung im Raum allein durch Tageslicht an bewölkten Tagen nur bedingt gegeben ist. In diesem Fall würde sich das Kunstlicht automatisch hinzuschalten.

Abbildung 5-17: Klassenraum 1.08, Unterrichtsbereich und Pinnwände als Raumteiler [3]

Tabelle 5-4: Beleuchtungsstärken Tageslichtmessung Klassenraum 1.08 [3]

Beleuchtungsstärke [lx] Innenraum			Breite 12,80m (4,10 + 0,2 + 8,5)							
			A	B	C	D	E	F	G	H
			0,8 m	2,4 m	4 m	5,6 m	7,2 m	8,8 m	10,4 m	12 m
Tiefe 5,70m/ 6,75m	5	6,15 m	95	871	786	612	826	186	1208	842
	4	4,70 m	213	506	414	575	493	432	391	261
	3	3,35 m	230	366	303	366	246	272	297	353
	2	2,00 m	155	139	142	162	187	216	206	317
	1	0,65 m	135	185	128	136	196			

In Abbildung 5-18 sind die Messergebnisse grafisch dargestellt. Bei den Spitzenwerten handelt es sich um den Bereich direkt an der Fensterfront. In dieser Achse weicht der Punkt F5 mit 186 lx von den benachbarten Punkten ab, da er durch ein raumteilendes Wandstück verschattet wird.

Die Punkte F1, G1 und H1 existieren in der Raumgeometrie nicht (siehe auch Tabelle 5-4, schwarze Zellen). Da EXCEL in der Tabelle für diese Punkte 0 lx annimmt, führt dies in der Darstellung fälschlicherweise zu einem Abfall der Werte. Dieser blau dargestellte Bereich kann vernachlässigt werden. Es ist zu vermuten, dass die Werte im Wandbereich des Raumes bei 100-200 Lux liegen.

Für die Ermittlung des Tageslichtquotienten waren auch hier die Außenbeleuchtungsstärken notwendig, um sie ins Verhältnis zu den im Innenraum aufgenommen Werten zu setzen. Sie schwankten zwischen 14280 und 14680 lx (leicht bewölkt). Hieraus errechneten sich die in Tabelle 5-5 aufgeführten Tageslichtquotienten.

Der mittlere Tageslichtquotient des Klassenraumes 1.08 ergibt sich zu 2,49 %. Der Raum wird somit an bewölkten Tagen mit einer Außenbeleuchtungsstärke von 10.000 lx im Mittel mit noch etwa 249 lx in Höhe der Nutzebene versorgt. Bei der Einstufung nach DIN 18599-4 (siehe Tabelle 5-1) handelt es sich somit um eine geringe Tageslichtversorgung. Die Nutzer empfinden die Tageslichtversorgung als ausreichend, siehe Nutzerbefragung in Kapitel 6.6.

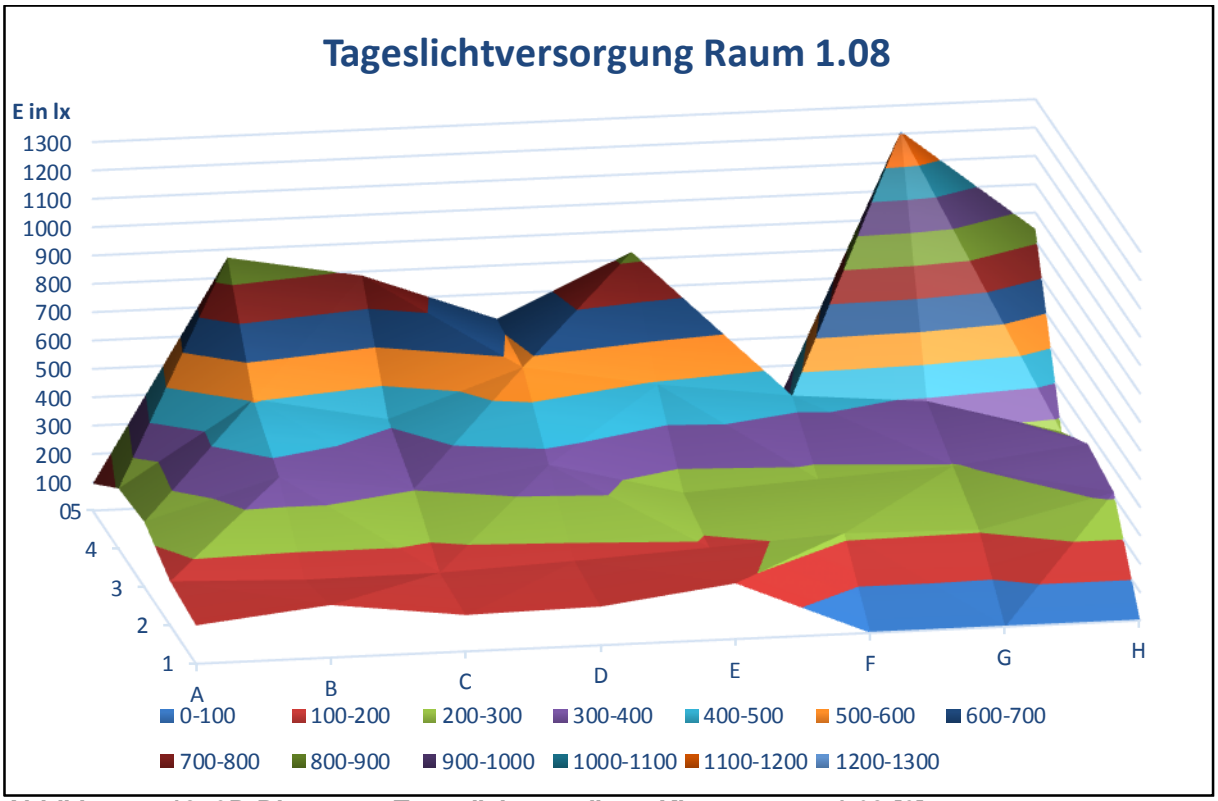

Abbildung 5-18: 3D-Diagramm Tageslichtverteilung Klassenraum 1.08 [3]

Tabelle 5-5: Tageslichtquotient Klassenraum 1.08 [3]

Tageslichtquotient D			Breite 12,80m (4,10 + 0,2 + 8,5)							
			A	B	C	D	E	F	G	H
			0,8 m	2,4 m	4 m	5,6 m	7,2 m	8,8 m	10,4 m	12 m
Tiefe 5,70m/ 6,75m	5	6,15 m	0,65%	5,99%	5,35%	4,17%	5,64%	1,27%	8,25%	5,76%
	4	4,70 m	1,47%	3,48%	2,82%	3,92%	3,37%	3,01%	2,72%	1,79%
	3	3,35 m	1,58%	2,51%	2,07%	2,49%	1,68%	1,90%	2,06%	2,42%
	2	2,00 m	1,06%	0,95%	0,97%	1,11%	1,28%	1,51%	1,42%	2,18%
	1	0,65 m	0,93%	1,27%	0,87%	0,93%	1,34%			

5.2.3 Klassenzimmer 2.01 (nordorientiert)

Die Messwerte zur Tageslichtversorgung in Raum 2.01 mit einer Raumtiefe von 6,78 m sind in Tabelle 5-6 dargestellt, wobei Achse 1 an der Fensterfront liegt und somit höhere Werte liefert (Messraster siehe Abbildung 5-11, Seite 43). Die Ergebnisse zeigen, dass allein mit dem Tageslicht keine gleichmäßige Beleuchtung zu erreichen ist. Für den unmittelbaren Arbeitsbereich der Schüler (gelb) werden an 11 von 15 Punkten des Sitzbereiches (Zellen A2 bis E4) die empfohlenen 300 lx nicht erreicht. Die mittlere Beleuchtungsstärke beträgt im gesamten Raum nur 251 lx bzw. im Unterrichtsbereich 228 lx (Sollwert 300 lx).

Tabelle 5-6: Beleuchtungsstärken Tageslichtmessung Klassenraum 2.01 [3]

Beleuchtungsstärke [lx] Innenraum			Breite 12,80m (4,10 + 0,2 + 8,5)							
			A	B	C	D	E	F	G	H
			12 m	10,4 m	8,6 m	7,2 m	5,6 m	4 m	2,4 m	0,8 m
Tiefe 5,70m/ 6,75m	1	0,65 m	297	351	275	446	203	174	597	697
	2	2,00 m	394	346	186	253	186	230	347	384
	3	3,35 m	312	187	245	312	232	208	275	224
	4	4,70 m	140	197	130	132	174	168	187	140
	5	6,15 m	133	137	124	108	172			

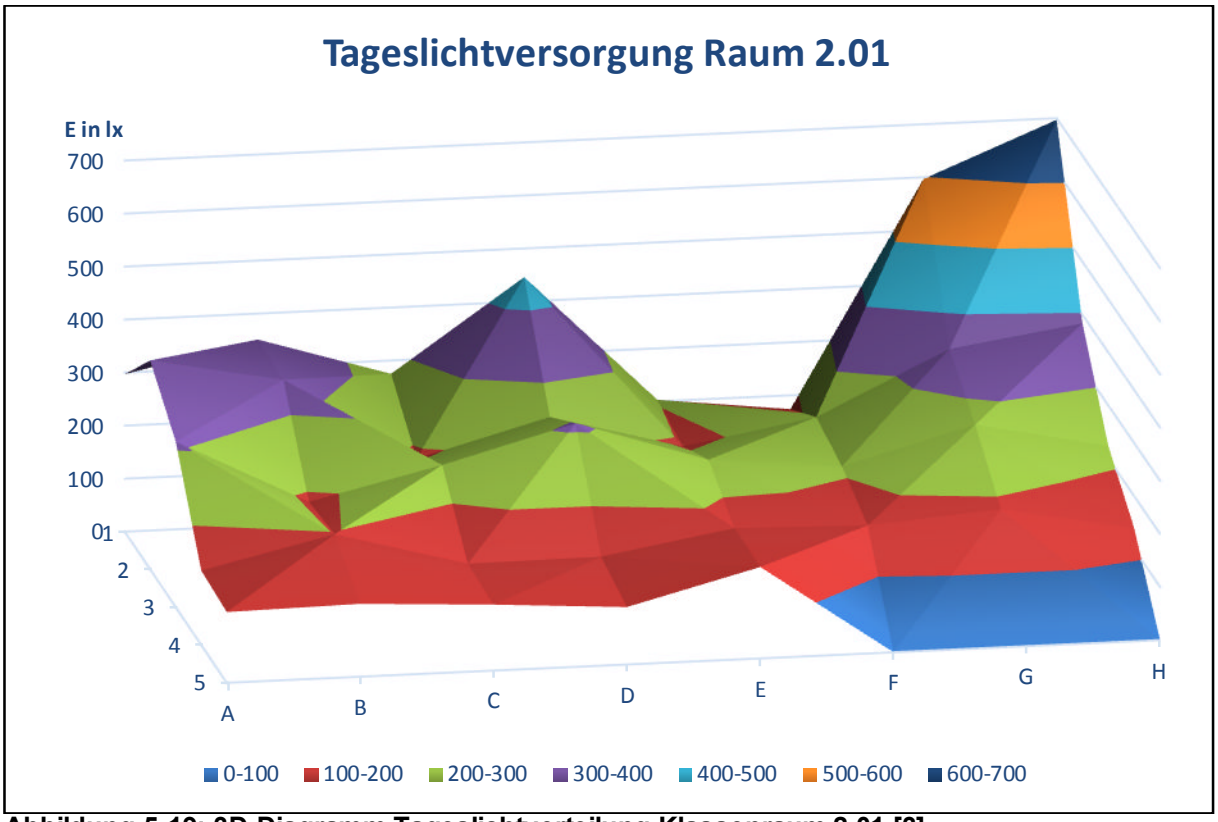

Abbildung 5-19: 3D-Diagramm Tageslichtverteilung Klassenraum 2.01 [3]

Abbildung 5-19 stellt die Verteilung grafisch dar und zeigt auch hier die Spitzenwerte in Achse 1 sowie den EXCEL-bedingten starken Abfall in den nicht existenten Punkten F5 bis H5.

Die für die Berechnung der Tageslichtquotienten notwendigen Außenbeleuchtungsstärken lagen zwischen 13830 und 16960 lx (leicht bewölkt). Hieraus wurden die Tageslichtquotienten in Tabelle 5-7 berechnet. Im Durchschnitt ergibt sich für den gesamten Raum ein Quotient von 1,60 %, was laut DIN 18599-4 in die Kategorie „keine Tageslichtversorgung“ fällt (Klassifizierung siehe Tabelle 5-1). Der Raum wird somit an bewölkten Tagen mit einer Außenbeleuchtungsstärke von 10.000 lx im Mittel mit noch etwa 160 lx in Höhe der Nutzebene versorgt. Dies bedeutet, dass es bei bedecktem Himmel unerlässlich ist das Kunstlicht zuzuschalten, um den Schülern ein angenehmes Lernumfeld zu schaffen.

Tabelle 5-7: Tageslichtquotient Klassenraum 2.01 [3]

Tageslichtquotient D			Breite 12,80m (4,10 + 0,2 + 8,5)							
			A	B	C	D	E	F	G	H
			12	10,4	8,6	7,2	5,6	4	2,4	0,8
Tiefe 5,70m/ 6,75m	1	0,65	2,10%	2,47%	1,78%	2,84%	1,26%	1,03%	3,57%	4,19%
	2	2	2,81%	2,41%	1,22%	1,60%	1,11%	1,36%	2,06%	2,32%
	3	3,35	2,24%	1,30%	1,62%	1,94%	1,39%	1,23%	1,63%	1,36%
	4	4,7	1,01%	1,35%	0,87%	0,81%	1,05%	0,99%	1,11%	0,86%
	5	6,15	0,96%	0,94%	0,83%	0,66%	1,05%			

5.2.4 Flur 1.OG

Im Flur erfolgte keine Tageslichtmessung, da keine direkten Fenster in diesem Bereich vorhanden sind und somit kein nennbares Tageslicht einfallen kann. Durch die Verglasung der Wände der Klassenzimmer, erfolgt ein geringer Tageslichteinfall.

5.2.5 WC Mädchen

Im WC Mädchen erfolgte keine Tageslichtmessung, da es sich um einen innenliegenden Raum handelt.

5.3 Auswertung Kunstlichtmessung

Zur Beurteilung der Messergebnisse werden im Folgenden die in den Arbeitsbereichen (in den Tabellen gelb markiert) und in den Umgebungsbereichen gemessenen Beleuchtungsstärken ausgewertet und mit den Sollwerten nach DIN 12464-1 und ASR A3.4 verglichen [4] [2]. Ein weiteres Bewertungskriterium stellt die Gleichmäßigkeit U_0 der Beleuchtungsstärke dar, welche als das Verhältnis der geringsten Beleuchtungsstärke E_{min} zur mittleren Beleuchtungsstärke $\bar{E}$ im Bewertungsbereich definiert ist. Je größer dieser Wert, desto besser ist die Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke auf einer Fläche. Ziel ist eine gleichmäßige Verteilung der Helligkeit, um eine visuelle Überlastung der Nutzer durch zu sehr schwankende Beleuchtungsstärken zu vermeiden.

5.3.1 Aula/Speisesaal

Der Raum wurde wie in Kapitel 5.1 beschrieben vorbereitet, das Licht ungedimmt eingeschaltet und die Messung durchgeführt (Messraster siehe Abbildung 5-4). Die Ergebnisse zeigt Tabelle 5-8, wobei Spalte G die Fensterfront darstellt. Die Zeilen 10 bis 12 befinden sich unter der Galerie, während die Zeilen 1 bis 9 im zweigeschossigen Bereich des Raumes liegen. Dies bedeutet, dass die Leuchten in den Zeilen 10 bis 12 niedriger montiert sind als in dem Bereich mit einer Deckenhöhe von über 6 Metern (siehe Foto in Abbildung 5-2).

Durch Abbildung 5-20 wird sichtbar, dass die Kunstlichtverteilung im Raum gleichmäßig ist. Eine Ausnahme bilden die Spitzenwerte an der verglasten Außentür, welche nicht verschattet werden kann (Punkt G12). Die Werte in Messreihe 10 bis 12 fallen höher aus, da zum einen der Lichteinfall durch die Außentür vorhanden ist und zum anderen die Leuchten über diesem Bereich in einer geringeren Höhe angebracht sind.

Tabelle 5-8: Beleuchtungsstärken Kunstlichtmessung Aula [3]

Beleuchtungsstärke [lx] Innenraum			**Tiefe 11,48 m**						
			A	B	C	D	E	F	G
			0,8 m	2,4 m	4 m	5,6 m	7,2 m	8,8 m	10,4 m
Breite 15,98 m	12	14,95 m	283	325	361	330	419	641	1640
	11	13,65 m	373	411	488	429	507	580	1017
	10	12,35 m	190	272	278	256	232	370	306
	9	11,05 m	165	186	212	256	218	211	149
	8	9,75 m	182	185	196	208	253	224	202
	7	8,45 m	180	195	216	228	237	238	206
	6	7,15 m	181	207	225	235	240	228	202
	5	5,85 m	175	203	217	224	232	228	208
	4	4,55 m	144	193	211	217	219	204	118
	3	3,25 m	135	186	199	201	199	174	102
	2	1,95 m	152	168	171	188	195	153	124
	1	0,65 m	64	134	145	154	151	126	98

Die Berechnung der Gleichmäßigkeit U_0 erfolgte in drei unterschiedlich zusammengefassten Bereichen, siehe Tabelle 5-9. Zum einen wurde der gesamte Raum betrachtet, wobei sich aufgrund des Tageslichteinflusses an der Außentür mit $U_0 = 0{,}25$ das erwartete Ergebnis einer schlechten Gleichmäßigkeit zeigt. Wird der gesamte Arbeitsbereich (Esstische) betrachtet, ergibt sich eine Gleichmäßigkeit der Beleuchtung von $U_0 = 0{,}63$, womit der Anforderungswert von 0,4 für Kantinen erfüllt ist. Lässt man für den Arbeitsbereich die stark tageslichtbeeinflusste Achse 11 unter der Galerie außer Betracht – hier findet im Mittagsbetrieb die Essenausgabe statt – ergibt sich eine Gleichmäßigkeit von 0,7.

Ebenfalls in der Tabelle dargestellt sind die durchschnittlichen Beleuchtungsstärken $\bar{E}$ [lx] in allen Bereichen. Hier wird deutlich, dass im Arbeitsbereich mit 244 lx eine zufriedenstellende Beleuchtungsstärke (Sollwert 200 lx) vorhanden ist.

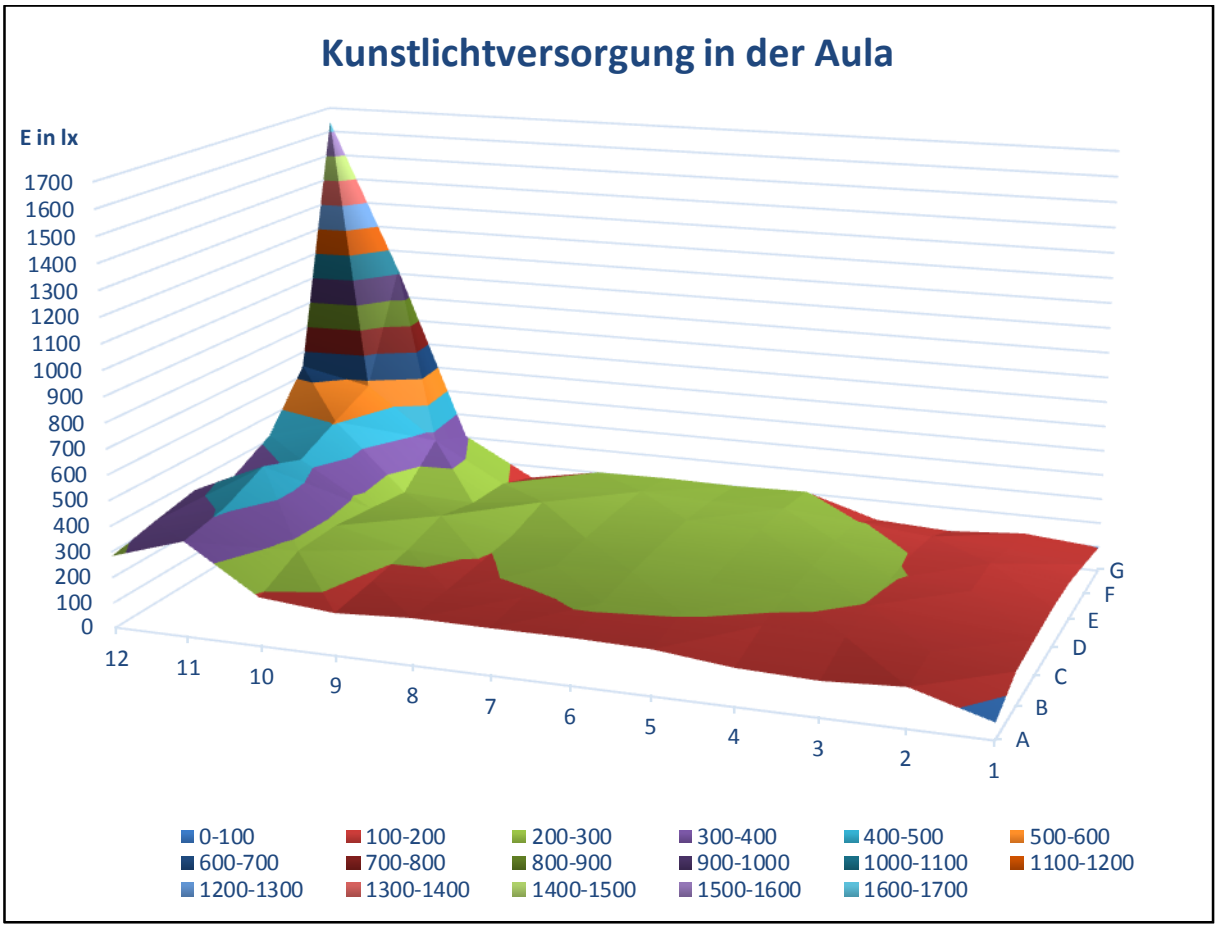

Abbildung 5-20: 3D-Diagramm Kunstlichtverteilung Aula [3]

Tabelle 5-9: Gleichmäßigkeit der Aula [3]

	Gesamter Raum	Arbeitsbereich	Arbeitsbereich ohne Reihe 11
$\bar{E}$ [lx]	257	244	217,5
E_{max} [lx]	1640	580	370
E_{min} [lx]	64	153	153
$U_0 = \frac{E_{min}}{\bar{E}}$	0,25	0,63	0,70

5.3.2 Klassenzimmer 1.08

Aufgrund der möglichen Lichtszenarien wurden im Klassenzimmer 1.08 drei verschiedene Kunstlichtmessungen vorgenommen. Bei allen Varianten wurde die silberne Seite der geschlossenen Jalousien nach innen gestellt, da dies den Raum besser abdunkelt.

5.3.3 Klassenzimmer 1.08 – Variante 1

Während der ersten Messung wurden über den Schülertischen sowohl die Arbeitsplatzbeleuchtung (direkt) als auch die Raumbeleuchtung (diffus) bei maximaler Leistung eingeschaltet, siehe Abbildung 3-8.

Des Weiteren waren die Beleuchtung der Computerarbeitsplätze sowie des Morgenkreises (Tecnolight) ungedimmt in Funktion.

Demnach waren alle verfügbaren Leuchten an.

In Tabelle 5-10 sind die Ergebnisse der ersten Kunstlichtmessung dargestellt und in Abbildung 5-21 als 3D-Oberflächendiagramm veranschaulicht. Reihe 5 befindet sich in Fensternähe, die Spalten F bis H befinden sich hinten am Morgenkreis.

Zu erkennen ist, dass die Beleuchtungsstärken im Bereich der Computerarbeitsplätze (F5 bis H5) deutlich höher sind als im Rest des Raumes. Dies wird einerseits durch die Messhöhe von 75 statt 65 cm beeinflusst. Darüber hinaus liegt hier die Beleuchtung direkt über den Messpunkten, was sich schwer vermeiden ließ. Weiterhin ist nicht auszuschließen, dass trotz der Jalousiestellung (geschlossen, silberne Seite innen) ein geringer Einfall von Tageslicht auf die Tische stattfindet. Hierauf haben auch die Lehrer im Rahmen der Nutzerbefragung hingewiesen.

Die Berechnung der durchschnittlichen Beleuchtungsstärke für die beiden Arbeitsbereiche (gelb bzw. orange markiert) ergibt Werte von 746 lx (Unterricht) bzw. 409 lx (Morgenkreis). Jedoch handelt es sich hierbei um eine manuell herbeigeführte Maximaleinstellung, die den Sollwert nach ASR A3.4 und den Planwert des Büros AIB von 300 lx bewusst übersteigt. Für die Schüler entstehen in dem Szenario keine Nachteile, da eine höhere Beleuchtungsstärke auch bedeutet, dass sie ihren Arbeitsplatz besser wahrnehmen können. Z. B. für Bastelarbeiten mag dieses Szenario sinnvoll sein. Energetisch ist diese Lichteinstellung ungünstig, da sie zu einem höheren Stromverbrauch führt – weshalb sie auch durch die Automatikregelung nicht vorgesehen ist, sondern manuell eingestellt werden muss.

Tabelle 5-10: Beleuchtungsstärken Kunstlichtmessung Klassenraum 1.08 – Variante 1 [3]

Beleuchtungsstärke [lx] Innenraum			**Breite 12,80m (4,10 + 0,2 + 8,5)**							
			A	B	C	D	E	F	G	H
			0,8 m	2,4 m	4 m	5,6 m	7,2 m	8,8 m	10,4 m	12 m
Tiefe 5,70m/ 6,75m	5	6,15 m	483	805	855	785	644	728	1095	968
	4	4,70 m	533	859	968	905	712	605	774	535
	3	3,35 m	511	740	852	818	629	460	455	311
	2	2,00 m	494	836	868	822	640	357	253	167
	1	0,65 m	344	558	544	473	413			

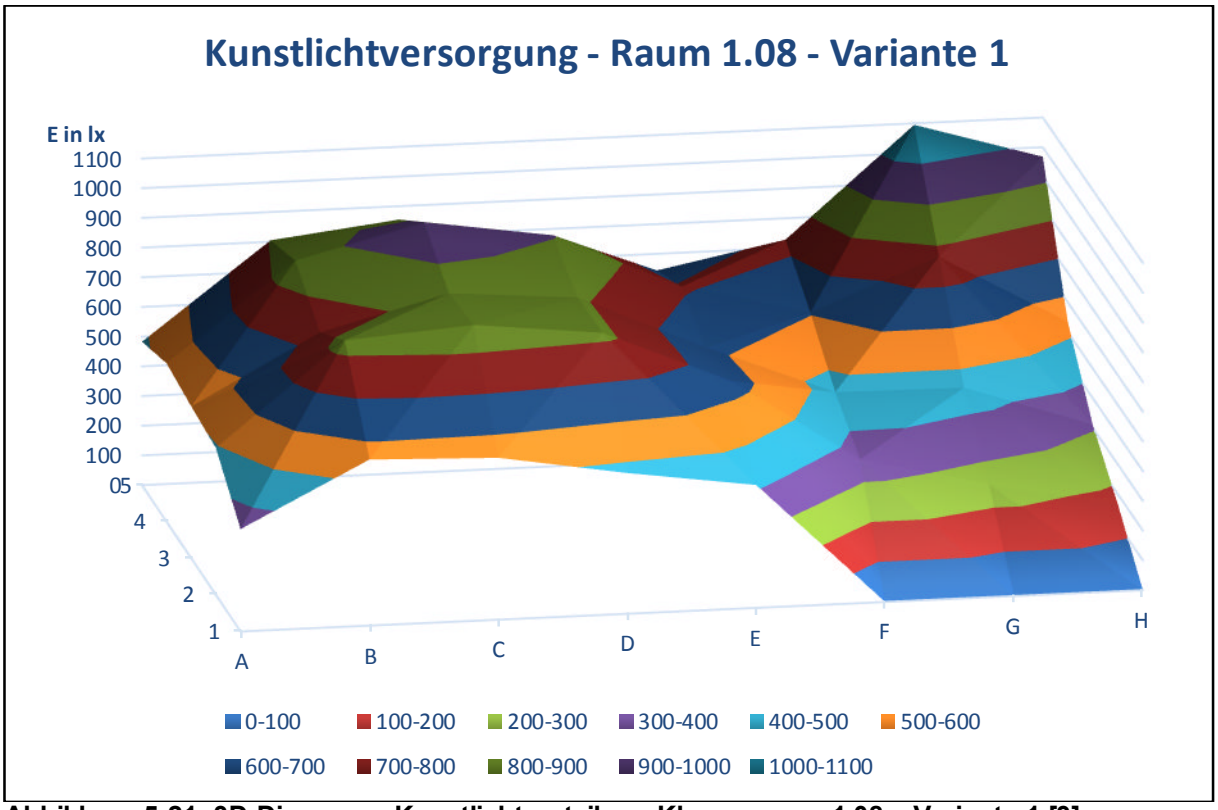

Abbildung 5-21: 3D-Diagramm Kunstlichtverteilung Klassenraum 1.08 – Variante 1 [3]

Die Gleichmäßigkeit der Beleuchtung sollte für Unterrichtsräume bei $U_0 \geq 0{,}6$ liegen. Betrachtet man den Unterrichtsbereich (gelb) und den Morgenkreis (orange) getrennt, so ist diese Anforderung für die unmittelbaren Arbeitsbereiche jeweils erfüllt. Bezieht man deren Umgebung mit ein, indem man den Raum in einen vorderen und einen hinteren Teil trennt (was in manchen Klassenräumen z. B. durch aufgestellte Pinnwände auch als Zweiteilung wahrnehmbar ist), so verringert sich die Gleichmäßigkeit für den vorderen Raum von 0,66 (nur Arbeitsbereich) auf 0,5 (mit Umgebung) und für den hinteren Raum von 0,76 auf 0,3. In dem Fall sind beide Werte zu gering. Verursacht wird dies durch geringe Beleuchtungsstärken in den Raumecken.

Tabelle 5-11: Gleichmäßigkeit Klassenraum 1.08 – Variante 1 [3]

	Raum gesamt	Raum vorn	Raum vorn nur Arbeitsbereich	Raum hinten	Raum hinten nur Arbeitsbereich
E_{max} [lx]	1095	968	968	1095	460
E_{min} [lx]	167	344	494	167	311
$\bar{E}$ [lx]	643	684	746	559	409
$U_0 = \frac{E_{min}}{\bar{E}}$	0,26	0,50	0,66	0,30	0,76

Auch bezogen auf den gesamten Raum ist die Gleichmäßigkeit mit 0,26 nicht ausreichend, jedoch ist anzumerken, dass die minimale Beleuchtungsstärke von 167 lx, durch welche dieses Verhältnis entsteht, sich in der hintersten Ecke des Raumes (Punkt H2) befindet und von den Nutzern kaum wahrgenommen werden dürfte. Sitzen die Schüler mit Blick nach vorn zur Tafel, so sollte dieser Unterschied keinen Einfluss auf das Wohlbefinden der Schüler ausüben.

5.3.4 Klassenzimmer 1.08 – Variante 2

Im Zuge der zweiten Messung wurde die Beleuchtung im Arbeitsbereich auf die direkte Arbeitsplatzbeleuchtung reduziert (mittlere Leuchtstoffröhre), die diffuse Raumbeleuchtung wurde ausgeschaltet. Die Beleuchtung der Computerarbeitsplätze sowie des Morgenkreises (Tecnolight) war – genau wie in Variante 1 – ungedimmt in Funktion.

Die Messergebnisse von Variante 2 sind in Tabelle 5-12 eingetragen und in Abbildung 5-22 grafisch dargestellt. Analog zu Variante 1 ist in der Raumecke (F5 bis H5) ebenfalls eine Messspitze zu verzeichnen, da die Randbedingungen (Computerarbeitsplätze mit voller Beleuchtung) nicht verändert wurden. Lediglich im Unterrichtsteil des Raumes wurde die Beleuchtungseinstellung geändert, was nun zu einer mittleren Beleuchtungsstärke von 444 lx im Bereich der Schultische führt (Sollwert 300 lx).

Tabelle 5-12: Beleuchtungsstärken Kunstlichtmessung Klassenraum 1.08 – Variante 2 [3]

Beleuchtungsstärke [lx] Innenraum			Breite 12,80m (4,10 + 0,2 + 8,5)							
			A	B	C	D	E	F	G	H
			0,8 m	2,4 m	4 m	5,6 m	7,2 m	8,8 m	10,4 m	12 m
Tiefe 5,70m/ 6,75m	5	6,15 m	227	427	451	391	319	694	1015	868
	4	4,70 m	239	411	444	421	328	478	679	471
	3	3,35 m	219	312	376	374	315	324	399	213
	2	2,00 m	220	357	386	363	287	208	186	120
	1	0,65 m	132	211	215	203	189			

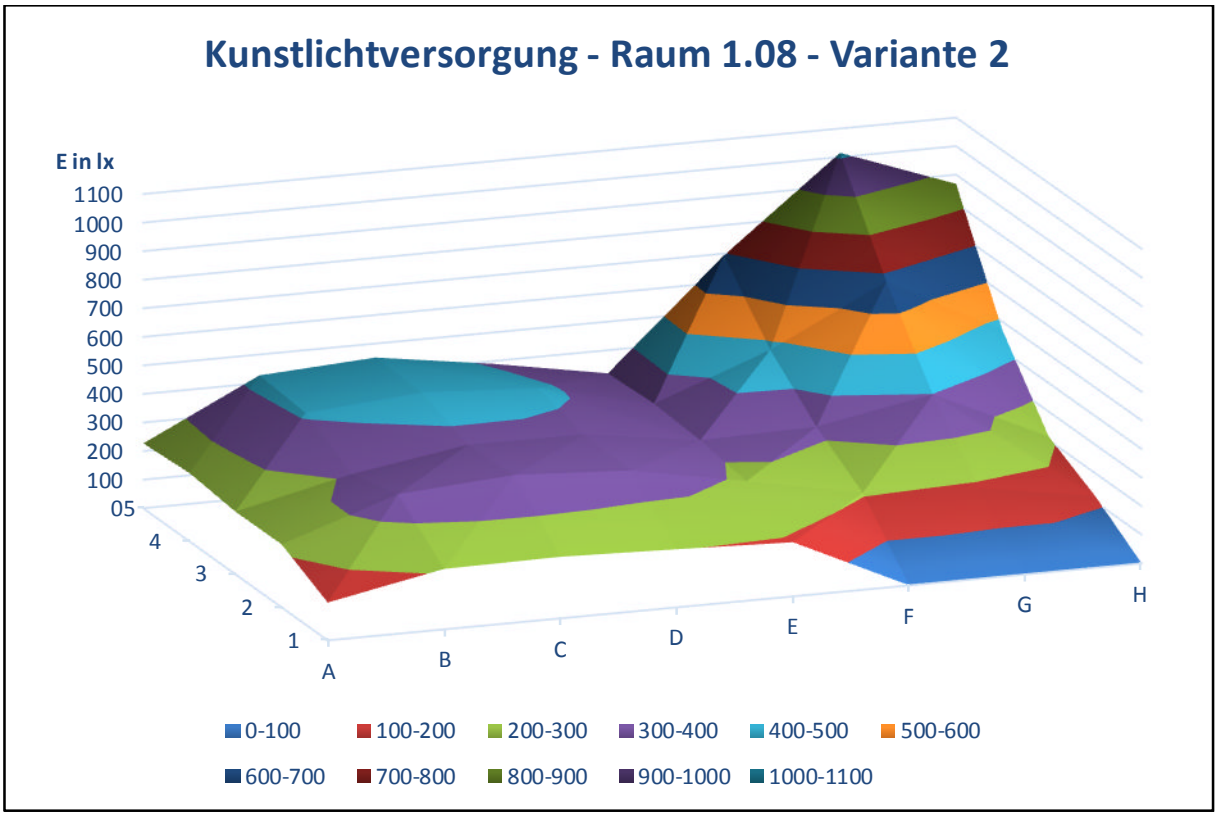

Abbildung 5-22: 3D-Diagramm Kunstlichtverteilung Klassenraum 1.08 – Variante 2 [3]

Tabelle 5-13: Gleichmäßigkeit Klassenraum 1.08 – Variante 2 [3]

	Raum gesamt	Raum vorn	Raum vorn nur Arbeitsbereich	Raum hinten	Raum hinten nur Arbeitsbereich
E_{max} [lx]	1015	451	444	1015	399
E_{min} [lx]	120	132	219	120	213
$\bar{E}$ [lx]	364	313	337	471	312
$U_0 = \frac{E_{min}}{\bar{E}}$	0,33	0,42	0,65	0,25	0,68

Bezogen auf die Arbeitsbereiche (gelb/orange) wird der Anforderungswert für die Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke von 0,6 jeweils erreicht. Bezieht man jedoch jeweils die Umgebungsbereiche im vorderen bzw. hinteren Raumabschnitt mit ein, so sind die Werte mit 0,42 bzw. 0,25 zu gering, da die Minimalwerte in den Raumecken das Ergebnis bestimmen.

Betrachtet man den gesamten Raum, liegt die Gleichmäßigkeit nur bei 0,33. Bei der mittleren Beleuchtungsstärke von 364 lx hätte der Minimalwert nicht kleiner als 219 lx sein dürfen (Ist-Wert E_{min} 120 lx in der hintersten Ecke des Morgenkreises, 132 lx vorn am Waschbecken).

Insgesamt ist dieses Szenario für die Ausleuchtung der Arbeitsplätze optimal.

5.3.5 Klassenzimmer 1.08 – Variante 3

Im Rahmen der dritten Messung wurde die diffuse Raumbeleuchtung aktiviert (die beiden äußeren Leuchtstoffröhren) und dafür die direkte Arbeitsplatzbeleuchtung ausgeschaltet. Die Lampen an den Computern wurden ausgeschaltet und über dem Morgenkreis auf etwa 50 % gedimmt.

Mithilfe der Leuchte Valuco Active ist es möglich, einen diffusen Taghimmel zu simulieren. Dazu sind die beiden äußeren Leuchtstoffröhren aktiv und senden gleichzeitig einen geringen Blaulichtanteil aus. Damit soll die Konzentration und Aufmerksamkeit der Schüler gesteigert werden.

Bei der Messung dieser Lichtvariante ergaben sich die in Tabelle 5-14 aufgeführten Werte, die in Abbildung 5-23 in einem 3D-Diagramm dargestellt sind. In der Grafik ist der bewusst eingestellte Unterschied zwischen Unterrichtsbereich und Morgenkreis deutlich zu erkennen.

Tabelle 5-14: Beleuchtungsstärken Kunstlichtmessung Klassenraum 1.08 – Variante 3 [3]

Beleuchtungsstärke [lx] Innenraum			**Breite 12,80m (4,10 + 0,2 + 8,5)**							
			A	B	C	D	E	F	G	H
			0,8 m	2,4 m	4 m	5,6 m	7,2 m	8,8 m	10,4 m	12 m
Tiefe 5,70m/ 6,75m	5	6,15 m	319	553	577	505	417	108	218	171
	4	4,70 m	365	566	612	569	432	218	188	111
	3	3,35 m	341	459	531	498	374	216	142	99
	2	2,00 m	332	498	550	492	373	204	103	77
	1	0,65 m	244	332	340	297	253			

In Tabelle 5-15 sind die Ergebnisse der einzelnen Teilbereiche zusammengefasst. Die Ungleichheit der Beleuchtungsstärkeniveaus wird deutlich, sowie man den gesamten Raum zusammengefasst betrachtet. Bedingt durch den vergleichsweise dunklen Morgenkreisbereich ergibt sich dann eine Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke von nur 0,22.

Während im Unterrichtsbereich eine mittlere Beleuchtungsstärke von 466 lx gemessen wurde, liegt dieser Wert im Morgenkreis auf Grund der Dimmung bei nur 152 lx. Die Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke ist bei einer Einzelbetrachtung der Arbeitsbereiche vorn mit 0,71 bzw. hinten mit 0,65 gegeben. Unter Einbezug der unmittelbaren Umgebung hingegen sinken die Werte auf 0,56 (vorn) bzw. 0,5 (hinten).

In der Praxis ist zu vermuten, dass dieser Unterschied kaum wahrgenommen wird, da manche Klassenräume bewusst z. B. durch das Aufstellen von Pinnwänden zweigeteilt genutzt werden.

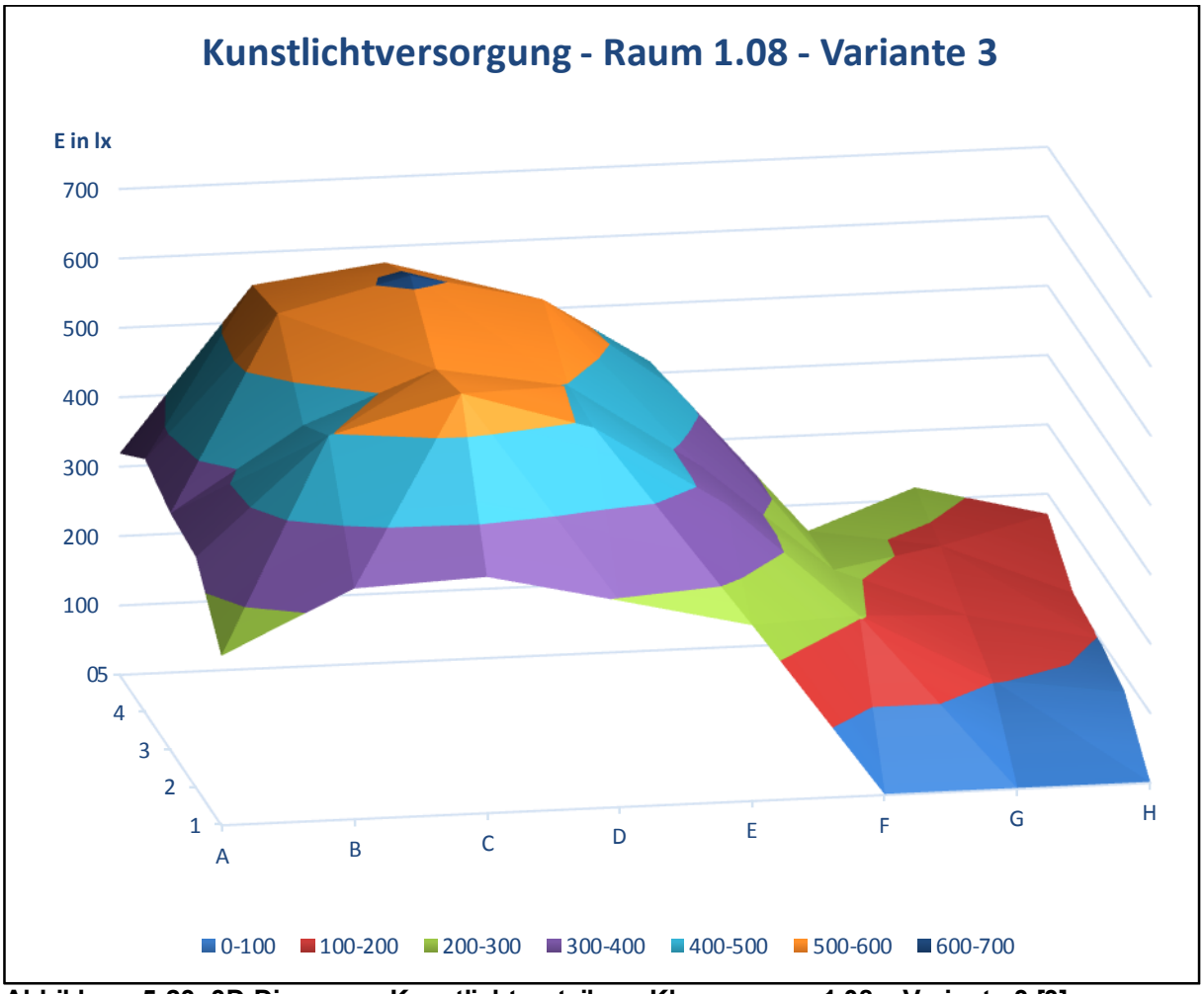

Abbildung 5-23: 3D-Diagramm Kunstlichtverteilung Klassenraum 1.08 – Variante 3 [3]

Tabelle 5-15: Gleichmäßigkeit Klassenraum 1.08 – Variante 3 [3]

	Raum gesamt	Raum vorn	Raum vorn nur Arbeitsbereich	Raum hinten	Raum hinten nur Arbeitsbereich
E_{max} [lx]	612	612	612	218	216
E_{min} [lx]	77	244	332	77	99
$\bar{E}$ [lx]	343	433	466	155	152
$U_0 = \frac{E_{min}}{\bar{E}}$	0,22	0,56	0,71	0,50	0,65

5.3.6 Klassenzimmer 2.01 – Varianten 4 und 5

Ziel der Messungen in Raum 2.01 war es, herauszufinden, ob die Einstellung der Jalousie eine Auswirkung auf die Beleuchtungsstärken hat. Es wurde die These aufgestellt, dass trotz gleicher Beleuchtung mit denselben Lichteinstellungen bei der Variante 4 mit silberner Seite nach innen höhere Beleuchtungsstärken zu messen sind, als mit der schwarzen Seite der Jalousie nach innen gerichtet (Variante 5).

Die Beleuchtung wurde in beiden Fällen vollständig angestellt, das heißt, es sind alle Leuchtstoffröhren der Valuco Active in Betrieb, die Beleuchtung über dem Morgenkreis ist ungedimmt und die Beleuchtung über den Computerarbeitsplätzen ist angestellt (wie in Klassenraum 1.08 Variante 1).

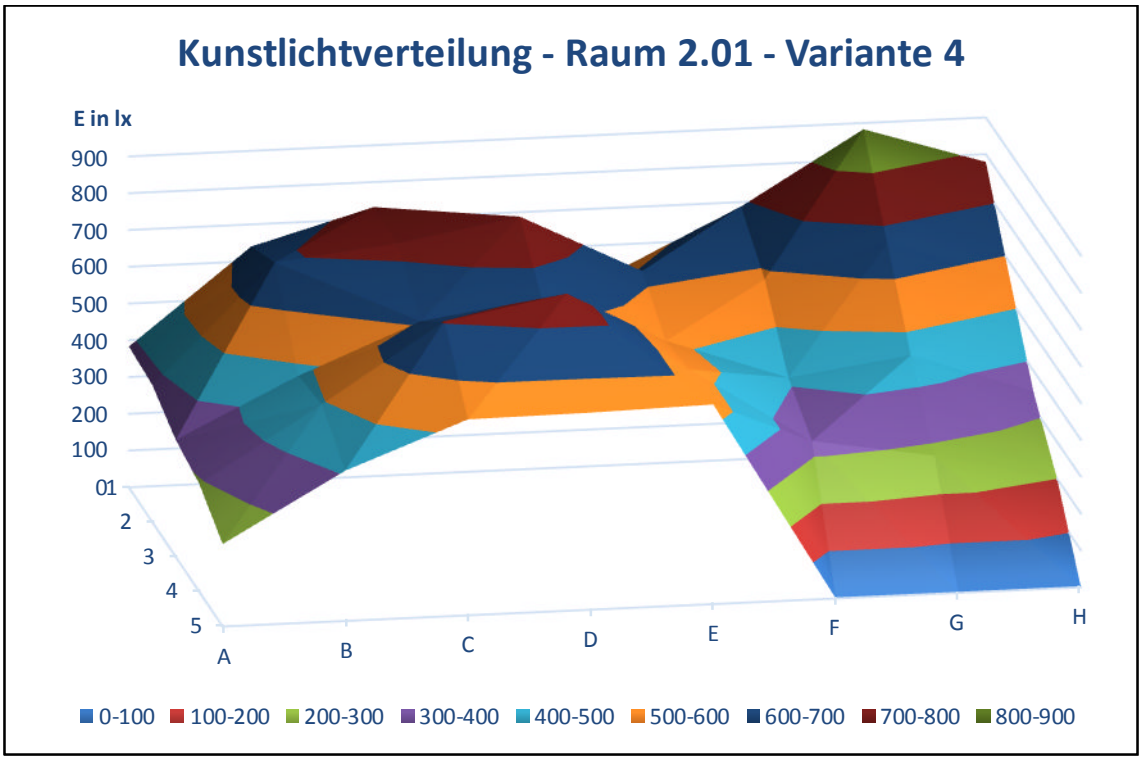

Abbildung 5-24: 3D-Diagramm Kunstlichtverteilung Klassenraum 2.01 – Variante 4 (silber-reflektierende Lamellen innen) [3]

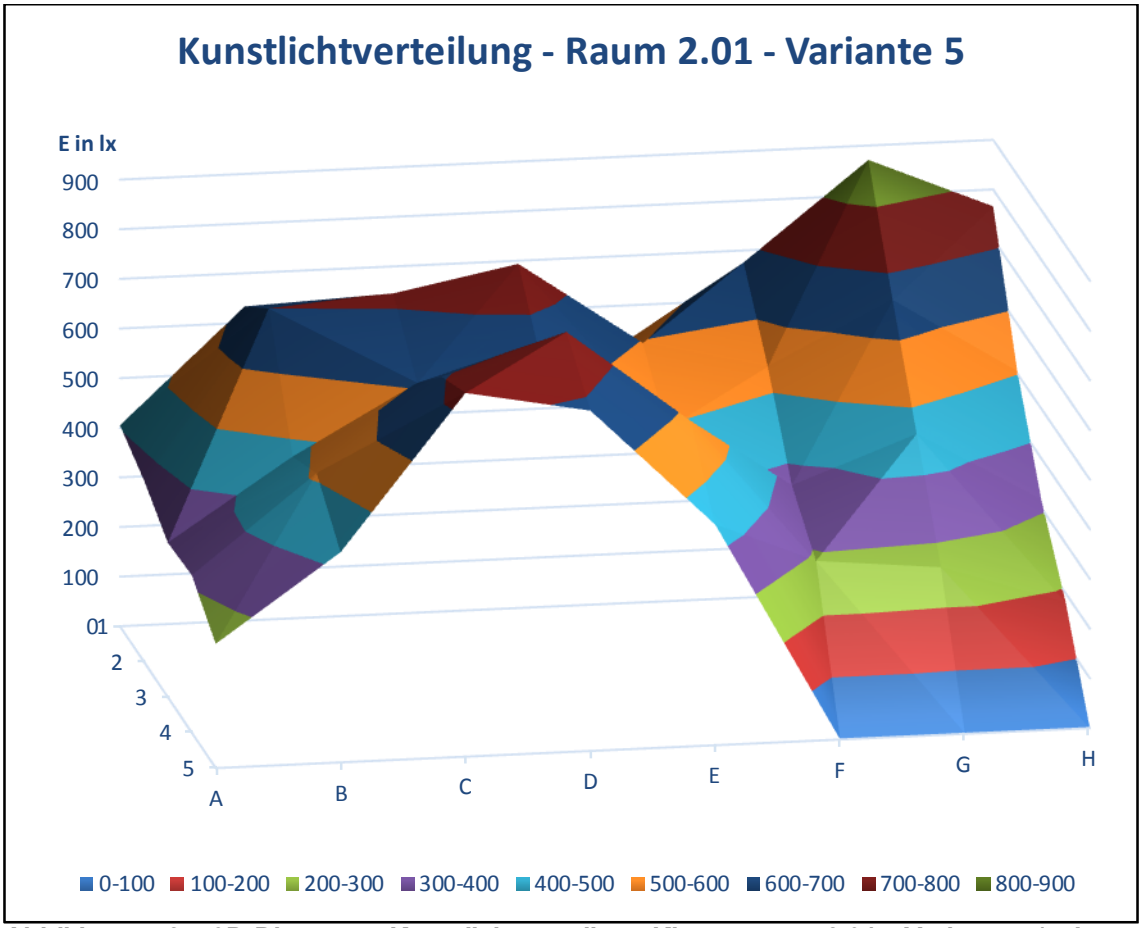

Abbildung 5-25: 3D-Diagramm Kunstlichtverteilung Klassenraum 2.01 – Variante 5 (schwarze Lamellen innen) [3]

In beiden Diagrammen wird sichtbar, dass es nur einen Spitzenwert gibt. Dabei handelt es sich, wie bei den untersuchten Varianten im Raum 1.08, um einen Messpunkt an den Computerarbeitsplätzen. Im Unterrichtsbereich ist erkennbar, an welchen Stellen im Raum die Leuchten angebracht sind, denn in der Mitte des Tischbereiches fallen die Messwerte ab (Foto Abbildung 5-7).

Abbildung 5-26: Klassenraum 2.01, Blick vom Morgenkreis Richtung Unterrichtsbereich

Bedingt durch den anderen Leuchtentyp und die andere Nutzungsart fallen die Messwerte im Morgenkreisbereich geringer aus. Hier kommt eine diffuse Beleuchtung zum Einsatz.

Die Beleuchtungsstärken der Kunstlichtmessung sind in Tabelle 5-16 und Tabelle 5-17 für beide Varianten vergleichbar dargestellt. Es bestätigt sich die These, dass die Werte mit der schwarzen Lamelle raumseits etwas geringere Beleuchtungsstärken ergeben. Es handelt sich aber nur um wenige Lux.

Tabelle 5-16: Beleuchtungsstärken Kunstlichtmessung Klassenraum 2.01 – Variante 4 (silberreflektierende Lamellen innen) [3]

Beleuchtungsstärke [lx] Innenraum			**Breite 12,80m (4,10 + 0,2 + 8,5)**							
			A	B	C	D	E	F	G	H
			12 m	10,4 m	8,6 m	7,2 m	5,6 m	4 m	2,4 m	0,8 m
Tiefe 5,70m/ 6,75m	1	6,15 m	383	640	732	689	531	688	883	779
	2	4,70 m	373	691	727	785	622	584	668	560
	3	3,35 m	318	477	610	639	526	411	457	344
	4	2,00 m	293	494	704	764	542	333	278	200
	5	0,65 m	224	408	532	535	542			

Tabelle 5-17: Beleuchtungsstärken Kunstlichtmessung Klassenraum 2.01 – Variante 5 (schwarze Lamellen innen) [3]

Beleuchtungsstärke [lx] Innenraum			**Breite 12,80m (4,10 + 0,2 + 8,5)**							
			A	B	C	D	E	F	G	H
			12 m	10,4 m	8,6 m	7,2 m	5,6 m	4 m	2,4 m	0,8 m
Tiefe 5,70m/ 6,75m	1	6,15 m	405	633	470	545	519	676	871	766
	2	4,70 m	366	700	719	767	596	537	660	505
	3	3,35 m	311	473	610	633	495	369	461	316
	4	2,00 m	317	511	693	772	581	288	264	182
	5	0,65 m	250	423	732	685	444			

In Tabelle 5-18 und Tabelle 5-19 lassen sich die Mittelwerte und die Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke ablesen. Im Unterrichtsbereich waren im Mittel 571 bzw. 570 lx gegeben. Im Morgenkreisbereich war die Abweichung mit 404 lx bzw. 382 lx etwas höher.

Tabelle 5-18: Gleichmäßigkeit Klassenraum 2.01 – Variante 4 (silber-reflektierende Lamellen innen) [3]

	Raum gesamt	Raum vorn	Raum vorn nur Arbeitsbereich	Raum hinten	Raum hinten nur Arbeitsbereich
E_{max} [lx]	883	785	785	883	457
E_{min} [lx]	200	224	293	200	344
$\bar{E}$ [lx]	540	551	571	515	404
$U_0 = \frac{E_{min}}{\bar{E}}$	0,37	0,41	0,51	0,39	0,85

Tabelle 5-19: Gleichmäßigkeit Klassenraum 2.01 – Variante 5 (schwarze Lamellen innen) [3]

	Raum gesamt	Raum vorn	Raum vorn nur Arbeitsbereich	Raum hinten	Raum hinten nur Arbeitsbereich
E_{max} [lx]	871	772	772	871	461
E_{min} [lx]	182	250	311	182	316
$\bar{E}$ [lx]	528	546	570	491	382
$U_0 = \frac{E_{min}}{\bar{E}}$	0,34	0,46	0,55	0,37	0,83

5.3.7 Flur 1.OG

Die Beleuchtung im Flur ist über drei Sensoren präsenzgesteuert. Es gibt keine Lichtschalter und eine Dimmung ist nicht möglich. Um die Kunstlichtmessung durchzuführen, musste stets darauf geachtet werden, dass das Licht angeschaltet war.

Zu beachten ist, dass im Aufenthaltsbereich des Flures über raumhohe Festverglasungen ein Sichtkontakt zu den Klassenräumen vorhanden ist. Die Beleuchtung der Klassenräume war ausgeschaltet.

Abbildung 5-27: Flur im 1. OG, rechts: Festverglasungen

Die erfassten Messwerte sind in der nachfolgenden Tabelle 5-20 aufgeführt und in Abbildung 5-28 grafisch im 3D-Oberflächendiagramm dargestellt. Die geschwärzten Zellen liegen nicht im Flächenbereich des Flures und werden von EXCEL als „0“ behandelt, was bei der Diagrammdarstellung zu einem scheinbaren Abfall der Werte auf 0 lx im Randbereich führt, welcher in der Realität nicht auftritt. Bei den beiden Spitzenwerten handelt es sich um Messpunkte, die sich direkt unter einer Leuchte befinden.

In Fluren sind im Allgemeinen keine ständigen, wichtigen Sehaufgaben zu erfüllen, daher ist in der ASR A3.4 lediglich eine Mindestbeleuchtungsstärke von 50 lx gefordert. Diese werden hier deutlich erreicht.

In der Praxis wird der Flur der St. Franziskus-Grundschule auch im Unterricht genutzt, wenn Schüler sich in Stillarbeit auch einen alternativen Platz suchen dürfen. Hierfür wählen einige Kinder den Fußboden im erweiterten Flurbereich vor den Verglasungen (hier Achse 11 bis 8) zum Lesen, Schreiben oder Malen (Da im gesamten Haus Hausschuhe getragen werden, ist die Sauberkeit so hervorragend, dass die Fußböden sehr gern für Aktivitäten genutzt werden.). Die sehr guten Messergebnisse zeigen, dass der Flur in diesem Fall sogar die Anforderungen an diese Nutzungsart erfüllt, da alle Werte über 300 lx liegen.

Tabelle 5-20: Beleuchtungsstärken Kunstlichtmessung Flur [3]

Beleuchtungsstärke [lx] Innenraum			Tiefe				
			A	B	C	D	E
			0,45 m	1,45 m	2,45 m	3,45 m	4,45 m
Breite	12	22 m		286	294	278	
	11	20 m	330	409	569	407	378
	10	18 m	307	424	429	422	280
	9	16 m	473	625	480	425	357
	8	14 m	426	429	436	375	363
	7	12 m		318	321	311	
	6	10 m		214	270	202	
	5	8 m		311	345	307	
	4	6 m		177	228	153	
	3	4 m		297	290	286	
	2	2 m		270	302	260	
	1	0 m		312	350	285	

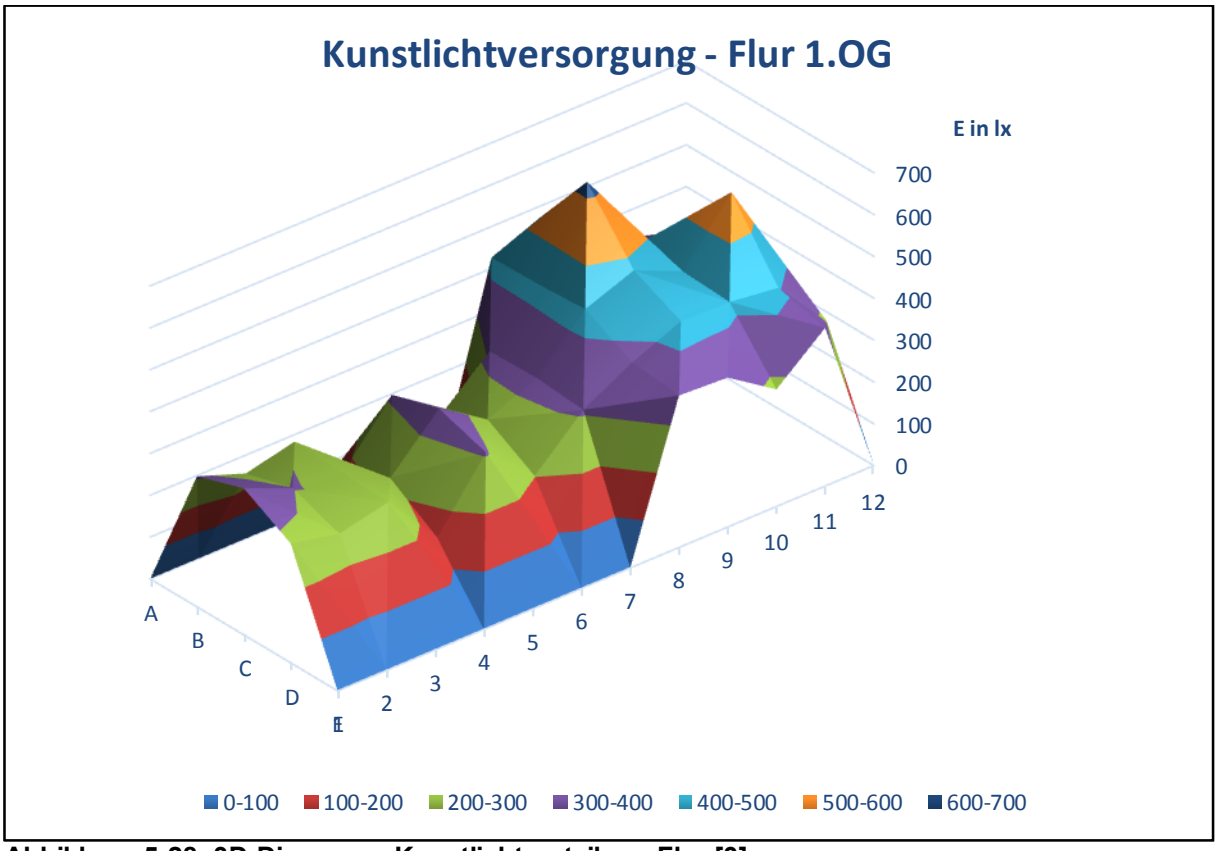

Abbildung 5-28: 3D-Diagramm Kunstlichtverteilung Flur [3]

Neben den Anforderungen in Aufenthaltsräumen sind in DIN EN 12464-1 ebenfalls Mindestwerte für die Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke in Fluren aufgeführt, welche mit 0,4 beziffert werden [4]. Eine Zusammenstellung der mittleren Beleuchtungsstärken und der Gleichmäßigkeit im Flur erfolgt in Tabelle 5-21. Die mittlere Beleuchtungsstärke beträgt im schmaleren Bereich 277 lx bzw. im erweiterten Flur vor den Verglasungen 400 lx (für den Gesamtflur i. M. 341 lx). Der Sollwert von 50 lx ist überall weit übererfüllt. Mit U_0 = 0,55 im schmaleren Gang bzw. 0,69 im erweiterten Flurbereich sind sehr gute Werte für die Gleichmäßigkeit gegeben.

Tabelle 5-21: Gleichmäßigkeit Flur [3]

	Gesamter Raum	schmalerer Flurbereich	breiter Flurbereich vor Verglasungen
E_{max} [lx]	625	350	625
E_{min} [lx]	153	153	278
$\bar{E}$ [lx]	341	277	400
U_0 [lx]	0,45	0,55	0,69

5.3.8 WC Mädchen

Die Beleuchtung im WC-Raum ist präsenzgesteuert, es gibt keine Lichtschalter.

Bei der Messung ergaben sich die nachfolgend in
Tabelle 5-22 erfassten Beleuchtungsstärken. Die hierbei schwarz markierten Felder sind Punkte, die aufgrund der Geometrie nicht innerhalb des Raumes liegen. Zur Erstellung des Diagramms werden sie mit 0 lx angesetzt.

Die geforderte Beleuchtungsstärke für Sanitärräume liegt laut ASR A3.4 bei 200 lx [2]. Wird aus allen gemessenen Werten ein Mittelwert gebildet, so ergibt sich eine mittlere Beleuchtungsstärke von 379 lx, welche weit über dem geforderten Minimum liegt. Betrachtet man den Vorraum (in Tabelle 5-22 in orange) und den WC-Bereich (gelb) separat, so ergeben sich sehr ähnliche mittlere Beleuchtungsstärken von 374 lx (Vorraum) bzw. 380 lx (WCs).

Der Sollwert von 200 lx wird lediglich in einer Kabine mit 194 lx leicht unterschritten.

Tabelle 5-22: Beleuchtungsstärken Kunstlichtmessung WC Mädchen [3]

Beleuchtungsstärke [lx] Innenraum			Tiefe			
			A	B	C	D
Breite	1			288	282	194
	2			405	536	292
	3				537	302
	4		366	391	469	281
	5		368	371	527	448

In Abbildung 5-29 sind die Werte grafisch dargestellt. Im Diagramm wird sichtbar, dass die Verteilung der Beleuchtungsstärke im Vorraum sehr gleichmäßig ist. Deutlich zu sehen ist auch, dass die Beleuchtung über Achse C angebracht ist (Spitzenwerte).

Die geforderte Gleichmäßigkeit der Beleuchtung von mindestens 0,4 wird in beiden Teilbereichen erfüllt und erreicht im Vorraum sogar einen Wert von 0,98, siehe Tabelle 5-23.

Die Befürchtungen aus der Simulation mit DIALux (Kapitel 2.2), die Waschtische seien nicht genügend ausgeleuchtet, haben sich für diesen Sanitärraum nicht bestätigt.

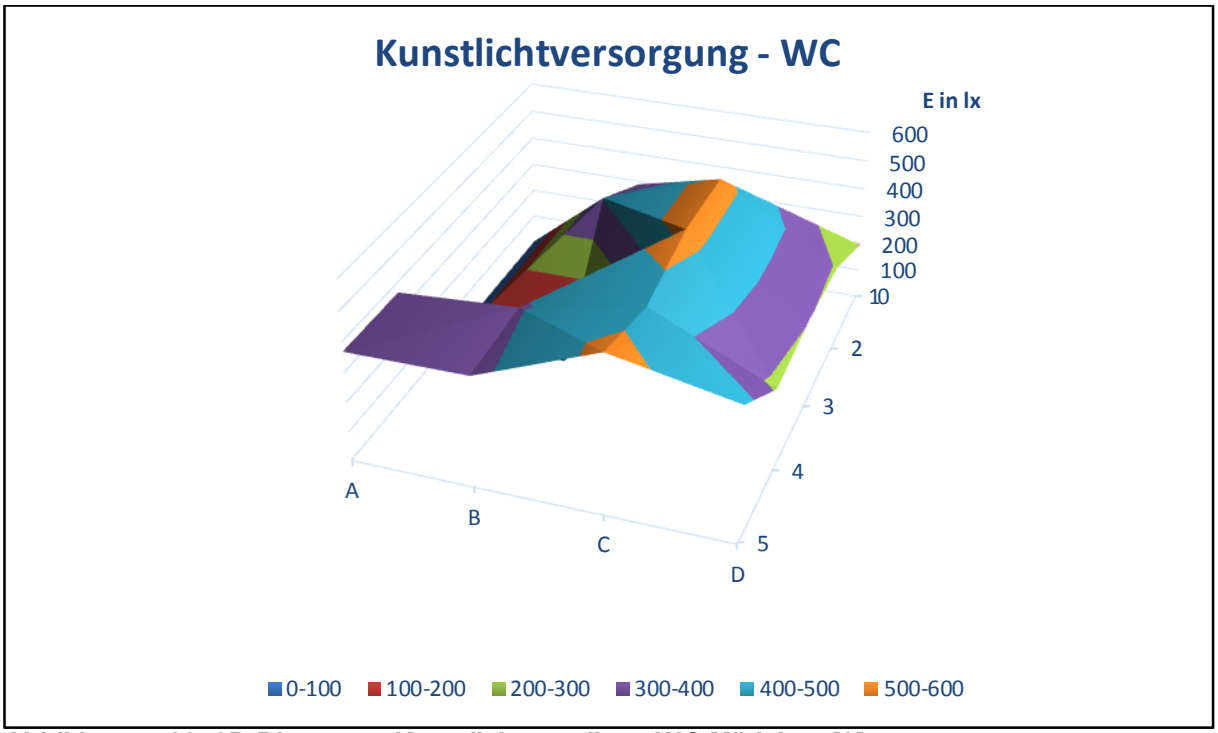

Abbildung 5-29: 3D-Diagramm Kunstlichtverteilung WC Mädchen [3]

Tabelle 5-23: Gleichmäßigkeit WC Mädchen [3]

	Gesamter Raum	WC- Bereich	Waschbereich
E_{max} [lx]	537	537	391
E_{min} [lx]	194	194	366
$\bar{E}$ [lx]	379	380	374
U_0 [lx]	0,51	0,51	0,98

5.4 Vergleich mit Planwerten

Die Übersicht in Tabelle 5-24 zeigt, dass die Tageslichtversorgung in der Aula und dem Klassenraum 1.08 zum Zeitpunkt der Messung die Sollwerte gut bzw. knapp erfüllt hat. Im nordorientierten Klassenraum 2.01 hingegen konnte dieses Ergebnis nicht erzielt werden.

Tabelle 5-24: Übersicht der Messergebnisse

Arbeitsbereich	Mittelwert Tageslicht [lx]	Tageslicht-quotient D	Mittelwert Kunstlicht [lx]	Sollwert [lx]
Aula/Speisesaal	303	3,65%	244	200
Klasse 1.08 Var.1 (max. Beleuchtung)	300	2,49%	746	300
Klasse 1.08 Var.2 (Arbeitsplatzbeleuchtung)	dto.	dto.	337	300
Klasse 1.08 Var.3 (diffuse Raumbeleuchtung)	dto.	dto.	466	300
Klasse 2.01 Var.4 (max. Beleuchtung, Jalousien silber)	228	1,60%	571	300
Klasse 2.01 Var.5 (max. Beleuchtung, Jalousien schwarz)	dto.	dto.	570	300
Flur 1. OG	kein Tageslicht	kein Tageslicht	341	50
WC Mädchen	kein Tageslicht	kein Tageslicht	379	200

Durch die künstliche Beleuchtung werden in allen Szenarien sämtliche Anforderungen erfüllt. In den Klassenräumen sorgt die manuelle Einstellung maximaler Leistungen für eine deutliche Überversorgung, jedoch sichert die automatische Lichtregelung konstante Beleuchtungsstärken auf einem energetisch sinnvollen Niveau.

Der gemessene Flur ist von der Ausstattung mit einem Klassenraum vergleichbar, was jedoch in Ordnung ist, da er tatsächlich gern als erweiterter Klassenraum genutzt wird und die eingesetzten LED eher sparsam sind.

Im WC Mädchen (EG) werden trotz sparsamer Leuchtmittel fast doppelt so hohe Beleuchtungsstärken erreicht.

5.5 Abgleich zur Simulation

In der folgenden Abbildung 5-30 wurden die bei der Kunstlichtmessung Variante 1 (alle Leuchten auf maximaler Leistung) aufgenommenen Beleuchtungsstärken in der Simulationsdarstellung aus DIALux verortet. Auch in der Simulation wurde mit dem Leistungsmaximum gearbeitet.

Im Bereich des Morgenkreises (links im Bild) passen die Messwerte gut zu den Simulationswerten. Unmittelbar unter der Morgenkreisleuchte ergab die Messung mit 455 lx einen geringeren Wert als in der Simulation (> 500 lx). Auffallend sind die starken Abweichungen an den PC-Arbeitsplätzen (unten links), die mit etwa 500 lx simuliert wurden, in der Messung jedoch 728 bis 1095 lx ergaben. Dies lässt darauf schließen, dass die Jalousien insbesondere an den Rändern, aber auch im Lamellenzwischenraum nicht zu 100% verdunkeln.

Betrachtet man den Unterrichtsbereich rechts im Bild zunächst innerhalb der 750 lx-Isophote, so bestätigt sich die Annahme, dass auch die Messwerte dort > 750 lx betragen. Eine Ausnahme bildet der Messpunkt im vorderen Zentrum mit 740 lx. Die Spitzenwerte liegen erwartungsgemäß in der Achse der Leuchten. Im Unterrichtsbereich weichen die Werte in Fensternähe nicht so stark ab wie an den PC-Tischen, das Maximum beträgt 855 lx, was zur Simulation passt. An der gegenüberliegenden Seite hingegen liegen die gemessenen Werte unter den Erwartungen. Die zwei Punkte, die exakt auf der 750 lx-Linie liegen, wurden mit nur 544 bzw. 558 lx messtechnisch erfasst.

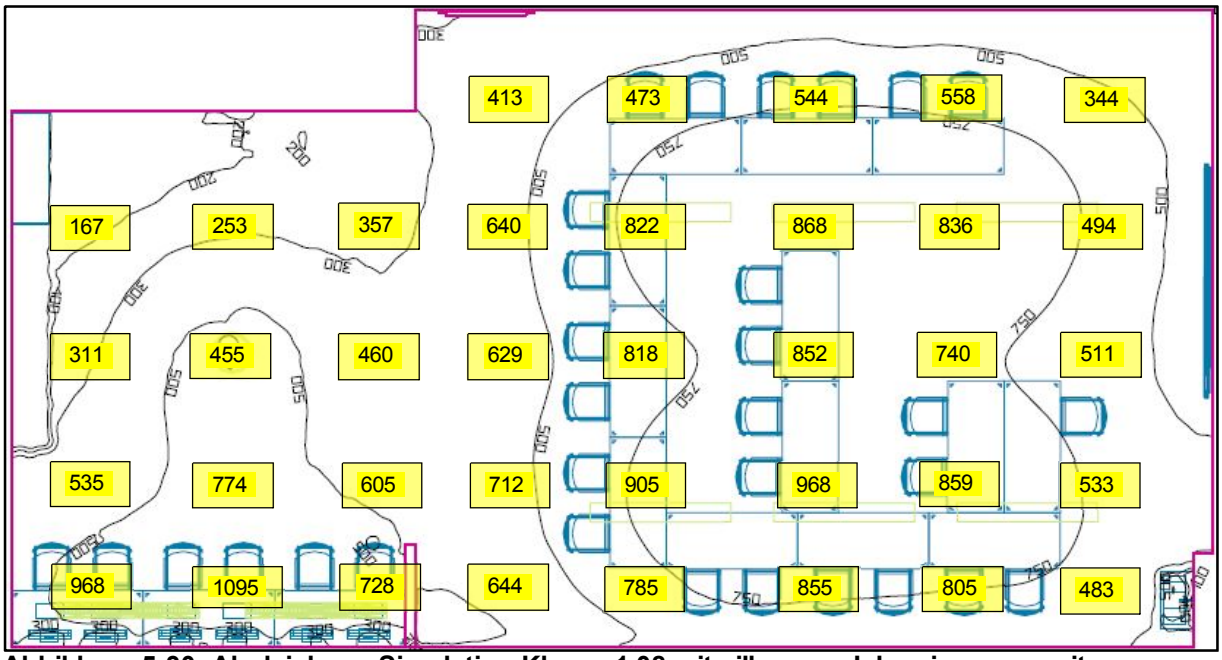

Abbildung 5-30: Abgleich zur Simulation Klasse 1.08 mit silbernen Jalousien raumseits

Der Minimalwert des vorderen Raumteils wurde mit 344 lx in Tafelblickrichtung vorn links gemessen, simuliert wurde er mit > 500 lx. Der Bereich vor der Tafel (Achse rechts im Bild) hat in der Kunstlichtmessung schwächer abgeschnitten als in der Simulation, was in der Praxis jedoch unkritisch ist, da im Bereich der elektronischen Tafel hohe Beleuchtungsstärken eher nachteilig sind.

Insgesamt hat die Kunstlichtmessung bis auf die beschriebenen punktuellen Ausnahmen die Simulationswerte gut bestätigt.

Bezüglich des Flures liegen die Messwerte aus der Kunstlichtmessung durchweg weit über den simulierten Werten (vgl. Simulation in Abbildung 2-8, Seite 19). Das simulierte Maximum wurde von DIALux mit 299 lx (Minimum 47 lx) angegeben.

Der erweiterte Flurbereich, der in Simulation von einer 200 lx-Isophote eingegrenzt wird, hat durch die Festverglasung eine indirekte Tageslichtversorgung aus den Klassenzimmern, die hier Einfluss auf die Messergebnisse hat. Tatsächlich gibt es Werte bis 625 lx

Im schmaleren Flurbereich gibt es punktuell unter den Leuchten 200 lx-Isolux-Linien in der Simulation, die Werte sollen zu den Wänden hin auf etwa 100 lx abfallen. Auch gemessen sind die Werte in der Mittelachse höher als am Rand, jedoch im Bereich von 270 bis 350 lx (Mittelachse) bzw. 177 bis 318 lx. An der Stirnseite des Flures befindet sich ein Brandschutzfenster, welches sich nicht verdunkeln lässt und die Messwerte beeinflusste (rechte Achse in Abbildung 5-31, erkennbar auch an der Spiegelung in Abbildung 5-32).

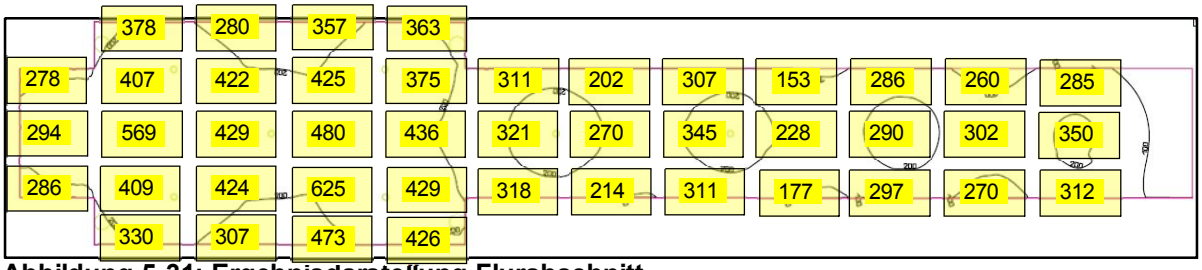

Abbildung 5-31: Ergebnisdarstellung Flurabschnitt

Abbildung 5-32: Kunstlichtmessung im Flur 1. OG

5.6 Verallgemeinerung und Fazit

Aula: Die Aula verfügt bereits über eine 6,15 m hohe Fensterfront, welche einen sehr guten Einfallswinkel für Tageslicht ermöglicht. Der Tageslichtquotient D von 3,65 % bedeutet, dass der Raum auch an bewölkten Tagen mit einer Außenbeleuchtungsstärke von 10.000 lx im Mittel mit noch etwa 365 lx in Höhe der Nutzebene versorgt wird (Sollwert 200 lx). Im Falle der untersuchten Kunstlichtvariante wurden mit einem Mittelwert von 257 lx sehr gute Ergebnisse erzielt. Sowohl die durchschnittliche Beleuchtungsstärke als auch die Gleichmäßigkeit sind zufriedenstellend.

Klassenraum 1.08: Die empfohlene Beleuchtungsstärke von 300 lx konnte bei der Tageslichtmessung im Arbeitsbereich im Mittel knapp, für einige Sitzplätze jedoch nicht erzielt werden, während eine Außenbeleuchtungsstärke von im Mittel etwa 14500 lx (leicht bewölkt) vorlag. Die Tische in der Nähe der Flurwand des 6,78 m tiefen Klassenraumes waren nicht ausreichend ausgeleuchtet. Die tageslichtgeführte Beleuchtungsregelung sorgt jedoch in diesem Fall im Automatikmodus für eine konstant ausreichende Beleuchtung der Arbeitsplätze. Während an bedeckten Tagen ein Stromverbrauch für Beleuchtung entsteht, führt an sonnigen Tagen die Blendung bzw. die Notwendigkeit des sommerlichen Wärmeschutzes zum Schließen der Jalousien, was ebenfalls ggf. das Einschalten der Beleuchtung nach sich zieht. Aus baulicher Sicht sind die Klassenräume bereits mit einem hohen Fensterflächenanteil von 17 % der Grundfläche ausgestattet. Die mögliche Sturzhöhe als maßgeblicher Faktor für den Einfallswinkel des Lichtes wurde mit 2,76 m ausgereizt.

Klassenraum 2.01: Zur Tageslichtversorgung kann festgehalten werden, dass diese im Raum 2.01 sowie höchstwahrscheinlich in allen nach Norden gelegenen Klassenräumen nicht ausreicht. Aus diesem Grund ist eine automatische Zuschaltung des Kunstlichts wahrscheinlicher als in den südlichen Klassenzimmern. Der Fensterflächenanteil ist jedoch auch hier bereits recht hoch, sodass baulich keine Verbesserungsvorschläge zu nennen sind. Der enorme Unterschied zwischen Nord- und Südklassenraum sollte als Anlass genommen werden, bei der Planung weiterer Schulen die Möglichkeit einer Ost-West-Ausrichtung zu prüfen.

Flure: Die Anforderungen an die Beleuchtungsstärke im Flurbereich sind mit einem Sollwert von 50 lx gering. Mit der installierten Beleuchtung werden diese so weit übererfüllt, dass der Fußboden im erweiterten Flurbereich mit einer mittleren Beleuchtungsstärke von 400 lx bei den Schülern für das stille Arbeiten sehr beliebt ist. Die eingesetzten Leuchtmittel besitzen mit 21 W eine recht geringe Leistung. Das Energieeinsparpotential ist daher vergleichsweise gering. Sehr positiv werden die großzügigen Verglasungen zu den Klassenräumen empfunden, wodurch die Flure zusätzliches Tageslicht erhalten.

WC Mädchen: Zwar ist die Beleuchtungsstärke im WC-Bereich mit einem Mittelwert von 380 lx annähernd doppelt so hoch wie notwendig, jedoch sind die installierten Deckeneinbauleuchten „Tecnolight DE 321“ mit 27 W starken Leuchtmitteln recht sparsam. Somit besteht zunächst kein Optimierungsbedarf. Im Falle des Leuchtenersatzes sollte über LED nachgedacht werden.

Fazit: Die Messung der Tages- und Kunstlichtversorgung in den Räumen 1.08, 2.01 sowie in der Aula, im Flur und einem Sanitärraum ergibt eine mehr als ausreichende Beleuchtungsstärke sowie eine gute Wirksamkeit der Verschattung.

6 Messergebnisse Funktion

In diesem Kapitel wird zunächst auf die Messtechnik und die Schwierigkeiten bei der Auswertung und dem Umgang mit Messfehlern eingegangen. Auf Basis korrigierter Messwerte erfolgt dann eine Auswertung typischer Tages-, Wochen- und Jahresverläufe. Die Auswertung der Energieverbräuche wird in Kapitel 8 vorgenommen.

Die Ergebnisse der Nutzerbefragungen werden detailliert vorgestellt und Verbesserungsvorschläge zu den genannten Kritikpunkten angebracht.

6.1 Messorte und Messtechnik

Für die Innenbeleuchtung wurden drei Messgeräte zur Erfassung der Stromstärke installiert (Tabelle 6-1). Die Umrechnung in die Leistung erfolgte über virtuelle Messpunkte von GEDES. Im Klassenraum 1.08 wurde die gesamte Beleuchtung erfasst, während im Klassenraum 2.01 die Phase im Bereich des Morgenkreises separat gemessen wurde. Ziel der Messungen ist die Erfassung der Lastgänge in den Klassenräumen. Die Verbrauchsauswertung findet in Kapitel 8 statt.

Tabelle 6-1: Messpunkte bezüglich Innenbeleuchtung

Kürzel	Einheit	Gruppe	Untergruppe	Beschreibung
DF0118-52A0-0	A	STR	BEL	Beleuchtung_Klasse_108
DF0118-52A0-5	kW	STR	BEL	Leistung_Beleuchtung_Klasse_108
DF0118-55A0-0	A	STR	BEL	Stromverbrauch_Beleuchtung_Klasse_201_Klasse
DF0118-55A0-5	kW	STR	BEL	Leistung_Beleuchtung_Klasse_201_Phase_L1
DF0118-55A2-0	A	STR	BEL	Stromverbrauch_Beleuchtung_Klasse_201_Morgenkranz_Arbeitsplatz
DF0118-55A2-5	kW	STR	BEL	Leistung_Beleuchtung_Klasse_201_Phase_L2
DF0384-7001-0	W/m²	WET	WET	Globalstrahlung_der_Wetterstation

Bei der Auswertung der Daten zeigten sich erhebliche Unstimmigkeiten bei den Messwerten. Im ausgeschalteten Zustand der Beleuchtung wurde eine Dauerleistung von ca. 100 W erfasst, welche nicht logisch erklärt werden konnte. Zunächst wurden Stillstandsverluste durch Vorschaltgeräte, Präsenzmelder u. ä. vermutet.

Durch eine professionelle Messung mit Hilfe des ausführenden Elektrofachbetriebes konnte am 5.5.2017 der Messfehler identifiziert werden. Hierzu wurden Messungen in allen vier Betriebszuständen vorgenommen: alle Lampen an, Raumbeleuchtung an (2/3), Arbeitsplatzbeleuchtung an (1/3), alle Lampen aus. Gemessen wurden dabei Wirkleistung P (gegenüber dem Versorger relevant) und Scheinleistung S. Es zeigte sich, dass neben der Wirkleistung in jedem Betriebszustand noch eine zusätzliche Blindleistung auftritt, siehe Abbildung 6-1. Daher ist die Scheinleistung (Summe der beiden) jeweils größer. Die für das Monitoring ausgewählte Messtechnik konnte nicht zwischen Blind- und Wirkleistung unterscheiden. Im Standby-Modus ist dieser Effekt am meisten ausgeprägt: 10 W Wirkleistung zzgl. Blindleistung führen zu 101 W Scheinleistung. Ausgelöst wird dies durch die Konstantlichtregelung (mit entsprechender Dimmung). Die permanente Messtechnik (Monitoring) kann dies leider nicht unterscheiden und zeigt den größeren Wert.

Die Kontrollmessung ergab die in Tabelle 6-2 aufgeführten Differenzen, welche insbesondere im Standby-Zustand sehr hoch sind:

Tabelle 6-2: Kontrollmessung Wirkleistung und Scheinleistung

	Wirkleistung P [W]	Scheinleistung S [VA]
Beleuchtung aus	10	103
Arbeitsplatzbeleuchtung (1/3)	237	258
Raumbeleuchtung (2/3)	461	474
maximale Leistung (3/3)	691	704

Abbildung 6-1: Messung der Scheinleistung S bei ausgeschalteter Beleuchtung

Durch eine EXCEL-Analyse wurde die notwendige Fehlerkorrektur ermittelt und für alle betroffenen Messwerte durchgeführt. Das Ergebnis dieser Korrektur sei an folgender Darstellung in Abbildung 6-2 veranschaulicht. Der fehlerhaft gemessene Sockel wurde deutlich nach unten korrigiert und die Messwerte im Betrieb ebenfalls durch eine ermittelte Korrekturformel rechnerisch angepasst.

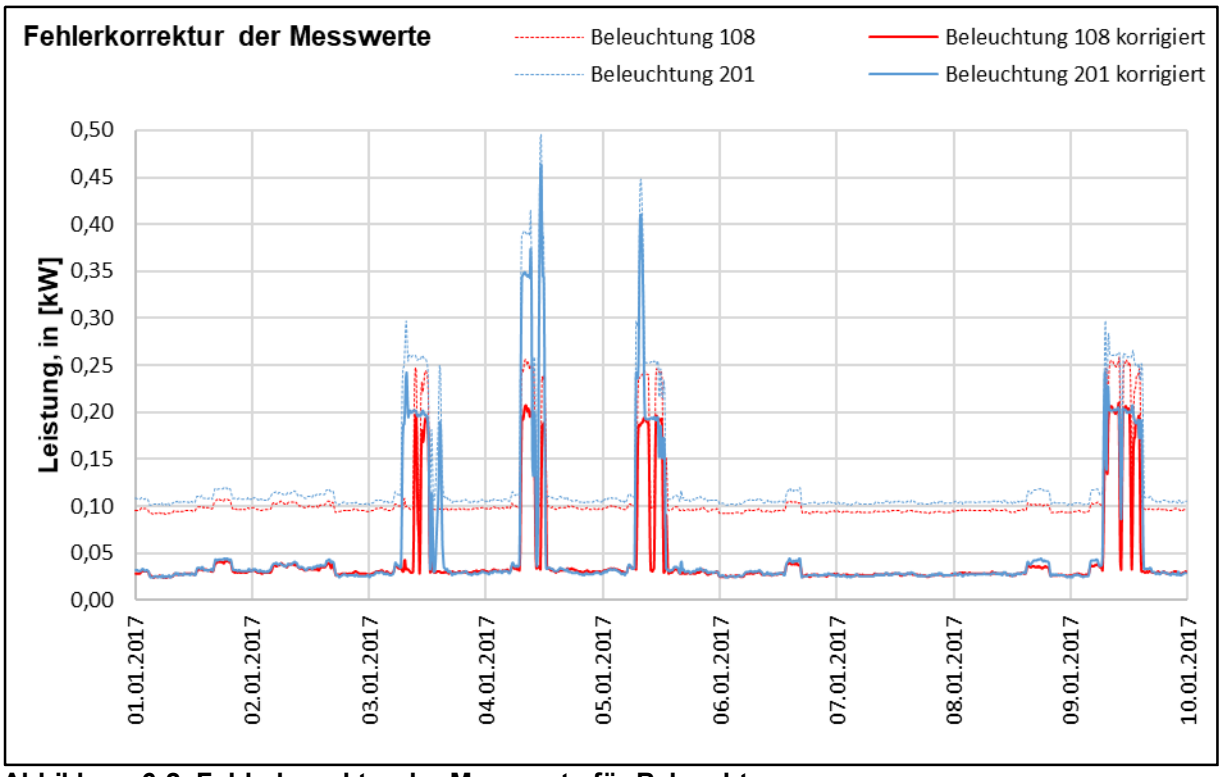

Abbildung 6-2: Fehlerkorrektur der Messwerte für Beleuchtung

6.2 Typischer Tagesverlauf

Obwohl die zuvor beschriebenen, notwendigen Korrekturen einen Einfluss auf die Verwertbarkeit der Daten haben, soll im Folgenden dennoch eine Auswertung der typischen Verläufe in den beiden Klassenzimmern 1.08 und 2.01 vorgenommen werden.

Zunächst werden charakteristische Tagesverläufe anhand von Beispieltagen im 10-Minuten-Intervall untersucht. Dabei wird stets vergleichend für einen bewölkt-wechselhaften (links) und einen eher sonnigen Tag (rechts) aufgezeigt, dass die Nutzungszeit, die Jahreszeit sowie ein Unterschied zwischen Nord- und Südklassenraum sichtbar werden. Um die Bedingungen der Sonneneinstrahlung beurteilen zu können, ist jeweils die von der Wetterstation erfasste Globalstrahlung in W/m² mit dargestellt.

6.2.1 Tagesverlauf im Frühling

Verglichen werden ein wechselhafter (23.05.2016) und ein sonniger Frühlingstag (22.05.2017), siehe Abbildung 6-3. Während an dem eher bewölkten Tag (links) im nordorientierten Klassenraum 2.01 zeitweilig kurz vor 8:00 Uhr die Beleuchtung eingeschaltet wird, bleibt sie im südorientierten Klassenraum ausgeschaltet. Am sonnigen Vergleichstag bleibt die Beleuchtung in beiden Räumen ausgeschaltet.

Ungeklärt ist der messtechnisch erfasste Sprung in den Messdaten jeweils um 3:00 und um 17:00 Uhr, der zeitgleich mit dem Ein- und Ausschalten der Lüftungsanlage zusammenfällt, jedoch aus beleuchtungstechnischer Sicht nicht nachvollziehbar ist.

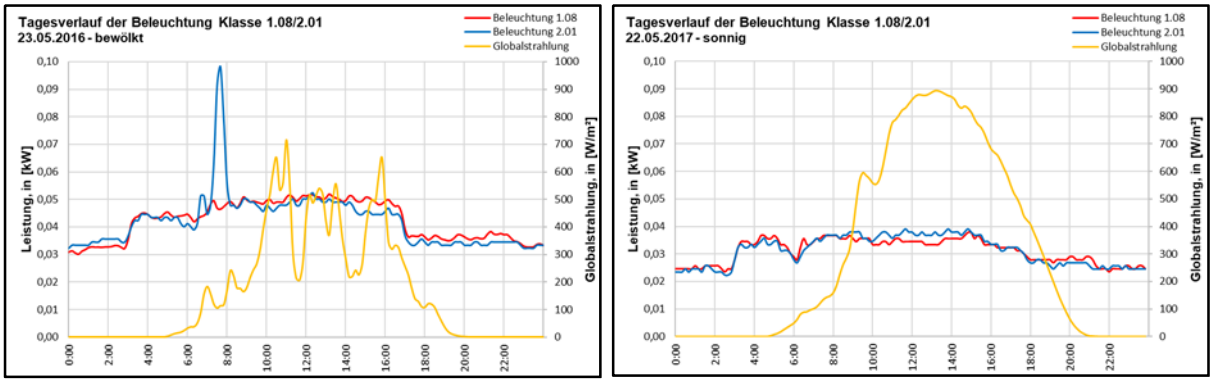

Abbildung 6-3: Tagesverläufe im Frühling; Links: bewölkt, Rechts: sonnig

6.2.2 Tagesverlauf im Sommer

Der wechselhafte Sommertag (03.06.2016) führte zum Einschalten der Beleuchtung im südorientierten Klassenraum von ca. 7:00 bis 8:30 Uhr, während im nordorientierten Raum die Beleuchtung nicht genutzt wurde.

Am sonnigen Vergleichstag wurde die Beleuchtung im Südklassenraum von ca. 7:00 bis 14:00 Uhr bis auf wenige Pausen genutzt. Der erfassten Leistung nach handelt es sich hierbei wahrscheinlich um die direkte Arbeitsplatzbeleuchtung. Möglicherweise ist dies darauf zurückzuführen, dass aufgrund des sommerlichen Wärmeschutzes und der Blendung die Jalousien geschlossen werden mussten, sodass das Kunstlicht eingeschaltet werden musste.

Im nordorientierten Klassenraum wurde das Kunstlicht nur kurzzeitig gegen 9:00 Uhr genutzt.

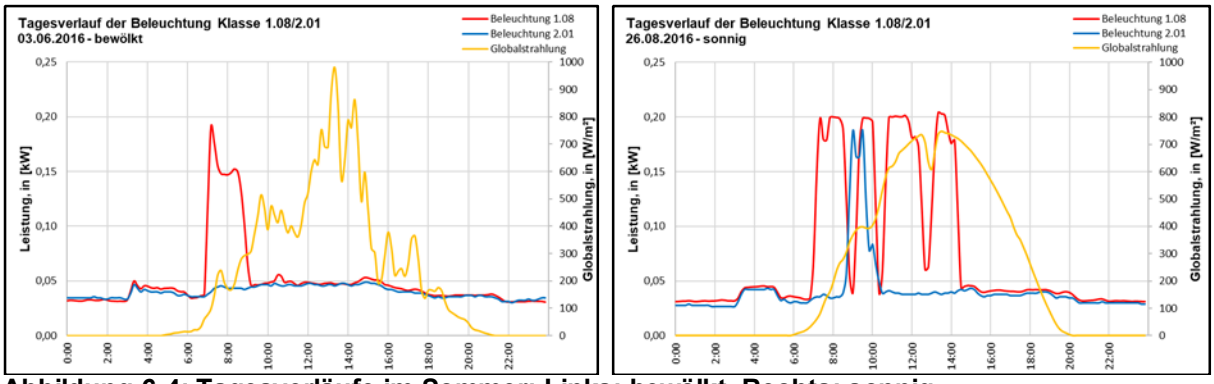

Abbildung 6-4: Tagesverläufe im Sommer; Links: bewölkt, Rechts: sonnig

6.2.3 Tagesverlauf im Herbst

Am bewölkten 05.09.2016 wurde das Kunstlicht zunächst in beiden Klassenräumen annähernd gleichermaßen intensiv genutzt, während eine Globalstrahlung von < 400 W/m² vorlag. Zum Unterrichtsschluss wurde das Licht ausgeschaltet.

Am sonnigen Vergleichstag wurde abermals das Kunstlicht im südorientierten Raum 1.08 stärker genutzt als im nordorientierten Klassenraum 2.01. Während in Raum 1.08 wahrscheinlich die Arbeitsplatzbeleuchtung aktiv war, deutet die kurze Nutzung im Raum 2.01 zu Unterrichtsbeginn mit nur ca. 80 W auf eine Nutzung im Morgenkreis hin.

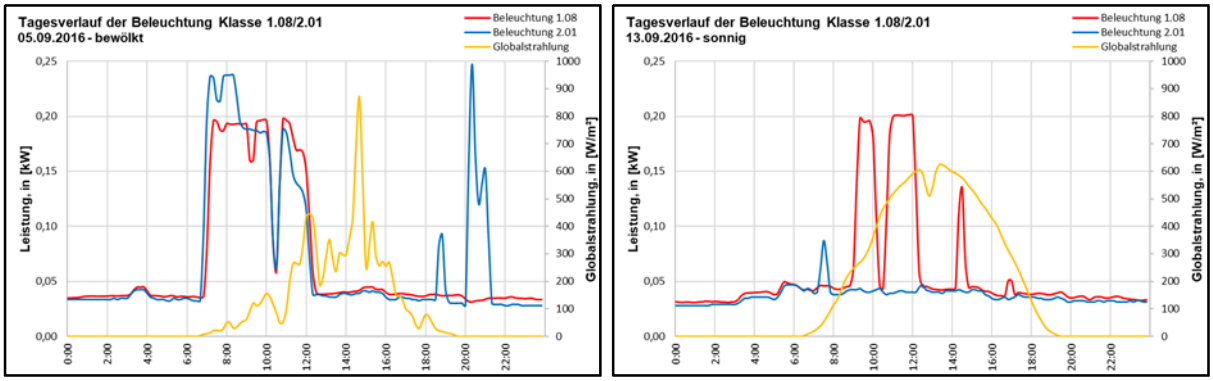

Abbildung 6-5: Tagesverläufe im Herbst; Links: bewölkt, Rechts: sonnig

6.2.4 Tagesverlauf im Winter

Am bewölkten Wintertag (23.02.2017) erreichten die Werte für die Globalstrahlung ca. 150 W/m². Erstmals werden hier in beiden Klassenräumen mit ca. 350 W Beleuchtungsleistung im Gegensatz zu den anderen Jahreszeiten mehr als 200 W gemessen, was darauf hindeutet, dass die Beleuchtung maximiert wurde.

Während im Südklassenraum während des gesamten Unterrichtszeitraumes die Beleuchtung auf hoher Stufe aktiv war, wurde sie im Nordklassenraum mit einer Ausnahme (ca. 10 Uhr) mit normaler Leistung betrieben. Dafür geht die Nutzung bis in die Nachmittagsstunden.

Am vergleichsweise sonnigen Wintertag (16.02.2017) war das Kunstlicht auch während des gesamten Unterrichts in Betrieb, jedoch wurde hier auf die Leistungsmaximierung verzichtet.

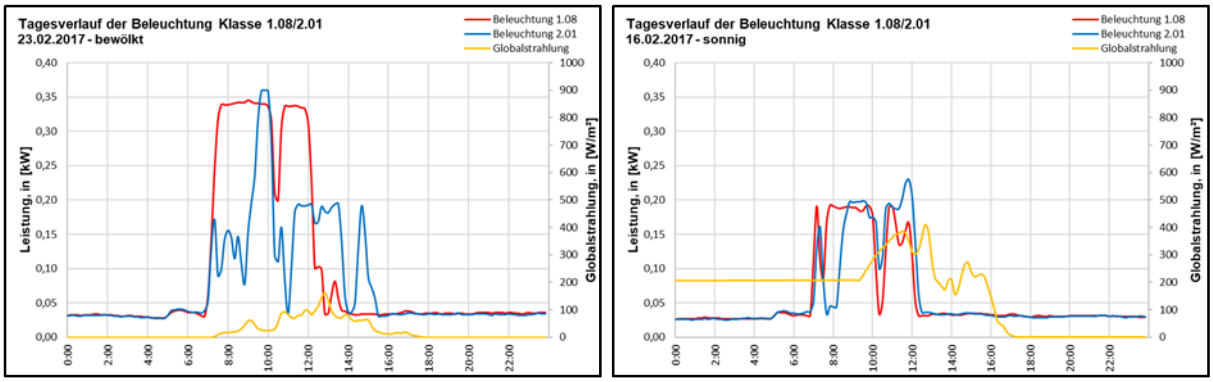

Abbildung 6-6: Tagesverläufe im Winter; Links: bewölkt, Rechts: sonnig

6.3 Typischer Wochenverlauf

6.3.1 Wochenverlauf Frühling

Ein typischer, frühlingshafter Wochenverlauf soll am Beispiel der Schulwoche vom 03.04. bis 07.04.2017 gezeigt werden, siehe Abbildung 6-7.

Sehr gut abzulesen ist die intensive Nutzung des Kunstlichtes – insbesondere im nordorientierten Klassenraum mit nahezu 350 W – am sehr bewölkten Montag und am Dienstagnachmittag. Hier lag die Globalstrahlung (gelb) lediglich im Bereich von 100 … 200 W/m². Mit steigender Globalstrahlung (bis zu 750 W/m² am Donnerstag) nimmt auch die Nutzung der Beleuchtung im Klassenraum 2.01 (Nord) deutlich ab. Im südorientierten Klassenraum 1.08 hingegen wird das Kunstlicht seltener genutzt.

Der Stromverbrauch für Beleuchtung ist während der Schulwoche im Südklassenraum mit 6,9 kWh (Ø 58 W) etwas geringer als im Nordklassenraum mit 7,5 kWh (Ø 62 W).

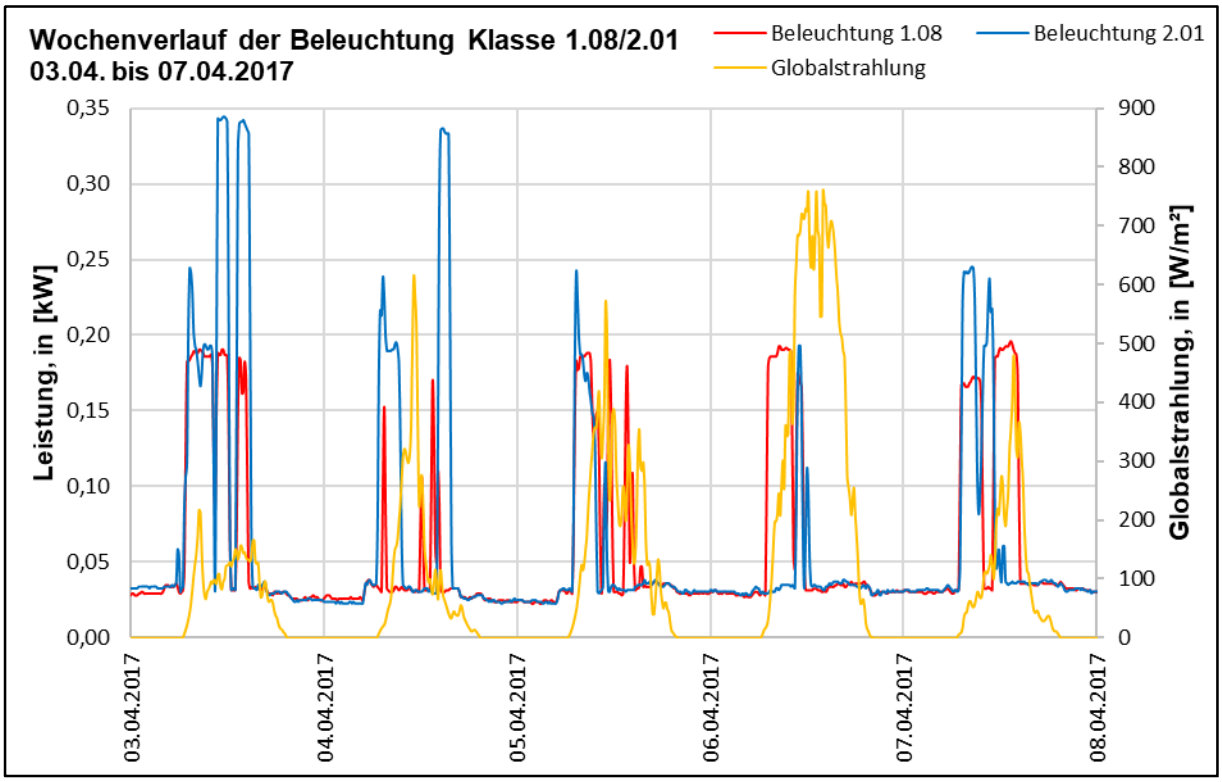

Abbildung 6-7: Wochenverlauf im Frühling

6.3.2 *Wochenverlauf Sommer*

Abbildung 6-8 zeigt eine typische Sommerwoche von Montag, 22.08. bis Freitag, 26.08.2016 mit Globalstrahlungswerten bis 750…800 W/m².

Wie bei der vorigen Auswertung des sonnigen Sommertages (Abbildung 6-4, rechts) bestätigt sich auch hier die Vermutung, dass das Kunstlicht an sonnigen Tagen im südorientierten Raum häufiger zum Einsatz kommt als im Norden.

Der Stromverbrauch für Beleuchtung ist während der Beispielwoche im Südklassenraum mit 7,9 kWh (Ø 66 W) deutlich höher als im Nordklassenraum mit 5,3 kWh (Ø 44 W). Damit ist die Kunstlichtnutzung in Raum 1.08 in der Sommerwoche stärker als in der vorbetrachteten Frühlingswoche.

Während die Beleuchtung am wechselhaften Montag im Nordklassenraum gegen 10 Uhr ausgeschaltet wurde, war sie im Südklassenraum bis Unterrichtsschluss in Betrieb. Am Montagabend hat vermutlich eine Elternversammlung in Raum 1.08 stattgefunden (ebenso am Dienstagabend in Raum 2.01).

Die Nutzung am Mittwoch ist in beiden Räumen ähnlich. Am sonnigen Donnerstag und Freitag ist davon auszugehen, dass die Jalousien im südorientierten Klassenraum geschlossen werden mussten, während im nordorientierten Raum das Tageslicht genutzt werden konnte.

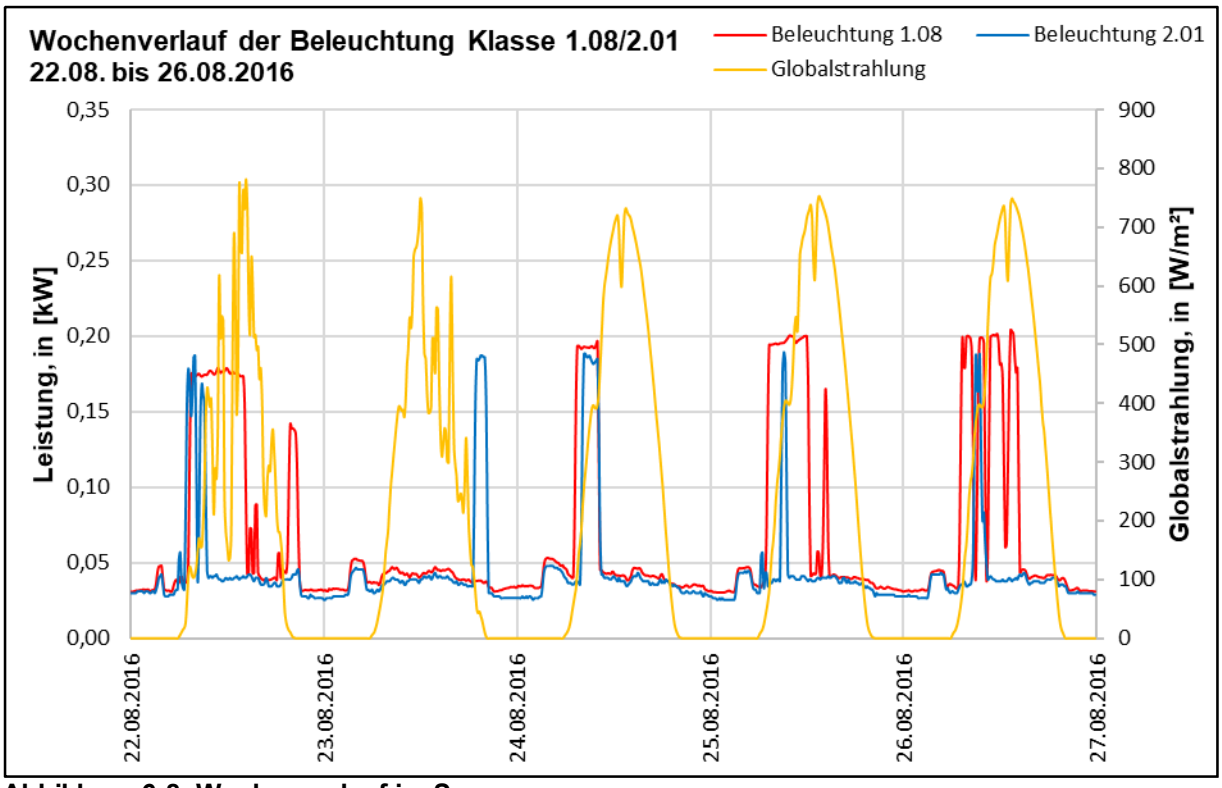

Abbildung 6-8: Wochenverlauf im Sommer

6.3.3 *Wochenverlauf Herbst*

Ein typischer, herbstlicher Wochenverlauf wird am Beispiel der Schulwoche vom 17.10. bis 21.10.2016 gezeigt, siehe Abbildung 6-9.

Die Beleuchtung wurde im Klassenraum 1.08 am Montag von 7:30 bis 13:10 Uhr und am Freitagnachmittag von 16 bis 17 Uhr besonders intensiv genutzt (bis zu 416 W). Im nordorientierten Raum hingegen fiel die Spitze von 375 W auf den trüben Freitagmorgen.

Die Verläufe am Dienstag bis Donnerstag ähneln sich, obwohl am Dienstag und Mittwoch die Sonne stärker schien (Globalstrahlung bis zu 540 W/m²) als am Donnerstag (max. 265 W/m²).

Der Stromverbrauch für Beleuchtung ist während der Schulwoche im Südklassenraum mit 10,5 kWh (Ø 88 W) erneut deutlich höher als im Nordklassenraum mit 7,2 kWh (Ø 60 W).

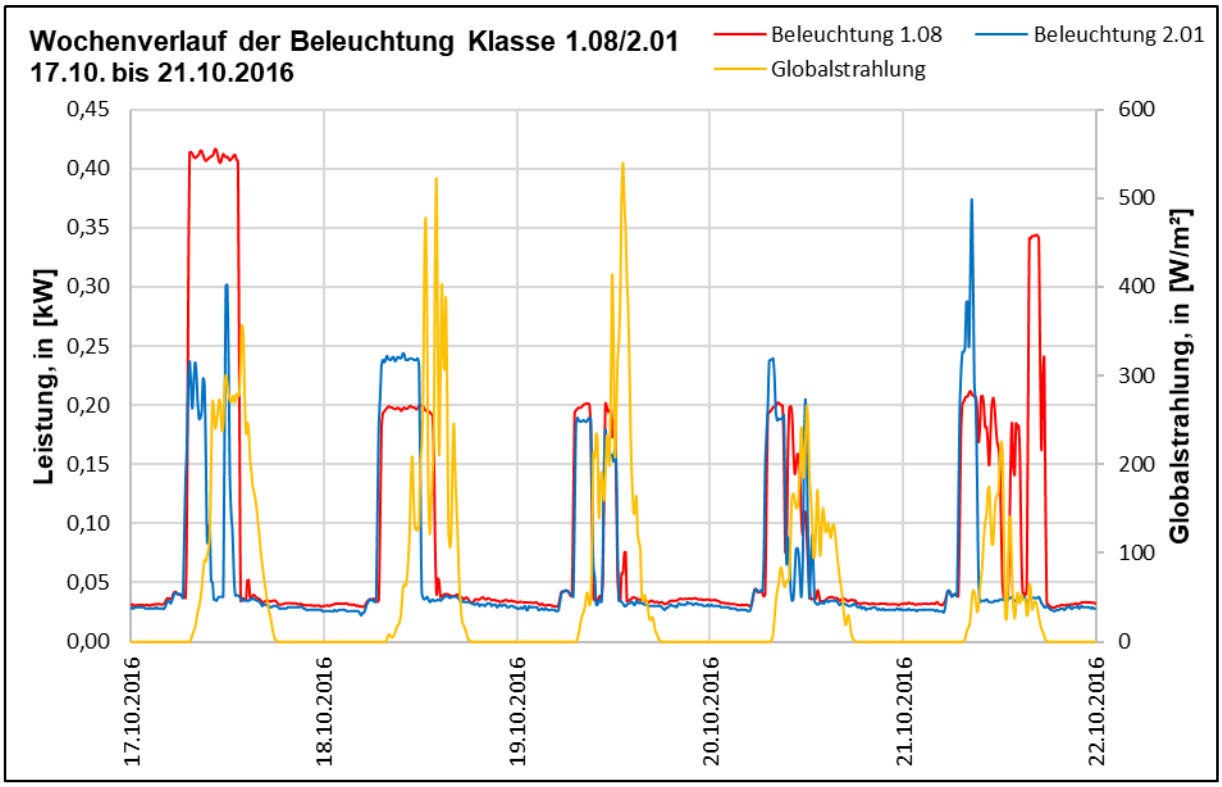

Abbildung 6-9: Wochenverlauf im Herbst

6.3.4 Wochenverlauf Winter

Abbildung 6-10 zeigt eine typische Winterwoche von Montag, 20.02. bis Freitag, 24.02.2017, wobei der Dienstag und Freitag mit Globalstrahlungswerten bis max. 400…500 W/m² die sonnigsten Tage waren.

Sehr gut lässt sich ablesen, dass die Beleuchtung an den sehr trüben Tagen (Mittwoch, Donnerstag) in beiden Klassenräumen verstärkt zum Einsatz kommt (max. 351 W im Süden, max. 426 W im Norden). Am Montag gibt es im Raum 2.01 eine Abendnutzung, am Dienstag im Raum 1.08 etwas länger.

Der Stromverbrauch für Beleuchtung ist während der Beispielwoche erneut im Südklassenraum mit 10,5 kWh (Ø 88 W) höher als im Nordklassenraum mit 9,3 kWh (Ø 78 W).

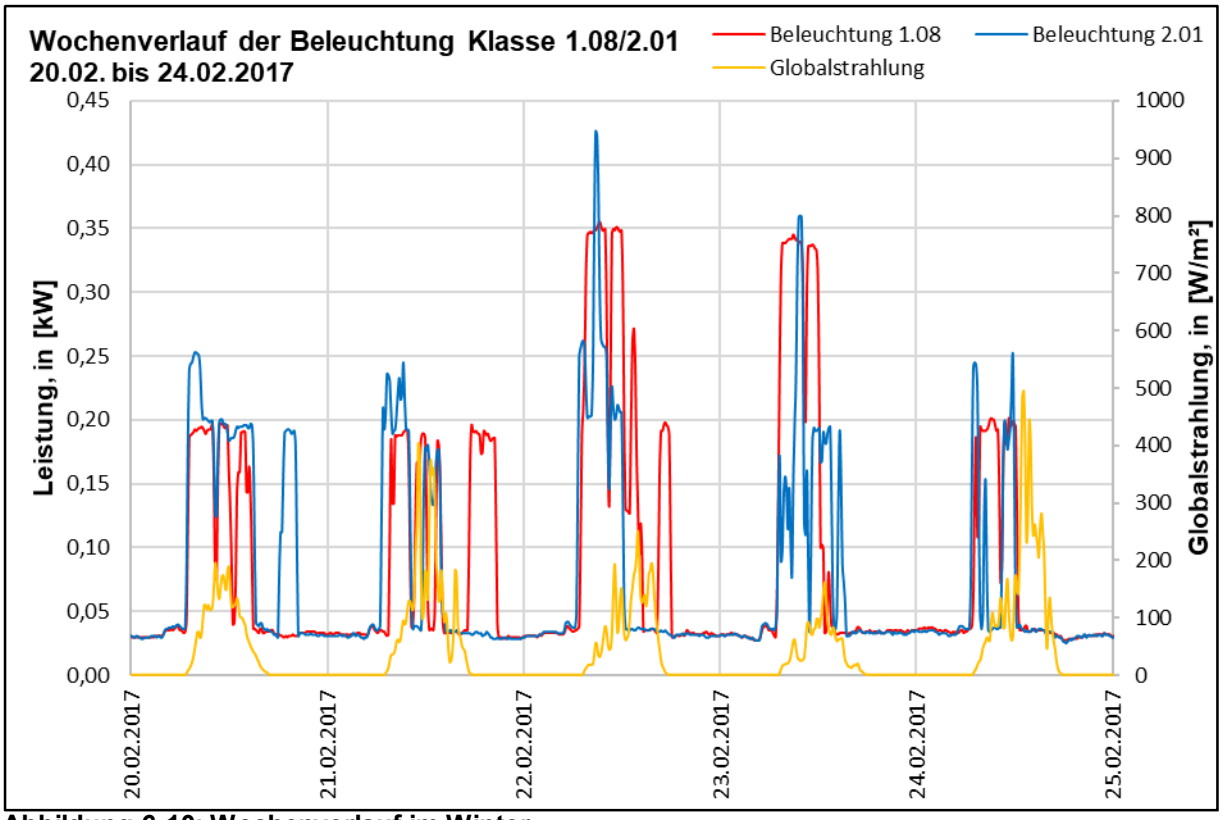

Abbildung 6-10: Wochenverlauf im Winter

6.4 Jahresverlauf

Der einzige Zeitraum, in dem zusammenhängende Daten vorhanden waren, war der 01.05.2016 bis 16.07.2017. Danach bricht die Übertragung in Raum 2.01 dauerhaft ab.

Die Jahresverläufe in Abbildung 6-11 und Abbildung 6-12 zeigen die Messdaten (korrigiert) in den Klassenräumen 1.08 und 2.01 zunächst für den gesamten Zeitraum vom 02.05.2016 bis zum 23.06.2017 (Beginn der Sommerferien) und reduziert auf alle Schultage von 7 bis 15 Uhr, jeweils als Punktdiagramm auf Basis von 10-Minuten-Werten. Bei scheinbaren Datenlücken in Abbildung 6-12 handelt es sich hier um ausgeblendete, schulfreie Tage. Beide Klassenräume werden in Abbildung 6-14 zur besseren Übersichtlichkeit noch einmal getrennt dargestellt.

Auffällig ist, dass die Leistungsspitzen in beiden Räumen zu grundlegend unterschiedlichen Zeiten auftreten. Im südorientierten Raum 1.08 trat das Maximum von 705 W am 14.11.2017 auf (Globalstrahlung max. 303 W/m²). Die zweitstärkste Nutzung der Beleuchtung wurde am 11.08.2016 registriert, welcher mit einer Globalstrahlung bis 863 W/m² recht sonnig war. Wahrscheinlich mussten an diesem Tag die Jalousien komplett geschlossen werden, sodass der Einsatz des Kunstlichtes nötig wurde.

Im nordorientierten Raum 2.01 hingegen wurde die Beleuchtung erst zwischen Mitte Januar und Mitte Februar 2017 maximiert, vermutlich aufgrund trüber Wintertage (es liegen keine Daten zur Globalstrahlung vor).

Markant ist in beiden Räumen der Sockelbereich von ca. 40 … 200 W Leistung während der Betriebszeit bzw. von ca. 40…60 W in Schließzeiten. Dieser Sockel verbleibt im Raum 2.01 ab Mai 2017 im Bereich von 40 W.

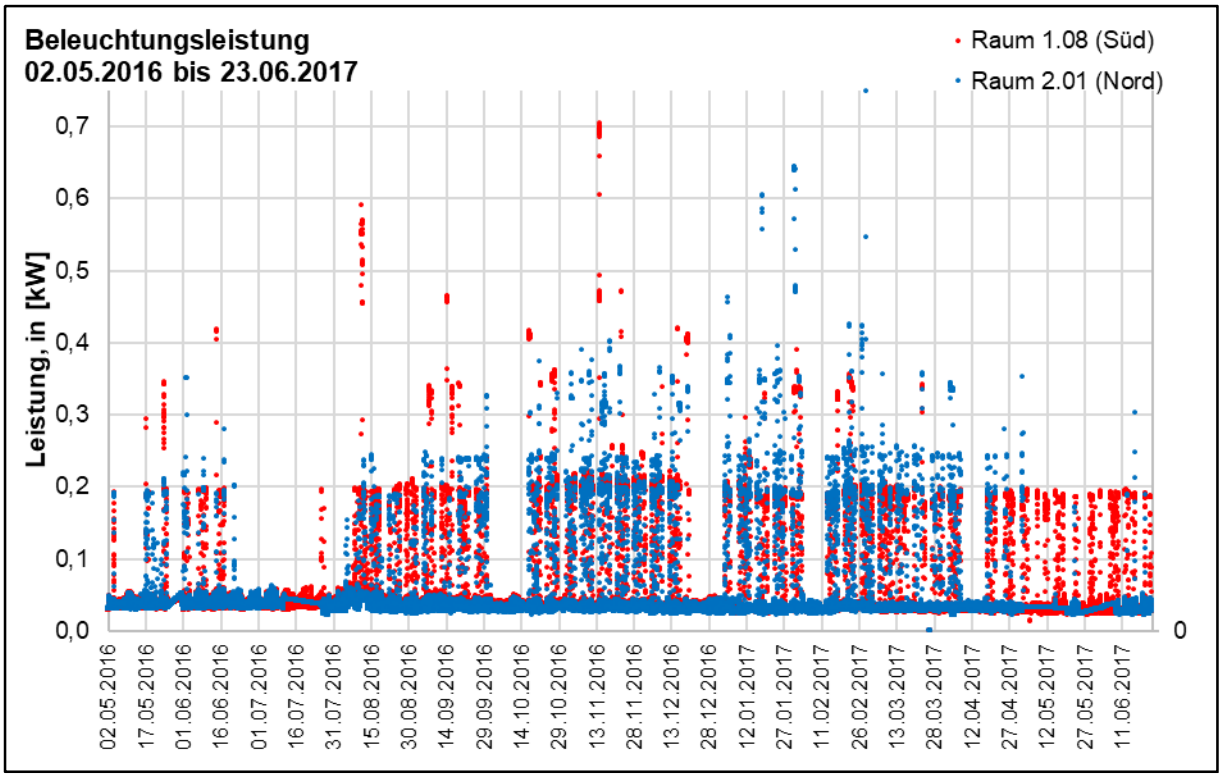

Abbildung 6-11: Beleuchtungsleistung, Klassenräume 1.08 und 2.01

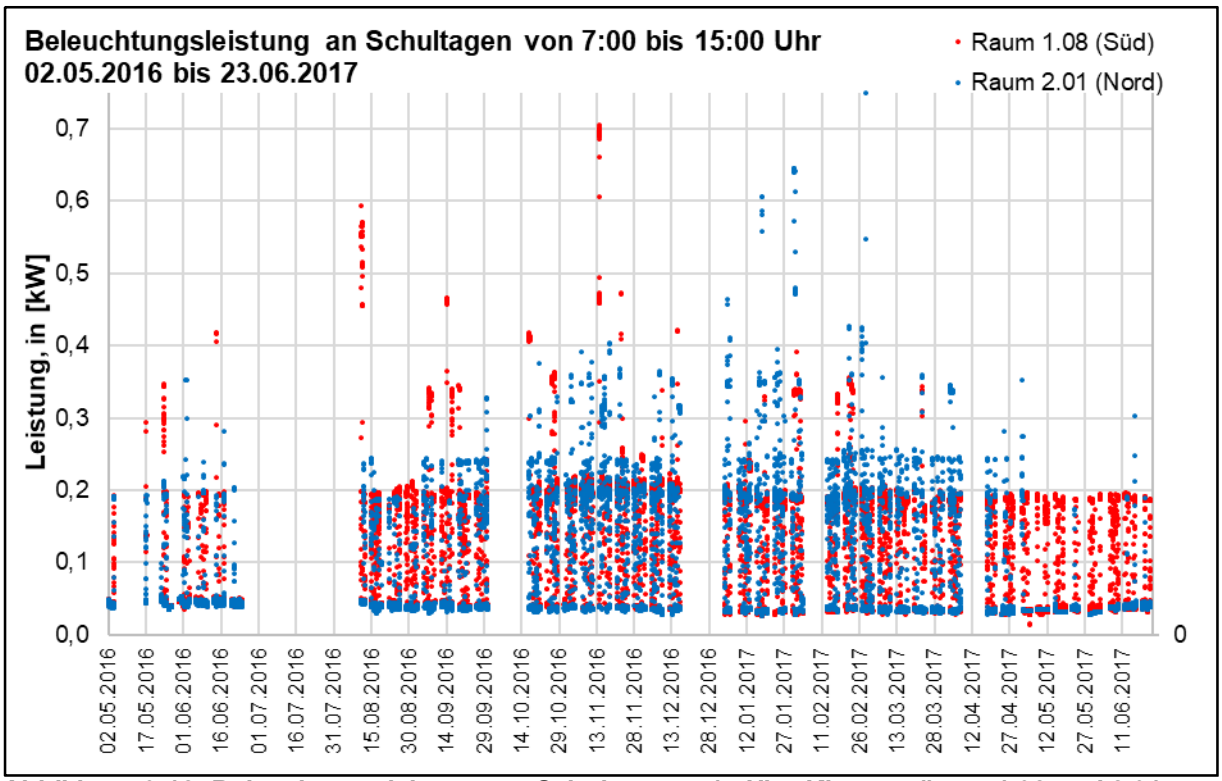

Abbildung 6-12: Beleuchtungsleistung an Schultagen 7-15 Uhr, Klassenräume 1.08 und 2.01

Die mittlere Leistung während der Unterrichtszeit des betrachteten Zeitraumes vom 02.05.2016 bis 23.06.2017 betrug im südorientierten Klassenraum mit 116 W etwas mehr als im nordorientierten Raum mit 95 W.

Betrachtet man ein exaktes Jahr und bildet den Mittelwert der Leistung für alle Nutzungsstunden vom 02.05.2016 bis 01.05.2017, so bleibt das Verhältnis mit 124 W (Süd) zu 106 W (Nord) ähnlich. Auch die Energieverbräuche der Klassenräume (Kapitel 8) bestätigen, dass der Klassenraum 2.01 einen geringeren Stromverbrauch für Beleuchtung aufweist. Aufgrund der grundlegend unterschiedlichen Tageslichtversorgung zwischen Nord und Süd wurde ein gegensätzliches Ergebnis vermutet. Wahrscheinlich ist im südorientierten Raum die Sonnenschutzeinrichtung häufiger geschlossen, was den Einsatz von Kunstlicht nach sich zieht.

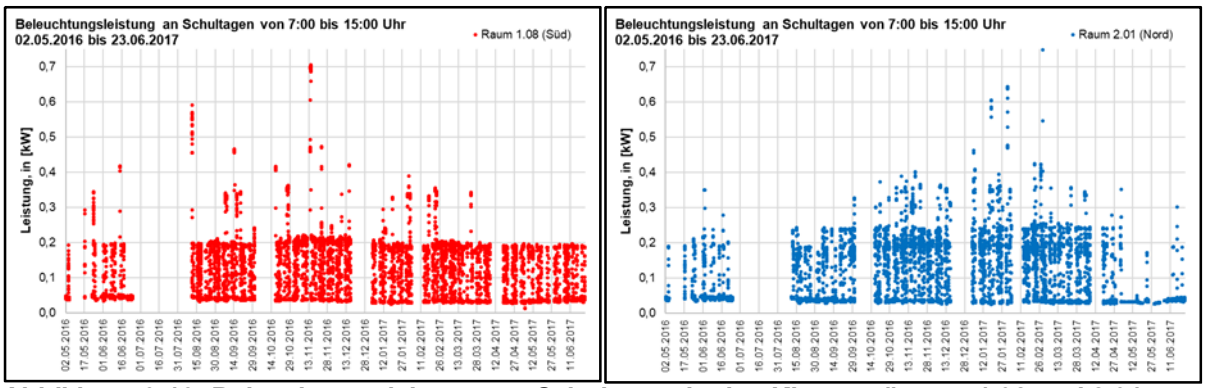

Abbildung 6-13: Beleuchtungsleistung an Schultagen in den Klassenräumen 1.08 und 2.01

6.5 Nutzerbefragungen April 2015

Am 14.04.2015 erfolgte durch die sozialwissenschaftliche Begleitforschung des Institutes für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES) Karlsruhe eine Befragung der Lehrer und Schüler der Grundschule zu verschiedenen baulichen und technischen Komponenten, an der auch das Monitoringteam teilnahm.

Die Beleuchtungssituation wurde darin von den befragten Schülern durchweg als positiv bewertet. Insbesondere die Bewegungsmelder wurden als hilfreich angesehen, um zu gewährleisten, dass die künstliche Beleuchtung nicht unnötig angeschaltet ist. Einziger Kritikpunkt der Kinder war, dass das permanente Ausschalten des Lichts bei Filmvorführungen nicht funktionierte und das Licht aufgrund der Präsenzmelder bei heruntergelassenen Jalousien immer wieder anging. Offenbar war dem Personal zu diesem Zeitpunkt noch nicht bekannt, wie die Automatik gesperrt werden kann.

Auch die Befragung der Lehrer- und Hortbetreuer war bezüglich der Beleuchtung der Klassen- und Horträume durchweg positiv. Das vorhandene natürliche und künstliche Licht wird prinzipiell als ausreichend empfunden, lediglich auf der Nordseite des Gebäudes wurden eher schlechte Tageslichtverhältnisse beanstandet.

Häufigere Beschwerden kamen bezüglich der Beleuchtung bzw. Blendung im Bereich der Tafel und des Lehrertisches. So kommt es manchmal zu Blendungen, die dazu führen, dass die Schüler die Tafelanschrift oder die Lehrkraft den Laptop nicht optimal erkennen können. Auch die Tatsache, dass die Jalousien der beiden Kastenfenster je Klassenraum nicht einzeln angesteuert werden können, wurde von den Lehrkräften als nachteilig bewertet, da es manchmal gut wäre, nur eines der Fenster zu verdunkeln.

Zuletzt wurde von manchen Lehrern bemängelt, dass am Lehrerpult „zu viele Knöpfe“ vorhanden sind und keine anwendergerechte Einweisung (Stand April 2015) in die Beleuchtungstechnik vorgenommen wurde.

6.6 Nutzerbefragungen September 2017

Neben zahlreichen Gesprächen im Zuge von Vorortbesuchen erfolgte am 29.09.2017 nochmals eine eingehende Nutzerbefragung der Schüler einer 4. Klasse (in Raum 1.08), einiger Lehrerinnen und der Schulleitung sowie des Hausmeisters.

Die Kinder verrieten, dass das Licht „manchmal nicht das mache, was die Lehrerin will“. Grundsätzlich finden sie die Beleuchtung genau richtig. Sie schätzen die Lichtautomatik, da man nicht zum Schalter laufen muss. Ist das Licht komplett aus, dürfen die Schüler auch auf Nachfrage das Licht selbst anschalten. Beim Morgenkreis gehe das Licht auch mal aus, dann müsse man winken.

Auf die Frage nach dem Blendschutz und der Verschattung gaben fast alle Kinder an, dass das Tageslicht manchmal blende. Ihnen waren jedoch alle Einstellungsmöglichkeiten vertraut, die die Lehrerin vornehmen kann.

Insgesamt findet das Personal die Beleuchtung ausreichend. Einstimmig hieß es, es seien keine Beschwerden der Schüler wahrnehmbar. Die Separatbeleuchtung des Morgenkreises und der PC-Arbeitsplätze in den Klassenzimmern wurde als sehr gut beurteilt. Inzwischen waren sie besser mit der Lichtautomatik und der Möglichkeit der Übersteuerung vertraut. Generell verlassen sich die befragten Lehrerinnen eher auf die Lichtautomatik und nehmen kaum eigene Einstellungen vor. Die Dimmfunktion werde eher nicht genutzt, da dies nicht immer wie geplant funktioniere und eine richtige Einführung fehle. Diese gab es zuletzt beim Einzug in die Schule im Februar 2014. Eine Erklärung der Bedienung und weitere Beschriftung wurde gewünscht. Eine Verteilung der vielen Funktionen für die Arbeitsplatzbeleuchtung und die Raumbeleuchtung auf mehr als zwei Schalter wäre vorstellbar gewesen.

Die Lehrer finden die Präsenzsteuerung sehr angenehm. Sie gaben jedoch auch an, dass sie manchmal die Automatik sperren und das Licht dann nach Unterrichtsschluss versehentlich eingeschaltet bleibt, weil sie sich auf die automatische Abschaltung verlassen haben. Im Hellen sei zudem schlecht zu erkennen, ob die rote Kontrolllampe am Tableau leuchtet oder nicht. In diesem Fall schaltet die Reinigungskraft das Licht am Nachmittag aus. Etwas kritisch wird gesehen, dass die Kinder sich an die Automatik gewöhnen und im „normalen Leben“ keine Verantwortung für das Ausschalten des Lichtes erlernen.

Bedauert wurde, dass auf der Nordseite tagsüber manchmal das Kunstlicht eingeschaltet werden müsse. Bezüglich der Südseite wurde erneut die Kritik deutlich, dass das Tageslicht genau von hinten auf den Laptop am Lehrertisch fällt. Der Tisch lässt sich nur punktuell drehen, jedoch aufgrund der Bodenverkabelung nicht wegrücken. An den PC-Arbeitsplätzen komme es vermehrt zu Blendungen, sodass dort die Jalousien geschlossen werden müssen. Allgemein sei es in den Südräumen eher zu hell und dadurch das Projektionsbild des Smartboards auch bei geschlossener Jalousie nicht kontrastreich genug. Daraufhin gaben andere Lehrer den Hinweis, die Hintergrundfarbe der elektronischen Tafel von weiß auf eine andere Farbe umzustellen, um die Erkennbarkeit zu steigern.

Die Grundrissspiegelung der Klassenräume wurde hinsichtlich der Tageslichtnutzung (Licht von links/rechts) nicht als nachteilig empfunden, da der Unterricht meist in Inselgruppen stattfinde.

Darüber hinaus zeigte sich der Kritikpunkt der Nutzer bezüglich der Verschattung der Klassenräume, dass bei der geringen Lamellenbreite von 25 mm die Sicht nach draußen stärker eingeschränkt ist als bei einem höheren Lamellenabstand. Insbesondere in den südorientierten Klassenräumen müssen die Jalousien aufgrund des sommerlichen Wärmeschutzes und der Blendung fast immer heruntergefahren werden. Es kam häufiger die Aussage, man fühle sich „eingesperrt“. Jalousien mit 50-60 mm breiten Lamellen hätten automatisch in horizontaler Stellung einen deutlich größeren Lamellenzwischenraum, durch den die Nutzer hindurchschauen könnten. Diese Ausführung war jedoch aufgrund der Platzeinschränkungen im Fensterkastenbereich nicht möglich.

Abbildung 6-14: Klassenraum 1.07 mit heruntergefahrenen Jalousien in waagerechter Stellung

Nachdem Fensterscheiben gerissen waren und Jalousiemotoren ausfielen, wurde anfangs vermutet, dass eine halbhohe Jalousiestellung zu großen Temperaturdifferenzen im Fensterkasten führe (Untersuchung siehe Abschlussbericht Teil 6). Daraufhin durften auf Anweisung der Schulstiftung die Jalousien nur noch ganz hoch oder ganz heruntergefahren werden. Eine halbhohe Stellung würde jedoch die Nutzerzufriedenheit deutlich erhöhen, da sie die Blendung im oberen Bereich verhindern kann und gleichzeitig im unteren Bereich den Sichtkontakt nach außen ermöglicht.

Abbildung 6-15: Klassenraum 2.07, Links: schwarz außen, Rechts: silber außen

Einer Lehrerin fiel auf, dass die Jalousien so montiert sind, dass in der Stellung mit der silberreflektierenden Seite außen weiterhin Licht von schräg oben durch die Lamellen scheint (siehe Abbildung 6-15 rechts, erkennbar am Schattenwurf in der Leibung). Da in den südorientierten Räumen eher ein Problem der Überwärmung besteht, sei dies jedoch aus energetischer Sicht die bevorzugte Jalousieposition. Besser wäre es, die Jalousie genau andersherum zu montieren, sodass mit der reflektierenden Seite außen bei steilem Sonnenstand eine bessere Verdunkelung erreicht werden kann. Das ist bei vergleichbaren Projekten zu beachten.

Nach Aussage des Hausmeisters ist das Licht sowie das Notlicht in allen Räumen und Fluren vollkommen ausreichend. Ihm sind keine Probleme bei der Steuerung der Beleuchtung aufgefallen.

Auch die Reinigungskraft der Schule wurde um ihre Einschätzung gebeten. Dabei war auffallend, dass sie ausgesprochen gut mit der Bedienung der Beleuchtung vertraut war und auch über das in der Konzeption vorgesehene Fensteröffnungsverhalten und die Jalousiestellungen sehr gut Bescheid wusste. Sie gab an, teilweise die Stellung der Jalousien zu korrigieren, wenn ihr z. B. auffalle, dass im Sommer die schwarze Lamellenseite nach außen zeigt oder im Winter umgekehrt. Sie findet die Beleuchtungsautomatik komfortabel, hat jedoch in der dunklen Jahreszeit Schwierigkeiten mit der kurzen Zeitspanne der Beleuchtungsdauer, wenn sie die Haupttreppe reinigt. Der nächstgelegene Präsenzmelder ist zu weit entfernt und sie stand häufiger im Dunkeln, was ein Sicherheitsrisiko darstellt.

6.7 Probleme und Verbesserungsansätze

Bei Vorortbesuchen fiel auf, dass die Türen zu den Sanitärräumen häufig offenstehen, da sie für Kinder schwer zu schließen sind. Dies führt dazu, dass das Licht angeht, wenn jemand auf dem Flur vorbeigeht. Die Türen sollten so eingestellt werden, dass sie leicht schließen.

Die hohe Tageslichtversorgung führt in den südorientierten Räumen dazu, dass die Jalousien meistens geschlossen bleiben müssen, damit das Tafelbild (Smartboard) erkennbar ist. In diesem Zusammenhang wäre es bei Folgeprojekten gut, wenn sich die Verdunkelung für jedes Fenster separat bedienen ließe und nicht automatisch alle Fenster des Raumes verdunkelt würden. So könnte man das Fenster in Tafelnähe verdunkeln und die Schülertische weiterhin mit Tageslicht versorgen.

Die Nutzererfahrungen zeigen, dass eine Mobilität des Lehrertisches von Vorteil ist. Nicht nur aufgrund der eigenen Gestaltungsvorlieben im Klassenraum, sondern im Fall der südorientierten Räume aufgrund der hier vorhandenen Blendung auf dem Lehrerlaptop. Die Lehrertische lassen sich aufgrund der Bodenverkabelung nur drehen, aber nicht verrücken. Die Bedienung für die Beleuchtung und die Jalousien hätte auch an einer Wandoberfläche in der Nähe des Lehrertisches positioniert werden können. Die Stromzufuhr für den Lehrerlaptop kann auch durch eine Wandsteckdose in der Nähe des Tisches gelöst werden. Damit wäre die Stellung des Tisches flexibel.

Bezüglich der Jalousien besteht der große Wunsch der Nutzer, die Jalousien auch in halbhoher Stellung nutzen zu dürfen, sodass im oberen Bereich der Blendschutz genutzt wird, aber im unteren Bereich noch ein Außenbezug möglich ist. Diese Stellung ist aufgrund von in der Vergangenheit aufgetretenen Motorendefekten und gerissenen Scheiben vom Schulträger untersagt. Laut Wartungsfirma der Jalousien nehmen die Motoren der Jalousien keinen Schaden bei Hitze. Die Defekte resultieren aus Überspannung – zwei Metallteile treffen aufeinander und es besteht kein korrekter Potentialausgleich. Insofern sollte diese Handlungsanweisung zurückgenommen werden – zur Sicherheit unter der Bedingung, dass wenigstens eine Front der Kastenfenster offen ist (Abfuhr von Stauwärme). Dass der Außenbezug deutlich zum Wohlbefinden beiträgt, zeigt sich auch an der Kritik, dass die Lamellenbreite mit nur 25 mm zu dem Gefühl führt, „eingesperrt zu sein“. Hier hätten breitere Lamellen größere Zwischenräume für Durchblicke ermöglicht.

6.8 Verallgemeinerung und Fazit

Die Beleuchtungssituation ist insgesamt als sehr gut einzuschätzen und bietet zahlreiche Einstellungsmöglichkeiten für individuelle Nutzerwünsche. Jedoch gibt es Schwierigkeiten und Berührungsängste bei der Bedienung der verschiedenen Funktionen, welche durch Aufklärung der Nutzer behoben werden sollen.

Die Tageslichtversorgung wird in den südorientierten Klassenräumen als mehr als genug eingeschätzt, teilweise kommt es zu Schwierigkeiten durch zu viel Licht im Tafelbereich und Blendung auf dem Lehrertisch. In den nordorientierten Klassenräumen ist die Tageslichtversorgung gering, hier kommt das Kunstlicht an bewölkten Tagen häufiger zum Einsatz.

In Folgeprojekten sollten Jalousien dieser Bauart eine größere Lamellenbreite aufweisen, um den Außenbezug besser zu wahren. Außerdem sollte wenigstens das Fenster in Tafelnähe separat zu verdunkeln sein.

7 Bedarfsprognose

Dieses Kapitel fasst die im Verlaufe des Monitorings erstellten Prognosen des Beleuchtungsstrombedarfs zusammen.

7.1 Bedarf nach DIN V 18599-4

Ina Asmussen ermittelte in ihrer Masterarbeit [5] die Energiekennwerte für die Beleuchtung mit Hilfe des vereinfachten Tabellenverfahrens, welches durch das DIN V 18599-Minitool in EXCEL bereitgestellt wurde. Hieraus ergab sich ein Nutzenergiebedarf der Beleuchtung von 23.417 kWh/a.

Im Jahr 2015 wurde mit Hilfe der Software IBP:18599 HighEnd [13] ein Nachweis nach DIN V 18599 für die Grundschule erstellt. In diesem wurde der Endenergiebedarf für die Beleuchtung mit 19.633 kWh/a bilanziert. Als Grundlage der Berechnung dienten die zum damaligen Zeitpunkt bekannten Anschlussleistungen für die Beleuchtung aus den Installationsplänen des Elektroplaners.

Im Rahmen der Masterarbeit von Kevin Muschalla [14] wurden die Softwareeingaben mit Hilfe der vorliegenden technischen Daten aus der Objektdokumentation überarbeitet. Im Fall der Beleuchtung wurde für alle Zonen die spezifische installierte Lampenleistung in W/m² berechnet und angepasst. Für die Nachweisversion mit realen technischen Bedingungen und Standard-Nutzerverhalten ergaben sich daraufhin 23.620 kWh/a. Nach einer zusätzlichen Anpassung des Nutzerverhaltens (Nachweisvariante im Beratungsmodus der Software) lag der Strombedarf bei 20.191 kWh/a.

7.2 Bedarf nach PHPP

Im Blatt „Strom NiWo“ des Passivhausprojektierungspaketes (PHPP) wurde der Strombedarf der Beleuchtung für verschiedene repräsentative Räume verschiedener Nutzungsarten ermittelt. Im Blatt „Strom“ wurden die Daten für die Wohnnutzung erfasst. Über geschätzte Laufzeiten und die spezifische installierte Lampenleistung ergaben sich in Summe 16.811 kWh/a.

7.3 Ingenieurmäßige Abschätzung

Des Weiteren wurde eine ingenieurmäßige Abschätzung des Beleuchtungsstrombedarfs durchgeführt. Alle vorhandenen Leuchten wurden in einer EXCEL-Tabelle erfasst und entsprechend der Raumnutzung mit einer geschätzten Laufzeit hinterlegt. Hierbei ergab sich eine Prognose von 14.749 kWh/a für den Beleuchtungsstrom, wovon 518 kWh/a auf die Hausmeisterwohnung entfallen, 598 kWh/a auf die Küche und 2901 kWh/a auf den Hort.

Innerhalb der Schulnutzung entfällt der größte Anteil auf die Klassenräume, gefolgt vom Strombedarf in den Verkehrsflächen, siehe Tabelle 7-1.

Tabelle 7-1: Ingenieurmäßige Abschätzung des Strombedarfs nach Nutzungsart

Nutzungsart	spezifische Leistung [W/m²]	rechnerischer Strombedarf [kWh/a]	spezifischer Strombedarf [kWh/(m²a)]
Klassenräume inkl. Hort	9,4	6221	5,5
Facharbeitsräume	10,2	1054	4,2
Verkehrsflächen	4,0	3107	2,9
Aula	8,2	1074	4,7
Außenbeleuchtung		978	
Sanitärräume	8,8	670	7,8
Küche	5,3	598	6,2
Verwaltung	7,9	529	5,5
Hausmeisterwohnung	4,1	518	4,3

In den acht Standard-Klassenräumen wurde davon ausgegangen, dass die Unterrichtsbeleuchtung (Valuco Active) drei Stunden je Schultag in Betrieb ist. Die PC-Beleuchtung wurde mit einer Stunde pro Tag veranschlagt, die Beleuchtung des Morgenkreises mit zwei Stunden. Hieraus ergaben sich je Klassenraum 455 kWh/a.

7.4 Abgleich mit Messwerten

Für die Klassenräume wurden nach ingenieurmäßiger Abschätzung 455 kWh/a Beleuchtungsstrom je Raum prognostiziert. Die korrigierten Messwerte (Korrektur siehe Kapitel 6.1) überschreiten die Prognosewerte nicht, sondern liegen mit 380 … 454 kWh/a für beide Räume im Bereich der Erwartungen.

Der Beleuchtungsstrom des gesamten Gebäudes wurde nicht separat gemessen.

Tabelle 7-2: Stromverbrauch Beleuchtung in den Klassenräumen

Jahr	Stromverbrauch Beleuchtung R. 1.08 [kWh/a]	Stromverbrauch Beleuchtung R. 2.01 [kWh/a]
2016	454	416
2017	422	380

Der Jahresverbrauch des südorientierten Raumes lag demnach im Mittel bei 438 kWh/a, der des nordorientierten Raumes bei 398 kWh/a. Eine Hochrechnung auf den Stromverbrauch der Beleuchtung aller acht Klassenräume ergibt somit (438 + 398) x 4 = 3344 kWh/a.

7.5 Verallgemeinerung und Fazit

Die Strombedarfsprognose ergab je nach Kenntnisstand der installierten Lampen (Stand 2015 bzw. Stand 2018) und je nach Bilanzierungsverfahren sehr unterschiedliche Werte – wobei nach DIN V 18599 trotz möglichst realitätsnaher Abbildung des Gebäudes und Anpassung des Nutzerverhaltens (Beratungsmodus) die höchsten Bedarfswerte zu verzeichnen sind, siehe Tabelle 7-3.

Der spezifische Strombedarf für Beleuchtung – bezogen auf die Energiebezugsfläche von 3095,02 m² – bewegt sich zwischen 4,4…7,6 kWh/(m²a).

Tabelle 7-3: Vergleich der Strombedarfsprognosen verschiedener Verfahren

Verfahren	Strombedarf [kWh/a]	spezifischer Strombedarf [kWh/(m²a)]
DIN V 18599 Mini-Tool, Stand 2015	23416,8	7,6
DIN V 18599, Stand 2015	19632,5	6,3
DIN V 18599 mit Norm-Nutzerprofil, Stand 2018	20231,5	6,8
DIN V 18599, Beratungsmodus, Stand 2018	20190,8	6,5
PHPP, Stand 2018	16683,2	5,6
Ingenieurmäßige Abschätzung, Stand 2018	14749,3	4,8

8 Messergebnisse Energie

Der nachfolgende Abschnitt fasst die Erkenntnisse zu den gemessenen Energiemengen der Beleuchtung zusammen. Die Auswertungen beschränken sich auf die beiden Klassenräume, in denen entsprechende Messtechnik verfügbar ist.

8.1 Messorte und Messtechnik

Es handelt sich um die gleichen Messpunkte wie in Kapitel 6.1 bereits beschrieben.Messkonzept:

- Ziel ist die Erfassung der Beleuchtungsstrommengen nach u. g. Anwendern
- Nord- und Südräume lassen sich vergleichen
- in Raum 2.01 war die Aufteilung zwischen Unterrichtsbereich und Morgenkreis geplant (aufgrund der Messfehler konnte keine Unterscheidung vorgenommen werden).

8.2 Monats- und Jahresverbrauch der Klassenräume im Vergleich

Abbildung 8-2 zeigt die Stromverbräuche für die Beleuchtung der Klassenräume 1.08 (Süd) und 2.01 (Nord) für die Jahre 2016 und 2017. Die Werte für Januar bis April 2016 lagen nicht vor und wurden ersatzweise wie im gleichen Zeitraum des Jahres 2017 angenommen.

Tabelle 8-1 zeigt die Stromverbräuche der beiden Klassenräume für Beleuchtung und sonstige Verbraucher.

Tabelle 8-1: Stromverbrauch der Klassenräume 1.08 und 2.01

	Stromverbrauch Raum 1.08 (Süd)		Stromverbrauch Raum 2.01 (Nord)	
Jahr	Beleuchtung [kWh/a]	Sonstige Verbraucher kWh/a]	Beleuchtung [kWh/a]	Sonstige Verbraucher [kWh/a]
2016	454	663	416	658
2017	422	574	380	676

Der mittlere Verbrauch des südorientierten Raumes war mit 36 kWh/Monat etwas höher als der des nordorientierten Raumes mit 33 kWh/Monat. Dies zeigt sich auch in den Unterschieden im Jahresverbrauch mit im Mittel 438 kWh/a im Raum 1.08 bzw. 398 kWh/a im Raum 2.01. Der Anteil der Beleuchtung am Gesamtstromverbrauch des jeweiligen Klassenraumes betrug im südorientierten Raum 41,4 % und im nordorientierten Raum 37,4 %.

Besonders deutliche Unterschiede sind im August bis Dezember 2016 zu erkennen. Zumindest im Spätsommer und Herbst kann davon ausgegangen werden, dass in dieser Zeit im Raum 1.08 – auch aufgrund erhöhter Raumtemperaturen – verstärkt die Jalousien zum sommerlichen Wärmeschutz geschlossen gehalten werden mussten, was zum Einsatz von Kunstlicht führte.

Lediglich im April 2016 sowie im Januar und November 2017 war der Energieverbrauch für Beleuchtung im Raum 2.01 höher als im Raum 1.08, was in der trüberen Jahreszeit wahrscheinlich auf eine schlechtere Tageslichtversorgung zurückzuführen ist.

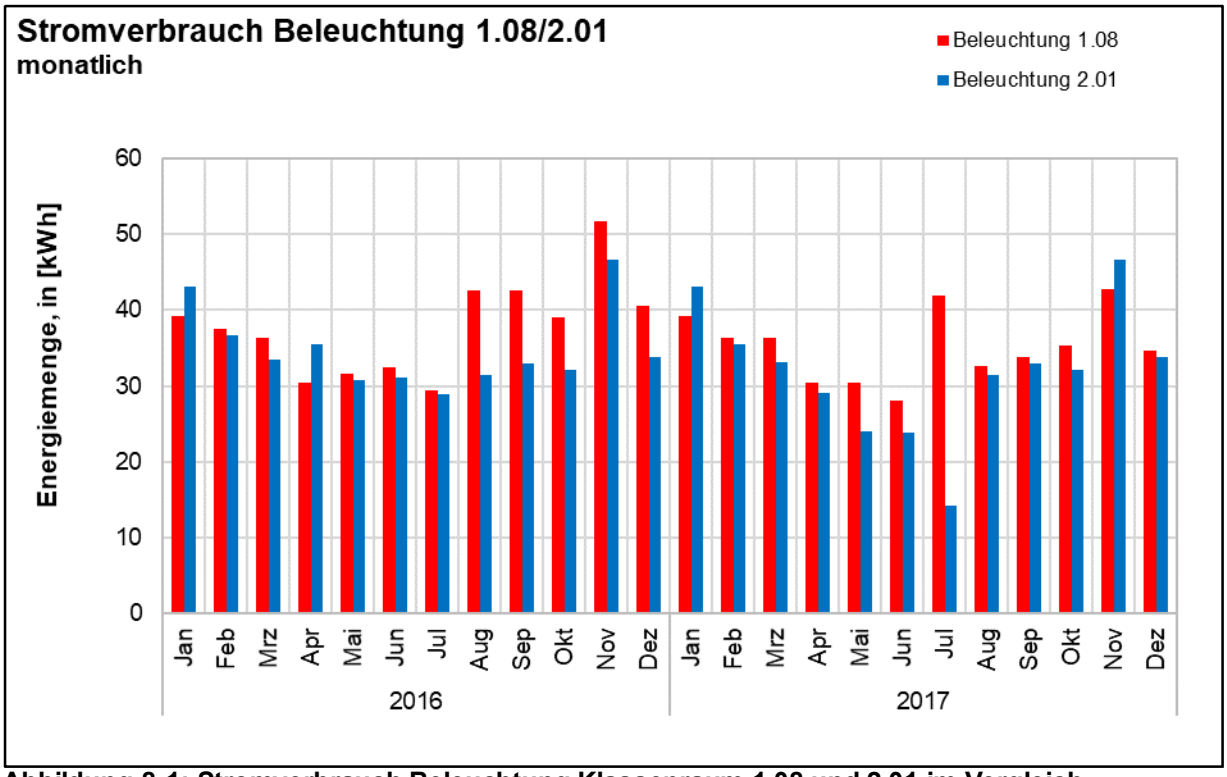

Abbildung 8-1: Stromverbrauch Beleuchtung Klassenraum 1.08 und 2.01 im Vergleich

8.3 Auswertung Nordklassenraum

Die ursprünglich geplante detaillierte Unterscheidung in die Beleuchtung des Unterrichtsbereiches und des Morgenkreises wurde aufgrund der in Kapitel 6.1 beschriebenen Probleme mit der Messtechnik nicht vorgenommen. Es wurde lediglich die Summe der beiden Werte in die Auswertungen einbezogen.

Der monatliche Energieverbrauch für die Beleuchtung ist naturgemäß im Sommer aufgrund der besseren Tageslichtversorgung geringer als im Winter, siehe Abbildung 8-2. Den höchsten Verbrauch gab es im November 2016 mit 47 kWh/Monat (Mittelwert 33 kWh/Monat). Die Werte für Dezember und Januar fallen jeweils aufgrund der hohen Anzahl an Schließtagen moderat aus.

Für den Stromverbrauch der sonstigen Verbraucher wie interaktives Whiteboard, CD-Player usw. ist erwartungsgemäß keine jahreszeitliche Abhängigkeit zu erkennen.

Die Beleuchtung hat im betrachteten Zeitraum von 2 Jahren im Mittel einen Anteil von 37,4 % am Gesamtstromverbrauch des Klassenraumes.

Abbildung 8-3 zeigt die erfasste Beleuchtungsleistung in Raum 2.01 in Abhängigkeit von der Globalstrahlung für die Schultage von 7 bis 15 Uhr im Zeitraum 02.05.2016 bis 23.06.2017 im 10-Minuten-Mittel.

Deutlich wird aus der Darstellung, dass die hohen Leistungswerte zu Zeiten auftraten, in denen die Globalstrahlung besonders niedrig war. Insbesondere bei Werten über 500…600 W lagen Globalstrahlungswerte von lediglich 130 W/m² vor, mit Ausnahme der drei höheren Messwerte im Bereich von 446 bis 485 W/m².

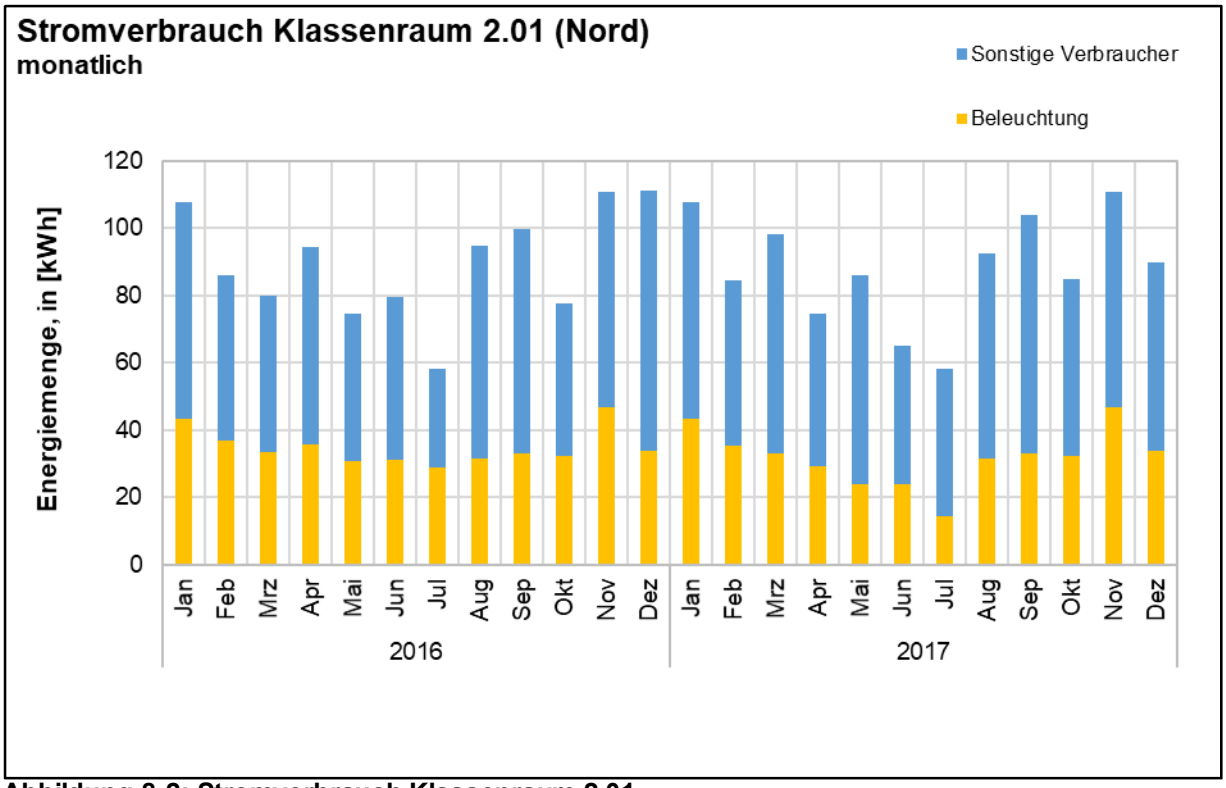

Abbildung 8-2: Stromverbrauch Klassenraum 2.01

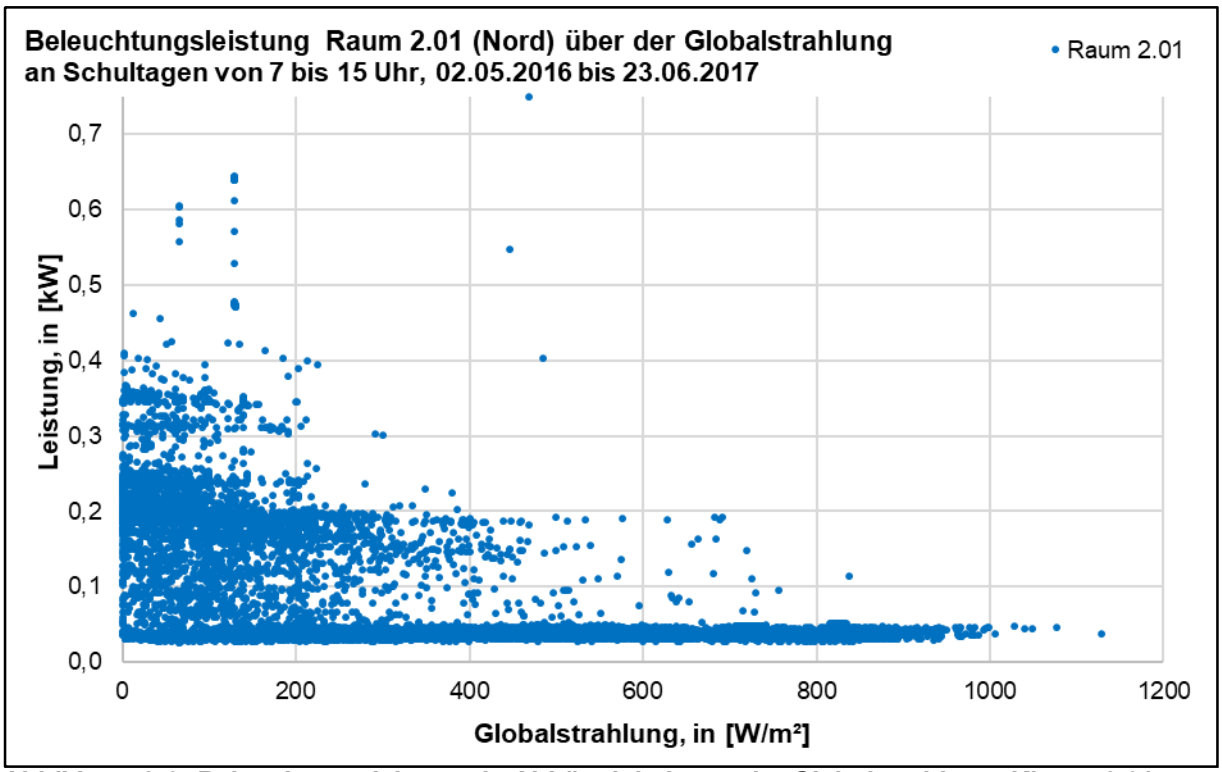

Abbildung 8-3: Beleuchtungsleistung in Abhängigkeit von der Globalstrahlung, Klasse 2.01

8.4 Auswertung Südklassenraum

Der monatliche Energieverbrauch für die Beleuchtung ist auch im südorientierten Raum im Sommer aufgrund der besseren Tageslichtversorgung geringer als im Winter, siehe Abbildung 8-4. Der höchste Verbrauch wurde im November 2016 mit 52 kWh erfasst (Mittelwert 36 kWh/Monat). Die Werte für Dezember und Januar fallen jeweils aufgrund der hohen Anzahl an Schließtagen moderat aus.

Für den Stromverbrauch der sonstigen Verbraucher wie interaktives Whiteboard, CD-Player usw. ist erwartungsgemäß keine jahreszeitliche Abhängigkeit zu erkennen.

Die Beleuchtung hat im betrachteten Zeitraum von 2 Jahren im Mittel einen Anteil von 41,4 % am Gesamtstromverbrauch des Klassenraumes.

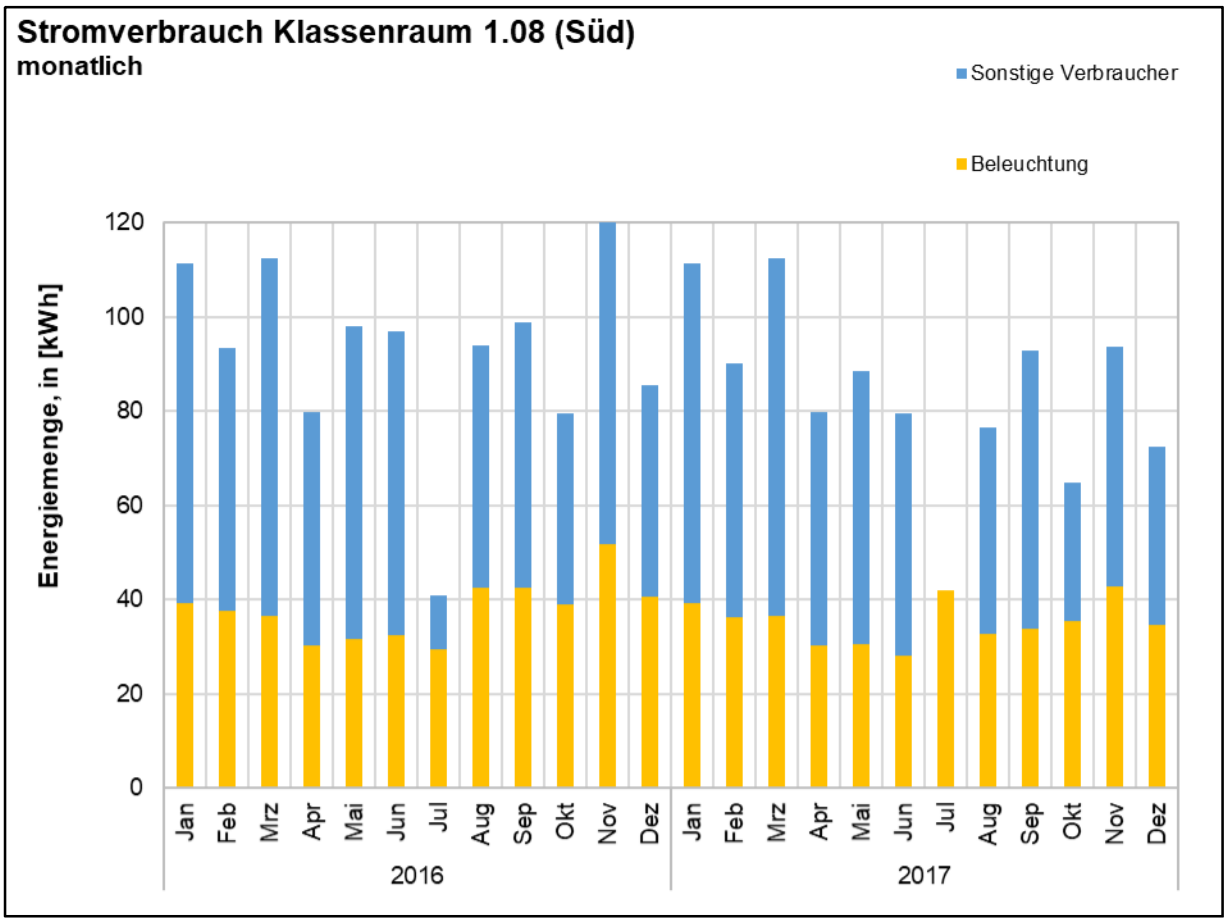

Abbildung 8-4: Stromverbrauch Klassenraum 1.08

Abbildung 8-5 zeigt die erfasste Beleuchtungsleistung in Raum 1.08 in Abhängigkeit von der Globalstrahlung für die Schultage von 7 bis 15 Uhr im Zeitraum 02.05.2016 bis 23.06.2017 im 10-Minuten-Mittel.

Auffallend ist hier im Vergleich zum nordorientierten Klassenraum die deutlich höhere Anzahl an Messpunkten im Sockelbereich bis 200 W ab einer Globalstrahlung von > 400 W/m². Prägnant sind auch die Leistungsspitzen bei gleichzeitig hoher Globalstrahlung, was auf die Nutzung von Kunstlicht bei geschlossenen Jalousien an besonders sonnigen Tagen rückschließen lässt.

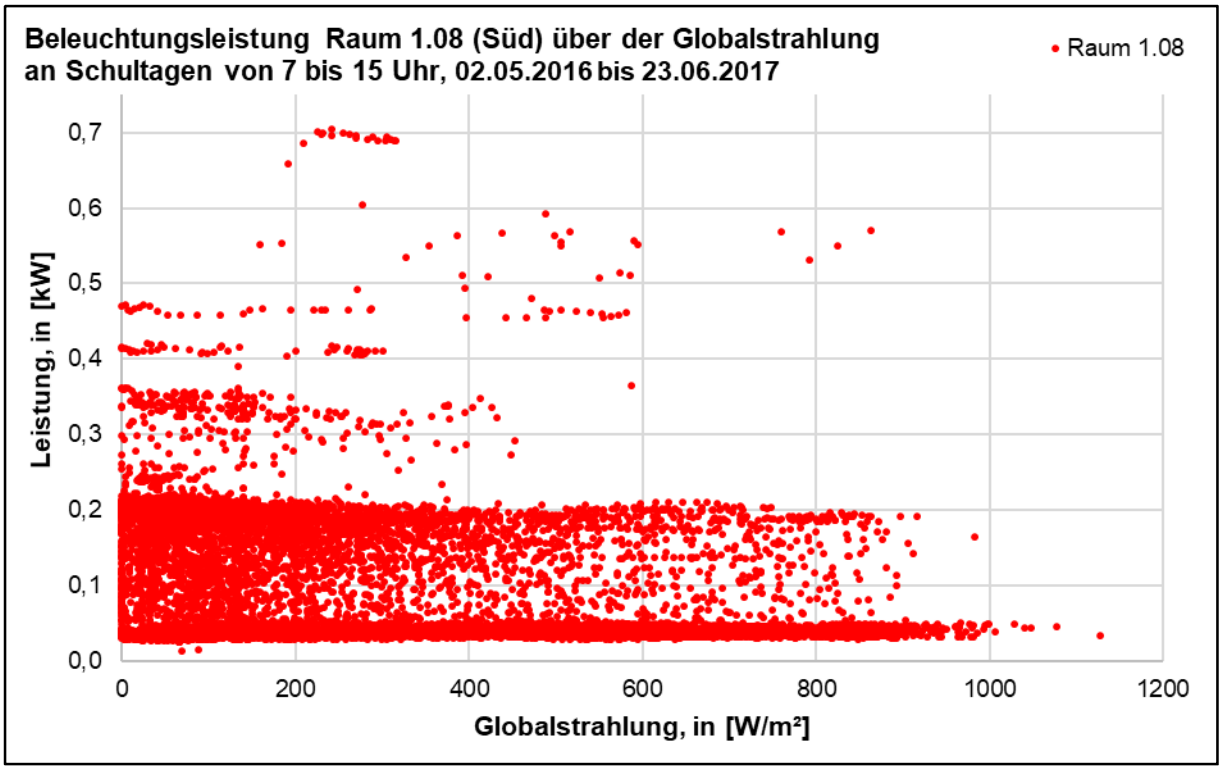

Abbildung 8-5: Beleuchtungsleistung in Abhängigkeit von der Globalstrahlung, Klasse 1.08

8.5 Problemfälle und Verbesserungsansätze

Entgegen der Erwartungen hat der südorientierte Klassenraum 1.08 trotz der besseren Tageslichtversorgung einen höheren Stromverbrauch für Beleuchtung aufzuweisen als der nordorientierte Klassenraum 2.01. Die Untersuchung der Abhängigkeit von der Globalstrahlung (gemessen an der Wetterstation der Schule) ergab, dass es sich bei den Leistungsspitzen vor allem um sonnige Tage handelte, an denen demzufolge die Jalousien im Klassenraum geschlossen bleiben mussten, sodass das Kunstlicht zum Einsatz kam. Möglicherweise ließe sich der Einsatz der Arbeitsplatzbeleuchtung an sonnigen Tagen reduzieren, wenn man den Nutzern eine halbhohe Stellung der Jalousien ermöglicht, sodass im unteren Bereich noch eine gewisse Tageslichtnutzung möglich ist. Dies ist von den Nutzern auch aufgrund des Außenbezuges gewünscht.

8.6 Verallgemeinerung und Fazit

Für die Übertragung auf andere Monitoringprojekte ergibt sich: bei der Inbetriebnahme ist eine professionelle Einstufungsmessung (mit Bekanntgabe des Leistungsfaktors LF, am besten für verschiedene Lastzustände) sinnvoll, damit später keine falschen Schlüsse gezogen werden.

Die Messwerte für den Beleuchtungsstromverbrauch der Klassenräume lagen mit 380 … 454 kWh/Jahr je Raum im Bereich der Erwartungen aus der ingenieurmäßigen Abschätzung mit 455 kWh/Jahr je Raum. Die Leistungsdaten zeigen zudem, dass die Beleuchtung überwiegend im tageslichtabhängigen Automatikmodus betrieben wird und selten Leistungsspitzen (z. B. durch händisches Hochdimmen) auftreten.

9 Außenbeleuchtung

Für die Außenbeleuchtung sind die Arbeitsstättenrichtlinie ASR A3.4 (Abschnitt Künstliche Beleuchtung im Freien) [2] und die DIN EN 12464 Teil 2: Arbeitsplätze im Freien [15] maßgeblich. Sie dient der Vermeidung von Unfällen und der Minimierung des Risikos von Vandalismus. Als Sollwert für Fußwege und betriebliche Parkplätze wird eine Beleuchtungsstärke von 10 lx angegeben.

9.1 Komponenten

Zur Beleuchtung des Außenbereiches sind 14 Stück LED-Mastleuchten „Cariboni Levante 06LV1B0007A“ mit einer Anschlussleistung von 24 W im Eingangsbereich, auf dem Hof und auf dem Parkplatz aufgestellt (gesamt 336 W).

Abbildung 9-1: Außenleuchte

Abbildung 9-2: Parkplatz und Schule mit Außenleuchten

9.2 Regelung

Die Regelung der Leuchten erfolgt tageslichtabhängig, mit zunehmender Dunkelheit werden die Leuchten bis zum Maximum stufenlos nach oben gedimmt.

Abbildung 9-3 zeigt den Verlauf der gemessenen Stromstärke für sechs aufeinanderfolgende Tage beispielhaft Anfang Januar 2017. Daraus wird ersichtlich, dass die Leuchten sich lediglich im Bereich der Dämmerung von 6 bis 8 Uhr sowie von 15 bis 17 Uhr in ihrem Verhalten unterscheiden.

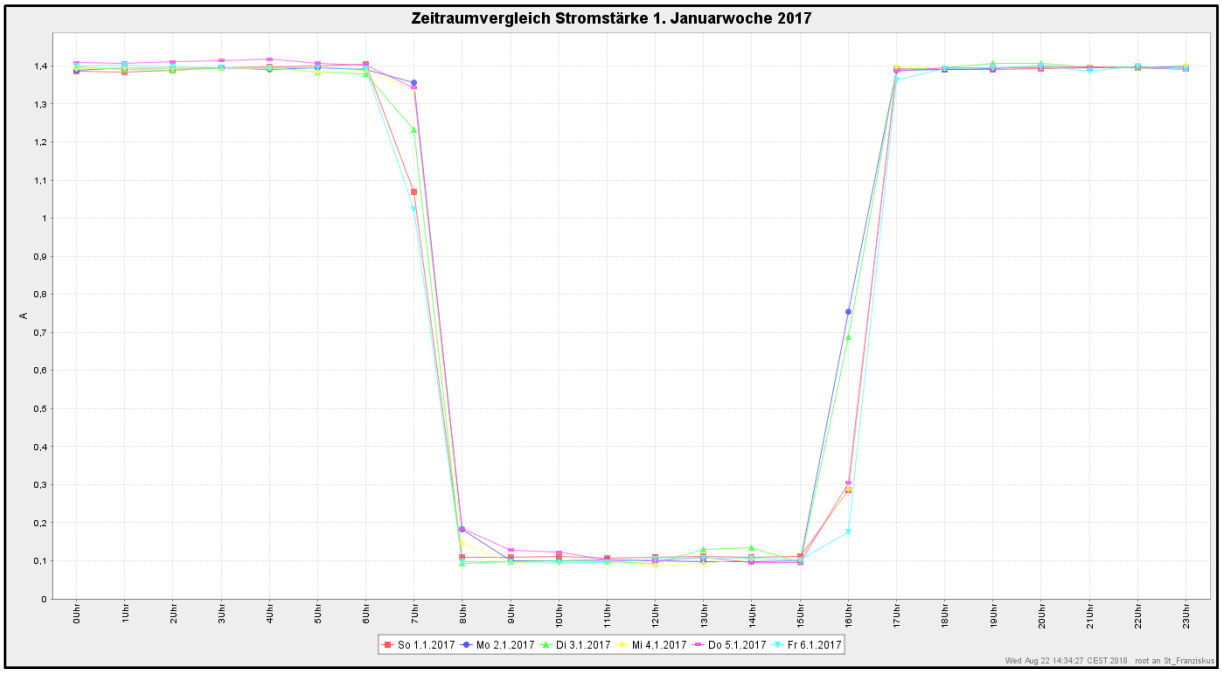

Abbildung 9-3: Zeitraumvergleich Stromstärke Außenbeleuchtung, erste Januarwoche 2017

9.3 Bedarfsprognose

Eine einfache Annäherung an den Strombedarf der Außenbeleuchtung erfolgte unter der Annahme, dass alle Leuchten (Anschlussleistung von insgesamt 336 W) durchschnittlich 8 Stunden pro Nacht in Betrieb sind, was 978 kWh/a ergibt.

Florian Hallensleben führte im Jahr 2014 eine Strombedarfssimulation mit einer EXCEL-Tabelle durch, jedoch mit dem ursprünglich vorgesehenen Leuchtentyp Leipziger Leuchte ASL 2007 LED mit 11 W Leistung. In dieser Simulation dienten die Sonnenauf- und -untergangszeiten der Wetterstation „Halle-Kröllwitz“ als Berechnungsgrundlage. Der Einschaltzeitpunkt wurde auf 10 Minuten vor Sonnenuntergang gewählt. Eine Dimmung auf 50 % der Leistung wurde von 23 Uhr bis 5 Uhr angenommen, in der restlichen Zeit läuft die Außenbeleuchtung demnach auf maximaler Leistung. Auf Grundlage der eingegebenen Daten ergab sich ein jährlicher Strombedarf der gesamten Außenbeleuchtung von 500 kWh/a.

Eine nachträgliche Korrektur der Simulation unter den realen Gegebenheiten mit 24 W Leistung und Deaktivieren der zuvor angenommenen Dimmung von 23 bis 5 Uhr führt zu einem Jahresstrombedarf von 1459 kWh.

9.4 Messorte und Messtechnik

Der Stromverbrauch wird dreiphasig im Hausanschlussraum Elektro R. 0.04 erfasst (Tabelle 9-1). Die Stromstärke wird gemessen, die Leistungsangaben werden durch virtuelle Zähler generiert. Hier zeigte sich jedoch eine fehlerhafte Programmierung, es musste direkt mit den Angaben zu den gemessenen Stromstärken gearbeitet und eigene Umrechnungen vorgenommen werden.

Tabelle 9-1: Messpunkte bezüglich Außenbeleuchtung

Kürzel	Einheit	Gruppe	Untergruppe	Beschreibung
DF0118-51B6-0	A	STR	BEL	Stromverbrauch_Aussenbeleuchtung_Phase_L1
DF0118-51B6-5	kW	STR	BEL	Leistung_Aussenbeleuchtung_Phase_L1
DF0118-51B8-0	A	STR	BEL	Stromverbrauch_Aussenbeleuchtung_Phase_L2
DF0118-51B8-5	kW	STR	BEL	Leistung_Aussenbeleuchtung_Phase_L2
DF0118-51DC-0	A	STR	BEL	Stromverbrauch_Aussenbeleuchtung_Phase_L3
DF0118-51DC-5	kW	STR	BEL	Leistung_Aussenbeleuchtung_Phase_L3

9.5 Energieverbrauch

Der gemessene Energieverbrauch ergibt sich aus der Summe der drei Phasen. Aus Abbildung 9-4 geht hervor, dass die Werte im Januar 2016 noch nicht vollständig vorhanden und im Februar bis April 2016 höchstwahrscheinlich fehlerhaft waren. Ab Mai 2016 sind die Jahresverläufe im Vergleich sehr ähnlich.

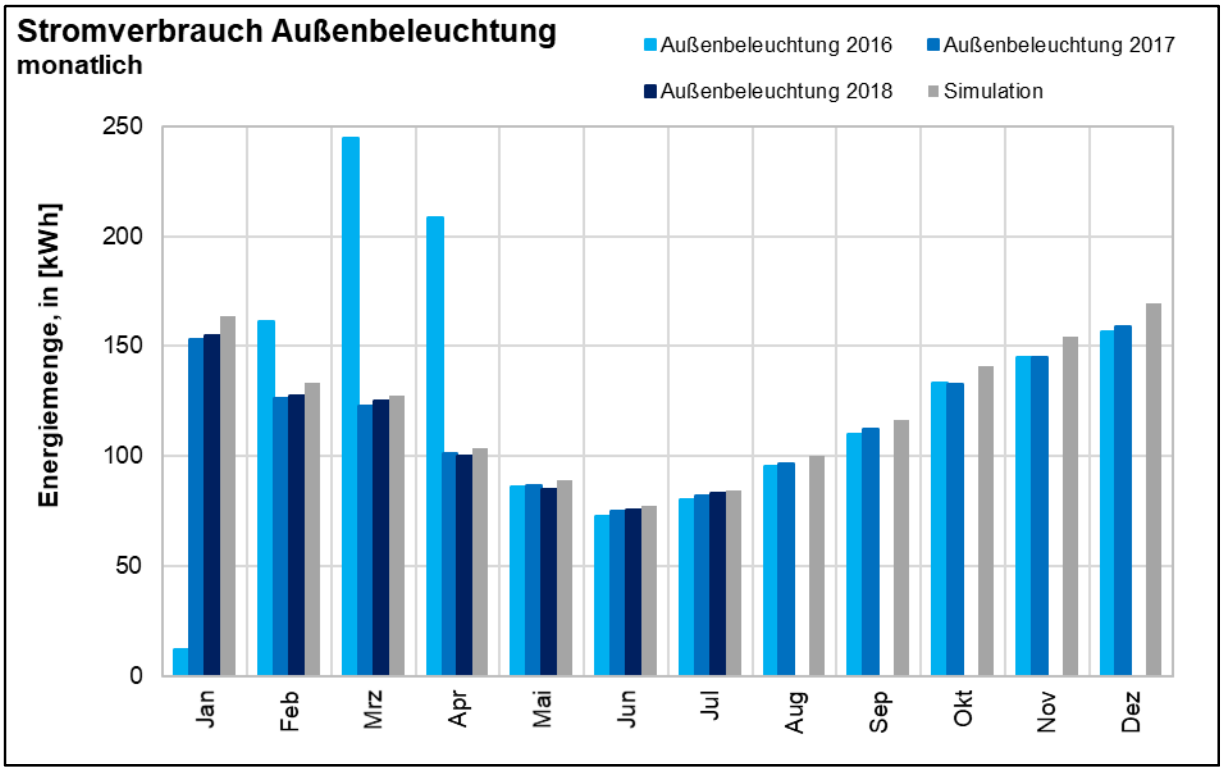

Abbildung 9-4: Stromverbrauch Außenbeleuchtung im Jahr 2016 und 2017

Für das Jahr 2017 sind die Messdaten komplett vorhanden. In diesem Zeitraum wurde ein Stromverbrauch von 1393 kWh gemessen (im Jahr 2016 unkorrigiert 1507 kWh). Aus den Monatswerten lässt sich eine deutliche jahreszeitliche Abhängigkeit ablesen. Während der Verbrauch im Juni 2017 bei 75 kWh/Monat lag, war er im Dezember 2017 mit im Mittel 159 kWh/Monat mehr als doppelt so hoch. Die Leistung lag im Jahresmittel bei 159 W, das Maximum trat mit 328 W auf.

Auffallend ist der sehr ähnliche Verlauf ab Mai 2016 bis Juli 2018 sowie die hohe Übereinstimmung mit der Simulation (graue Balken) auf Basis der korrigierten EXCEL-Tabelle, siehe Abbildung 9-4. Insbesondere in der helleren Jahreszeit sind die Werte fast deckungsgleich, lediglich im Winter liegt die Prognose etwas über den Messwerten.

Die Abhängigkeit der gemessenen Stromstärke der Außenbeleuchtung von der Globalstrahlung, welche von der Wetterstation erfasst wurde, stellt Abbildung 9-5 dar. Bei der Betrachtung der Standby-Zeiten ist ein Sockel von ca. 0,1 A entsprechend 23 W erkennbar.

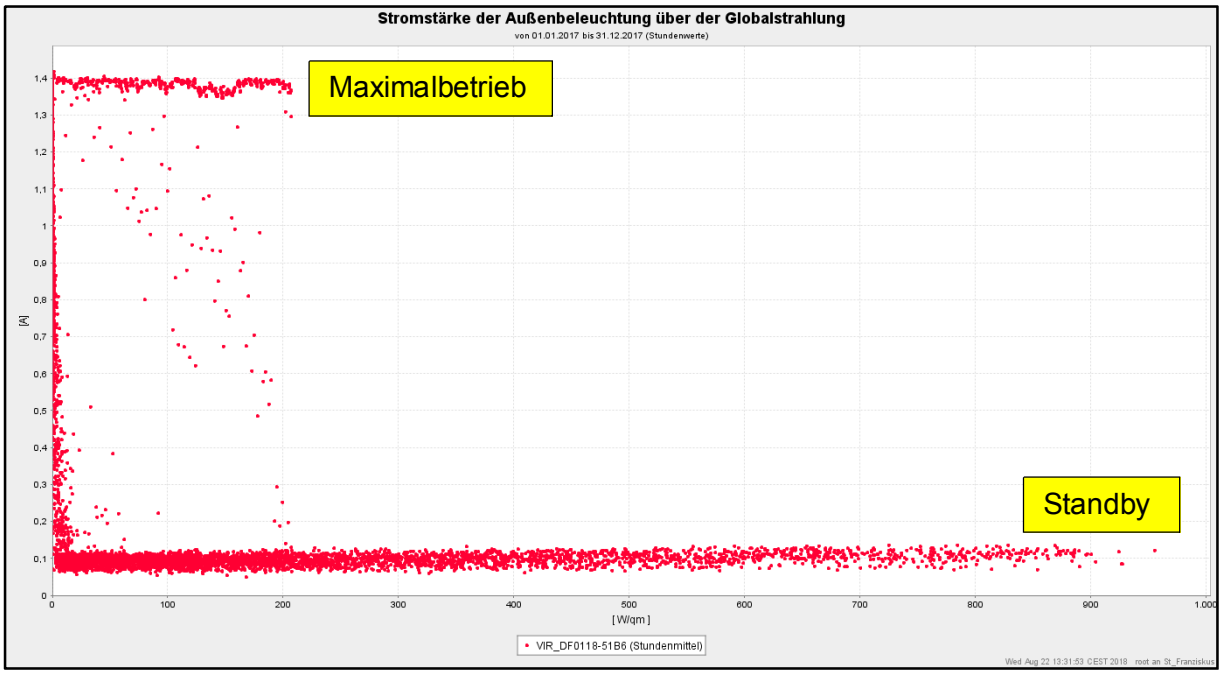

Abbildung 9-5: Stromstärke der Außenbeleuchtung über der Globalstrahlung, Jahr 2017

Abbildung 9-6 zeigt einen Zeitraumvergleich für den 21.12.2016 (kürzester Tag des Jahres), den 21.06.2017 (längster Tag des Jahres) sowie den 21.03. und 21.09.2017 (Tag- und Nachtgleiche).

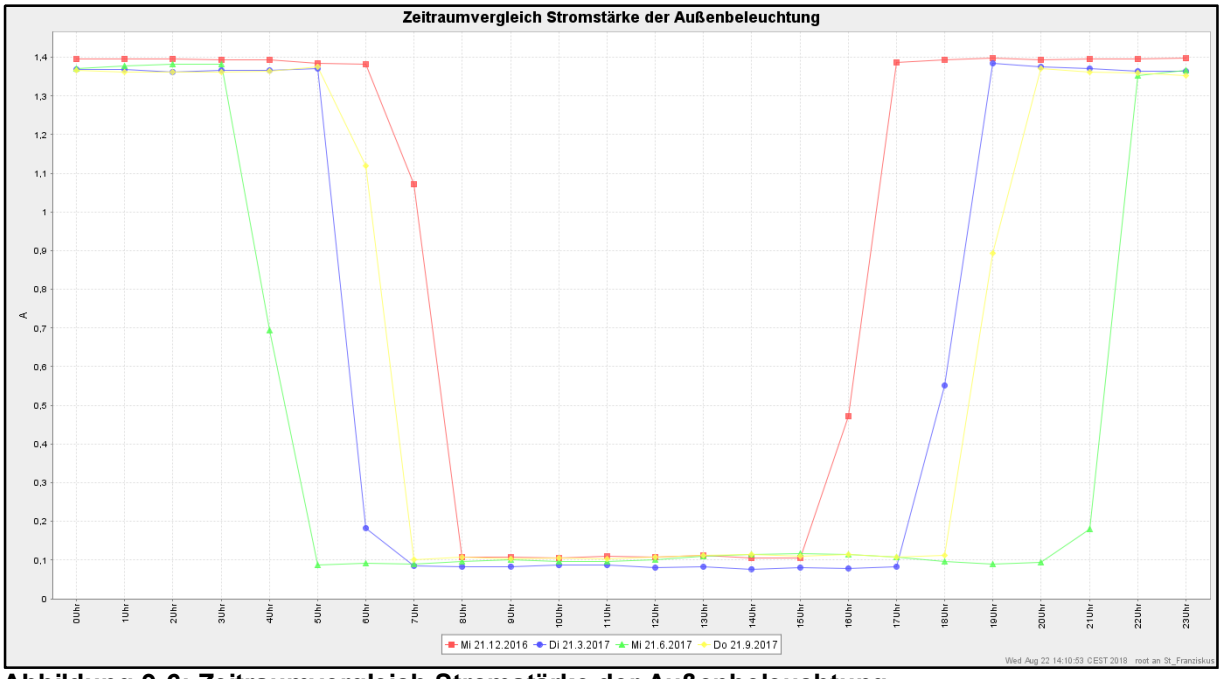

Abbildung 9-6: Zeitraumvergleich Stromstärke der Außenbeleuchtung

Während die Außenbeleuchtung am 21.12.2016 nur von 8 bis ca. 15 Uhr komplett ausgeschaltet blieb, konnte am 21.6.2017 von 3 bis 22 Uhr auf die Beleuchtung verzichtet werden. Der Tagesverlauf zum Frühlings- bzw. Herbstanfang ist erwartungsgemäß fast deckungsgleich, mit Ausnahme der Verschiebung durch die Zeitumstellung zwischen Sommer- und Winterzeit. Die Leuchten schalteten am 21.03.2017 gegen 6 Uhr aus und gingen gegen 18 Uhr wieder in Teilbetrieb, am 21.09.2017 geschah beides eine Stunde später.

9.6 Problemfälle und Verbesserungsansätze

Bei der Auswertung der Monitoringdaten der Außenbeleuchtung musste festgestellt werden, dass die virtuellen Zähler, welche die Stromstärkemessungen in Leistungsangaben umrechnen, fehlerhaft programmiert waren. Für die Auswertungen wurden daher die Stromstärkemessungen genutzt.

9.7 Verallgemeinerung und Fazit

Der Stromverbrauch für die Außenbeleuchtung ist mit 1393 kWh/a etwa 5 % geringer als in der Simulation mit 1459 kWh/a prognostiziert wurde. Während die Simulation in der dunkleren Jahreszeit etwas höhere Werte ergab, war hier ein möglicher Standby-Verbrauch nicht angesetzt worden. Beides gleicht sich in etwa aus.

Da es sich um sehr sparsame Leuchten handelt und der Anteil der Außenbeleuchtung am Gesamtstromverbrauch der Schule vergleichsweise gering ist, wird kein Optimierungsbedarf gesehen.

10 Anhang

10.1 Literatur

[1] AIB GmbH, *Planungsunterlagen,* Bautzen: Architekten Ingenieure Bautzen, 2013.

[2] Ausschuss für Arbeitsstätten (ASTA), „Technische Regeln für Arbeitsstätten ASR A3.4 – Beleuchtung," April 2011. [Online]. Available: https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/ASR/pdf/ASR-A3-4.pdf?__blob=publicationFile&v=2. [Zugriff am 2018].

[3] J. Benn, „Masterarbeit "Optimierung der Verschattungs- und Beleuchtungsanlagen für eine Passivhausschule"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2017.

[4] DIN EN 12464-1, *Beleuchtung von Arbeitsstätten,* Berlin: Beuth, 2003.

[5] I. Asmussen, „Masterarbeit „Energetische Bewertung der Beleuchtung in einer Passivhausschule"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2015.

[6] DIAL GmbH, *DIALux evo 5.0,* Lüdenscheid: DIAL GmbH, 2015.

[7] Tecnolight, „www.tecnolight.de," Tecnolight Leuchten GmbH, 2014. [Online]. Available: http://tecnolight.de/pages/german/index.htm. [Zugriff am 02 Juli 2014].

[8] Trilux, „www.trilux.de," Trilux GmbH & Co. KG, 2014. [Online]. Available: www.trilux.com. [Zugriff am 02 Juli 2014].

[9] DIN V 18599, *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung;,* 2016.

[10] DIN 5034-5, *Tageslicht in Innenräumen,* Berlin: Beuth, 1993.

[11] M. Wamsganß und M. Oetzel, „EnOB:Monitor Leitfaden "Tageslichtnutzung in Gebäuden - Anleitung zu Lichtmessungen"," Universität Karlsruhe, Fachgebiet Bauphysik und technischer Ausbau | Universität Dortmund, Fachbereich Bauwesen, Karlsruhe/Dortmund, 2009.

[12] DIN 5035-6, *Beleuchtung mit künstlichem Licht – Messung und Bewertung,* Berlin: Beuth, 2006.

[13] Heilmann Software IT GmbH und Fraunhofer IBP, *IBP:18599 HighEnd,* Schwieberdingen: Heilmann Software - Gesellschaft für Informationstechnologie mbH, 2014.

[14] K. Muschalla, „Masterarbeit "Energiebilanzierung mit verschiedenen Energiebilanzverfahren für eine Passivhausschule"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2018.

[15] DIN EN 12464-2, *Licht und Beleuchtung - Arbeitsplätze im Freien,* Berlin: Beuth Verlag, 2003.

[16] F. Hallensleben, „Masterarbeit "Nutzerorientierte und witterungsbedingte Simulationen sowie die Erstellung einer Strombilanz am Neubau der Sankt Franziskus Grundschule in Halle (Saale)"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2014.

10.2 Nomenklatur

Tabelle 10-1: Abkürzungen

Kürzel	Erläuterung
ASR	Technische Regeln für Arbeitsstätten, Arbeitsstättenrichtlinien
cd	Candela (Einheit der Lichtstärke)
cd/m²	Candela je Quadratmeter (Einheit der Leuchtdichte)
CFL	Kompaktleuchtstofflampe
CO_2	Kohlenstoffdioxid
d	Tag
d. J.	des Jahres
DIN	Deutsches Institut für Normung; deutsche Norm
DIN V	Deutsches Institut für Normung; deutsche Vornorm
DN	engl. Diameter Nominal, Nennweite (von Rohren etc.)
DWD	Deutscher Wetterdienst
EG	Erdgeschoss
EN	Europäische Norm
EnBau	(Forschung für) Energieoptimiertes Bauen im Neubau
EnEV	Energieeinsparverordnung (Jahr 2009)
EnOB	(Forschung für) Energieoptimiertes Bauen
EnSan	(Forschung für) Energieoptimiertes Bauen in der Sanierung
EVG	elektronisches Vorschaltgerät
HT	Hochtarif
i. H. v.	in Höhe von
IREES	Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien, Karlsruhe
ISO	International Standardisation Organisation; internationale Norm
k. A.	keine Angabe
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
kWp	Kilowattpeak
LED	Lichtemittierende Diode (Light emitting diode)
LFL	stabförmige Leuchtstofflampe
lm	Lumen (Einheit des Lichtstroms)
LVK	Lichtverteilungskurve
lx	Lux (Einheit der Beleuchtungsstärke)
m	Meter
m²	Quadratmeter
m³	Kubikmeter
M-Bus	Meter-Bus: Feldbus für die Verbrauchsdatenerfassung
NT	Niedertarif
OG	Obergeschoss
PHI	Passivhaus Institut Darmstadt
PHPP	Passivhaus Projektierungspaket
PV	Photovoltaik
RLT	Raumlufttechnik
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
v.l.n.r.	von links nach rechts
W	Watt
Wh	Wattstunde
Ws	Wattsekunde

Tabelle 10-2: Lateinische Formelzeichen

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
A	Fläche	m²
A_{EB}	Energiebezugsfläche	m²
A_N	Nutzfläche nach Energieeinsparverordnung	m²
D	Tageslichtquotient	%
E	Beleuchtungsstärke	lx
$E_{außen}$	Beleuchtungsstärke im Außenbereich	lx
E_{innen}	Beleuchtungsstärke im Innenbereich	lx
$\bar{E}_m$	mittlere Beleuchtungsstärke	lx
f	Frequenz	Hz
f_P	Primärenergiefaktor	-
g	Energiedurchlassgrad (von Fenstern)	-
I	Lichtstärke	cd
L	Leuchtdichte	cd/m²
P	elektrische Leistung	W
$P_{Leuchtmittel}$	Leistung des vorhandenen Leuchtmittels	W
P_{max}	maximale Anschlussleistung der Leuchte	W
Q	Energiemenge	kWh/a
q	Energiemenge, flächenbezogen	kWh/(m²a)
R_a	Farbwiedergabe	-
U_0 oder g	Gleichmäßigkeit	-

Tabelle 10-3: Griechische Formelzeichen

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
Δ	Differenz	verschieden
η	Lichtausbeute	lm/W
ϑ	Temperatur	°C, K
ρ	Reflexionsfaktor	-
Φ	Lichtstrom	lm

10.3 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1-1: Ergebnisdarstellung Klasse 1.08 mit silbernen Jalousien raumseits 7
Abbildung 1-2: L1 Trilux Valuco Active im Klassenzimmer 8
Abbildung 1-3: Bedienung Klassenraumbeleuchtung und Jalousien 9
Abbildung 1-4: 3D-Diagramm Tageslichtverteilung Klassenraum 1.08 [3] 10
Abbildung 1-5: Tagesverläufe im Sommer; Links: bewölkt, Rechts: sonnig 11
Abbildung 1-6: Beleuchtungsleistung an Schultagen 7-15 Uhr, Klassenräume 1.08 und 2.01....12
Abbildung 1-7: Stromverbrauch Außenbeleuchtung im Jahr 2016 und 2017 13
Abbildung 2-1: Links: silber-reflektierende Oberfläche innen, Rechts: schwarze Oberfläche innen....15
Abbildung 2-2: Rendering des Klassenraums 2.01 aus DIALux evo 5.0....16
Abbildung 2-3: Ergebnisdarstellung Klasse 1.08 mit silbernen Jalousien raumseits 17
Abbildung 2-4: Ergebnisdarstellung Klasse 1.08 mit schwarzen Jalousien raumseits....17
Abbildung 2-5: Ergebnisdarstellung Klasse 2.01 mit silbernen Jalousien raumseits 18
Abbildung 2-6: Ergebnisdarstellung Klasse 2.01 mit schwarzen Jalousien raumseits....18
Abbildung 2-7: Ergebnisdarstellung WC Mädchen 1.10 19
Abbildung 2-8: Ergebnisdarstellung Flurabschnitt 19
Abbildung 3-1: Installationsplan Beleuchtung EG Gebäudeteil B (Hort) [1]....21
Abbildung 3-2: Installationsplan Beleuchtung EG Gebäudeteil A (Aula und Küche) [1]....21
Abbildung 3-3: Installationsplan Beleuchtung 1. OG Gebäudeteil B (Klassen) [1]....22
Abbildung 3-4: Installationsplan Beleuchtung 1.OG Gebäudeteil A (Aula und Verwaltung) [1]....22
Abbildung 3-5: Installationsplan Beleuchtung 2. OG Gebäudeteil B (Klassen) [1]....23
Abbildung 3-6: Installationsplan Beleuchtung 2.OG Gebäudeteil A (Fachunterrichtsräume) [1]....23
Abbildung 3-7: L1 Trilux Valuco Active 25
Abbildung 3-8: Links: L2 Tecnolight FA 748 [7]; Rechts: L10 Trilux 5041 RMV [8]....25
Abbildung 3-9: L14 – Trilux Valuco D im Kunstraum 25
Abbildung 3-10: L8.1 Tecnolight DA 500 mm....26
Abbildung 3-11: Bedienung Aulabeleuchtung und Jalousien....26

Abbildung 3-12: Links: L4 Trilux Inperla LED; Rechts: RZB Flat Polymero Kreis 27
Abbildung 3-13: v.l.n.r. L3 Tecnolight DE 321 [7], L5 Trilux 7132/58 [8], L12 Trilux 6651 [8] 27
Abbildung 3-14: v.l.n.r. Beleuchtung Raum der Stille 28
Abbildung 3-15: v.l.n.r. L9 Trilux 3623 RMV, L15 Trilux Aragon im Raum 0.18 28
Abbildung 3-16: Links: Blick in Fensterkasten mit hochgefahrener Jalousie, Rechts: Raum 2.07 mit defekter Jalousie 29
Abbildung 3-17: Kunstraum 2.14, v.l.n.r. silber innen, 45 °, 90°, 45°, schwarz innen 29
Abbildung 3-18: Pfosten-Riegel-Fassade Aula von innen 30
Abbildung 3-19: Pfosten-Riegel-Fassade Aula von außen mit einer defekten Jalousie 30
Abbildung 3-20: Eingang mit geschlossenen Jalousetten, rechts mit Solar- und Aulafassade 31
Abbildung 3-21: Links: Kastenfenster mit gekipptem Außenflügel, Rechts: Detail der Jalousie 31
Abbildung 4-1: Präsenzmelder in Klassenraum 1.07 33
Abbildung 4-2: diffuse Raumbeleuchtung minimal (links) und maximal (Mitte), rechts: kombiniert 34
Abbildung 4-3: diffuse Raumbeleuchtung minimal (links) und maximal (rechts) 34
Abbildung 4-4: Arbeitsplatzbeleuchtung minimal (links) und maximal (rechts) 34
Abbildung 4-5: v.l.n.r.: nur Raumbeleuchtung, nur Arbeitsplatzbeleuchtung, kombiniert 34
Abbildung 4-6: Bedienung Klassenraumbeleuchtung und Jalousien 35
Abbildung 5-1: Messungen im Außenbereich 38
Abbildung 5-2: Aula mit üblicher Bestuhlung als Speisesaal 38
Abbildung 5-3: Installationsplan Aula [1], Links: Luftraum 1. OG, Rechts: EG unter Galerie 39
Abbildung 5-4: Messraster Aula [3] 39
Abbildung 5-5: Aula am Tag der Beleuchtungsmessung [3] 40
Abbildung 5-6: Aula nach Anbringen der Markierungen für die Messung 40
Abbildung 5-7: Klassenraum 1.08 am Tag der Messung, hinten: Morgenkreis und PC-Tische [3] 41
Abbildung 5-8: Installationsplan Klassenraum 1.08 [1] 41
Abbildung 5-9: Messraster Klassenraum 1.08 [3] 42
Abbildung 5-10: Installationsplan Klassenraum 2.01 [1] 42
Abbildung 5-11: Messraster Klassenraum 2.01 [3] 43
Abbildung 5-12: Installationsplan Flur 1.OG [1] 43
Abbildung 5-13: Messraster Flur 1. OG [3] 43
Abbildung 5-14: Messung im Flur 1. OG [3] 44
Abbildung 5-15: Messraster WC Mädchen EG [3] 44
Abbildung 5-16: 3D-Diagramm Tageslichtverteilung Aula [3] 45
Abbildung 5-17: Klassenraum 1.08, Unterrichtsbereich und Pinnwände als Raumteiler [3] 47
Abbildung 5-18: 3D-Diagramm Tageslichtverteilung Klassenraum 1.08 [3] 48
Abbildung 5-19: 3D-Diagramm Tageslichtverteilung Klassenraum 2.01 [3] 49
Abbildung 5-20: 3D-Diagramm Kunstlichtverteilung Aula [3] 51
Abbildung 5-21: 3D-Diagramm Kunstlichtverteilung Klassenraum 1.08 – Variante 1 [3] 53
Abbildung 5-22: 3D-Diagramm Kunstlichtverteilung Klassenraum 1.08 – Variante 2 [3] 54
Abbildung 5-23: 3D-Diagramm Kunstlichtverteilung Klassenraum 1.08 – Variante 3 [3] 56
Abbildung 5-24: 3D-Diagramm Kunstlichtverteilung Klassenraum 2.01 – Variante 4 (silber-reflektierende Lamellen innen) [3] 57
Abbildung 5-25: 3D-Diagramm Kunstlichtverteilung Klassenraum 2.01 – Variante 5 (schwarze Lamellen innen) [3] 57
Abbildung 5-26: Klassenraum 2.01, Blick vom Morgenkreis Richtung Unterrichtsbereich 58
Abbildung 5-27: Flur im 1. OG, rechts: Festverglasungen 59
Abbildung 5-28: 3D-Diagramm Kunstlichtverteilung Flur [3] 60
Abbildung 5-29: 3D-Diagramm Kunstlichtverteilung WC Mädchen [3] 62
Abbildung 5-30: Abgleich zur Simulation Klasse 1.08 mit silbernen Jalousien raumseits 63
Abbildung 5-31: Ergebnisdarstellung Flurabschnitt 64
Abbildung 5-32: Kunstlichtmessung im Flur 1. OG 64
Abbildung 6-1: Messung der Scheinleistung S bei ausgeschalteter Beleuchtung 68
Abbildung 6-2: Fehlerkorrektur der Messwerte für Beleuchtung 68
Abbildung 6-3: Tagesverläufe im Frühling; Links: bewölkt, Rechts: sonnig 69
Abbildung 6-4: Tagesverläufe im Sommer; Links: bewölkt, Rechts: sonnig 70
Abbildung 6-5: Tagesverläufe im Herbst; Links: bewölkt, Rechts: sonnig 70
Abbildung 6-6: Tagesverläufe im Winter; Links: bewölkt, Rechts: sonnig 71
Abbildung 6-7: Wochenverlauf im Frühling 71
Abbildung 6-8: Wochenverlauf im Sommer 72
Abbildung 6-9: Wochenverlauf im Herbst 73
Abbildung 6-10: Wochenverlauf im Winter 74
Abbildung 6-11: Beleuchtungsleistung, Klassenräume 1.08 und 2.01 75

Abbildung 6-12: Beleuchtungsleistung an Schultagen 7-15 Uhr, Klassenräume 1.08 und 2.01.....75
Abbildung 6-13: Beleuchtungsleistung an Schultagen in den Klassenräumen 1.08 und 2.01.....76
Abbildung 6-14: Klassenraum 1.07 mit heruntergefahrenen Jalousien in waagerechter Stellung.....78
Abbildung 6-15: Klassenraum 2.07, Links: schwarz außen, Rechts: silber außen 78
Abbildung 8-1: Stromverbrauch Beleuchtung Klassenraum 1.08 und 2.01 im Vergleich 84
Abbildung 8-2: Stromverbrauch Klassenraum 2.01 85
Abbildung 8-3: Beleuchtungsleistung in Abhängigkeit von der Globalstrahlung, Klasse 2.01 85
Abbildung 8-4: Stromverbrauch Klassenraum 1.08 86
Abbildung 8-5: Beleuchtungsleistung in Abhängigkeit von der Globalstrahlung, Klasse 1.08 87
Abbildung 9-1: Außenleuchte 89
Abbildung 9-2: Parkplatz und Schule mit Außenleuchten 89
Abbildung 9-3: Zeitraumvergleich Stromstärke Außenbeleuchtung, erste Januarwoche 2017 90
Abbildung 9-4: Stromverbrauch Außenbeleuchtung im Jahr 2016 und 2017 91
Abbildung 9-5: Stromstärke der Außenbeleuchtung über der Globalstrahlung, Jahr 2017 92
Abbildung 9-6: Zeitraumvergleich Stromstärke der Außenbeleuchtung 92

Tabelle 1-1: Beleuchtungsstärken der Bereiche [1] [2].....7
Tabelle 1-2: Vergleich der Strombedarfsprognosen verschiedener Verfahren.....11
Tabelle 2-1: Beleuchtungsstärken der Bereiche [1] [2].....15
Tabelle 2-2: Ergebnisübersicht Klassenräume 1.08.....17
Tabelle 2-3: Ergebnisübersicht Klassenräume 2.01.....18
Tabelle 2-4: vertikale Beleuchtungsstärke im Türbereich der Flure 20
Tabelle 3-1: Installierte Leuchtentypen.....24
Tabelle 5-1: Klassifizierung der Tageslichtversorgung über den Tageslichtquotienten [9].....37
Tabelle 5-2: Beleuchtungsstärken Tageslichtmessung Aula [3].....45
Tabelle 5-3: Tageslichtquotienten Aula [3].....46
Tabelle 5-4: Beleuchtungsstärken Tageslichtmessung Klassenraum 1.08 [3] 47
Tabelle 5-5: Tageslichtquotient Klassenraum 1.08 [3].....48
Tabelle 5-6: Beleuchtungsstärken Tageslichtmessung Klassenraum 2.01 [3] 48
Tabelle 5-7: Tageslichtquotient Klassenraum 2.01 [3].....49
Tabelle 5-8: Beleuchtungsstärken Kunstlichtmessung Aula [3] 50
Tabelle 5-9: Gleichmäßigkeit der Aula [3].....51
Tabelle 5-10: Beleuchtungsstärken Kunstlichtmessung Klassenraum 1.08 – Variante 1 [3].....52
Tabelle 5-11: Gleichmäßigkeit Klassenraum 1.08 – Variante 1 [3] 53
Tabelle 5-12: Beleuchtungsstärken Kunstlichtmessung Klassenraum 1.08 – Variante 2 [3].....54
Tabelle 5-13: Gleichmäßigkeit Klassenraum 1.08 – Variante 2 [3] 54
Tabelle 5-14: Beleuchtungsstärken Kunstlichtmessung Klassenraum 1.08 – Variante 3 [3].....55
Tabelle 5-15: Gleichmäßigkeit Klassenraum 1.08 – Variante 3 [3] 56
Tabelle 5-16: Beleuchtungsstärken Kunstlichtmessung Klassenraum 2.01 – Variante 4 (silber-reflektierende Lamellen innen) [3] 58
Tabelle 5-17: Beleuchtungsstärken Kunstlichtmessung Klassenraum 2.01 – Variante 5 (schwarze Lamellen innen) [3] 58
Tabelle 5-18: Gleichmäßigkeit Klassenraum 2.01 – Variante 4 (silber-reflektierende Lamellen innen) [3] 59
Tabelle 5-19: Gleichmäßigkeit Klassenraum 2.01 – Variante 5 (schwarze Lamellen innen) [3].....59
Tabelle 5-20: Beleuchtungsstärken Kunstlichtmessung Flur [3] 60
Tabelle 5-21: Gleichmäßigkeit Flur [3].....61
Tabelle 5-22: Beleuchtungsstärken Kunstlichtmessung WC Mädchen [3] 61
Tabelle 5-23: Gleichmäßigkeit WC Mädchen [3].....62
Tabelle 5-24: Übersicht der Messergebnisse.....62
Tabelle 6-1: Messpunkte bezüglich Innenbeleuchtung.....67
Tabelle 6-2: Kontrollmessung Wirkleistung und Scheinleistung.....68
Tabelle 7-1: Ingenieurmäßige Abschätzung des Strombedarfs nach Nutzungsart.....81
Tabelle 7-2: Stromverbrauch Beleuchtung in den Klassenräumen 82
Tabelle 7-3: Vergleich der Strombedarfsprognosen verschiedener Verfahren.....82
Tabelle 8-1: Stromverbrauch der Klassenräume 1.08 und 2.01.....83
Tabelle 9-1: Messpunkte bezüglich Außenbeleuchtung 91
Tabelle 10-1: Abkürzungen 96
Tabelle 10-2: Lateinische Formelzeichen 97
Tabelle 10-3: Griechische Formelzeichen.....97
Tabelle 10-4: Planer, Ausführende, Projektbeteiligte 100

10.4 Verantwortliche Planer und Ausführende

Tabelle 10-4: Planer, Ausführende, Projektbeteiligte

Kurz	ausführliche Angabe	Gewerk/Verantwortlichkeit
HOLLENBACH	Sachverständigenbüro Herr Hollenbach Karlstraße 14 39261 Zerbst	Projektsteuerer
STEINBLOCK	Steinblock Architekten GmbH Herr Tietze Porsestraße 19 39104 Magdeburg	Architektur
AIB	AIB GmbH Architekten Ingenieure Bautzen Herr Medack, Herr Hoffmann Liselotte-Herrmann-Str. 4 02625 Bautzen	Elektrotechnik, Planer
GLASBAU	Holz-Glasbaugesellschaft mbH Herr Engelage, Herr Hoffrogge Seumestraße 124 04249 Leipzig	Fenster und Außentüren, Ausführung
SCHMIDT	Elektro-Schmidt GmbH Herr Schmidt Kreisstr. 57 06449 Aschersleben/ OT Mehringen	Elektrotechnik, Ausführung

10.5 Überblick über separate Anhänge

A Simulation
B Tageslicht- und Kunstlichtmessung
C Technische Daten der Komponenten
D Bedarfsprognose
E Pläne