

## Konzept und Erfahrungen vom Laborpraktikum Messen und Berechnen realer Raumbelichtung

Johannes Ledig<sup>1,2</sup>, Eicke Janas<sup>2</sup>, Andreas Waag<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38115 Braunschweig

<sup>2</sup> Institut für Halbleitertechnik, TU Braunschweig, Hans-Sommer-Str. 66, 38106 Braunschweig

In einem 2016 an der TU Braunschweig eingeführten Laborpraktikum „Raumbelichtung“ wird in Kleingruppen die reale Beleuchtungssituation von Räumen und Verkehrsflächen der TU Braunschweig mittels Handrechnung, Simulation und Messung diskutiert. Dabei werden wesentliche Elemente der ‚Gamification‘ aufgegriffen: die Studierenden aus dem Master-Studiengang Elektrotechnik nehmen eine Perspektive als Gutachter/in ein, mit dem Ziel, Ihre Bewertung der diskutierten Beleuchtungssituation als Poster zu präsentieren.

Durch sequenzielle Teilziele, siehe Abbildung 1, werden im Sinne der ‚Cascading Information‘ Inhalte der parallel laufenden Vorlesung und Übung Lichttechnik 1 aufgegriffen und angewendet sowie in Kolloquien mit Tutoren besprochen.

Die diskutierten Beleuchtungssysteme sowie ihre eigenen Ergebnisse stellen sich die Studierenden abschließend in einem Info-Markt im jeweils diskutierten Raum gegenseitig vor.



Abbildung 1: Übersicht der in der Kleingruppe zu bearbeitenden Teilaufgaben.

Dieser Beitrag erläutert die Elemente und Ziele der Veranstaltung sowie Erfahrungen aus der Durchführung. Beispielhaft werden Ergebnisse einer Gruppe vorgestellt.

### Ausgangssituation

Im Modul Lichttechnik 1 (Vorlesung und Übung) der TU Braunschweig werden neben Lampen und lichttechnischen Größen auch Leuchten und Gütekriterien von Beleuchtungssystemen behandelt. Insbesondere die Übung geht seit einigen Jahren vertieft auf die Handrechnung (Punktbeleuchtung, Direktanteil, Wirkungsgradverfahren) und Simulation von Raumbelichtung mittels Raytracing ein, siehe Abbildung 2. als Anschauungsbeispiel wurde dabei auch ein einfaches Beleuchtungsstärkemessgerät eingesetzt.

Aufgrund der positiven Rückmeldungen innerhalb der Studierendengemeinschaft hat die Studierendenzahl in der Veranstaltung Lichttechnik in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen. Um einen fachspezifischen Austausch zwischen Studierenden zu fördern und den Praxisbezug zu vertiefen wurde 2015 in Bezug auf das Diskussionspapier „Gute Lehre an der TU Braunschweig“ ein Laborpraktikum entworfen. Der Schwerpunkt des Laborpraktikums liegt in der fachlichen Arbeit im Team (Kleingruppen) und der praktischen

Anwendung theoretischer Kenntnisse aus der Vorlesung und Übung. Für die Ausarbeitung, Erprobung und erstmalige Durchführung des Laborpraktikums sowie die Anschaffung benötigter Hilfsmittel (Werkzeuge) wurde eine Förderung durch Sachmittel und Personalkosten aus dem teach4TU Innovationsprogramm „Gute Lehre“ beantragt und bewilligt.



Abbildung 2: Rendering aus der Simulation einer Übungsaufgabe „Konferenzraum“.

### **Veranstaltungsort**

Das Laborpraktikum wird in einem PC-Pool des Gauß-IT-Zentrum der TU Braunschweig durchgeführt. Dort steht den Studierenden auch außerhalb der Präsenzzeit die zur Bearbeitung der Teilaufgaben eingesetzte Anwendersoftware (DIALux evo 6, LDT Editor, Analyse- und Darstellungsprogramm Origin, PowerPoint) sowie das Lernmanagementsystem Stud.IP zur Verfügung. Insbesondere wurde im PC-Pool zu Semesterbeginn jeweils (bisher jährlich aktualisiert) die aktuelle Version der Simulationssoftware DIALux evo installiert.

### **Raumauswahl**

Die Raumauswahl erfolgt durch die Kleingruppe. Für eine Verifikation der Berechnungs- und Messergebnisse zueinander sind dabei insbesondere die Kenntnis von Modell und Version der eingebauten Leuchten sowie deren Leuchtendaten (Datenblätter, Lichtstärkeverteilungskurven, Modell der Leuchte zur Simulation mit DIALux) notwendig. Um den Studierenden eine Anregung zur Auswahl zu geben, wurde ein Katalog geeigneter Räume mit modernen Beleuchtungssystemen und unterschiedlicher Sehaufgabe/Tätigkeit zusammengestellt. Damit eine Bearbeitung (Raumerfassung, Messung der Beleuchtungsstärke) auch in zukünftigen Durchläufen des Laborpraktikums möglich ist sollten die Räume zur TU Braunschweig gehören und für Studierende vorzugsweise frei zugänglich sein.

In den ersten zwei Durchläufen des Laborpraktikums wurden von den Kleingruppen insgesamt acht Räume bzw. Verkehrsflächen der TU Braunschweig mit unterschiedlichen Leuchten diskutiert und präsentiert:

- **Seminarraum HS66.3** im Hochhaus der Elektrotechnik (zweiflammige T5-Spiegelrasterleuchten mit Tast-Dimmer nachgerüstet)
- **Flur** im Hochhaus der Elektrotechnik (nach Brandschutzsanierung mit LED Panel Deckenleuchten, Präsenzmelder und LED-Notbeleuchtung ausgestattet)
- **Fahrstuhlbereich** im Hochhaus der Elektrotechnik (nach Brandschutzsanierung mit T5-Rasterleuchten, Präsenzmelder und LED-Notbeleuchtung ausgestattet)
- **Keller-Gänge** im Hochhaus der Elektrotechnik (nach Brandschutzsanierung mit LED Feuchtraum-Wannenleuchten ausgestattet)
- **Foyer** im Hochhaus der Elektrotechnik (LED-Anbauleuchten sowie LED Panel Deckenleuchten, und Präsenzmelder sowie LED-Notbeleuchtung)
- **Flur** im Altgebäude (Lichtband mit freistrahrenden T5-Lampen)
- **Teeküche** im Hochhaus der Elektrotechnik (LED Downlight Einbauleuchte)
- **Empfangsbereich** im Studierendenhaus Masch.Bau (LED Downlight Einbauleuchten)

Zudem wurden im Rahmen des Innovationsprojekts Informationen zu weiteren Beleuchtungssystemen an der TU Braunschweig für eine Bearbeitung zusammengetragen:

- Chemielabor 10. Etage im Hochhaus der Elektrotechnik (LED Einbauleuchten)
- Toiletten im Hochhaus der Elektrotechnik (LED Downlight Einbauleuchte)
- Grauraumschleuse zum Labor des epitaxy competence center (ec<sup>2</sup>) (T5-Rasterleuchten)
- Laborraum epitaxy competence center (ec<sup>2</sup>) (mehrfammige T5-Spiegelrasterleuchten)

Für die beiden zuletzt genannten Räume liegen auch Unterlagen der ursprünglichen Beleuchtungsplanung aus der Bauplanung vor. Über die enthaltene Lampe sind in den Angaben zu den LED-Leuchten üblicherweise keine Details (Spektrum, Technologie) enthalten, daher wurde der relative Verlauf der spektralen Leistungsdichte mit vorhandenen Messgeräten durch die Tutoren bestimmt und von den Studierenden auf dem Poster eingebunden.

Als ungeeignete eigene Ideen der Teilnehmenden erwiesen sich dagegen ein Serverraum des Gauß-IT-Zentrums am Standort Mendelssohnstr. (Spiegelrasterleuchten), der Neubau der Universitätsbibliothek (Rasterleuchten und Downlights mit Kompaktleuchtstofflampen), das Lehrstudio (Raum PK4.111 im Altgebäude, T8-Designleuchten) sowie ein Seminarraum (alte Lamellenrasterleuchten), da jeweils die Leuchtenbezeichnung bzw. Leuchtendaten nicht verfügbar waren.

### **Werkzeuge zur Raumerfassung**

Zur Erfassung der tatsächlichen lichttechnischen Eigenschaften der Räume wurden im Rahmen des Innovationsprogramms Werkzeuge (Messgeräte, Farbkarten) angeschafft, siehe Abbildung 3, welche die Studierenden nach Absprache auch außerhalb der betreuten Termine selbständig nutzen können. Die Werkzeuge werden in einem

Transportkoffer aus Aluminium mit Taschen und passenden Aussparungen in der Schaumstoffeinlage aufbewahrt. Für die Dokumentation der Werkzeugnutzung und -übergabe wurde eine Inventar- und Unterschriftenliste erstellt.



**Abbildung 3: Foto der bei der Raumerfassung verwendeten Werkzeuge: Beleuchtungsstärke-Messgerät der Klasse C gemäß DIN 5032-7:2017-02 (mittig) mit Leuchtdichteausatz (oben), Laserentfernungsmesser (links) und zwei RAL-Farbfächern.**

Für die detaillierte Modellierung des Beleuchtungssystems werden Farbe und Reflexionsgrad der Raumelemente (Wände, Boden, Einrichtung) durch einen relativen visuellen Vergleich mit Farbkarten zweier RAL-Farbfächer (RAL K7 und RAL K5) abgeschätzt. Die Verspiegelung der Oberflächen wird dabei auf übliche Werte des jeweiligen Materials (z.B. matte Wandfarbe, polierter Waschbeton, lackiertes oder poliertes Metall) gesetzt. Zur näherungsweisen Modellierung detailreicher Elemente (z.B. technische Anlagen, Anschlagtafeln, Gestaltungselemente) mittels Textur nutzen Studierende typischerweise die Digitalkamera ihres Smartphones und binden in der Simulation ein passend beschnittenes Foto als Textur ein.

Zur Erfassung der Raumgeometrie sowie der Leuchtenanordnung und zum qualifizierten Auffinden von Punkten im gewählten Raster für die Beleuchtungsstärkemessung stehen ein Laserentfernungsmesser und ein Meterstab zur Verfügung. In mehreren Räumen bot sich eine Wahl des Messrasters in ganzzahligen Abmaß von Raumelementen (Fliesen oder Deckenraster) als praktische Vereinfachung an.



**Abbildung 4: Fotos von der Raumerfassung sowie Modellierung (rechts) des Beleuchtungssystems eines Seminarraumes der TU Braunschweig durch eine Kleigruppe im Sommersemester 2016.**

## **Lichttechnische Messung**

Nach der Simulation des Beleuchtungssystems entwirft die Kleingruppe unter Berücksichtigung der Norm DIN 5035-6 sowie Erkenntnissen aus der Simulation (Beleuchtungssärkeverteilung und Leuchtenanordnung) ein Messraster.

Zur Bestimmung der Beleuchtungsstärke wird ein Beleuchtungsstärkemessgerät der Klasse C gemäß DIN 5032-7:2017-02 (Typ Gossen Mavolux 5032 C USB) mit USB-Anschluss eingesetzt, welches sich für Orientierungsmessungen eignet. Durch Nutzung der digitalen Schnittstelle werden potentielle Übertragungsfehler gegenüber der händischen Aufzeichnung einer größeren Anzahl von Messpunkten minimiert. Erfahrungen zeigen jedoch, dass bei guter Koordination innerhalb der Gruppe die direkte EDV-Erfassung durch Zuruf und Eintragen der abgelesenen Werte an die passende Koordinate praktikabler als ein späterer Abgleich der Speicherindizes ist.

Für Beispielmessungen steht für das Beleuchtungsstärkemessgerät auch ein Aufsatz (inkl. Adapterscheibe für Aufsatzmessungen an selbstleuchtenden Flächen) zum Bestimmen der Leuchtdichte zur Verfügung, z.B. zur prinzipiellen Diskussion von Blendung.

## **Lernmanagementsystem**

In dem Laborpraktikum wird auch das Campus- und Lernmanagementsystems Stud.IP der TU Braunschweig aktiv eingebunden. Die Stud.IP-Veranstaltung zum Innovationsprojekt enthält im Einzelnen:

- Grunddaten sowie eine detaillierte Beschreibung des Laborpraktikums
- Information zum Innovationsprogramm Gute Lehre
- Ablaufplan mit Terminen und Themen der Kolloquien
- Wiki mit einer Liste der Messgeräte sowie Eckdaten der vorgeschlagenen Räume
- Downloads:
  - Anleitungen zu den Messgeräten
  - Übungsaufgaben für die Einarbeitung in DIALux evo (Aufgabenstellung sowie Grundriss und Leuchtendaten)
  - Leuchtendaten der vorgeschlagenen Beleuchtungssysteme (Katalog)
  - Origin-Projekt als Vorlage für die Darstellung der Messergebnisse
  - Vorlage für das Poster zum Infomarkt mit Beispiel für die inhaltliche Struktur

Zudem gibt es für jede Gruppe einen geschlossenen Stud.IP-Ordner, in welchem die Dokumentation der Übungs-/Hausaufgabe sowie die gewonnenen Daten und Ergebnisse (Messung, Simulation, Auswertung) und das gestaltete Poster abgelegt werden. Die im Rahmen der Bearbeitung benötigte Normen (insbesondere DIN EN 12464 und DIN 5035) sind über die Universitätsbibliothek zugänglich.

## **Auswertung der Ergebnisse**

Durch die detaillierte Modellierung der Räume und deren Einrichtung entstehen in der Simulation jeweils ausgesprochen fotorealistische Darstellungen (Rendering von Ansichten) des Beleuchtungssystems, siehe Abbildung 5.

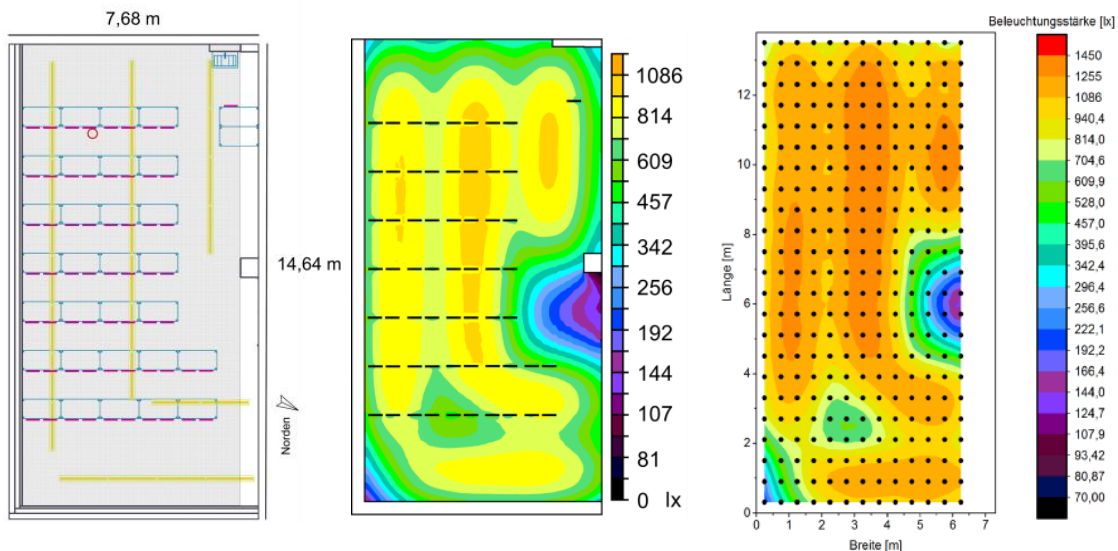




**Abbildung 5: Foto und Rendering (aus der Simulation) des Seminarraumes. [1]**

Die durch Kleingruppen ermittelten Ergebnisse (Handrechnung, Simulation, Messung) liegen durchweg um ein vielfaches höher als die tätigkeitsbezogene Anforderung an den Wartungswert der mittleren Beleuchtungsstärke. Dagegen ist die Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke je nach Dimensionierung des Tätigkeitsbereiches (ggf. Ausschluss einer Randzone an Wänden) nicht immer ausreichend erfüllt. Die Ergebnisse der Messungen lagen jeweils deutlich oberhalb der Simulationsergebnisse, weisen jedoch jeweils eine ähnliche relative Verteilung auf, siehe Abbildung 6.

In den meisten Beleuchtungssystemen konnte dieses weitgehend mit einer geringeren Alterung (Wartungswert vs. Neuwert des Beleuchtungssystems) erklärt werden, zudem wurde bei der Raumerfassung bereits der tatsächliche Reflektionsgrad (Farbe nach Alterung) der Oberflächen abgeschätzt. Verbleibende Abweichungen sind nicht in der „Orientierungsmessung“, sondern vermutlich in vom Hersteller gegenüber der tatsächlichen Eigenschaften etwas konservativ (mit zu geringen lichttechnischen Werten) angegebene Leuchtendaten begründet.



**Abbildung 6: Grundriss des Seminarraums mit Einrichtung und Leuchtenposition sowie Beleuchtungsstärkeverteilungen aus der Simulation (Wartungswert) und Messung. [1]**

Aus den Simulationsergebnissen kann zudem der Raumwirkungsgrad  $\eta_R$  und mit DIALux evo 6 auch der Direktanteil  $\eta_{Dir}$  des Leuchtenlichtstroms auf der Nutzebene ermittelt werden. Im Gegensatz zur Abschätzung mittels Raumindex  $k$  und Leuchtendaten bzw.

Tabelle können  $\eta_{Dir}$  und  $\eta_R$  somit auch für komplexe Raumgeometrien und unter Berücksichtigung der tatsächlichen Leuchtenanordnung bestimmt werden.

### **Evaluation und Verbesserungen**

Positiv ist der konstruktive Austausch beim gegenseitigen Präsentieren der eigenen Ergebnisse im Infomarkt aufgefallen. Nach jeder Station wurde mittels Klebepunkten auf einer zweidimensionalen Skala eine Einschätzung zur 1) Präsentation und 2) Raumauswahl gesammelt welche durchweg positiv ist. Nach jedem Semester wird über das Lernmanagementsystem Stud.IP zudem eine anonyme Online-Evaluation mit Fragen zu inhaltlichen Aspekten durchgeführt. Rückmeldungen daraus wurden mit den Tutoren diskutiert und sind als Verbesserung in die Veranstaltung eingeflossen.

Aus der Evaluation ergab sich zudem auch seitens der Studierenden die Empfehlung, die Kleingruppen jeweils auf zwei bis drei Personen zu beschränken.

Für die Studierenden waren das Visualisieren der Messwerte (im Analyse- und Darstellungsprogramm Origin) und das Erstellen der Poster eine Herausforderung, insbesondere da die Studierenden damit bisher überwiegend keine Erfahrung hatten. Zudem war zwischenzeitlich nicht allen Studierenden klar, welche der Teilergebnisse dafür relevant sind. Daher wurde die Vorlage für das Poster überarbeitet und ein Vorschlag für die inhaltliche Aufteilung entsprechend der Teilaufgaben angelegt. Ebenso wurde ein Origin-Projekt mit Kurzanleitung als Vorlage erstellt, um mit geringerem Aufwand ein Konturdiagramm inkl. Farbpalette ähnlich dem von DIALux evo zu erzeugen. Durch eine einheitliche Farbskalierung von simulierten und gemessenen Beleuchtungsstärkeverteilung wird ein intuitiver visueller Vergleich der absoluten Ergebnisse auf dem Poster unterstützt.

Die Einführung in die Simulationssoftware findet seit dem Sommersemester 2016 nicht wie bisher in der Übung Lichttechnik, sondern detaillierter in den ersten zwei Terminen des Laborpraktikums statt. Interessierte aus dem Modul Lichttechnik sind dabei ebenfalls willkommen - aufgrund der stark gestiegenen Teilnehmerzahl im Modul Lichttechnik (Vorlesung & Übung) wurden dort die Methoden zur Handrechnung vertieft und die Simulation der Übungsaufgaben nur beispielhaft vorgestellt.

Das Laborpraktikum wird zukünftig an einem wöchentlichen Termin am späten Nachmittag (ab 17:00 Uhr) angeboten um die Messungen der Beleuchtungsstärke ohne direkte Sonneneinstrahlung auch überwiegend innerhalb bzw. direkt im Anschluss an die reguläre Präsenzzeit zu ermöglichen.

Das im ersten Durchlauf genutzte Stud.IP-Modul DoIT (Erfassung und Bewertung des Bearbeitungsfortschritts) erwies sich als nicht zweckmäßig. Bei einer geringen Anzahl von Gruppen entsteht bereits bei der Beobachtung bzw. Betreuung der Kleingruppenarbeit ein guter Eindruck über den Lernprozess und Bearbeitungsstand (formatives Assessment) und dem zusätzlichen Aufwand zum Einstellen und Beurteilen der Ergebnisse stand kein signifikanter Mehrwert gegenüber.

## Präsentation des Laborpraktikums

Im Rahmen der Förderung durch das Innovationsprogramm ist das Konzept am InnoBrunch 2015 sowie am Tag der Lehre 2016 [2] und dem teach4 TU Magazin [3] der TU Braunschweig vorgestellt und in einem Workshop zur Nachhaltigkeit in der Lehre diskutiert worden. Insbesondere wurde in diesem Workshop auch eine SWOT-Analyse erstellt, welche in die weitere Vorbereitung der Lehrveranstaltung eingeflossen ist.

Das verbesserte Konzept und die Teilaufgaben des Labropraktikums wurden zudem in einem „Follow-Up-Treffen“ des Innovationsprojekts im Rahmen des Seminars im Institut für Halbleitertechnik detailliert vorgestellt und diskutiert.

Mit den Messgeräten des Laborpraktikums und in der Übung Lichttechnik verwendeten Lampen wurde im Seminarraum des Instituts für Halbleitertechnik eine Vitrine gestaltet, siehe Abbildung 7, dadurch sind die Elemente für die praktische Bearbeitung für Besucher des Instituts sichtbar. Die Poster vom Tag der Lehre sowie der TU Night (Spektren-Quiz) sind, ebenso wie eine Kollage der Poster vom Info-Markt, direkt daneben ausgehängt.



**Abbildung 7: Fotos der Vitrine mit Lampen und Werkzeugen im Institut für Halbleitertechnik.**

Die Poster der Kleingruppen (aus der Präsentation im Infomarkt) werden in Absprache mit den Autoren über das Semester hinaus im jeweils diskutierten Raum bzw. dem Seminarraum ausgehängt. Durch die unmittelbare Nähe zu dem diskutierten Beleuchtungssystem wird der praktische Bezug des Labors deutlich und die Teilnehmenden können dieses bei Gelegenheit auch ihren Kommilitonen erläutern.

## Zusammenfassung

Das Laborpraktikum ergänzt und verfestigt gelerntes Wissen und das Verständnis für Beleuchtungsfragen bei den Studierenden. Durch die Bearbeitung und die Präsentation wird die Anwendung erlernter Inhalte und die Erläuterung eigener Ergebnisse gegenüber Dritten trainiert. Eine Verifikation der Berechnungsergebnisse durch den Vergleich mit der realen Beleuchtungsstärke schafft einen klaren Bezug zwischen Theorie und Praxis, zudem erfolgt die Modellierung der Berechnung (Approximieren der Raumeigenschaften) nach einer Begehung der Räume durch die Studierenden intuitiver als bei einer virtuellen Aufgabe.



Die gefundene relative Verteilung der Ergebnisse aus Simulation und Messung ist zueinander jeweils konsistent, absolute Abweichungen der mittleren Werte konnten weitgehend mit Hinblick auf eine geringe Alterung (Wartungswert nicht erreicht) erklärt werden. Verbleibende Abweichungen zum Neuwert können auch im Hinblick auf die „Orientierungsmessung“ überwiegend den angenommenen Raumeigenschaften und Leuchtendaten zugeschrieben werden.

Das Innovationsprogramm „Gute Lehre“ hat mit der Förderung dieses Innovationsprojekts erfolgreich die Konzeption, Ausarbeitung und Erprobung einer neuen, innovativen Lehrveranstaltung ermöglicht. Es wurden wie angestrebt ein Katalog geeigneter Räume der TU Braunschweig mit notwendigen Eckdaten (Leuchtendaten, Raumeigenschaften) erstellt und Werkzeuge (Messgeräte, Farbkarten) für die praktische Bearbeitung der Aufgabe durch Studierende angeschafft.

Die Veranstaltung wurde im Jahr 2016 mit einem Zeitumfang von zwei Semesterwochenstunden (28 Stunden Präsenzzeit, 32 Stunden Selbststudium) im Modulhandbuch des Master-Studiengangs Elektrotechnik der TU Braunschweig aufgenommen und somit wie durch die Förderung angestrebt durch Aufnahme in das Curriculum verstetigt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das Projekt vom Institut als außerordentlich erfolgreich eingeschätzt wird. Das Lehrangebot des Instituts wurde praxisorientiert und attraktiv erweitert, was von den Studierenden sicher sehr gerne angenommen wird. Da sich die Lehrinhalte an die zentrale Forschungsrichtung des Instituts für Halbleitertechnik (LED-Technologie) anlehnen, ist der erhebliche getätigte Aufwand zum Aufbau der Veranstaltung auch gerechtfertigt.

Das Prinzip der Cascading Information zwischen der Veranstaltung Lichttechnik (Vorlesung und Übung) und dem im selben Semester durchgeführten Laborpraktikum hat in den ersten zwei Durchläufen gut funktioniert und wird weiterhin fortgeführt.

#### **Förderhinweis:**

Die Ausarbeitung, Erprobung und erstmalige Durchführung des Laborpraktikums sowie Anschaffung benötigter Werkzeuge (Messgeräte, Farbkarten) wurde als Lehrprojekt im Rahmen des Innovationsprogramms Gute Lehre der TU Braunschweig aus dem BMBF-Projekt teach4TU unter dem Förderkennzeichen 01PL12043 gefördert.

#### **Referenzen:**

- [1] A. Dreyer, J. Messmer, and P. Wenzel, „Seminarraum HS 66.3,“ *Laborpraktikum Raumbelichtung, TU Braunschweig*. p. 1, 2016.
- [2] J. Ledig and A. Waag, „Messen und Berechnen realer Raumbelichtung (Laborpraktikum),“ *Tag der Lehre*. Braunschweig, 2016.
- [3] J. Ledig, „Innovationsprojekt Gute Lehre: Messen und Berechnen realer Raumbelichtung,“ *Teach4TU-Magazin Sommersemester 2016*, pp. 28–29, 2016.