

UNIVERSITÄT BREMEN
Fachbereich 3 - Informatik
Arbeitsgruppe Multisensorische Interaktive Systeme

Bachelorarbeit

**Auslegung und Realisierung einer Fernsehstudio-
Beleuchtungsanlage auf RGB-LED-Basis**

vorgelegt von

David Weigel

Studiengang:	Systems Engineering
Matrikelnummer:	2479368
Erstgutachter	Prof. Dr.-Ing. Udo Frese
Zweitgutachter	Dipl.-Inf. Frederic Pollmann

Inhalt

1 EINLEITUNG.....	1
1.1 MOTIVATION.....	1
1.2 ZIEL DER ARBEIT.....	2
1.3 AUFBAU DER ARBEIT.....	2
2 GRUNDLAGEN.....	4
2.1 LICHTTECHNIK.....	4
2.1.1 <i>Photometrische Größen</i>	4
2.1.1.1 Spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges.....	4
2.1.1.2 Lichtstrom.....	5
2.1.1.3 Lichtstärke.....	6
2.1.1.4 Beleuchtungsstärke.....	7
2.1.1.5 Leuchtdichte.....	8
2.1.1.6 Stoffkennzahlen.....	9
2.1.2 <i>Farbmetrik</i>	9
2.1.2.1 Farbtemperatur.....	11
2.1.2.2 Farbwiedergabeindex.....	11
2.2 FILM- UND FERNSEHBELEUCHTUNG.....	11
2.2.1 <i>Führungslicht</i>	11
2.2.2 <i>Aufhelllicht</i>	12
2.2.3 <i>Spitzlicht</i>	12
2.3 LEUCHTDIODEN.....	12
2.3.1 <i>RGB-LEDs</i>	13
2.3.2 <i>Weißer LEDs</i>	13
2.3.3 <i>Stand der Technik: Studiobeleuchtung mit LEDs</i>	14
3 BESTANDSAUFNAHME.....	15
3.1 STUDIO.....	15
3.1.1 <i>Produktionstechnik</i>	15
3.1.2 <i>Geometrie des Studios</i>	17
3.1.3 <i>Anwendungsfall News</i>	20
3.1.4 <i>Anwendungsfall Film</i>	21
3.2 BELEUCHTUNGSANLAGE B1.....	21
3.2.1 <i>Halogen-Scheinwerfer</i>	22
3.2.2 <i>LED-Leuchte</i>	24
3.2.3 <i>Bewertung</i>	25
3.3 BELEUCHTUNGSANLAGE B2.....	27
3.3.1 <i>Leuchtmittel</i>	27
3.3.2 <i>Anordnung</i>	30
3.3.3 <i>Steuerung</i>	31
3.3.4 <i>Bewertung</i>	32
3.4 ANFORDERUNGEN AN B3.....	33
4 MESSUNG DER LICHTSTÄRKEVERTEILUNG DES LED-MODULS WS2812.....	34
4.1 VERSUCHSMATERIAL.....	34
4.2 VERSUCHSAUFBAU.....	34
4.3 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG.....	36

4.4	MESSERGEBNISSE.....	37
4.5	AUSWERTUNG.....	39
5	SIMULATION.....	41
5.1	SOFTWARE.....	41
5.2	MODELL DES RAUMES.....	43
5.3	MODELL DER BELEUCHTUNGSANLAGE B2.....	44
5.4	VERIFIKATION DER ERGEBNISSE.....	46
6	UNTERSUCHUNGEN.....	49
6.1	KONZEPT 1.....	49
6.1.1	<i>Idee</i>	49
6.1.2	<i>Vorgehensweise</i>	49
6.1.3	<i>Auswertung</i>	50
6.2	KONZEPT 2.....	52
6.2.1	<i>Idee</i>	52
6.2.2	<i>Vorgehensweise</i>	52
6.2.3	<i>Auswertung</i>	53
6.3	KONZEPT 3.....	54
6.3.1	<i>Idee</i>	54
6.3.2	<i>Vorgehensweise</i>	55
6.3.3	<i>Auswertung</i>	56
6.4	KONZEPT 4.....	57
6.4.1	<i>Idee</i>	57
6.4.2	<i>Vorgehensweise</i>	57
6.4.3	<i>Auswertung</i>	58
6.5	BEWERTUNG.....	59
7	REALISIERUNG.....	61
7.1	KOMPONENTENAUSWAHL.....	61
7.1.1	<i>LED-Streifen</i>	61
7.1.2	<i>Netzteil</i>	61
7.1.3	<i>Dimmer</i>	62
7.1.4	<i>Leitungen</i>	63
7.1.5	<i>Kosten</i>	64
7.2	INBETRIEBNAHME.....	64
7.2.1	<i>Einzelkomponenten</i>	64
7.2.2	<i>Systemtest</i>	66
7.3	INTEGRATION DER KOMPONENTEN IN DAS STUDIO.....	69
7.4	BEWERTUNG.....	72
8	FAZIT UND AUSBLICK.....	75
9	ANHANG.....	I
10	QUELLENVERZEICHNIS.....	II

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1.1: Campus TV Studio zu Beginn der Arbeit.....	2
Abbildung 2.1: $V(\lambda)$ -Kurven.....	5
Abbildung 2.2: CIE-Normfarbtafel.....	10
Abbildung 2.3: Platzierung des Führungslichts.....	12
Abbildung 2.4: Platzierung des Spitzlichts.....	12
Abbildung 2.5: Typisches Emmisionsspektrum von blauen, grünen und roten LEDs.....	13
Abbildung 2.6: Spektrale Verteilung des Lichts für die neutralweiße (4000 K) LED Samsung LM561A.....	14
Abbildung 3.1: Raum des Campus TV Projekts im Grundriss.....	17
Abbildung 3.2: 3D-Modell des Green-Screen-Aufbaus.....	18
Abbildung 3.3: Green-Screen-Bereich des Studios (Grundriss).....	19
Abbildung 3.4: Green-Screen (Vorderansicht).....	19
Abbildung 3.5: Eine typische Dialogszene mit virtuellem Hintergrund.....	20
Abbildung 3.6: Aluminium-Parabolspiegel-Scheinwerfer ARRILight 800.....	23
Abbildung 3.7: LED-Leuchte TP-LONI-D50.....	24
Abbildung 3.8: Stationäre Beleuchtungsanlage mit RGB-LED-Streifen.....	27
Abbildung 3.9: RGB-LED-Modul WS2812.....	28
Abbildung 3.10: Kaskadierung der RGB-LED-Module.....	29
Abbildung 3.11: Kommunikationsprotokoll der RGB-LED-Module.....	29
Abbildung 3.12: Anordnung der RGB-LED-Streifen im Raum (Grundriss).....	30
Abbildung 3.13: Bediener-Schnittstelle der Steuerung.....	32
Abbildung 4.1: Versuchsaufbau zur Messung der Lichtverteilung.....	35
Abbildung 4.2: LED-Modul mit Versorgungsleitung auf Kamera-Adapter montiert.....	35
Abbildung 4.3: Spektrum-Antwort der Photodiode mit Filter des HT309.....	36
Abbildung 4.4: Verwendetes Koordinatensystem.....	39
Abbildung 4.5: Lichtstärkeverteilungskurven des LED-Moduls.....	45
Abbildung 5.2: Messpunkte zur Verifikation der Simulation im Grundriss.....	46
Abbildung 6.1: 4 mal 1200 LEDs vom Typ WS2812.....	51
Abbildung 6.2: 8 mal 1200 LEDs vom Typ WS2812.....	51
Abbildung 6.3: Beleuchtungsstärkeverteilung mit 1200 weißen LEDs.....	53
Abbildung 6.4: Isolux-Diagramm des Green-Screens.....	54
Abbildung 6.5: Querstreifen zur Ausleuchtung des Green-Screens.....	55
Abbildung 6.6: Messpunkte auf dem Green-Screen.....	56
Abbildung 6.7: Vertikaler Verlauf der Beleuchtungsstärke mit und ohne zusätzliche Streifen zur Hintergrundbeleuchtung.....	57
Abbildung 6.8: Weiße LED-Streifen, 60 cm vom Green-Screen entfernt.....	58
Abbildung 6.9: Vertikaler Verlauf der Beleuchtungsstärke mit Hauptbeleuchtung in kleinem und großem Abstand.....	59
Abbildung 7.1: Alle Komponenten im Systemtest.....	68
Abbildung 7.2: Beleuchtungsanlage B3.....	70
Abbildung 7.3: Bediener-Schnittstelle der Steuerung von B3.....	71
Abbildung 7.4: Von B3 beleuchteter Aufnahmebereich.....	72

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2.1: Beispiele für Beleuchtungsstärken nach DIN EN 12464.....	8
Tabelle 3.1: Technische Daten der Halogen-Scheinwerfer.....	23
Tabelle 3.2 Technische Daten der LED-Leuchte.....	25
Tabelle 4.1 Gemessene Beleuchtungsstärken.....	39
Tabelle 5.1 Für die Simulation genutzte Oberflächenmaterialien.....	44
Tabelle 5.2 Vergleich der simulierten und gemessenen Beleuchtungsstärken.....	48
Tabelle 7.1 Bruttopreise der eingesetzten Komponenten.....	64
Tabelle 7.2 Am Eingang der Dimmer gemessene Spannung.....	67
Tabelle 7.3 Vergleich der in Konzept 4 simulierten Beleuchtungsstärken.....	73
Tabelle 7.4 Gemessene Beleuchtungsstärke des Green-Screens in Lux.....	74

1 Einleitung

1.1 Motivation

An der Universität Bremen gibt es das Projekt Campus TV, in dem Studierende des Fachbereichs Kulturwissenschaften im Rahmen verschiedener Veranstaltungen Techniken der Film- und Fernsehproduktion kennenlernen und praktisch anwenden können. Aber auch Studierende anderer Studiengänge haben die Möglichkeit, ihre Mitarbeit bei Campus TV als General-Studies-Leistung in ihr Studium einzubringen. Die dabei produzierten Inhalte werden der Öffentlichkeit über die Internetpräsenz des Projekts zur Verfügung gestellt. [Uni2014]

Zur Infrastruktur von Campus TV gehört unter anderem auch ein kleines Greenscreen-Studio. In diesem werden Videoaufnahmen von Personen und anderen Objekten vor einem grünen Hintergrund gemacht. Dieser kann mit Hilfe einer Bearbeitungssoftware durch beliebiges Bildmaterial ersetzt werden, was große kreative Freiheit bietet.

Sowohl für die Aufnahme bewegter als auch unbewegter Bilder mit Kameras ist die Beleuchtung der Szene unter technischen und gestalterischen Gesichtspunkten von großer Bedeutung. In dem betrachteten Studio kam dafür bisher eine Kombination aus Zimmerbeleuchtung sowie Halogen- und LED-Strahlern zum Einsatz.

Im Zuge einer Erweiterung des Nutzerkreises des Studios sollten die kompliziert handhabbaren Geräte durch eine stationäre Beleuchtungsanlage ersetzt werden. Eine erste Initiative bestand in dem Aufbau eines Systems auf Basis von Leuchtdioden-Streifen, deren Licht in Helligkeit und Farbe geregelt werden kann. Die Implementierung weist Unzulänglichkeiten auf, die ihren Nutzwert erheblich verringern. Dazu gehören vor allem die zu niedrige Beleuchtungsstärke und die benutzerunfreundliche Bedienung.

Mit dieser Arbeit soll ein Beitrag zur Verbesserung des bestehenden Systems geleistet werden.



Abbildung 1.1: Campus TV Studio zu Beginn der Arbeit. Kameras und Scheinwerfer sind auf den Green-Screen im Hintergrund gerichtet. Darüber sind die LED-Streifen der stationären Beleuchtungsanlage zu sehen.

1.2 Ziel der Arbeit

Das Ziel der Arbeit ist die Auslegung und Realisierung einer Beleuchtungsanlage für ein semi-professionelles Fernsehstudio. Dabei wird untersucht, inwiefern sich (RGB)-LEDs als Leuchtmittel für diesen Zweck eignen.

Aufbauend auf einer bestehenden Anlage und den Anforderungen ihrer Nutzer wird dazu mit Hilfe einer Computer-Simulation ein Konzept erstellt, dass mit begrenzten finanziellen Mitteln realisiert werden soll.

1.3 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in acht Kapitel. Im folgenden Kapitel werden die theoretischen Grundlagen der Lichttechnik und der Film- und Fernsehbeleuchtung zusammengetragen.

Das darauf folgende Kapitel vollzieht eine Bestandsaufnahme des Zustands zu Beginn der Arbeit. Es werden die Eigenschaften des Studios und seine Anwendung dargestellt. Ebenso

1. Einleitung

enthält das Kapitel eine Beschreibung der dort bisher bestehenden Beleuchtungssysteme. Aus der Bestandsaufnahme heraus werden die Anforderungen an die Erweiterung der Beleuchtungsanlage gestellt.

Das vierte Kapitel beschreibt ein Experiment zur Vermessung des in der aktuellen Beleuchtungsanlage verwendeten LED-Moduls. Aus den Messdaten wird ein Modell der Lichtquelle erstellt, das in die Simulation des Ist-Zustands eingeht.

Die Beleuchtungssimulation ist Gegenstand des fünften Kapitels. Auf die Einführung der verwendeten Software DIALux folgt die Modellierung des Ist-Zustands. Dazu gehört das Modell des Studio-Raumes und der dort bestehenden Beleuchtungsanlage. Eine Verifikation der Simulationsmethode schließt dieses Kapitel ab.

Im sechsten Kapitel werden anhand der aufgebauten Simulation vier konsekutive Konzepte zur Erweiterung der Anlage untersucht.

Die praktische Umsetzung des finalen Konzepts wird im Kapitel 7 beschrieben. Anschließend wird das erzielte Ergebnis bewertet und mit dem ausgelegten Konzept verglichen.

Die Arbeit schließt mit einem Fazit im achten Kapitel.

2 Grundlagen

2.1 Lichttechnik

Die Lichttechnik ist der „Zweig der Technik, der sich mit Lichtmessung, der Erzeugung von Licht und Fragen der Beleuchtung befasst“ [Kono2010]. Die Begriffe Lichttechnik und Beleuchtungstechnik werden oft synonym gebraucht. Gleichwohl bezieht sich Beleuchtungstechnik eher auf das Arbeitsgebiet der Ingenieure, die das Wissen der Lichttechnik in der Praxis anwenden, um von Menschen genutzte Räume zu beleuchten, und auf die dort verwendeten technischen Mittel wie Lampen, Leuchten und Zubehör.

2.1.1 Photometrische Größen

Zum Treffen quantitativer Aussagen zu den verschiedenen Aspekten des Phänomens Licht sind eine Reihe von photometrischen Größen und Einheiten definiert, die direkt oder indirekt gemessen werden können.

Physikalisch gesehen ist Licht elektromagnetische Strahlung in dem Wellenlängenbereich, den der Mensch mit seinem Auge wahrnehmen kann. Er reicht von etwa 380 nm bis 780 nm. Die Verteilung der Strahlungsenergie innerhalb dieses Spektralbereiches bestimmt dabei, welcher physiologische Farb- und Helligkeitseindruck vom Menschen wahrgenommen wird.

2.1.1.1 Spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges

Viele der photometrischen Größen abstrahieren von der spektralen Verteilung des Lichts und beschreiben statt der im Licht enthaltenen Farben eine zusammenfassende Helligkeit.

Dafür werden die allgemeinen radiometrischen Größen wie zum Beispiel Strahlungsstärke und Strahlungsleistung unter Berücksichtigung der menschlichen Physiologie angepasst und Lichtstärke und Lichtstrom genannt. Den Übergang von der einen zur anderen Seite schafft die sogenannte $V(\lambda)$ -Kurve, die die spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges zeigt (siehe Abbildung 2.1).

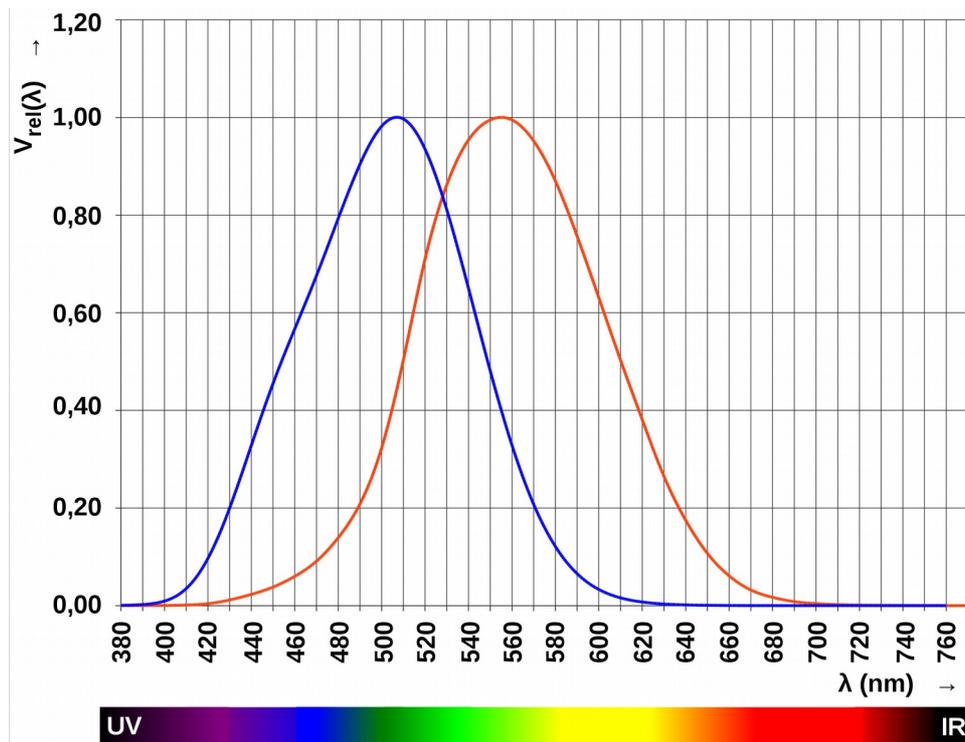


Abbildung 2.1: $V(\lambda)$ -Kurven. Die rote Kurve gilt für das helladaptierte Auge, die blaue für das dunkeladaptierte. [Hahn2010]

Das menschliche Auge empfindet nicht alle Lichtfrequenzen gleichermaßen hell. Diese Funktion gewichtet die einzelnen Frequenzen entsprechend ihrem Beitrag zur Helligkeitswahrnehmung. Sie wurde im Jahr 1924 von der Internationalen Beleuchtungskommission (*Commission Internationale de l'Éclairage*, CIE) für den sogenannten 2°-Standardbeobachter genormt. Die Norm basiert auf Versuchen mit einer Vielzahl an Versuchspersonen. Dabei wurden die Untersuchungen auf einen zentralen Ausschnitt des Gesichtsfeldes beschränkt, der einen Öffnungswinkel von 2° besitzt. Zudem besteht eine Abhängigkeit von dem Adaptionzustand des Auges. Beim Tagsehen hat das Auge eine andere spektrale Hellempfindlichkeit als beim Nachtsehen. [Baer2006, Kap. 1.2.1]

2.1.1.2 Lichtstrom

Als Lichtstrom bezeichnet man die von einer Lichtquelle in den gesamten Raum abgegebene Strahlung. Er ist nach [Baer2006, Kap. 1.2.2] definiert als

$$\Phi = K_m \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} V(\lambda) \cdot \Phi_{e\lambda} \cdot d\lambda$$

2. Grundlagen

Φ_{λ} ist der spektrale Strahlungsfluss. Das ist die auf die Wellenlänge bezogene, abgegebene elektromagnetische Strahlungsleistung. Der Strahlungsfluss gibt an, auf welcher Wellenlänge pro Zeiteinheit wie viel Energie abgegeben wird.

Dieses Spektrum wird über den sichtbaren Bereich aufintegriert und dabei mit der Hellempfindlichkeitsfunktion (vgl. Abschnitt 2.1.1.1) gewichtet.

Der Faktor K_m wandelt von Watt (W), der Einheit der Strahlungsleistung, zum Lumen (lm), der Einheit des Lichtstroms. Er wird fotometrisches Strahlungsäquivalent genannt und beträgt 683 lm/W.

Der typische Lichtstrom einer 100-W-Glühlampe ist ungefähr 1380 lm; der einer Leuchtstofflampe mit 58 W hingegen beträgt etwa 5200 lm. [Bear2006, Tab. 1.6]

2.1.1.3 Lichtstärke

Die Darstellung der folgenden Absätze folgt [Ris2003, Kap. 1.2.5].

Die Lichtstärke I ist der Quotient aus Lichtstrom in Lumen und dem Raumwinkel in Steradian (abgekürzt sr).

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

Die Einheit der Lichtstärke ist die Candela (lateinisch für Kerze). Sie ist die Grundeinheit der Beleuchtungstechnik und zugleich eine der sieben Basiseinheiten im SI-System. Damals wurden als messtechnische Referenz eine spezifizierte Brenneranordnung (Hefnerkerze, internationale Kerze) oder schmelzendes Platin verwendet. Die heutige Definition lautet „1 Candela entspricht der Strahlungsleistung von 1/683 Watt einer monochromatischen Strahlung der Frequenz von $540 \cdot 10^{12}$ Hz pro Steradian.“

Eine Vollkugel entspricht einem Raumwinkel von 12,56 sr. Eine punktförmige Lichtquelle, die einen Lichtstrom von 12,56 lm erzeugt (in etwa eine Weihnachtskerze), und diesen in alle Richtungen des Raumes gleichmäßig aussendet, tut dies dementsprechend mit einer gleichverteilten Lichtstärke von

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} = \frac{12,56 \text{ lm}}{12,56 \text{ sr}} = 1 \text{ cd}$$

Wird diese Lichtquelle in einen Scheinwerfer eingebaut, der das Licht auf einen Kegel bündelt, dessen Öffnungswinkel $7,246^\circ$ groß ist (was einer Raumwinkelabdeckung von ungefähr 1/1000 des vollen Raumwinkels entspricht), dann ändert sich die Lichtstärke in dem Kegel zu:

2. Grundlagen

$$I = \frac{\Phi}{\Omega'} = \frac{12,56 \text{ lm}}{12,56 \cdot 10^{-3} \text{ sr}} = 1000 \text{ cd}$$

Die meisten Leuchten strahlen ihr Licht aber nicht gleichmäßig in alle Richtungen ab. Deswegen muss die Lichtstärkeverteilung für jeden Raumwinkel angegeben werden, um den Strahler vollständig zu charakterisieren. Dargestellt wird diese Verteilung meist als Lichtstärkeverteilungskurve (LVK) in einem polaren Koordinatensystem (siehe auch Abbildung 4.5). Dazu wird der Raum um die Lichtquelle in einer bestimmten Schnittebene betrachtet, die durch den Mittelpunkt der Quelle läuft. Am weitesten verbreitet ist der Schnitt in zwei orthogonalen Ebenen entlang der Hauptstrahlrichtung. [Bear2006, Kap. 1.2.2.1]

Die LVK ähneln den aus der Nachrichtentechnik bekannten Antennendiagrammen. Dort wird die Verstärkung der Strahlungsintensität eingetragen, die auch Strahlungsstärke genannt wird. Sie ist das radiometrische Äquivalent zur Lichtstärke und wird in der Einheit W/sr angegeben.

Die Lichtstärke bezieht sich auf punktförmige Lichtquellen. Sie kann als Näherung auch für ausgedehnte Lichtquellen angegeben werden, gilt dann aber nur im so genannten Fernfeld, wo die fotometrische Grenzentfernung überschritten ist. Damit die Quelle als punktförmig angenommen werden kann, muss der Abstand zu ihr mindestens das zehnfache ihrer größten Ausdehnung betragen [Baer, Kap. 1.2.2.3].

2.1.1.4 Beleuchtungsstärke

Der Quotient aus Lichtstrom und der von ihm beleuchteten Fläche wird Beleuchtungsstärke E genannt [Baer2006, Kap. 1.2.2.1]. Für eine ebene Fläche gilt

$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$

Die Einheit für die Beleuchtungsstärke ist das Lux:

$$[\text{lx}] = \frac{[\text{lm}]}{[\text{m}^2]}$$

Das fotometrische Entfernungsgesetz stellt eine Verbindung zwischen der Lichtstärke einer Lampe und der Beleuchtungsstärke her:

$$E = \frac{I}{r^2}$$

Dem entsprechend nimmt die Beleuchtungsstärke einer senkrecht bestrahlten Fläche mit dem Quadrat der Entfernung ab. [Acke2006, 11.5.1]

2. Grundlagen

Die Verteilung der Beleuchtungsstärke einer ungleichmäßig beleuchteten Fläche wie z.B. einem Fußboden lässt sich auf verschiedene Arten visualisieren. Eine Möglichkeit ist das Zeichnen von Isoluxkurven, die in der betrachteten Ebene Punkte gleicher Beleuchtungsstärke verbinden. Eine dreidimensionale Darstellungsform ist das Beleuchtungsstärkengebirge, das jedem Punkt der Ebene eine Höhe proportional zur Beleuchtungsstärke zuordnet.

Das radiometrische Äquivalent zur Beleuchtungsstärke ist die Bestrahlungsstärke, die in W/m^2 angegeben wird. [Bear2006, Tab. 1.10]

Vor allem wird die Beleuchtungsstärke als Dimensionierungsgrundlage in der Innenraumbeleuchtung verwendet. Die DIN EN 12464 z.B. führt Beleuchtungsanforderungen für fast alle Tätigkeiten und Raumarten, die in Arbeitsstätten vorkommen, auf [Zies2009, Kap. 6 u. 7]. Beispiele für dort geforderte Beleuchtungsstärken sind

Raum/Tätigkeit	Beleuchtungsstärke / lx
Gießerei	300
Büro	500
Elektrotechnik, Montage von Telefonen	750
Grafische Industrie, Farbkontrolle	1500

Tabelle 2.1: Beispiele für Beleuchtungsstärken nach DIN EN 12464

In einigen Fällen kann es sinnvoll sein Beleuchtungsstärken von Flächen anzugeben, die nicht eben sind. Dabei werden Geometrien wie Zylinder, Halbzylinder, Sphären und Halbsphären in Betracht gezogen. [Ris2003, Kap. 1.2.6]

2.1.1.5 Leuchtdichte

Die Leuchtdichte L gibt in der Einheit cd/m^2 an, wieviel Licht von einer bestimmten, direkt oder indirekt leuchtenden Fläche A in eine bestimmte Richtung abgegeben wird. [Ris2003, Kap. 1.2.7]

$$L = \frac{I_\alpha}{A \cos \alpha}$$

α ist der Ausstrahlungswinkel der Lichtquelle und I_α die Lichtstärke in Richtung dieses Winkels.

Die Leuchtdichte ist die einzige für das menschliche Auge „sichtbare“ lichttechnische Größe und korrespondiert mit dem Helligkeitseindruck [Ris2003, Kap. 1.2.7].

2. Grundlagen

2.1.1.6 Stoffkennzahlen

Um Baustoffe bezüglich ihres lichttechnischen Verhaltens zu charakterisieren, gibt es entsprechende Stoffkennzahlen. In der Beleuchtungsplanung gehören der Reflexions-, Transmissions- und Absorptionsgrad zu den am meisten verwendeten lichttechnischen Kennzahlen.

Der Reflexionsgrad ist definiert als

$$\varrho = \frac{\phi_e}{\phi}$$

Diese einheitenlose Größe gibt an, welcher Anteil des auftreffendes Lichtstroms ϕ nach der Wechselwirkung mit der Materie durch Reflexion wieder an die Umgebung abgegeben wird [Baer2006, 1.2.2.2].

Dabei wird keine Aussage darüber getroffen, wie sich der reflektierte Lichtstrom ϕ_e räumlich verteilt. Zwischen gerichteter und diffuser Reflexion wird nicht unterschieden. Ebenso wenig beschreibt die Kennzahl die Farbwirkung des Stoffs, d.h. welche Anteile des Lichtspektrums stärker und welche schwächer reflektiert werden.

Diese lichttechnischen Stoffeigenschaften können z.B. durch Leuchtdichtekennzahlen und Reflexionsspektren erfasst werden. Bei den gängigen Beleuchtungsberechnungsverfahren (vgl. Kapitel 5.1) werden sie jedoch vernachlässigt. Analog zum Reflexionsgrad sind auch der Transmissionsgrad τ und der Absorptionsgrad α definiert. τ gibt den Lichtstrom-Anteil an, der durch ein Medium hindurchgeleitet wird. α ist der Anteil, der in die Materie aufgenommen wird. Wegen des Energieerhaltungssatzes gilt $\varrho + \tau + \alpha = 1$ [Baer2006, 1.2.2.2].

2.1.2 Farbmeterik

Die in Kapitel 2.1.1 beschriebenen Größen treffen keine Aussage über die farbliche Zusammensetzung des Lichts. Das ist die Aufgabe der Farbmeterik, die eindeutige Maßzahlen für einen Farbeindruck definieren soll [Baer2006, Kap. 1.2.4].

Die vollständigste Farbmeterik ist die Beschreibung der Strahlung durch ihr Spektrogramm. Bei einem solchen ist der Raum aller möglichen Farben unendlichdimensional, da jeder der unendlich vielen Wellenlängen eine der unendliche vielen möglichen Leistungsdichten zugeordnet werden kann. Die Spektroskopie findet insbesondere in der Chemie und der Astronomie Verwendung, da es eine Menge Informationen über das betrachtete Objekt transportiert.

Wird Licht für die menschliche Nutzung analysiert, genügt die Betrachtung eines dreidimensionalen Unterraums des physikalischen Farbraums. Dies ist in der Physiologie des

2. Grundlagen

menschlichen Auges begründet, da das Auge die Strahlung nach drei voneinander unabhängigen spektralen Wirkungsfunktionen bewertet, deren Einzelwirkungen sich zu einer Gesamtwirkung addieren. Deswegen genügen drei Maßzahlen X, Y, Z um jede menschliche Farbempfindung in Farbton, Helligkeit und Sättigung eindeutig anzugeben [Baer2006, Kap. 1.2.4.1]. Die Abbildung aller spektraler Verteilungen auf möglichen Farbeindrücke ist also surjektiv.

Wenn die Helligkeit außer Acht gelassen wird, reduziert sich der dreidimensionale Farbraum auf zwei Dimensionen. Dieser Ausschnitt ist in der CIE-Normfarbtafel dargestellt (siehe Abbildung 2.2).

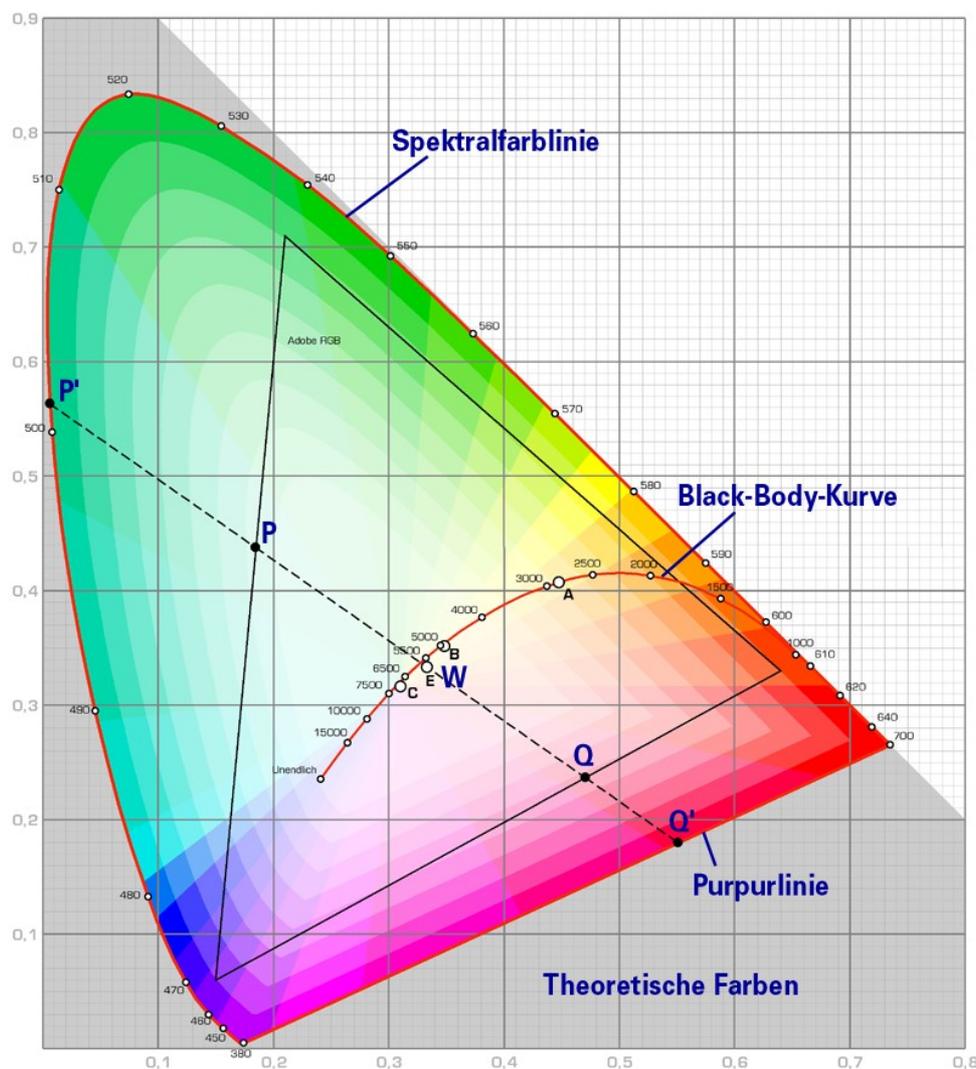


Abbildung 2.2: CIE-Normfarbtafel. Die gedruckten Farben dienen nur als Orientierung. [Ande2014]

2. Grundlagen

2.1.2.1 Farbtemperatur

Die durch ein Leuchtmittel verursachte Farbempfindung wird oft durch die Farbtemperatur T_F in der Einheit Kelvin (K) angegeben. Sie ist die Temperatur, bei der ein glühender schwarzer Strahler die gleiche Farbempfindung hervorruft, wie das untersuchte Leuchtmittel. [Baer2006, Kap. 1.2.4.1]

Im CIE-Diagramm (siehe Abbildung 2.2) verlaufen die Farben des schwarzen Strahlers auf einer Kurve von dunkelrot, über rot, orange, gelb, weiß zu hellblau. [Ris2003, Kap. 1.2.4.1]

2.1.2.2 Farbwiedergabeindex

Die photometrischen Größen aus Abschnitt 2.1.1 allein reichen nicht aus, um eine Beleuchtungseinrichtung ausreichend zu charakterisieren, da sie nur Aussagen über die Helligkeit, aber nicht über die farbliche Wirkung von Licht treffen.

Hersteller von Leuchtmitteln geben für diese selten die ganze spektrale Lichtverteilung an. In der Praxis werden häufig Farbwiedergabeindex R_a angegeben. Er gibt an, wie genau die Farbwiedergabe eines Leuchtmittels mit der einer Bezugslichtquelle übereinstimmt. Als Bezugslichtquelle wird ein schwarzer Strahler bei einer Farbtemperatur von über 5000 K verwendet [Baer2006, Kap. 1.2.4.3]. R_a wird aus den Farbdifferenzen berechnet, die bei der Beleuchtung von acht Testfarben unter beiden Lichtquellen entstehen. Der beste erreichbare Farbwiedergabeindex ist $R_a = 100$.

2.2 Film- und Fernsehbeleuchtung

Die Basis für ein optimales Fernsehbild bei einer Personenaufnahme bildet laut [Muel2008, 17.4.13] die Dreipunkt-Ausleuchtung. Optimal bedeutet in diesem Kontext, dass die Kamera zugewandte Seite der Person für die Kamera gut ausgeleuchtet ist und die Beleuchtung sich gleichzeitig an natürlichen Lichtsituationen orientiert.

Die drei Lichtquellen haben jeweils eine spezielle Funktion und Position in der Szene. Die Position wird mit Bezug auf die optische Achse zwischen der Kamera und der Person angegeben. [Muel2008, 17.4] definiert die drei notwendigen Lichter wie folgt.

2.2.1 Führungslicht

Das Führungslicht ist die Hauptlichtquelle. Es fällt idealerweise aus 45° schräg oben ein und imitiert damit das Sonnenlicht. Der Betrachter des zweidimensionalen Fernsehbildes ist auf Schatten im Gesicht der Akteure angewiesen, um Tiefeninformationen zu gewinnen. Dazu

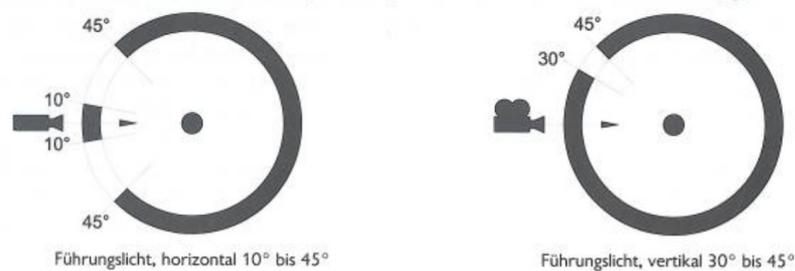


Abbildung 2.3: Platzierung des Führungslichts [Muel2008]

lässt man das Licht auch in horizontaler Richtung nicht frontal, sondern seitlich auf die Person fallen.

2.2.2 Aufhelllicht

Das Aufhelllicht hilft dabei, den vom Führungslicht erzeugten Kontrastumfang abzumildern. Da es keine zusätzlichen Schatten werfen soll, wird eine möglichst diffuse Lichtquelle verwendet. Die Platzierung entspricht der des Führungslichts (siehe Abbildung 2.3) mit einem Unterschied: Es wird auf der anderen Seite der horizontalen Achse platziert, damit auch Licht in die Schattenbereiche des Führungslichts fällt.

2.2.3 Spitzlicht

Das Spitzlicht wird oberhalb hinter der Person platziert und fällt aus einem Winkel von etwa 60° ein. Dadurch hellt es die Umrisse auf, sodass sich die Person vom Hintergrund abhebt. Beim Betrachter unterstützt dies den Eindruck räumlicher Tiefe.



Abbildung 2.4: Platzierung des Spitzlichts [Muel2008]

2.3 Leuchtdioden

Im Gegensatz zu den meisten anderen Lichtquellen erzeugen Leuchtdioden nahezu monochromatisches Licht mit hoher Farbsättigung. Um mit Leuchtdioden dennoch weißes Licht zu erzeugen gibt es zwei Ansätze.

2.3.1 RGB-LEDs

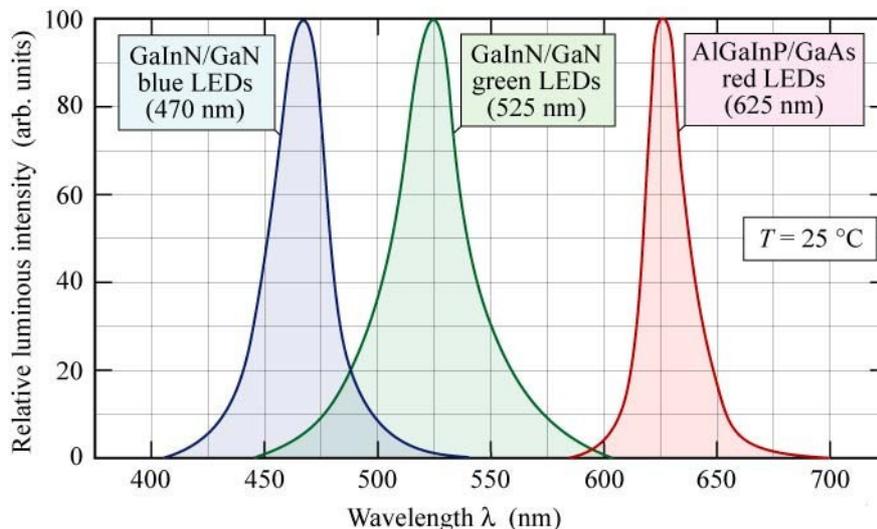


Abbildung 2.5: Typisches Emmissionspektrum von blauen, grünen und roten LEDs bei Raumtemperatur [Schu2014]

Bei RGB-LEDs werden die drei LED-Farben rot, grün und blau in einem Gehäuse miteinander kombiniert. Im richtigen Lichtstromverhältnis nimmt das menschliche Auge die Mischung dieser drei Peaks als weißen Farbeindruck wahr.

Bei der Reflektion an Objekten wird durch die Lücken im Spektrum deren Farbe aber nur schlecht wiedergegeben. Als Beispiel stelle man sich Objekt vor, das im Reflexionsspektrum nur im Intervall zwischen 575 nm und 600 nm reflektiert. Im Licht einer typischen RGB-LED (siehe Abbildung 2.5) wäre dieses Objekt quasi unsichtbar.

Erst bei der Nutzung fünf oder sechs unterschiedlicher Farben werden Farbwiedergabewerte mit $R_a > 80$ erreicht. Praktisch kommen sie allerdings nicht vor. [Baer2006, Kap. 2.2.2].

2.3.2 Weiße LEDs

Wenn es nur darauf ankommt, weißes Licht zu erzeugen, dass in seiner Farbe nicht verstellt werden können muss, wird dafür der Fluoreszenz-Effekt benutzt, der auch von Leuchtstofflampen bekannt ist. Dabei regt das Licht einer Primärfarbe Leuchtstoffe an, die es in weiteren Farben abstrahlen.

Im Fall von weißen LEDs wird das hochfrequente Licht einer blauen Leuchtdiode zur Anregung eines Leuchtstoffs verwendet, mit dem die LED beschichtet ist. Dieser strahlt in einem breiten Bereich ab. Durch Auswahl und Mischung der Leuchtstoffe, die auch Phosphore genannt werden, kann die Farbtemperatur beeinflusst werden. Mit dieser Methode wird ein Farbwiedergabeindex von $R_a = 70 \dots 90$ erreicht. [Baer2006, Kap. 2.2.2]

2. Grundlagen

Als Beispiel für eine weiße LED ist in Abbildung 2.6 das Spektrum der weißen LED zu sehen, die später in dieser Arbeit Verwendung findet. Neben dem blauen Peak ist das abgegebene Spektrum des Leuchtstoffs mit seinem Maximum im gelb-grünen Wellenlängenbereich zu sehen.

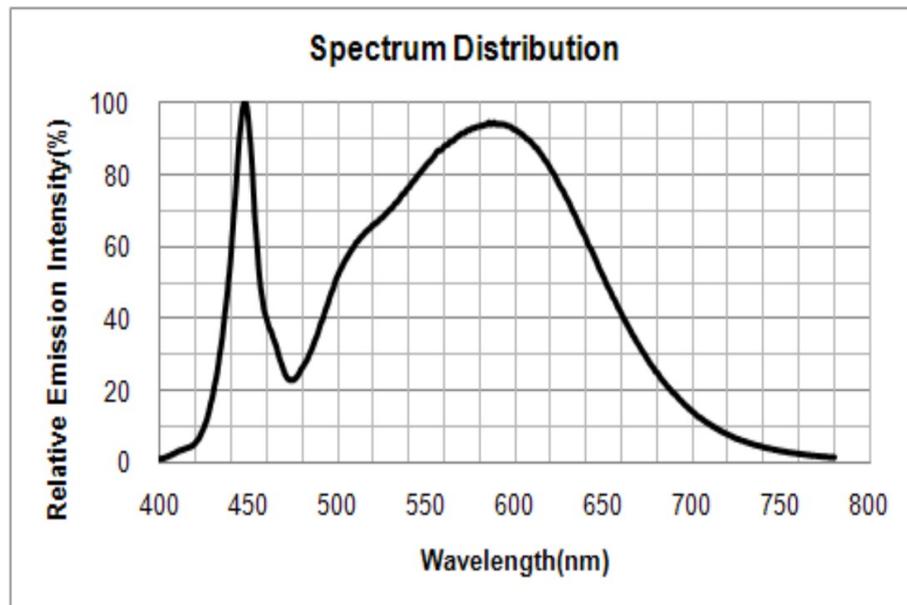


Abbildung 2.6: Spektrale Verteilung des Lichts für die neutralweiße (4000 K) LED Samsung LM561A [Sams2013]

2.3.3 Stand der Technik: Studiobeleuchtung mit LEDs

Das Halogenlicht ist seit vielen Jahren das am häufigsten eingesetzte Licht in der Bühnen und Studiobeleuchtung. Die Lichtart der Glühlampen auf Wolfram-Basis entspricht dem schwarzen Strahler und bietet ein kontinuierliches Spektrum mit guter Farbwiedergabe. [Acke2006, Kap. 7.10.1]

Auf Grund der steigenden Lichtströme verfügbarer LEDs auf dem Markt gibt es auf dem Markt seit ein paar Jahren bereits erste Studio-Leuchten auf LED-Basis. Während vor allem kleine und portable Lösungen z.B. als LED-Panel verfügbar sind, gibt es zu großen Studio-Halogen-Scheinwerfern keine LED-basierte Alternative. [Mess2013] stellt als bisher stärksten LED-Scheinwerfer ein Gerät mit 3000 Lumen vor, was lediglich Halogensysteme mit einer Leistung von maximal 250 Watt ersetzen kann.

3 Bestandsaufnahme

In diesem Kapitel werden die Gegebenheiten zusammengetragen, die nötig sind, um eine erweiterte Beleuchtungsanlage für das Campus-TV-Studio auszulegen. Dies sind einerseits die Rahmenbedingungen, die durch die Infrastruktur des Studios vorgegeben werden, und andererseits die zwei bereits bestehenden Beleuchtungssysteme B1 und B2.

B1 besteht aus klassischen Halogen-Scheinwerfern, die durch eine LED-Leuchte ergänzt wird. B2 ist eine stationäre Beleuchtungsanlage, die für das Studio entwickelt wurde, um B2 abzulösen. Der wesentliche Mangel von B2 besteht in ihrer unzureichenden Helligkeit.

Aufbauend auf den Erfahrungen aus der Nutzung von B1 und B2, sowie der Berücksichtigung der Anwendungsfälle werden Anforderungen an die neue Beleuchtungsanlage B3 formuliert, die B2 erweitern soll und im Rahmen dieser Arbeit ausgelegt wird.

3.1 Studio

Ein Fernsehstudio wird im Wesentlichen von innen nach außen geplant. Zuerst muss bekannt sein, was sich im Studio abspielen soll, danach folgt die Auswahl von passenden Geräten in der richtigen Anzahl. Idealerweise wird erst zuletzt entschieden, welche Räumlichkeiten bezogen werden. [Acke2006, Kap. 5.7]

In dieser Arbeit wird nicht ein Studio von Grund auf neu geplant, sondern die Beleuchtungsanlage eines bestehenden TV-Studios erweitert. Deshalb werden an dieser Stelle die Produktionstechnik und der Studioraum, in dem sie angewendet wird, dargestellt. Desweiteren beschreiben zwei typische Anwendungsfälle des Studios die Anforderungen der Nutzer.

3.1.1 Produktionstechnik

In dem Studio des Campus-TV-Projekts (siehe Abbildung 1.1) werden Videos mit der Chroma-Key-Technik produziert.

Das Bild wird mit zwei gleichen HD-Videokameras (Sony HDR-FX7e) aufgenommen. Diese sind mit einem 1/4"-CMOS-Sensor und einem 20-fach-Zoomobjektiv mit einer Brennweite von 3,9 – 78 mm ausgestattet. Die Kameras sind über FireWire-Verbindungen mit einer Workstation verbunden, zu der die Aufnahmen in Echtzeit übertragen werden. Dort kann das Material zur späteren Bearbeitung gespeichert oder bei einer Live-Sendung direkt ins Internet gestreamed werden. Dafür kommt die Software Wirecast [Tele2014] zum Einsatz.

3. Bestandsaufnahme

Neben dem Abmischen und Kombinieren unterschiedlicher angeschlossener Video- und Audioquellen implementiert sie auch die Keying-Funktion. Mit dieser kann der Hintergrund, vor dem eine Szene spielt, aus dem Videobild „ausgestanzt“ werden [Acke2006, Kap. 5.6.2]. Das Programm ersetzt GPU-beschleunigt das Bild des Hintergrundes durch ein anderes, stehendes oder bewegtes Bild [Tele2014]. Im Effekt erscheinen die Personen und Objekte der ursprünglichen Szene also vor einem neuen, virtuellen Hintergrund.

Dieses mächtige gestalterische Mittel wird z.B. häufig bei Nachrichtensendungen eingesetzt, um Bildmaterial einzubinden, das die sprachlichen Mitteilungen des Moderators unterstützen soll, die flexibel mit einem professionell wirkenden Hintergrund versehen werden, ohne dass physischer Aufwand für dessen Aufbau entsteht.

Bei digitalen Keying muss der Computer anhand eines Kriteriums für jeden Pixel entscheiden, ob er zum Vordergrund oder Hintergrund gehört. Dies ist beim Chroma-Keying eine Schlüsselfarbe, die der Pixel unter einer gewissen Tolleranz annehmen muss, um als Hintergrund gewertet zu werden. Man unterscheidet entsprechend der verwendeten Hintergrundfarbe zwischen Blue-Screen- und Green-Screen.

Im Campus-TV-Studio findet sich ein fest installierter Green-Screen-Hintergrund (vgl. Abschnitt 3.1.2).

3.1.2 Geometrie des Studios

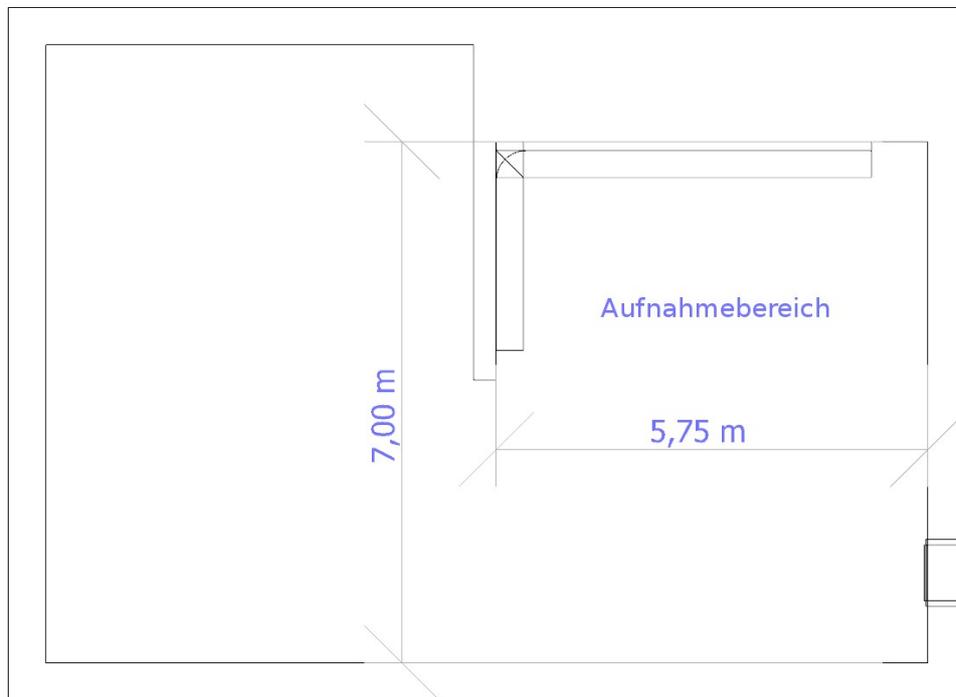


Abbildung 3.1: Raum des Campus TV Projekts im Grundriss. Auf der rechten Seite befindet sich der Aufnahmebereich. Dort steht für den Aufbau der gedrehten Szene und die dafür verwendeten Kameras und Scheinwerfer ein Raum mit 7 m Tiefe und einer Breite von 5,75 m zur Verfügung.

Für die weitere Planung wurden die wichtigsten Abmessungen des Studios aufgenommen. Die Unsicherheit der gemessenen Längswerte liegt schätzungsweise in einem Intervall von 10 cm um die Angaben in den Zeichnungen.

Der eigentliche Aufnahmebereich des Studios befindet sich in einem etwa 90 m² großen Büroraum, in dem das Campus-TV-Projekt untergebracht ist (siehe Abbildung 3.1). Mit seinen geringen Abmaßen ist das Studio als Kleinststudio anzusehen (vgl. [Acke2006, Kap. 5.11.1]).

Das zentrale Element des Aufnahmebereichs ist der Green-Screen (siehe Abbildung 3.2). Er umfasst an zwei Seiten eine Fläche von circa 15 m², innerhalb derer sich die eigentliche Szene abspielt, die von den Kameras erfasst wird (siehe Abbildung 3.3). Mit einer grünen Stoffdecke kann der Green-Screen auf die Bodenfläche erweitert werden, sodass z.B. auch Kameraperspektiven mit Ganzkörperaufnahmen eingestellt werden können.

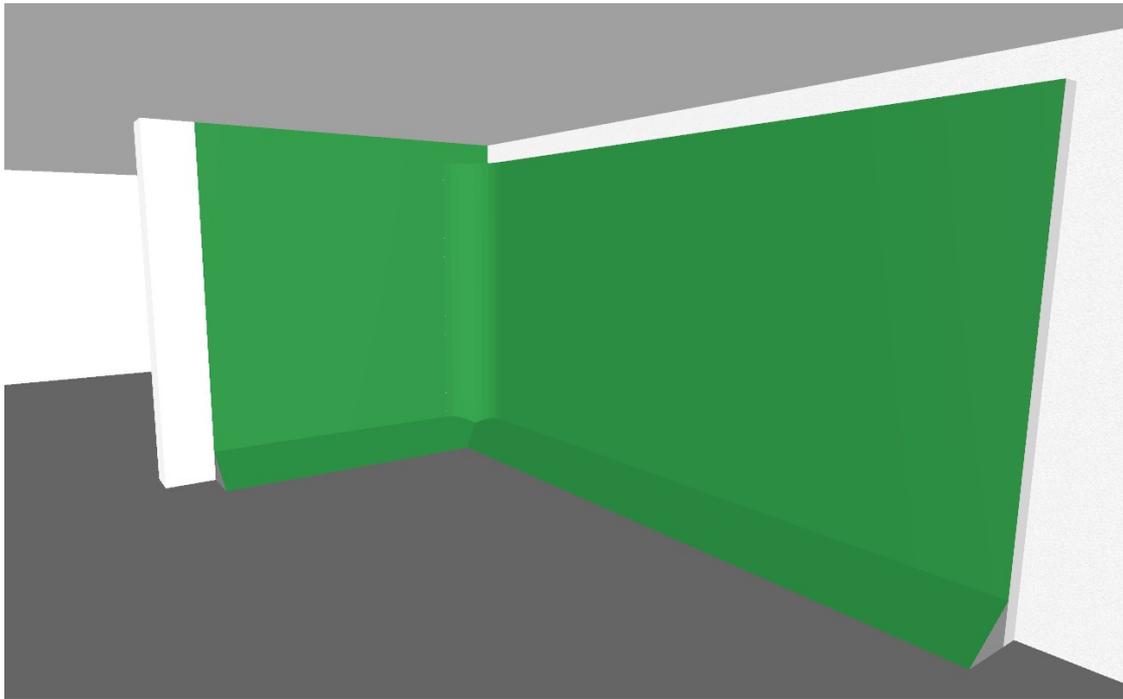


Abbildung 3.2: 3D-Modell des Green-Screen-Aufbaus

Für ein gutes Ergebnis beim Chroma-Keying ist wichtig, dass der gesamte Green-Screen mit allen seinen Bestandteilen im Kamerabild mit möglichst homogener Farbe aufgenommen wird. Dies ist besonders an den Übergängen zwischen den einzelnen Flächen kritisch, da es in den Ecken zu Schattenbildung kommt. Dem Problem wird dadurch entgegengewirkt, dass die Übergänge abgerundet werden.

An der langen Seite besteht der Green-Screen aus angestrichenen Holzplatten, die sich bis auf eine Höhe von 2,80 m erstrecken (siehe Abbildung 3.4). An der kurzen Seite wurde die Raumwand bis zur 3,00 m hohen Decke mit der gleichen Farbe versehen.

3. Bestandsaufnahme

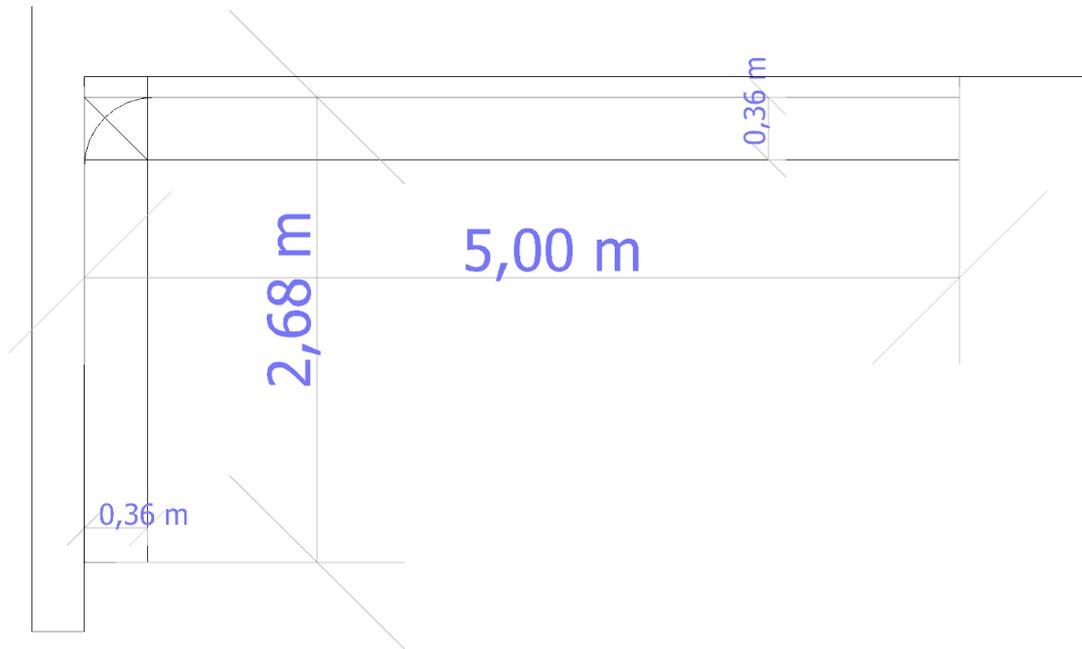


Abbildung 3.3: Green-Screen-Bereich des Studios (Grundriss)

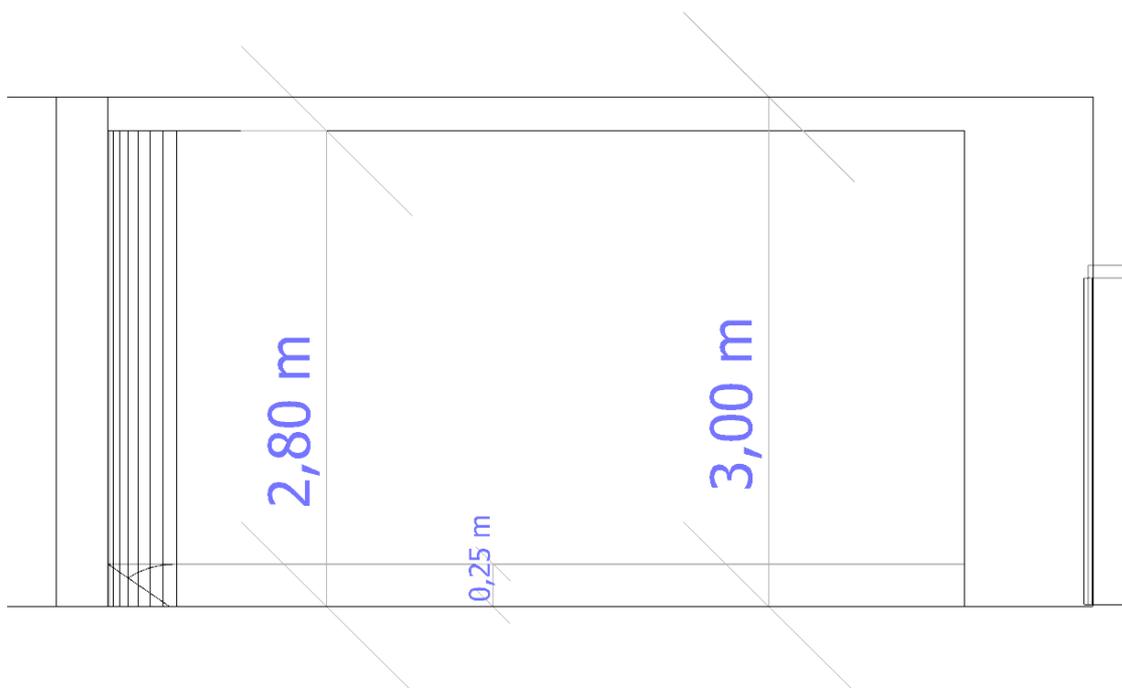


Abbildung 3.4: Green-Screen (Vorderansicht)

3.1.3 Anwendungsfall News



Abbildung 3.5: Eine typische Dialogszene mit virtuellem Hintergrund. Im schwarz eingrahmten Bereich sind Fehler des Chroma-Keying-Prozesses zu sehen.

Ein Anwendungsfall des Green-Screen-Studios ist die Produktion von „nachrichtenartigen“ Sendungen, bei denen sprechende Personen im Vordergrund stehen. Dies umfasst Anmoderationen, Interviews und kleine Diskussionsrunden. Neben den Personen können weitere Objekte Teil der Szene sein, die eine untergeordnete Rolle spielen. Der virtuell eingefügte Hintergrund erfüllt vorrangig einen dekorativen Zweck.

In diesen Gesprächsszenen kommt meist eine Art der Close-Up-Kameraeinstellung zur Anwendung. Dabei sind die Personen vom Kopf abwärts bis etwa zur Hüfte zu sehen, um neben ihrer Mimik auch die Gestik einzufangen. Das Kameraobjektiv steht den Sprechenden in etwa auf Augenhöhe gegenüber. Dementsprechend kommt es auf eine gute Ausleuchtung in einer Höhe ab einem Meter über dem Boden an.

Für die Funktion des Chroma-Keyings ist eine gleichmäßige Beleuchtungsstärke des grünen Hintergrundes und die schattenfreie Beleuchtung der Akteure nötig. Ist dies nicht gegeben, kommt es in den schattigen Bereichen zu fehlerhaften Zuordnungen zwischen Vor- und Hintergrund (siehe Abbildung 3.5), weil die Farbtöne nicht zuverlässig unterschieden werden können.

3. Bestandsaufnahme

Klassischerweise kommt aus gestalterischen Gesichtspunkten in diesem Anwendungsfall eine Dreipunkt-Ausleuchtung (vgl. Kapitel 2.2) zum Einsatz. Bei den Produktionen von Campus TV wird zur Vereinfachung davon jedoch meistens abgewichen.

3.1.4 Anwendungsfall Film

Ein weiterer Anwendungsfall ist die Videomontage. Dabei wird im Green-Screen-Studio aufgenommenes Bildmaterial in Aufnahmen eingesetzt, die außerhalb des Studios gemacht werden oder mit Hilfe der Computergrafik künstlich generiert werden. So lassen sich Szenen erstellen, die sich in realen Umgebungen unmöglich oder nur unter erheblichem technischen Aufwand realisieren lassen. Dazu gehören auch Spezial-Effekte wie z.B. fliegende Objekte. Wenn Personen als Akteure tätig werden, ist neben ihrer kommunikativen Ausdrucksweise auch ihre Handlung von Bedeutung.

Damit die Videomontage trotzdem einen natürlichen Eindruck macht, müssen die Kameraeinstellungen der Bilder, die vereinigt werden sollen, zueinander passen. Daraus folgt, dass im Gegensatz zum Anwendungsfall News diverse Kameraeinstellungen nötig sein können. Für eine Long-Shot-Einstellung, bei der Personen in ihrer Gänze im Bild zu sehen sind, muss auch der grüne Boden des Green-Screens (vgl. Kapitel 3.1.2) verwendet werden.

Wegen des größeren Aktionsraums wird insgesamt mehr Beleuchtung gebraucht. Der Green-Screen muss auch in seinen niedrigeren und höheren Abschnitten gleichmäßig ausgeleuchtet sein. Damit das Bildmaterial aus den unterschiedlichen Quellen in Kombination nicht unnatürlich wirkt, müssen deren Lichtfarbe und Helligkeit zusammenpassen. Dasselbe gilt idealerweise für die Richtungen, aus denen das Licht in die Szenen einfällt.

3.2 Beleuchtungsanlage B1

Bisher kamen für die Beleuchtung im Studio zwei handelsübliche Scheinwerfer unterschiedlicher Art zur Anwendung: Zwei Parabolspiegel-Halogen-Scheinwerfer und eine LED-Leuchte. Im Folgenden sollen die Geräte an Hand ihrer Eckdaten vorgestellt werden.

3. Bestandsaufnahme

3.2.1 Halogen-Scheinwerfer

Scheinwerfer	
Hersteller	Arnold & Richter Cine Technik GmbH & Co. Betriebs KG (kurz ARRI)
Typ	Aluminium-Parabolspiegel-Scheinwerfer
Modell	ARRI lite 800
Leuchtmittel	
Typ	Festkörperlampe
Glühfadenmaterial	Wolfram
Gasfüllung	Halogen
Wendelform	Axialdoppelwendel
Sockeltyp	R7s
Betriebsspannung	230 V
Leistungsaufnahme	800 W
Dimmbar	nein
Lichtstrom	21000 lm
Farbtemperatur	3200 K
Maximale Glühlampentemperatur	900 °C
Durchschnittliche Lebensdauer	75 h

Tabelle 3.1: Technische Daten der Halogen-Scheinwerfer

Die zwei ARRI-Halogen-Scheinwerfer sind gemeinsam auf einem Stativ angebracht, das auf drei Rollen stehend verschoben und in seiner Höhe verstellt werden kann. Die relative Position und Orientierung der Leuchten auf dem Stativ kann nur geringfügig verändert werden.



Abbildung 3.6: Aluminium-Parabolspiegel-Scheinwerfer ARRIlight 800 [Stak2014]

Mit einem Stellrad am Scheinwerfergehäuse lässt sich der Abstand vom Leuchtmittel zum Reflektor variieren. Dadurch lässt sich der Lichtkegel in engen Grenzen fokussieren bzw. aufweiten.

Als weiteres Mittel zur Lichtlenkung befinden sich an der Vorderseite des Scheinwerfers vier flügelähnliche Metallblenden, sogenannte Torblenden (zu sehen auf Abbildung 3.6). Durch sie kann der Lichtkegel scharf eingegrenzt werden.

3. Bestandsaufnahme

3.2.2 LED-Leuchte

Hersteller	Dedo Weigert Film GmbH
Modell	TecPro Felloni TP-LONI-D50
Abstrahlwinkel	50°
Lichtstrom	
Leistungsaufnahme	24 W
Dimmbar	Ja
Leuchtmittel	
Typ	Leuchtdioden
Bauform	Bedrahtet, 5 mm
Anzahl	324 Stück
Farbtemperatur	5600 K
Farbwiedergabeindex R _a	83

Tabelle 3.2 Technische Daten der LED-Leuchte



Abbildung 3.7: LED-Leuchte TP-LONI-D50 [Musi2014]

Dieses Gerät besteht aus einem Panel, das 18 mal 18 LEDs als Matrix mit einem Rasterabstand von etwa 1,5 cm trägt (siehe Abbildung 3.7). Dieses ist ebenfalls auf einem flexibel positionierbaren Dreibein-Stativ montiert.

3. Bestandsaufnahme

Das Licht wird nur von den in den LED-Gehäusen integrierten Reflektoren gebündelt. Abgesehen von dem Passieren einer Abdeckscheibe, die Teil des Gehäuses ist, wird das Licht direkt in die Szene abgegeben. Um das Licht stärker zu streuen, kann ein Diffusor aus rauer Kunststofffolie mit Klettverschlüssen vor den Strahler montiert werden.

3.2.3 Bewertung

Das Beleuchtungssystem B1 bietet bei fachgerechter Anwendung einige Vorteile. Die Halogen-Scheinwerfer bieten im Verhältnis zu ihrem einfachen technischen Aufbau eine hohe Lichtstärke. Durch die frei positionierbaren Stative kann die Beleuchtung an unterschiedliche Szenen-Aufbauten angepasst werden, wobei in einem gewissen Spielraum auch eine künstlerische Gestaltung des Lichtbildes möglich ist. Des Weiteren handelt es sich um Standardkomponenten, die als fertiges Produkt über den Einzelhandel bezogen werden können.

Demgegenüber stehen einige Nachteile, die an dieser Stelle erläutert werden sollen.

Handhabbarkeit

Die Stative belegen einen beträchtlichen Anteil der Grundfläche des kleinen Studios (vgl. Abschnitt 3.1.2). Dies erschwert dort nicht nur den Verkehr, sondern beeinträchtigt gleichzeitig die Einrichtung des Sets. Die Positionierung von Kameras und Beleuchtung stehen aus lichtgestalterischer Sicht in wechselseitiger Abhängigkeit. Da die Video-Kameras ebenfalls auf Stativen befestigt sind, konkurrieren sie mit der Beleuchtung um Stellfläche, was die Probleme beim Justieren der Stative weiter verschärft.

Zudem müssen Stromversorgungsleitungen zu jeder Leuchte verlegt werden. Insgesamt erhöht sich also die benötigte Zeit für Auf- und Abbau des Studio-Sets.

Die zukünftigen Pläne zur Nutzung des Studios sehen eine Erweiterung des Benutzerkreises vor. Dabei sollen viele Kleingruppen aus ungeübten Nutzern das Green-Screen-Studio in vorgegebenen Zeitslots für kleine Produktionen verwenden. Daher sollte die Bedienung der Anlage sollte ohne lange Unterweisung möglich und nicht umständlich sein.

Sicherheit

Neben dem störungsfreien Betriebsablauf hat der Begriff der Sicherheit in der Lichttechnik auch die Bedeutungen des Schutzes vor Sachschäden sowie des Arbeits- und Gesundheitsschutzes [Muel2008, Kap. 43].

3. Bestandsaufnahme

Die auf den Stativen aufgebauten Leuchten haben einen hohen Schwerpunkt und befinden sich damit in labiler Lage. Besonders in Anbetracht der Enge des Raumes ergibt sich die Gefahr, dass Benutzer die Aufbauten versehentlich anstoßen und sie beim Umfallen beschädigt werden.

Durch die zahlreichen verstellbaren Verbindungen ist besonders das Stativ mit dem Halogen-Scheinwerfer-Paar (vgl. 3.2.1) auch in sich sehr instabil. Durch unvorsichtigen Umgang kann es auch hier leicht zu Beschädigung kommen.

Auch für die Benutzer gehen Gefahren von der Beleuchtungsanlage aus. Kabel und Stativbeine stellen Stolperfallen dar. Die hohe Temperatur der Halogen-Glühlampen (siehe Tabelle 3.1) birgt weitere Risiken. Am Scheinwerfer-Gehäuse werden einige Teile heiß, sodass die Nutzer sich möglicherweise Verbrennungen zuziehen und durch schreckhafte Reaktion weitere Unfälle verursachen können. Ferner kann auch die Gefahr eines Brandes nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Kosten

Die Kosten der Beleuchtung ergeben sich aus den festen Anschaffungskosten der Leuchten und den variablen Kosten für elektrische Energie, Leuchtmittelverbrauch und Wartung. [Ris2003, Kap. 5.7.2]

Insbesondere die geringe Lebensdauer (siehe Tabelle 3.1) der Halogenlampen mit einem aktuellen Preis von circa 9 € und der Aufwand des Austauschs erzeugt hohe Kosten. In Anbetracht steigender Energiekosten ist auch der hohe Energieverbrauch von 800 W pro Scheinwerfer nicht zu vernachlässigen.

Wärmeentwicklung

Wie viele professionelle Studio-Räume verfügt auch das Campus-TV-Studio nicht über Fenster ins Freie. Die Frischluftzufuhr erfolgt über die Klimaanlage, die auch für eine konstante Raumtemperatur sorgt. Da die Anlage ein akustisches Rauschen erzeugt, das die Tonaufnahmen stört, muss sie während der Aufnahmearbeiten abgeschaltet werden.

Wärme wird von elektrischen Geräten und den Körpern der Personen, die sich im Raum befinden, an diesen abgegeben. Im Vergleich zu einem Menschen, der in der Klimatechnik mit 100 W Wärmeleistung veranschlagt wird [Acke2006, Kap. 5.12.2], tragen die Halogen-Scheinwerfer einen größeren Teil zur Raumtemperatur bei. Sie gehören zu den Temperaturstrahlern, die sehr hohe Strahlungsanteile im Infrarot und verhältnismäßig geringe im sichtba-

ren Bereich des Spektrums haben. Die Wärmeabgabe der Beleuchtung ist vor allem durch die Wahl der Leuchtmittel beeinflussbar.

3.3 Beleuchtungsanlage B2

Die in Kapitel 3.2.3 genannten Nachteile waren Grund für die Entwicklung einer auf die Bedürfnisse des Campus-TV-Studios zugeschnittenen Beleuchtungsanlage. An dieser Stelle soll der aktuell realisierte Stand der Anlage analysiert werden (vgl. Abbildung 3.8). Sie ist stationär im Raum installiert und basiert auf RGB-LED-Streifen, dessen Licht von zentraler Stelle gesteuert werden kann.



Abbildung 3.8: Stationäre Beleuchtungsanlage mit RGB-LED-Streifen

3.3.1 Leuchtmittel

Als Leuchtmittel kommen RGB-LEDs vom Typ WS2812 des chinesischen Herstellers Worldsemi Co. Ltd. zum Einsatz. Diese Module integrieren neben den drei eigentlichen Leuchtdioden einen Treiber-IC (Integrated Circuit) in einem Chip-Gehäuse des Typs SMD5050 (siehe Abbildung 3.9).

Die eingebetteten Leuchtdioden geben nahezu monochromatisches Licht ab. Da sie nicht wesentlich mehr als 1 mm auseinander liegen, wirkt bereits bei Betrachtung aus kleinen Entfernungen der Effekt der additiven Farbmischung.

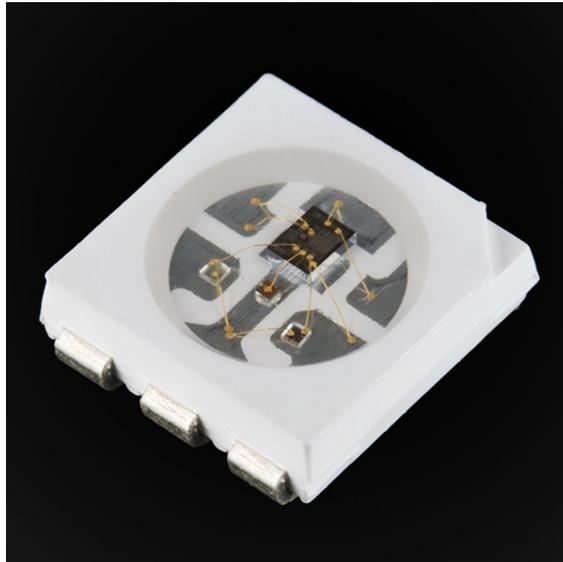


Abbildung 3.9: RGB-LED-Modul WS2812 [Spar2014]

Das Datenblatt [Worl2014] gibt für die rote LED ein Wellenlängenintervall von 620 – 630 nm ab. Die grüne Farbe liegt zwischen 515 und 530 nm und Blau zwischen 465 und 475 nm. Ansonsten werden die beleuchtungstechnischen Eigenschaften nicht weiter spezifiziert. Es werden zwar auch Intervalle für die Lichtstärke der einzelnen Farben in Millicandela angegeben, aber da weder die räumliche Verteilung noch der Abstrahlwinkel angegeben ist, lassen sich darauf nur Vermutungen aufbauen. Angaben über den Lichtstrom fehlen völlig.

Es handelt sich um eine digitales RGB-LED-Modul, da es einen integrierten Treiber-Schaltkreis besitzt, der die Dioden mit Strom versorgt. Bei herkömmlichen, analogen RGB-Modulen sind die Anoden- und Kathoden-Anschlüsse einfach mit den Pins des Gehäuses verbunden und müssen extern mit dem richtigen Strom versorgt werden. Bei der vorliegenden digitalen Variante wird lediglich der Treiber mit 5 V Spannung versorgt, der dann in Abhängigkeit von einem seriellen Datensignal den Strom und damit die Helligkeit der einzelnen LEDs einregelt.

Die LED-Module lassen sich in einer Kette anordnen (vgl. Abbildung 3.10). Dazu hat jedes Modul einen Anschluss für den Datenausgang (DO), über den das Steuersignal an den Dateneingang (DIN) des jeweils nächsten Chips weitergeleitet wird. Dadurch lassen sich eine große Zahl von RGB-LEDs über nur eine Signalleitung am Anfang der Kette ansteuern.

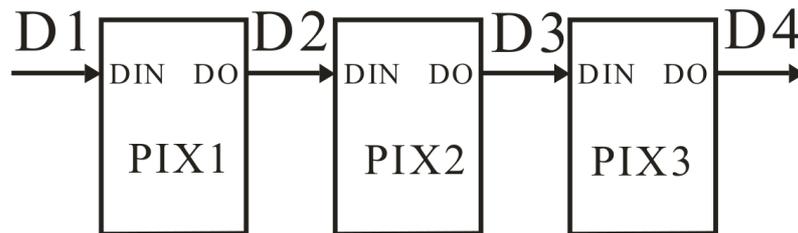


Abbildung 3.10: Kaskadierung der RGB-LED-Module [Worl2014]

Damit trotzdem jedes Modul in einer individuellen Farbe leuchten kann, braucht es ein Kommunikationsprotokoll, das dies unterstützt (siehe Abbildung 3.11). Es basiert auf Datenworten mit einer Länge von 24 Bit (8 Bit für die Helligkeit jeder der drei Farben). Der Absender der Steuerinformation reiht einen Datenstrom mit einem Wort pro Modul der Kaskade aneinander. Durch die Wortreihenfolge gibt es eine implizite Adressierung. Jedes Modul speichert das erste Wort des Stromes, das es am Dateneingang erreicht, in einem Register. Erst beginnend mit dem zweiten Wort werden die Daten auf dem Ausgangspin repliziert. Am Ende des Stroms folgt ein Reset-Code. Er veranlasst die Module, eine neue Farbe anzunehmen, und schaltet die Register für den nächsten Zyklus frei.

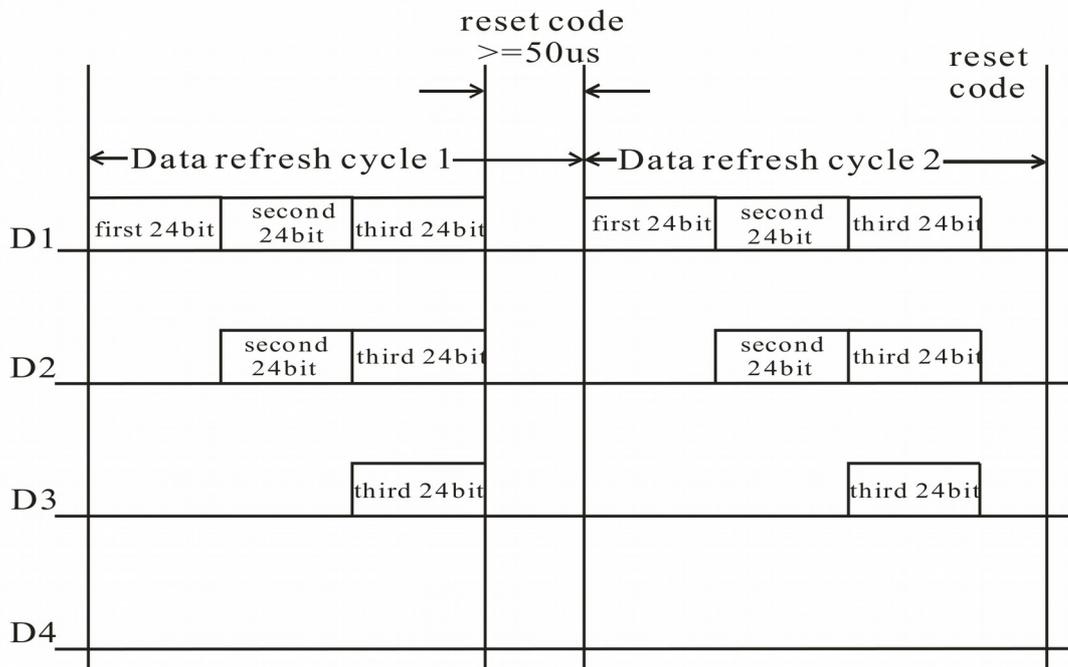


Abbildung 3.11: Kommunikationsprotokoll der RGB-LED-Module

3. Bestandsaufnahme

3.3.2 Anordnung

Die LED-Chips sind auf flexiblen Kunststoffstreifen montiert erhältlich, die auch Leiterbahnen zur elektrischen Verbindungen tragen. Alle Module werden in Parallelschaltung mit Spannung versorgt. Auch die Datenverbindung sind auf dem Streifen entsprechend Abbildung 3.10 hergestellt. Dadurch braucht der elektrische Anschluss nur an einem Ende zu erfolgen. Dies wird begrenzt durch den Spannungsabfall über die dünne Leiterbahn, sodass eine gewisse Streifenlänge nicht überschritten werden sollte.

Für die betrachtete Beleuchtungsanlage basiert auf Streifen mit einer Dichte von 60 LEDs/m, was einem Abstand von rund 1,67 cm entspricht. Zum Schutz vor Umwelteinflüssen ist der Streifen von einem Silikonschlauch mit rechteckigem Querschnitt umhüllt. Acht Streifen mit einer Länge von 2,50 m sind auf Metallprofilen aus dem Trockenbaubereich angebracht. Diese sind in einer Höhe von 2,80 m gleichmäßig über der Spielfläche verteilt (siehe Abbildung 3.12), auf die sie senkrecht herunter strahlen.

Die 1200 RGB-LEDs werden zentral von einem Netzteil (Mean Well HRP-300-5) mit einer Ausgangsleistung von 300 W versorgt.

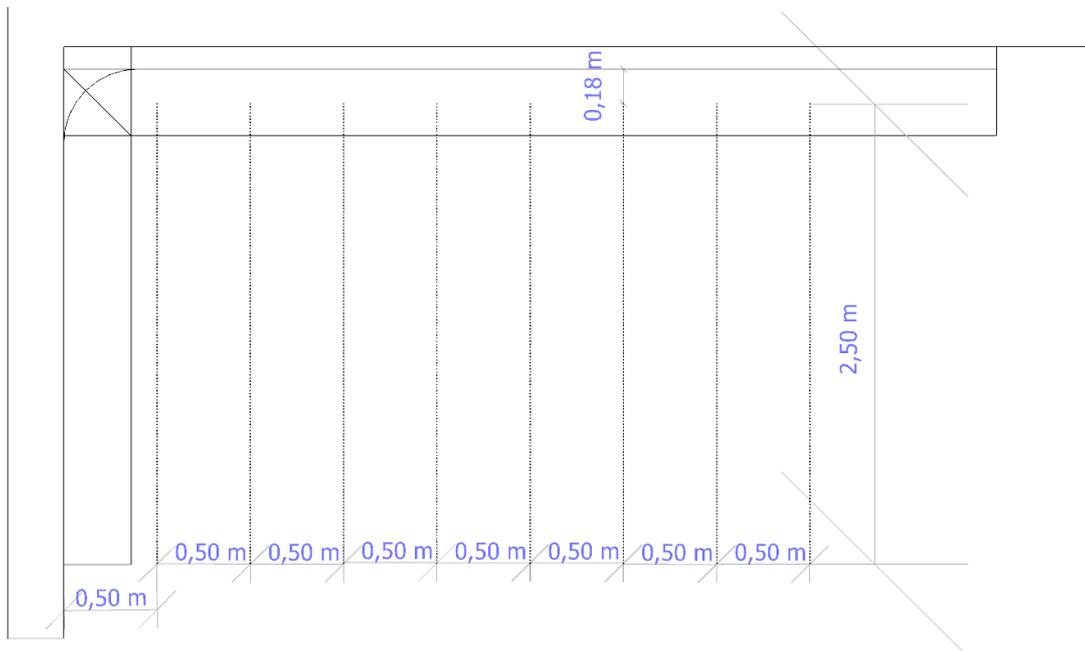


Abbildung 3.12: Anordnung der RGB-LED-Streifen im Raum (Grundriss)

3.3.3 Steuerung

Zur Steuerung der Anlage durch den Anwender existiert eine Konsole, die in der Nähe des Aufnahmebereichs an der Wand montiert ist.

Der Kern dieser Konsole ist ein Mikrocontroller-Prototyping-Board vom Typ Arduino Mega 2560. Dieses steuert die LED-Streifen nach dem in 3.3.1 beschriebenen Kommunikationsprotokoll. Die Arduino-Plattform besitzt eine eigene Programmiersprache, für die eine Programmiersprache besteht, die das Protokoll implementiert. Die acht Streifen sind über eine Steuerleitung und einen Vorwiderstand direkt mit jeweils einem Pin des Boards verbunden.

Als Benutzerschnittstelle kommen fünf Dreh-Potentiometer zum Einsatz. Ihr Widerstand, der proportional zur gewählten Stellung ist, teilt eine Spannung, die vom Analog-Digital-Umsetzer des Mikrocontrollers eingelesen wird.

Drei Regler sind für die Einstellung des Farbtons und der grundsätzlichen Helligkeit der Beleuchtung zuständig. Die Reglerstellungen werden dabei als Koordinate im HSV-Farbraum interpretiert. Diese Parametrisierung erlaubt dem Benutzer, zunächst einen Farbton (Hue) zu wählen. Die Sättigung (Saturation) dieser Farbe zwischen dem reinen Grundfarbton und dem ungesättigten Weiß wird mit einem zweiten Regler gewählt. Der letzte Regler erlaubt die Einstellung des Hellwertes (Value). Diese Art der Einstellung ist für den Anwender intuitiver als die Nutzung des RGB-Farbraums.

Die verbleibenden zwei Regler erlauben die räumliche Variation des Lichtfeldes. Durch die lineare Balancierung des Hellwertes kann die Lichtverteilung in Richtung der LED-Streifen und quer dazu „gekippt“ werden.

Die HSV-Werte werden von dem Programm des Mikrocontrollers ins RGB-Format transformiert, in dem sie an die LED-Module übergeben werden.



Abbildung 3.13: Bediener-Schnittstelle der Steuerung

3.3.4 Bewertung

B2 bietet gegenüber B1 eine Reihe Verbesserungen. Der Aufwand für Auf- und Abbau entfällt komplett. Dadurch kann die Anlage schnell und unkompliziert in Betrieb genommen werden. Es muss lediglich ein Netzstecker eingesteckt und die gewünschte Beleuchtung zentral eingestellt werden.

Nach der Inbetriebnahme wurden einige Schwächen des Systems deutlich. Bei der überschlagsartigen Auslegung der Anzahl benötigter LED-Streifen wurde die Beleuchtungsstärke in der Bodenebene zu 1300 Lux abgeschätzt. Die tatsächlich gemessene Beleuchtungsstärke liegt dort im Mittel jedoch unter 100 Lux (vgl. Kapitel 5.4). Auch bei subjektiver Betrachtung wirkt die Ausleuchtung weit weniger hell als die gewöhnlicher Innenraumbeleuchtung.

3. Bestandsaufnahme

Die einstellbare Farbe hat einen sehr starken Einfluss auf die Farbgebung der Szene. In den typischen Anwendungsfällen wird dies aber nur in einem engen Rahmen gebraucht. Dafür ist wegen der unbeschrifteten Regler der Steuerung die Einstellung wenig intuitiv.

Ein weiteres Problem ist die hohe Lautstärke des Lüfters des Netzgeräts von B2, durch die Audioaufnahmen gestört werden.

3.4 Anforderungen an B3

Auf Grund der einfachen Handhabbarkeit von B2 wird in dieser Arbeit das Konzept einer stationären Beleuchtungsanlage für B3 beibehalten.

Die zentrale Anforderung besteht im Erreichen einer ausreichenden Grundbeleuchtung. Laut [Acke2006, 5.5.2] ist für Fernsehstudio-Kameras eine Beleuchtungsstärke von ca. 700 Lux erforderlich. Dieser Richtwert soll in der Bodenebene erreicht werden. Als sekundäre Anforderung soll die Gleichmäßigkeit der Green-Screen-Ausleuchtung optimiert werden. Des Weiteren ist eine verbesserte Bediener-Schnittstelle für die Anlage und die Reduktion der Lautstärke erforderlich.

4 Messung der Lichtstärkeverteilung des LED-Moduls WS2812

Da der Hersteller des LED-Moduls keine Angaben über die Lichtstärkeverteilung zur Verfügung stellt, wurde sie im Rahmen dieser Arbeit experimentell bestimmt. Der Versuchsaufbau orientiert sich an der Funktion eines Goniophotometers, das die Lichtstärke in allen Strahlrichtungen einer untersuchten Leuchte misst. Dazu wird die relative Orientierung zwischen Lichtquelle und Messsensor zwischen den einzelnen Lichtmessungen variiert und in definierter Entfernung die Beleuchtungsstärke gemessen.

4.1 Versuchsmaterial

- LED-Modul WS2812 auf Streifen-Abschnitt
- Dreibein-Kamerastativ mit Nivellier-Libelle (Manfrotto 028B) und 3-Wege-Kopf (Manfrotto 808RC4)
- LED-taugliches Luxmeter (HT Instruments, Modell HT309)
- Mikrocontroller-Board Arduino Mega
- 3-poliges Verbindungskabel
- Abdunkelbarer Raum

4.2 Versuchsaufbau

Im Zentrum des Versuchs steht das auf einem schwenkbaren Stativ montierte LED-Modul, das in definierter Entfernung von einem an der Wand angebrachten Luxmeter befestigt wurde (siehe Abbildung 4.1).

Der Versuch wurde in einem Raum durchgeführt, der weitestgehend abgedunkelt werden kann. Fenster sind nicht vorhanden und die übrigen Lichtquellen wurden abgeschaltet oder verdeckt.

Es wurde ein einzelnes LED-Modul vom Typ WS2812 isoliert betrachtet. Dazu wurde ein kurzes Stück eines LED-Streifens abgetrennt und mit doppelseitigem Klebeband eben auf den Kamera-Adapter des Stativs geklebt (siehe Abbildung 4.2). Die angelötete Versorgungsleitung wurde zugentlastet, um zu verhindern, dass die Klebeverbindung abreißt.



Abbildung 4.1: Versuchsaufbau zur Messung der Lichtverteilung

Auf der anderen Seite der Versorgungsleitung wurde ein Mikrocontroller-Board angeschlossen um das Modul mit Spannung und dem Datensignal für die Farbansteuerung zu versorgen (vgl. Kapitel 3.3.1). Dazu wurde die Firmware der Beleuchtungsanlage B2 reduziert. Das Mikrocontroller-Board wiederum wurde von einem Laptop über USB mit Spannung versorgt.

Der Kamera-Adapter wurde auf dem Stativ befestigt, das mit Hilfe der Nivellier-Libelle waagrecht auf dem Fußboden aufgestellt wurde. Als Ausgangsorientierung wurde der Stativkopf um 90° nach vorne geschwenkt, sodass die LED frontal auf den Sensor des Luxmeters gerichtet ist. In dieser Orientierung wurde auch die Höhe der LED durch das Stativ auf die des Sensors eingestellt. Ein Abstand von 1,00 m zwischen LED und Sensor hat sich in Vorversuchen als praktikabel erwiesen. Die soeben beschriebene Ausgangslage ist auch in Abbildung 4.2 zu sehen. Bei einer Entfernung von 2 m fällt die Positionsungenauigkeit zwischen LED und Sensor zwar weniger ins Gewicht, es konnten in dieser Entfernung aber nur noch Beleuchtungsstärken von maximal 0,5 Lux gemessen werden. Mit so niedrigen Werten stößt man an Auflösungsgrenzen des Luxmeters, dessen Display nur 0,01-Lux-Schritte unterscheiden

kann. Die Messgenauigkeit wird vom Hersteller über den gesamten Messbereich, auch bei kleinen Werten, mit $\pm 6\%$ des angezeigten Wertes angegeben.

Der Sensor des Luxmeters basiert auf einer Silicium-Photodiode in Kombination mit einem Filter, der die spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges (vgl. Kapitel 2.1.1.1) abbildet (siehe Abbildung 4.3). Damit sollten unterschiedliche Lichtzusammensetzungen in Hinsicht auf die Beleuchtungsstärke korrekt gewichtet werden. Trotzdem bietet das Gerät eine Funktion an, um Messwerte aus LED-Messungen zu korrigieren. Sie erlaubt das einfache Multiplizieren mit einem vorgegebenen Korrekturfaktor, der von der Farbe abhängig ist. Für weiße LEDs ist der Faktor 0,99.

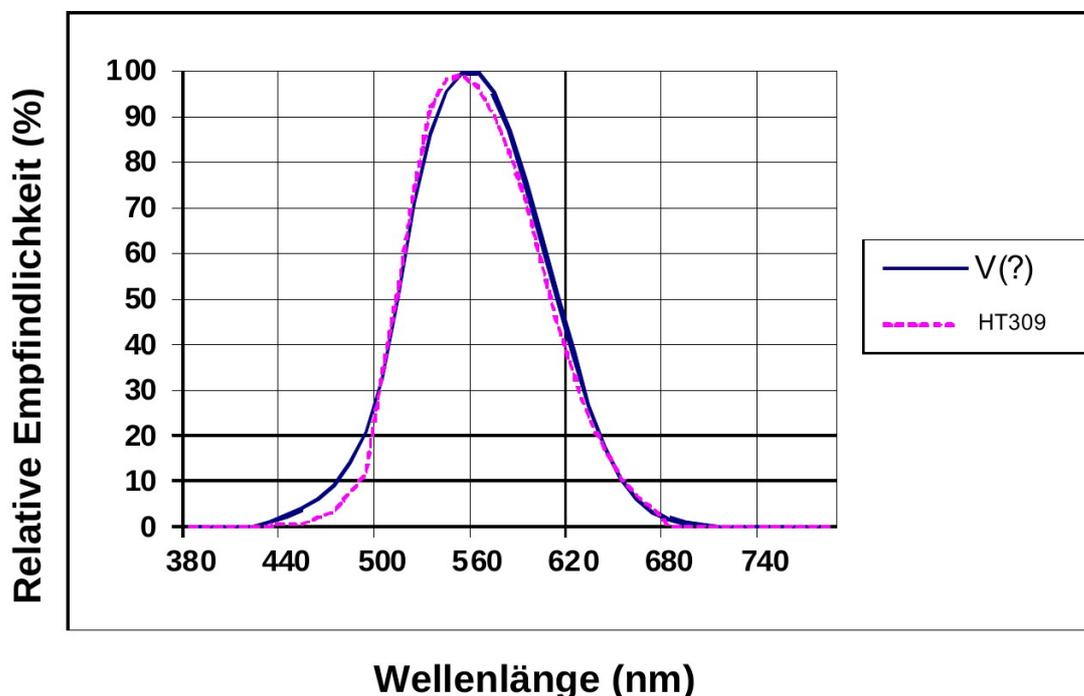


Abbildung 4.3: Spektrum-Antwort der Photodiode mit Filter des HT309 im Vergleich zur $V(\lambda)$ -Kurve [HTIn2011]

4.3 Versuchsdurchführung

Aus der Ausgangslage wurde die Kameraaufnahme des Stativs mit dem LED-Modul in 5°-Schritten um 90° vom Lichtsensor weg geschwenkt. Dieser Schwenk wurde - von der LED aus gesehen - in vier Richtungen durchgeführt: Horizontal nach links und rechts sowie vertikal nach oben und unten. Da die Freiheitsgrade des Stativkopfs eingeschränkt sind, musste dafür zwischenzeitlich auch die LED auf dem Kameraadapter umgeklebt werden, um die Orientierung zu ändern.

Am Anfang jeder Messreihe (in eine der vier Richtungen) wurde die Luxmeter-Funktion zur Null-Kalibrierung angewendet. Dazu wird der Sensor mit einer Verschlusskappe abgedeckt und auf Knopfdruck der dann gemessene Wert auf 0 Lux kalibriert. Im Laufe des Versuchs wurde der Nullwert bei verschlossenem Sensor mehrmals kontrolliert. Es wurden Werte von 0,1 bis 0,2 Lux festgestellt, die im weiteren Verlauf vernachlässigt wurden.

Gleiche Werte wurden im abgedunkelten Raum mit aufgedecktem Sensor gemessen. Ein Einfluss des Restlichts auf die Messergebnisse kann also ausgeschlossen werden.

Das LED-Modul wurde so angesteuert, dass es den maximalen Lichtstrom abgibt. Dazu wurden alle drei Farbkanäle voll angesteuert. Die Aufnahme einer Messreihe erfolgte durch Wiederholung des folgenden Zyklus:

1. Winkel am Kamerastativ einstellen
2. Minimum-Funktion des Luxmeters zurücksetzen
3. Aus dem Messfeld heraustreten
4. Raumbelichtung ausschalten
5. Ein paar Sekunden warten
6. Raumbelichtung wieder einschalten
7. Messwert ablesen
8. Messwert notieren

Die Minimum-Funktion hält vom Zeitpunkt seiner Aktivierung stets den kleinsten gemessenen Lux-Wert auf dem Display fest. Da die Raumbelichtung um Größenordnungen heller ist als die untersuchte LED, kann durch Ausschalten der Raumbelichtung die Messung der Beleuchtungsstärke, die durch die LED verursacht wird, ausgelöst werden. Diese Art der Fernbedienung hat den Vorteil, dass die Messung nicht durch den Bedienenden beeinflusst wird. Für ein simples Ablesen des aktuellen Messwerts vom Display aus der Ferne reicht die Beleuchtung durch die untersuchte LED nicht aus. Das Betätigen der Hold-Funktion, die den aktuell angezeigten Wert speichert, würde das Eintreten des Bedienenden in das Messfeld erfordern. Dieser sorgt dort für Reflexionen, die die Messwerte verfälschen.

4.4 Messergebnisse

Die gemessenen Werte sind in Tabelle 4.1 dargestellt. Die dort verwendeten Winkelangaben beziehen sich auf das in Abbildung 4.4 gezeigte Koordinatensystem. Das LED-Modul ist mit seiner leuchtenden Seite in Richtung des Lamp-Vectors gerichtet und die angewinkelte Ecke des Moduls (siehe Abbildung 3.9) zeigt in Richtung $H = 215^\circ$.

4. Messung der Lichtstärkeverteilung des LED-Moduls WS2812

	Horizontaler Winkel / Grad			
	0	90	180	270
Vertikaler Winkel / Grad	Beleuchtungsstärke / Lux			
0	1,60	1,73	1,58	1,73
5	1,60	1,73	1,46	1,89
10	1,60	1,46	1,46	1,93
15	1,58	1,58	1,46	1,88
20	1,58	1,46	1,44	1,75
25	1,65	1,58	1,44	1,68
30	1,58	1,44	1,36	1,48
35	1,45	1,36	1,29	1,48
40	1,58	1,29	1,29	1,53
45	1,52	1,14	1,14	1,53
50	1,43	1,06	1,06	1,38
55	1,35	0,99	1,06	1,31
60	1,13	0,76	0,84	1,16
65	1,06	0,62	0,68	1,01
70	0,91	0,39	0,53	0,86
75	0,76	0,29	0,32	0,64
80	0,60	0,16	0,27	0,51
85	0,38	0,11	0,09	0,27
90	0,16	0,16	0,07	0,11

Tabelle 4.1 Gemessene Beleuchtungsstärken

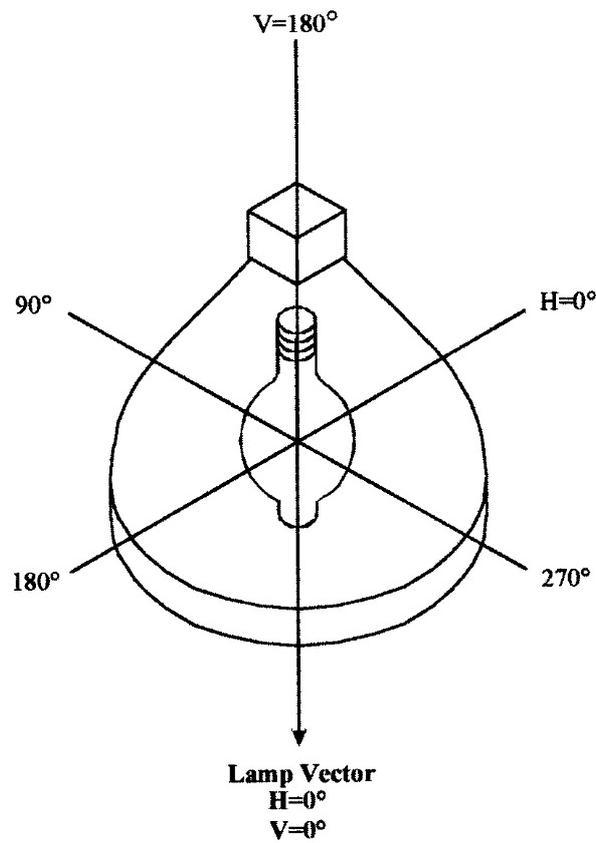


Abbildung 4.4: Verwendetes Koordinatensystem [ANSI2002]

4.5 Auswertung

Die Beleuchtungsstärken können über das photometrische Entfernungsgesetz in Lichtstärken umgerechnet werden [Acke2006, 1.2.4]. Die Werte für die Lichtstärkeverteilung des untersuchten Moduls wurden dementsprechend nach folgender Formel berechnet:

$$I_v = E \cdot k \cdot l^2 \quad \text{mit } k=0,99 \quad \text{und } l=1\text{ m}$$

k bezeichnet den Korrekturfaktor des Messgeräts für weiße LEDs und l den Abstand zwischen beleuchteter Fläche und Lichtquelle.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.5 graphisch dargestellt. Die Lichtstärkeverteilungen entsprechen näherungsweise den kreisförmigen Kurven eines Lambertstrahlers. Das Lambertsche Gesetz charakterisiert ideal diffus leuchtende Flächen, bei denen die Lichtstärke proportional zum Kosinus des Abstrahlwinkels ist. [Baer2006, Kap. 1.2.2.3]

Die Richtwirkung des LED-Moduls ergibt sich also maßgeblich aus der Perspektive auf die leuchtende Fläche. Einen Linsen-Effekt erzielt das Gehäuse der LED nicht.

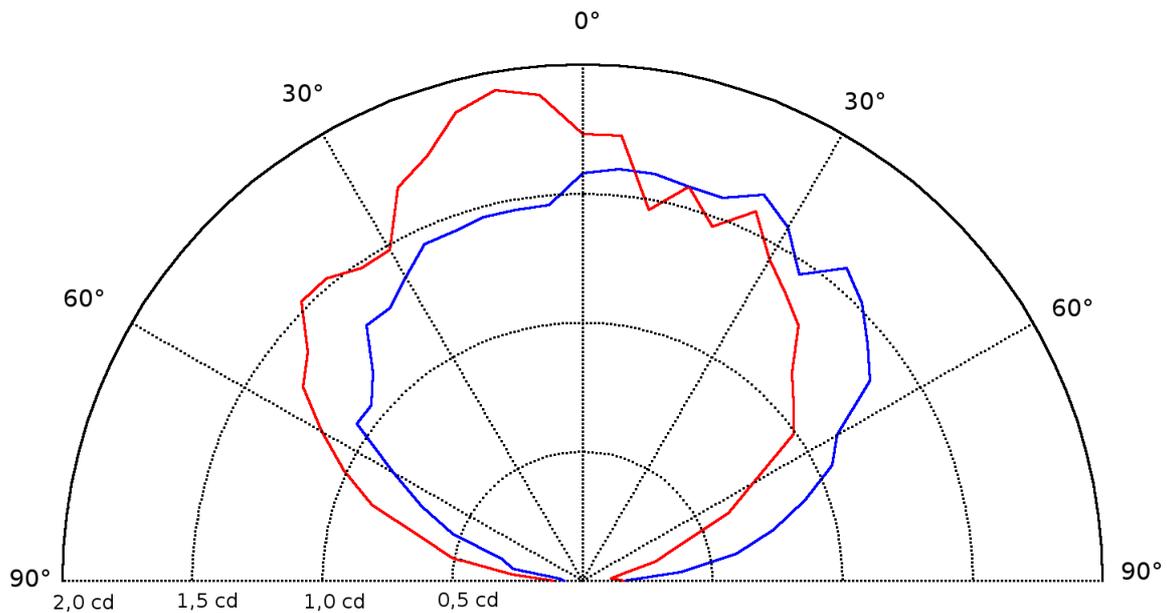


Abbildung 4.5: Lichtstärkeverteilungskurven des LED-Moduls. Die blaue Kurve beschreibt die Ebene in den horizontalen Richtungen $H=0^\circ$ (rechte Seite) und $H=180^\circ$ (linke Seite). Die rote Kurve liegt in der Ebene mit $H=90^\circ$ (rechts) und $H=270^\circ$ (links). Vgl. Abbildung 4.4.

Tools zur Beleuchtungsplanung (vgl. Kapitel 5.1) arbeiten mit Leuchten-Modellen, die vor allem die Lichtstärkeverteilung beinhalten. Diese Modelle werden in unterschiedlichen Dateiformaten gespeichert. Die Ergebnisse dieses Versuchs wurden in eine Modelldatei nach dem Standard ANSI/IESNA LM-63- 2002 [ANSI2002] überführt (siehe Anhang I).

Das in dieser Arbeit verwendete Tool DIALux integriert die Lichtstärkeverteilung über die Winkel zu einem Lichtstrom auf. Demnach strahlt das untersuchte Modul 6 lm aus.

5 Simulation

5.1 Software

Bei der Planung von Beleuchtungen in der Gebäudetechnik kamen klassischerweise Verfahren wie die Punktbeleuchtungsmethode und die Wirkungsgradmethode zum Einsatz, die sich auch ohne die Nutzung eines Computers durchführen lassen. Die Wirkungsgradmethode basiert auf Tabellen und erlaubt es, die benötigte Lampen- und Leuchtenanzahl für einen Raum zu überschlagen, der in einer definierten Nutzebene ein Beleuchtungsstärke vorweisen soll. Neben gewissen Raumparameter werden für das Verfahren spezielle Tabellen zu den Leuchten benötigt, die verwendet werden sollen. [Ris2003, 5.5]

Die händischen Beleuchtungsmethoden sind verglichen mit den beschränkten Erkenntnissen, die sie liefern, langwierig und stoßen bei komplexeren Raumgeometrien und weitergehenden Fragestellungen an ihre Grenzen.

Computerbasierte Planungsprogramme hingegen können viele beleuchtungstechnische Größen auch in komplexen Szenarien berechnen. So lässt sich z.B. auch das verfügbare Tageslicht in Berechnungen mit einbeziehen. Die Programme ähneln 3D-Modelling-Tools, in denen der zu beleuchtende Raum nachgebaut wird. Daraufhin werden Leuchten verteilt und ihr Effekt an verschiedenen Stellen betrachtet.

Zwei prominente Beispiele sind die Programme Relux der schweizer Relux Informatik AG und DIALux von der DIAL GmbH aus Lüdenscheid. In beiden Fällen handelt es sich um Standardsoftware, die ausschließlich unter dem Betriebssystem Windows läuft.

In dieser Arbeit kommt DIALux in der Version „evo 3.3“ zum Einsatz, da es als Vollversion kostenlos verfügbar und einsteigerfreundlich ist. DIALux hat 400.000 Nutzer in 180 Ländern. Neben der Software bietet die DIAL GmbH Dienstleistungen in der Licht- und Gebäudetechnik an. Dazu gehören auch Anwenderschulungen für DIALux und Messdienstleistungen eines Labors für Leuchten und Lampen. [Dial2014]

DIALux lässt sich für die Simulation im Innen- und Außenbereich verwenden. Gebäude werden anhand von Grundrissen modelliert. Diese können auch aus CAD (Computer Aided Design)-Dateien anderer Programme importiert werden. Neben Gebäudeöffnungen wie Fenstern und Türen lassen sich auch primitive geometrische Formen (Säulen, Quader, Rampen, Stufen) in Räume einbringen. Komplexere Geometrien wie z.B. Mobiliar können als Dateien aus 3D-Modellierungsprogrammen übernommen werden.

5. Simulation

Es besteht eine Vielzahl an Plug-Ins für DIALux, in denen Leuchtenhersteller ihre Kataloge abbilden können. Diese beinhalten die technischen Daten, die Lichtstärkeverteilung und oft ein geometrisches Modell der Leuchte. Eine Leuchte kann so direkt in die Simulation übernommen werden und es lassen sich Leuchten verschiedener Hersteller am Objekt ausprobieren und vergleichen.

Auf Basis der gemachten Eingaben berechnet das Programm die räumliche Lichtverteilung innerhalb des virtuellen Modells. Die meisten Lichtsimulationstools verwenden für diese Berechnung das Interflektionsverfahren, welches in der Computergrafik als Radiosity besser bekannt ist. Der Rechenkern von DIALux implementiert seit Ende 2012 das Photonshooting-Verfahren. Es hat gegenüber Radiosity den Vorteil, dass sich damit größere und komplexere Szenen effizienter berechnen lassen. Dies wird vor allem bei Projekten interessant, bei denen die Grenzen zwischen Innen- und Außenbereich verfließen, wie z.B. Objekten mit großen Glasfasaden. Bei dem Verfahren werden von den Leuchten entsprechend ihrer Lichtstärkeverteilung Photonen in den Raum ausgesendet. Wenn sie auf eine Fläche treffen, werden sie abhängig vom Material gerichtet oder diffus reflektiert, transmittiert oder absorbiert. Die Photondichte pro Fläche wird in die Beleuchtungsstärke umgerechnet. [Dial2012]

Nach der Berechnung steht eine fotorealistisch gerenderte 3D-Ansicht des Modells bereit, dessen Ansicht einen ersten Helligkeitseindruck vermittelt. Außerdem kann der Benutzer im Modell exakte Messungen verschiedener Größen vornehmen. Dazu müssen virtuelle Messflächen oder -punkte an interessierenden Stellen in der Szene platziert werden. Dort können vorrangig horizontale, vertikale, zylindrische und hemisphärische Beleuchtungsstärken abgelesen werden. Weitere angezeigte Größen sind die Leuchtdichte, der Blendwert und Tageslichtquotient sowie eine „kameraorientierte Beleuchtungsstärke“. Letztere wäre für diese Arbeit sicherlich interessant gewesen, ließ sich aber nicht benutzen, obwohl sie in den Menüs zur Auswahl stand.

Für Messpunkte werden skalare Werte berechnet. Im Falle von Messflächen kann die Verteilung der Beleuchtungsstärke durch Minimal-, Maximal und Durchschnittswert charakterisiert oder als zweidimensionales Diagramm in die 3D-Ansicht eingebettet werden (siehe z.B. Abbildung 6.8). Dafür gibt es die Möglichkeit der Darstellung in Falschfarben oder in Form von Isolux-Kurven.

DIALux kann die Ergebnisse auch auf Konformität mit gängigen Normen überprüfen. Die Auswertung kann in Form eines konfigurierbaren Berichts exportiert werden, um ihn z.B. einem Kunden zu präsentieren.

Zur Untersuchung der Genauigkeit von Lichtberechnungssoftware besteht das normierte Testverfahren CIE TC 3.33. Es definiert unterschiedliche Lichtszenen und stellt an Referenzpunkten gemessene Beleuchtungsstärken zur Verfügung. Die von der Software berechneten Werte dürfen nur innerhalb gewisser Tolleranzen von den im Versuch gemessenen abweichen. DIALux bietet die von der Norm geforderten Genauigkeit von $\pm 10,5\%$. In den meisten Fällen liegt der Fehler sogar innerhalb der Messtoleranz von $\pm 6,7\%$. [Dial2012]

5.2 Modell des Raumes

Die wesentlichen Eingabedaten für das Simulationsprogramm sind die Raumform, die Raumabmessungen und die Reflexionsgrade der Flächen im Raum.

Die Geometrie des Raumes konnte auf Basis von einfachen Messungen (siehe Kapitel 3.1.2) rekonstruiert werden. Wie bei jedem Modell wird die Realität idealisiert abgebildet. Dabei kommen einerseits die Messunsicherheit und andererseits die begrenzten gestalterischen Elemente von DIALux zum Tragen. Vor allem die Übergänge zwischen den Green-Screen-Flächen und dem Boden mussten durch die zur Verfügung stehenden Mittel kompromisshaft angenähert werden. Es wurde nur der Raum an sich und der darin befindliche Green-Screen modelliert. Einrichtungsgegenstände, wie z.B. Schränke, wurden der Einfachheit halber ausgelassen.

Auf Grund fehlender Messungen mussten die Reflexionsgrade der Oberflächen geschätzt werden. Dies wurde unter Zuhilfenahme des in DIALux integrierten Farben- und Materialkatalogs vollzogen. Dort finden sich typische Bodenbeläge, Wand- und Deckenmaterialien, die mit verschiedenen Farben, Texturen und Reflexionsgraden versehen sind. Farben und Texturen haben nur einen Einfluss auf die visuelle Darstellung. In die lichttechnischen Berechnungen wird ausschließlich der Reflexionsgrad einbezogen. Tabelle 5.1 zeigt die gewählten Oberflächenmaterialien.

Oberfläche	Material	Reflexionsgrad
Boden	DefaultFloorMaterial	20 %
Wände	Rauhputz weiß	86 %
Decke	DefaultCeilingMaterial	70 %
Green-Screen	6032(Signalgrün)	19 %

Tabelle 5.1 Für die Simulation genutzte Oberflächenmaterialien

5.3 Modell der Beleuchtungsanlage B2

Zur Überprüfung der Genauigkeit der Simulation und als Ausgangspunkt für die Modellierung der Erweiterung wurde die RGB-LED-basierte Beleuchtungsanlage B2 in das Modell eingefügt.

Geometrisch sind die einzelnen LED-Module als Quader (Länge und Breite 5 mm, Höhe 1 mm) angenähert. Die Streifen, auf denen sie angebracht sind, und die Gerüststruktur (vgl. Abschnitt 3.3.2) wurden nicht in das Modell mit einbezogen. Es wird davon ausgegangen, dass dies keinen erheblichen Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat, da die Elemente im Raum vergleichsweise klein sind und nicht direkt angestrahlt werden.

Die optische Wirkung der LED-Module wird durch die Leuchten-Modelldatei, die in Kapitel 4 aus experimentellen Daten erzeugt wurde, in die Simulation eingebracht. Dementsprechend liegt den simulativen Berechnungen der Zustand des LED-Moduls zu Grunde, in dem es auf allen drei Farbkanälen mit maximal gewähltem Lichtstrom – also in der Summe „weiß“ – leuchtet.

Abbildung 5.1 zeigt das durchgerechnete Modell. Ein Leuchtstreifen war zum Zeitpunkt der Arbeit defekt und wurde deshalb auch in der Simulation ausgeschaltet, um den Genauigkeitsvergleich nicht zu beeinflussen. Als Beispiel für die berechneten Ergebnisse ist in der Abbildung die Verteilung der Beleuchtungsstärke in der Bodenebene dargestellt. Für die Berechnung dieses Modells mit 1200 LEDs benötigt ein aktuelles Notebook (Prozessor Intel Core i5-4200U, Grafikchip Nvidia GT 750M) knapp 2 Minuten.

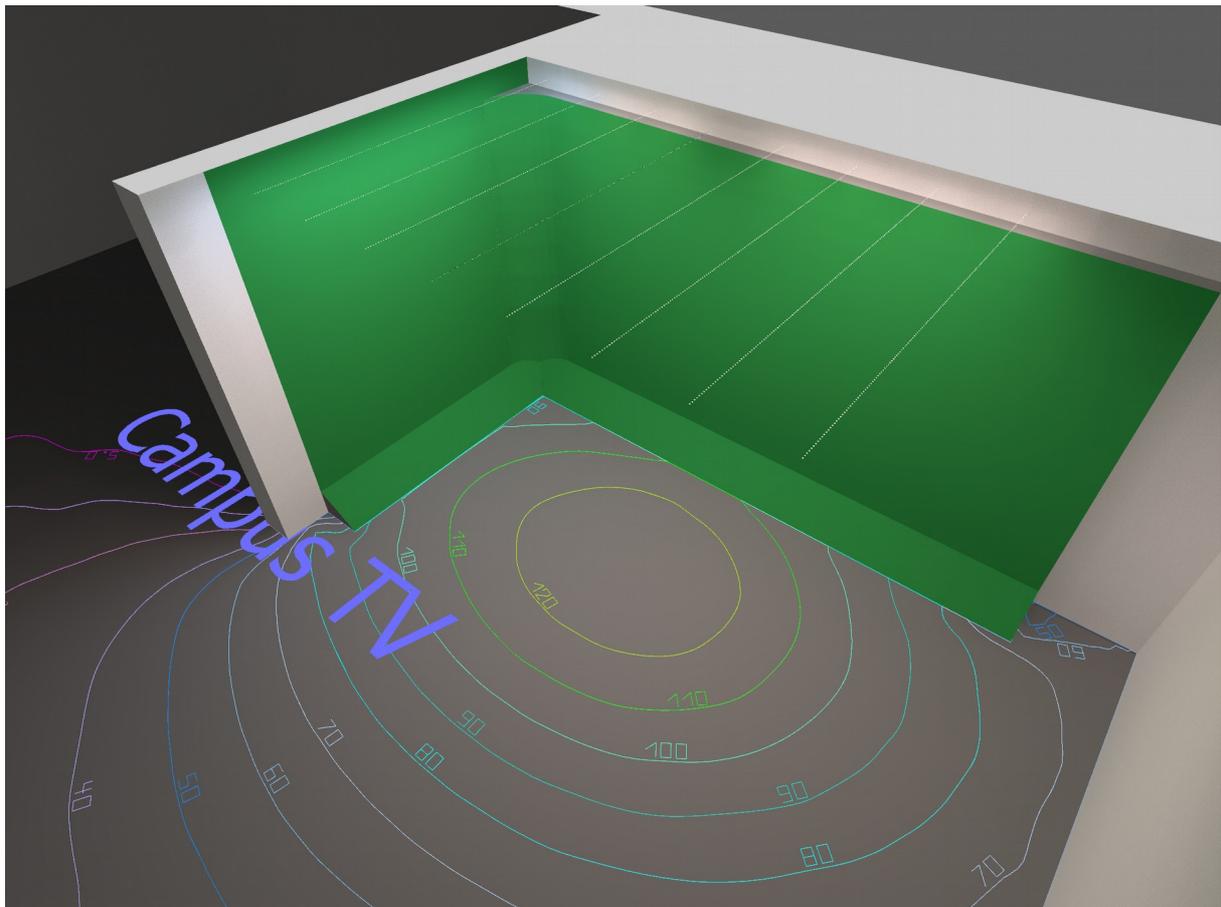


Abbildung 5.1: Simulation der Beleuchtungsanlage B2 mit berechneter Beleuchtungsstärke in der Bodenebene.

5.4 Verifikation der Ergebnisse

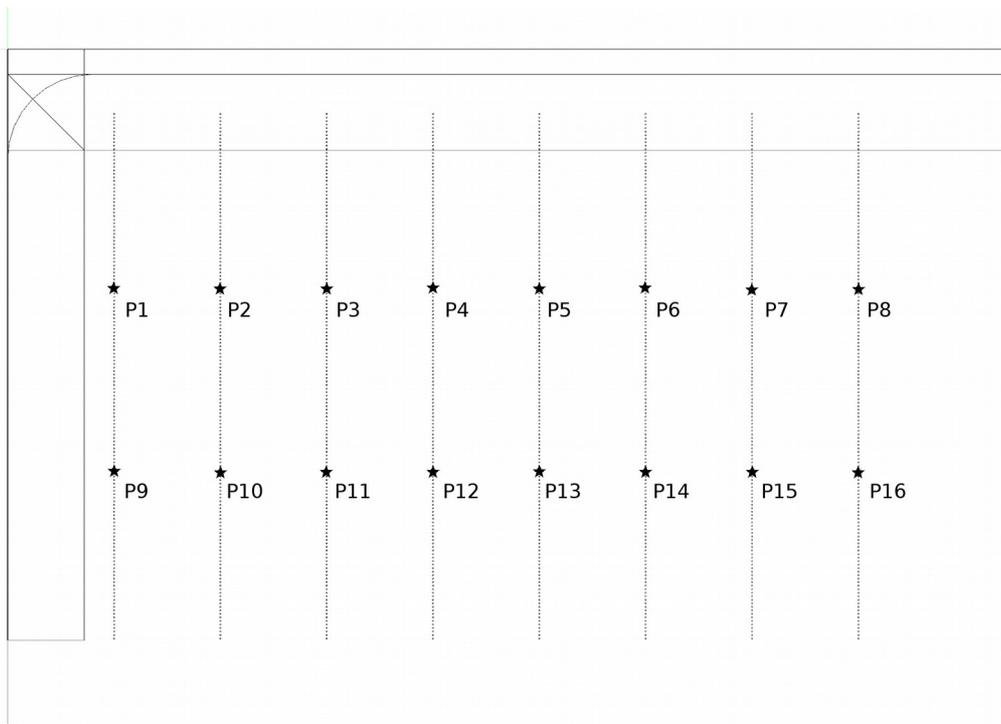


Abbildung 5.2: Messpunkte zur Verifikation der Simulation im Grundriss. Sie befinden sich jeweils jeweils zwischen den Dritteln eines jeden LED-Streifens und sind 1,00 m und 1,83 m von der langen Seite des Green-Screens entfernt.

Um die Genauigkeit der Computersimulation zu bewerten, wurden exemplarisch einige durch sie berechneten Werte mit Messwerten aus dem realen Aufbau verglichen. Im realen Studio wurden auf dem Fußboden unterhalb jedes LED-Streifens zwei Messungen der Beleuchtungsstärke aufgenommen. Dazu wurde das Luxmeter HT309, wie in Kapitel 4, verwendet.

An den korrespondierenden Stellen im Modell wurden Messpunkte gesetzt, an denen die Beleuchtungsstärken als skalare Zahl abgelesen werden können. Die 16 Messpunkte sind in Abbildung 5.2 zu sehen.

Tabelle 5.2 stellt die Werte gegenüber. Die absolute Abweichung F ist die Differenz zwischen den verglichenen Werten. Bezieht man sie auf die als wahren Wert angenommene gemessene Beleuchtungsstärke E_s , so erhält man jeweils die relative Abweichung

$$f = \frac{F}{E_s}$$

5. Simulation

Die simulierten Werte liegen in der richtigen Größenordnung, sind aber in allen Punkten zu hoch. Im Mittel liegen sie 18,1875 lx über den gemessenen Werten.

Die tendenzielle Veränderung zwischen Messpunkten, die nebeneinander liegen, wird durch die Simulation gut wiedergegeben. Die Vorzeichen ihrer Differenzen stimmen in Simulation und Messung in den meisten Fällen überein.

Die relative Abweichung liegt im Durchschnitt bei 20,7 %. Dies übersteigt die von der Norm CIE TC 3.33 für die Genauigkeit von Simulationsprogrammen geforderte Toleranzgrenze von 10,5 %. Diese Grenze normiert allerdings nur die Ungenauigkeit des Berechnungsverfahrens, dass exakte technische Daten über die Szene und die Leuchten als Eingabe erhält.

Gegensätzlich dazu sind im hier betrachteten Fall die Lichtstärkeverteilungskurven mit einfachen Mitteln aufgenommen und die Reflexionswerte der Raumboflächen geschätzt. In Anbetracht dessen ist ein summierter Fehler von 20,7 % verständlich.

Ein Indiz für die Auswirkung der Reflexionswerte auf den Fehler ist die Zunahme der relativen Abweichung von P8 zu P1 und von P16 zu P9 hin. Während auf der freien Seite des Green-Screen-Aufnahmebereichs (P5, P6, P7, P8 und P15, P16) der relative Fehler unter 10 % liegt, nimmt er an der Wand sein Maximum von 48,1 % an.

Desweiteren können auch systematische Fehler bei der Messung mit dem Luxmeter gemessenen Referenzwerte nicht ausgeschlossen werden.

5. Simulation

Messpunkt	Gemessene Beleuchtungs- stärke E_m / lx	Simulierte Beleuchtungs- stärke E_s / lx	Absolute Abweichung F / lx	Relative Abweichung $f / \%$
P1	71,1	101	29,9	42,1
P2	83,5	111	27,5	32,9
P3	91,1	118	26,9	29,5
P4	90,8	123	32,2	35,5
P5	115,9	124	8,1	7,0
P6	115,9	120	4,1	3,5
P7	111,6	112	0,4	0,4
P8	100,5	101	0,5	0,5
P9	70,2	104	33,8	48,1
P10	83,5	114	30,5	36,5
P11	93,3	120	26,7	28,6
P12	102,6	126	23,4	22,8
P13	110,6	126	15,4	13,9
P14	109,9	123	13,1	11,9
P15	106,3	114	7,7	7,2
P16	92,2	103	10,8	11,7
Mittelwert	96,8	115	18,2	20,7

Tabelle 5.2 Vergleich der simulierten und gemessenen Beleuchtungsstärken

Trotz der teils recht hohen Abweichungen wird das erstellte Modell als probates Mittel für die Untersuchung von Erweiterungskonzepten akzeptiert.

6 Untersuchungen

Ausgehend von dem in der Simulationssoftware aufgebauten Modell der Beleuchtungsanlage B2 im Ist-Zustand werden in diesem Kapitel Erweiterungen daran vorgenommen. Im Rahmen der folgenden Konzepte werden vier Erweiterungsideen analysiert. Die Konzepte werden im Modell abgebildet und die simulierte Beleuchtungswirkung untersucht.

In Konzept 1 werden die bisher eingesetzten RGB-LEDs in ihrer Anzahl skaliert, um höhere Beleuchtungsstärke zu erreichen. Konzept 2 analysiert alternativ dazu weiße LEDs als Leuchtmittel, mit denen sich die erforderliche Beleuchtungsstärke günstiger realisieren lässt.

In Konzept 3 wird überprüft, ob mit einem zusätzlichen weißen LED-Streifen eine bessere Green-Screen-Ausleuchtung erreicht werden kann. Da dies ohne weiteres nicht möglich ist, wird in Konzept 4 die Hauptbeleuchtung weiter vom Green-Screen-Hintergrund entfernt, um den gleichen Effekt zu erreichen.

Nach einer Bewertung der Konzepte wurde Konzept 4 zur Realisierung herangezogen.

6.1 Konzept 1

6.1.1 Idee

Der naheliegendste Ansatz zur Erhöhung der Beleuchtungsstärke ist die Erweiterung um zusätzliche RGB-LED-Streifen des bereits in der Anlage B2 verwendeten Typs. Vorteilhaft dabei ist, dass die Systemarchitektur nicht wesentlich geändert werden muss. Die Steuerung kann unverändert bestehen bleiben, da die hinzukommenden Streifen mit den gleichen Farbsignalen versorgt werden können, wie die bereits bestehenden. Dazu bildet man Gruppen von Streifen, deren Datenleitungen parallel geschaltet werden. Allerdings wird für die 5-V-Spannungsvorsorgung ein Netzteil entsprechend größerer Leistung erforderlich.

6.1.2 Vorgehensweise

Um diesen Ansatz zu untersuchen, wurden in der Simulation parallel zu den bereits montierten Streifen in kleiner Entfernung weitere hinzugefügt. Die Anzahl der LEDs wurde so in drei Schritten verdoppelt, vervier- und verachtacht. Nach wiederholter Berechnung wurden die Werte in der Bodenebene anhand der Isolux-Linien verglichen. Die Bodenebene wurde für die Betrachtung ausgewählt, da sie dem worst case entspricht: Alle horizontalen Nutzebenen, die

6. Untersuchungen

höher liegen, werden wegen des fotometrischen Entfernungsgesetzes (vgl. Kapitel 2.1.1.4) entsprechend stärker beleuchtet.

6.1.3 Auswertung

Die Beleuchtungsstärke skaliert linear mit der Anzahl der eingesetzten LED-Streifen (siehe Abbildung 6.1 und Abbildung 6.2). Eine Verdoppelung des verbauten Lichtstroms führt erwartungsgemäß in der ganzen Ebene auch zu einer Verdoppelung der Beleuchtungsstärke. Gleichermäßen steigt aber auch der Beleuchtungsstärke-Gradient linear mit der LED-Anzahl, die Verteilung der Beleuchtungsstärke wird also ungleichmäßiger.

Um die geforderte Beleuchtungsstärke von 700 Lux (vgl. Kapitel 3.4) in der ganzen Aufnahmefläche zu erreichen, wäre eine Verachtfachung der LED-Anzahl (siehe Abbildung 6.2) notwendig.

Neben den hohen Kosten für die Leuchtmittel in Höhe von 2800 € wirft die Stromversorgung einer derart großen Lampenmenge Probleme auf. Das in B2 verwendete Industrie-Netzteil wird von der bestehenden Anlage bereits ausgelastet. Im Einzelhandel konnten keine Netzteile höherer Leistung gefunden werden. Zudem sind lautlos gekühlte Modelle in dem Leistungsbereich rar.

Ein weiteres Problem der RGB-LEDs ist ihr niedriger Farbwiedergabeindex. Dies liegt an den drei schmalbandigen Peaks in ihrem Spektrum. Szabo et al. haben den Farbwiedergabeindex eines typischen RGB LED Clusters in [Szab2007] zu $R_a=37.8$ bestimmt. [Muel2008, Kap. 7.2] fordert für qualitativ hochwertige Fernsehaufnahmen jedoch einen Farbwiedergabeindex von $R_a>85$.

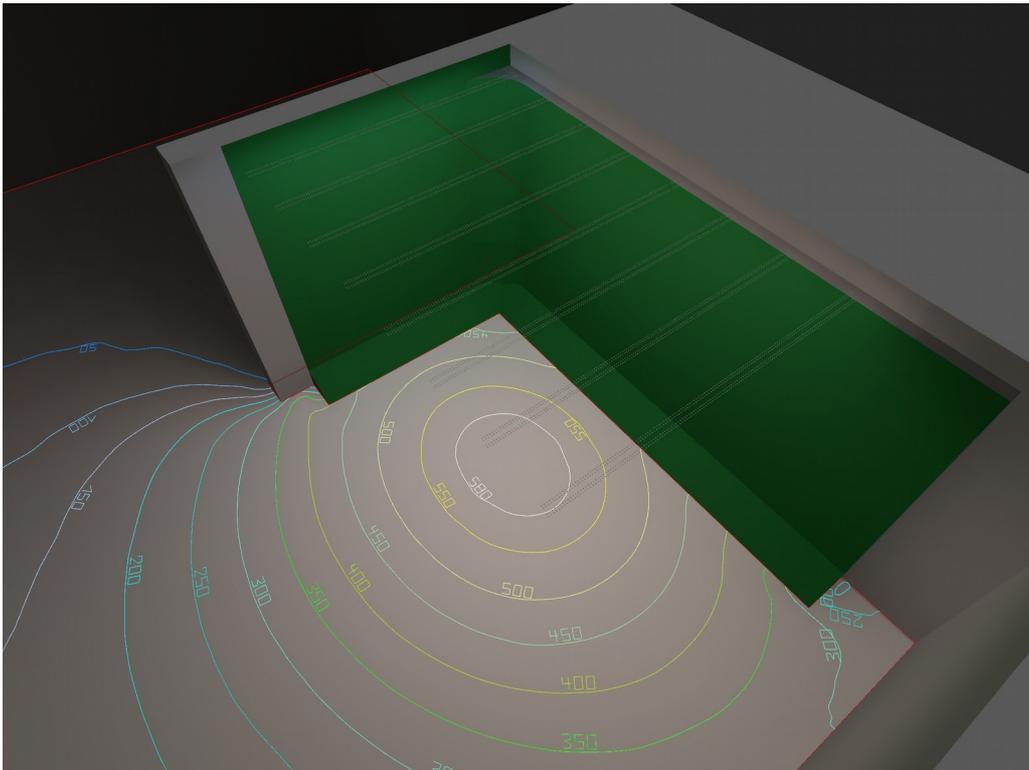


Abbildung 6.1: 4 mal 1200 LEDs vom Typ WS2812

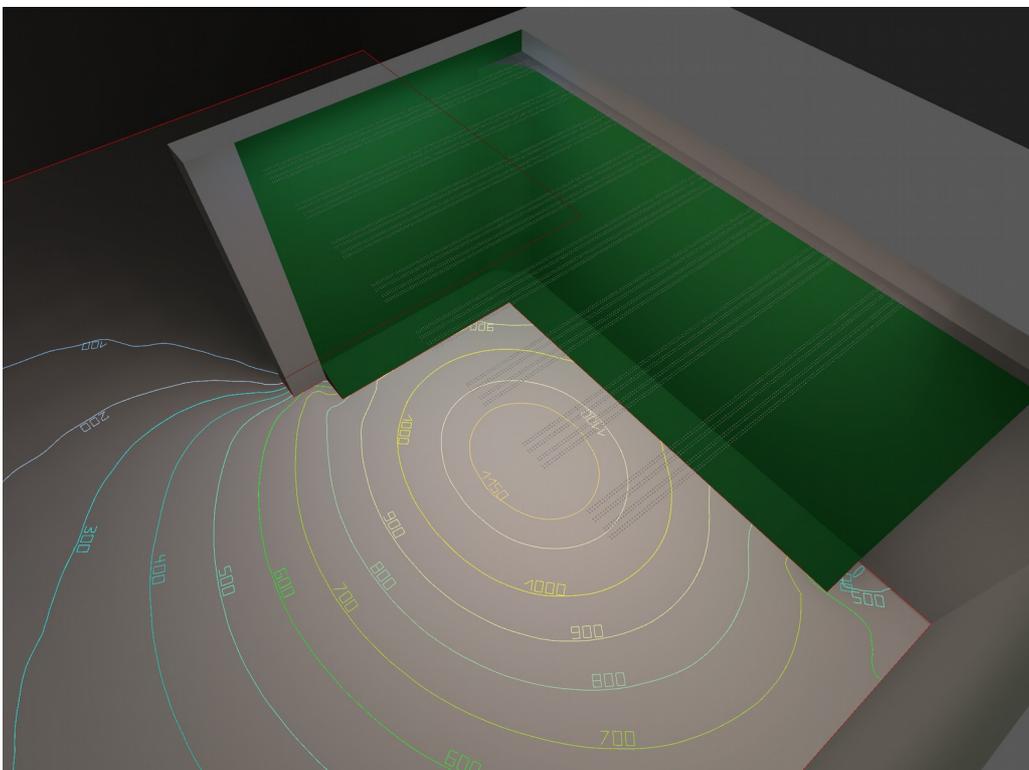


Abbildung 6.2: 8 mal 1200 LEDs vom Typ WS2812

6.2 Konzept 2

6.2.1 Idee

Die Funktion von B2, die Lichtfarbe einstellen zu können, nimmt eine untergeordnete Rolle zu einer ausreichenden Beleuchtungsstärke ein. Deswegen wird im Rahmen dieses Konzeptes die Tauglichkeit von weiß leuchtenden LEDs untersucht. Es gibt eine Vielzahl verschiedener LED-Streifen auf dem Markt, die mit weißen LEDs bestückt sind. Darunter finden sich auch Streifen mit hoher Lichtausbeute und hohem Farbwiedergabeindex. Allerdings werden viele Produkte ohne für die Planung ausreichende Spezifikation angeboten.

Bei der Konstruktion der Anlage B2 wurde auf den Stahlprofilen, die die RGB-LED-Streifen tragen, Platz für je einen weiteren parallelen Streifen pro Profil vorgesehen. Da LED-Streifen mit weißen LEDs in der gleichen Breite wie die RGB-Variante verfügbar sind, müsste die bestehende Konstruktion nicht verändert werden.

6.2.2 Vorgehensweise

Für die Untersuchung wurde ein LED-Streifen gesucht, der die angeführten Kriterien zu Farbwiedergabe und Helligkeit besser erfüllt und gleichzeitig kostengünstig ist. Für die Auslegung musste auf einen spezifizierten Lichtstrom und angegebene Lichtstärkeverteilung geachtet werden.

Es wurde ein Streifen der Marke Solarox, Modell „HighCRI Power LED Strip ECO“ ausgewählt. Dieser besitzt mit 60 LEDs/m die gleiche LED-Dichte, wie die in B2 verwendeten Streifen. Pro Meter wird ein Lichtstrom von 1560 lm angegeben, was 26 lm/LED ergibt. Das entspricht dem 4,3-fachen des Lichtstroms der RGB-LEDs. Der Kaufpreis für 5 m der Solarox-Streifen ist mit 100 € gleich dem der RGB-Streifen.

Die darauf verbauten Samsung-LEDs der Produktfamilie LM561A haben einen Farbwiedergabeindex $R_a > 80$ und kommen damit an den geforderten Wert von 85 heran. Eine IES-Datei, wie sie in Kapitel 4 für die RGB-LED erstellt wurde, stellt Samsung für die Modellreihe, aus der die weiße LED stammt, bereits zur Verfügung.

Das Simulations-Modell aus Konzept 1 wurde abgewandelt, indem die Lichtstärkeverteilung und die Lichtstromangabe entsprechend den weißen LEDs geändert wurde.

6.2.3 Auswertung

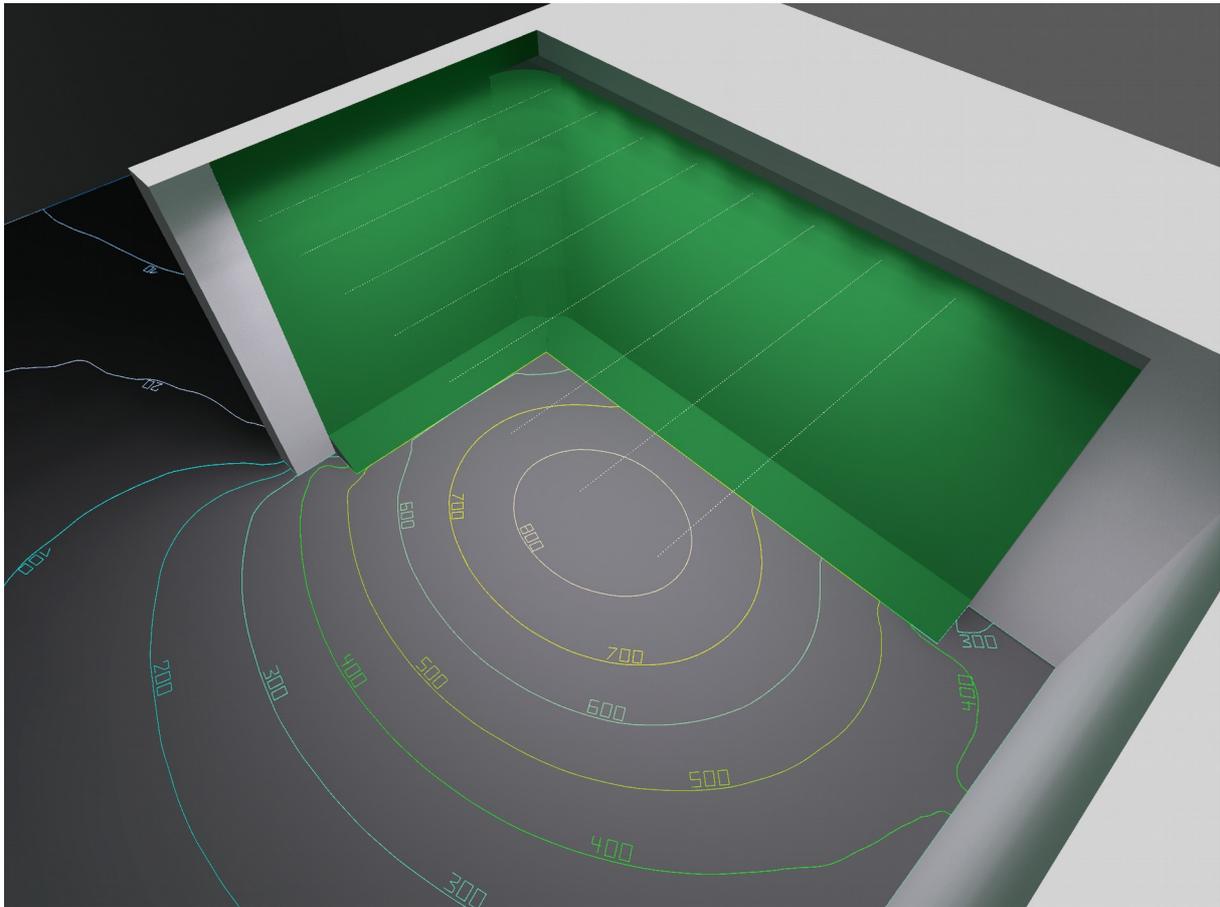


Abbildung 6.3: Beleuchtungsstärkeverteilung mit 1200 weißen LEDs

Abbildung 6.3 zeigt die Ergebnisse der Simulation. 700 Lux werden in einem guten Teil des Aufnahmefeldes erreicht. Um die gleiche Beleuchtungsstärke mit der RGB-LEDs zu erzielen, wäre mindestens eine Vervielfachung ihrer Anzahl notwendig. Wegen des gleichen Meterpreises der weißen LED-Streifen und der RGB-Variante, kann mit ersteren die benötigte Beleuchtungsstärke wesentlich günstiger erreicht werden kann.

In Abbildung 6.4 ist die Ausleuchtung des Green-Screens zu sehen. Mit abnehmender Höhe fällt die Beleuchtungsstärke stark ab.

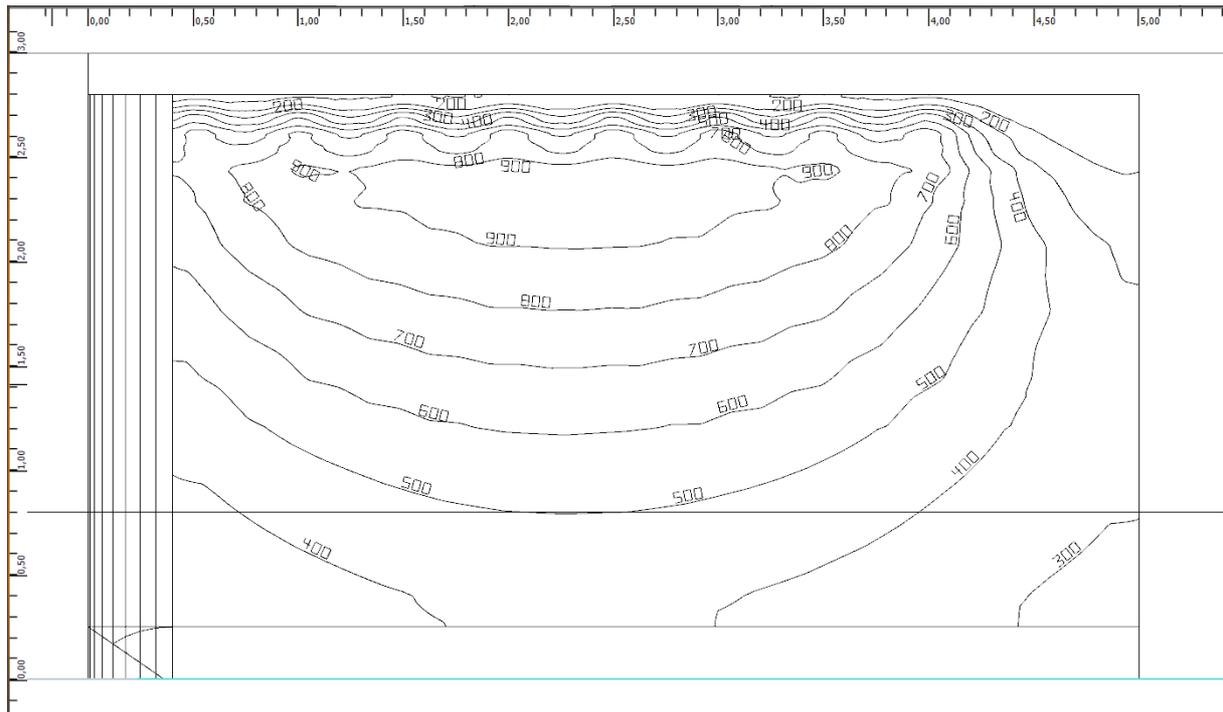


Abbildung 6.4: Isolux-Diagramm des Green-Screens

6.3 Konzept 3

6.3.1 Idee

In diesem Konzept soll evaluiert werden, ob mittels eines zusätzlichen weißen LED-Streifens grundsätzlich eine gleichmäßigere Ausleuchtung des Green-Screens erreicht werden kann.

Die Streifen wurden parallel zum Green-Screen an drei verschiedenen Positionen A, B und C platziert (siehe Abbildung 6.5) und haben eine Länge von 5 m.

- Streifen A befindet sich in 12 cm Abstand vor dem Green-Screen quer am Ende der Längsstreifen aus Konzept 2. Er ist senkrecht nach unten orientiert, die optischen Achsen der einzelnen LEDs liegen parallel zur Wand.

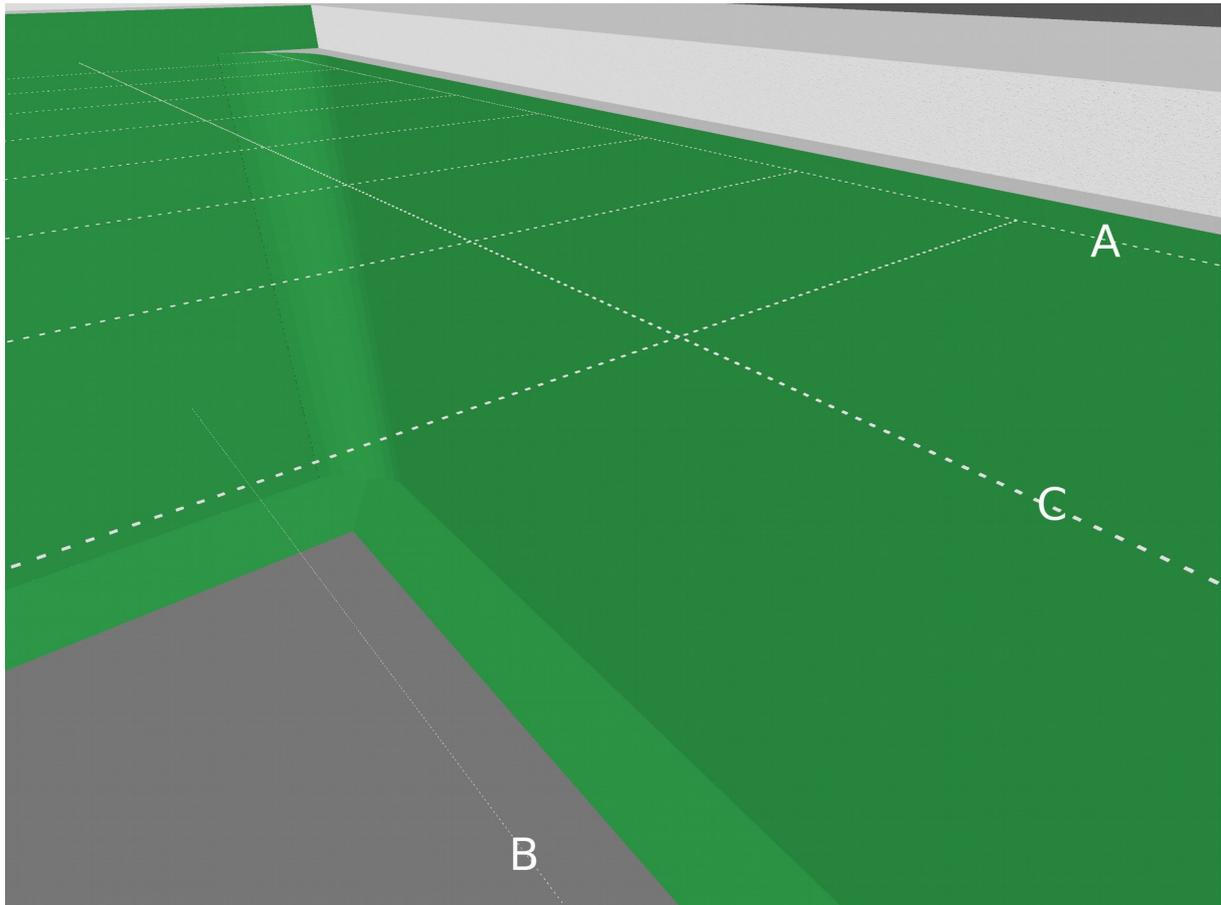


Abbildung 6.5: Querstreifen zur Ausleuchtung des Green-Screens

- Streifen B liegt 1 m über dem Boden und 1 m vom Green-Screen entfernt. Er strahlt senkrecht gerade auf den Green-Screen. Da diese Position im Aktionsfeld des Aufnahmebereichs liegt, dient sie als unrealisierbares Extrembeispiel nur zu Vergleichszwecken.
- Streifen C liegt wie Streifen A in der Ebene der Hauptbeleuchtung. Dort ist er 1 m vom Green-Screen abgerückt. Der Streifen wurde um seine Längsachse um 20 Grad in Richtung des Green-Screens rotiert. Damit schneiden die optischen Achsen der LEDs diesen etwa auf einer Höhe von 1 m.

6.3.2 Vorgehensweise

Die drei Streifen wurden entsprechend der beschriebenen Lage und Orientierung in das Modell eingefügt. Sie wurden in der Simulation jeweils einzeln zu der Hauptbeleuchtung zugeschaltet und für die drei Szenarien wurden Messergebnisse aufgenommen.

6. Untersuchungen

6.3.3 Auswertung

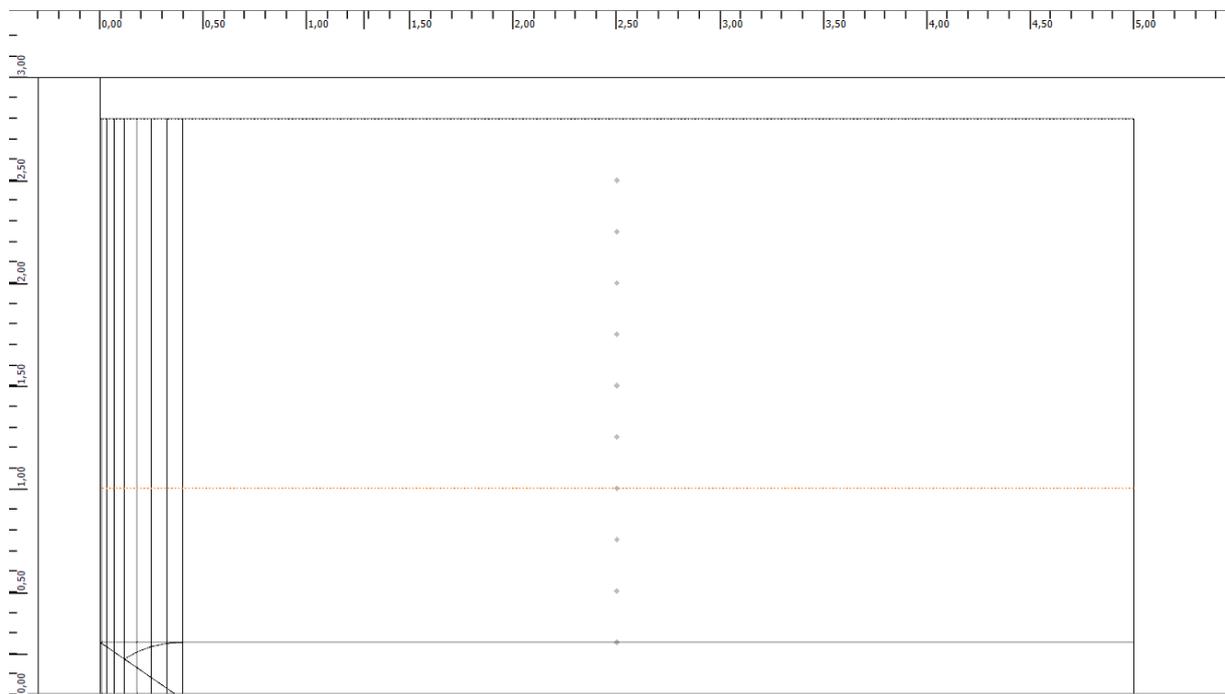


Abbildung 6.6: Messpunkte auf dem Green-Screen. Die zehn Punkte sind in der horizontalen Mitte im Abstand von 25 cm auf unterschiedliche Höhen verteilt.

In Abbildung 6.7 sind die Messwerte aus der Simulation dargestellt, die an den Positionen aus Abbildung 6.5 aufgenommen wurden. In allen drei Szenarien ist eine deutliche Veränderung der Ausleuchtung im Vergleich zu dem Aufbau ohne zusätzlichen Streifen zu erkennen.

Streifen B bringt eine deutlich ausgeglichene Ausleuchtung mit sich. Unterhalb einer Höhe von 0,75 m fällt die Beleuchtungsstärke zwar um fast 400 lx ab, darüber liegt sie aber etwa konstant um die 1200 lx.

Die Positionen A und C bringen keine Verbesserung. In den oberen Bereichen, die ohne Green-Screen-Beleuchtung bereits zu hell beleuchtet sind, erhöhen sie die Beleuchtungsstärke noch weiter. In den unteren Bereichen, auf die die Streifen mit ihrer optischen Achse zielen, wird verhältnismäßig wenig Änderung erreicht.

Auch wenn eine Verbesserung der Green-Screen-Ausleuchtung bezüglich seiner Gleichmäßigkeit grundsätzlich möglich ist, gelingt dies aus der Deckenebene nicht ohne weiteres. Durch den breiten Abstrahlwinkel der LEDs und das fotometrische Entfernungsgesetz kann das Licht von dort nicht gezielt genug in den unteren Bereich gebracht werden, wo es gebraucht wird.

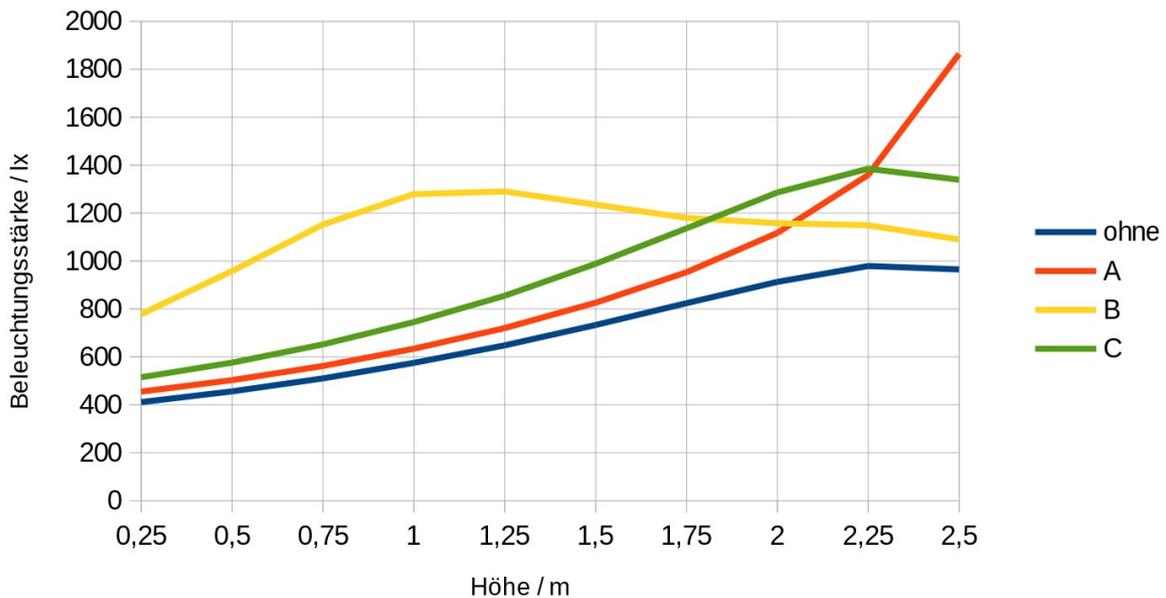


Abbildung 6.7: Vertikaler Verlauf der Beleuchtungsstärke mit und ohne zusätzliche Streifen zur Hintergrundbeleuchtung

In professionellen Fernsehstudios werden aus diesem Grund sogenannte Cyclorama-Scheinwerfer mit asymmetrischem Reflektor eingesetzt. Auch unter Verwendung der in Konzept 1 ausgesuchten LED-Streifen wäre die Bündelung ihres Lichtstroms z.B. durch Einkleben in ein Aluminiumprofil ein möglicher Lösungsansatz. Aus zeitlichen Gründen wurde dieser nicht weiter untersucht.

6.4 Konzept 4

6.4.1 Idee

Anstatt die Beleuchtungsstärke im oberen Bereich zu erhöhen, wird mit diesem Konzept der Ansatz verfolgt, den oberen Bereich abzdunkeln, um den vertikalen Verlauf der Beleuchtungsstärke gleichmäßiger zu gestalten. Dies geschieht durch Abrücken der Lichtquellen vom Green-Screen.

6.4.2 Vorgehensweise

Die Anordnung der LED-Streifen aus Konzept 2 wurde vom Green-Screen weg verschoben, sodass die Distanz zwischen Streifenanfang und Green-Screen 60 cm beträgt. Abbildung 6.8 zeigt den Aufbau.

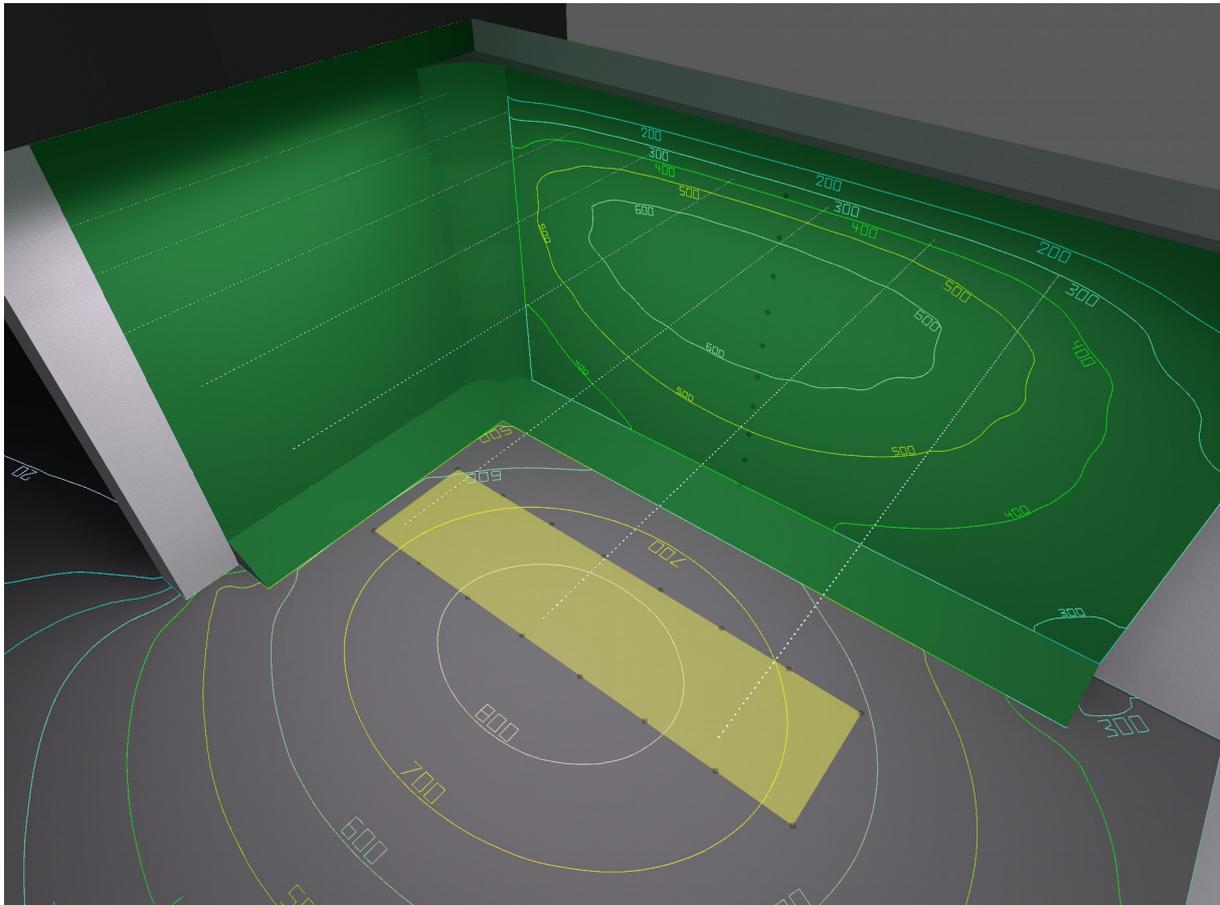


Abbildung 6.8: Weiße LED-Streifen, 60 cm vom Green-Screen entfernt. Eine Messfläche und Messpunkte sind eingeblendet.

6.4.3 Auswertung

Abbildung 6.9 stellt die durch dieses Konzept erzielte Green-Screen-Ausleuchtung der aus Konzept 2 gegenüber. Bis zu einer Höhe von 1 m gibt es kaum Differenzen. Darüber nimmt die Beleuchtungsstärke bei den weiter entfernten Streifen wesentlich weniger zu als bei denen in ursprünglicher Entfernung. Die maximale Differenz im Verlauf der Beleuchtungsstärke konnte durch das Abrücken von 568 lx auf 272 lx mehr als halbiert werden.

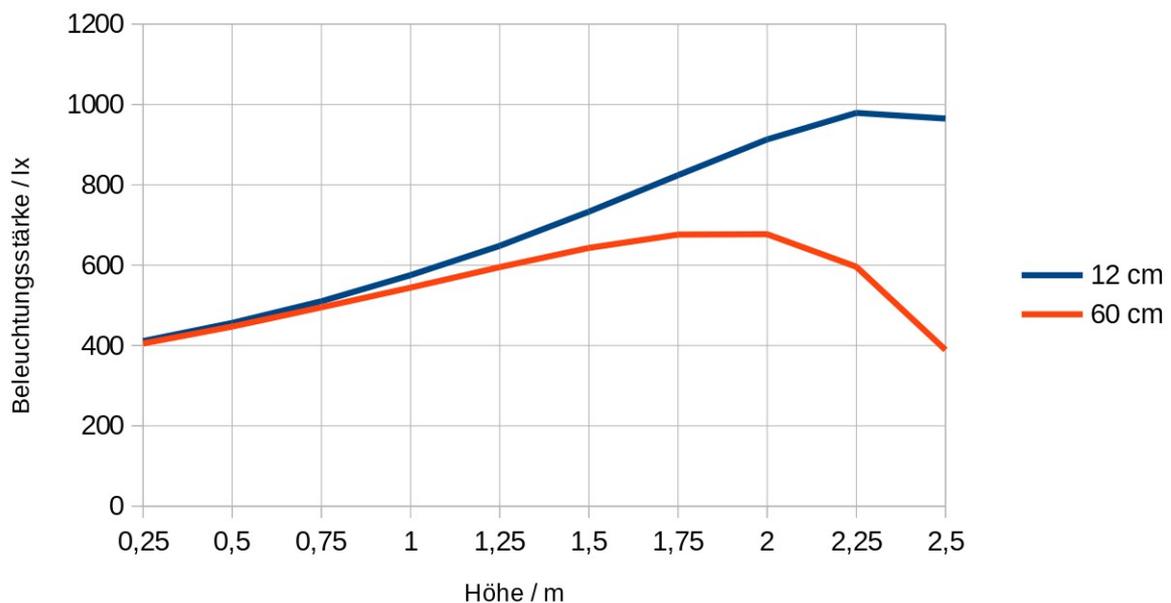


Abbildung 6.9: Vertikaler Verlauf der Beleuchtungsstärke mit Hauptbeleuchtung in kleinem und großem Abstand. Die Lage der Messpunkte entspricht der aus Abschnitt 6.3.2.

6.5 Bewertung

Aufgrund der deutlichen Erhöhung der Grundhelligkeit und der Verbesserung der Green-Screen-Ausleuchtung wurde das finale Konzept 4 für die Realisierung ausgewählt.

Für Konzept 1 wären nur wenige Änderungen an der Systemarchitektur nötig, was einen geringen Integrationsaufwand erwarten lässt. Auch die Veränderbarkeit des Farbtons und die individuelle Ansteuerbarkeit jedes einzelnen RGB-LED-Moduls sind Vorteile der bestehenden Anlage, die im Konzept 1 erhalten blieben. Durch die dezentrale, integrierte Stromregelung sind diese „intelligenten“ Module einfach einsetzbar.

Die Funktionalität der Gesamtanlage, die sich durch diese Features ergibt, spielen bezüglich der ausreichenden Beleuchtungsstärke eine weit untergeordnete Rolle. Diese kann mit den RGB-LED-Modulen nur in sehr hoher Stückzahl erreicht werden, was finanzielle und stromversorgungstechnische Probleme mit sich bringt. Auch der subtile Nachteil eines zu niedrigen Farbwiedergabeindex macht die RGB-LEDs als alleinige Beleuchtung für das Filmset unbrauchbar.

Die in Konzept 2 eingeführten, weißen LEDs verfügen über einen akzeptablen Farbwiedergabeindex, was auf ihrem dichteren Spektrum beruht. Durch ihren höheren Lichtstrom lässt sich die erforderliche Beleuchtungsstärke durch nur acht zusätzliche Streifen erreichen. Die

6. Untersuchungen

durch die Einführung des neuen LED-Typs steigende Komplexität der Anlage wird als geringeres Problem eingeschätzt. Die zusätzlich erforderliche Nennspannung erfordert ein zusätzliches Netzgerät. Die Dimmbarkeit muss bei den analogen LEDs durch externe Dimmer realisiert werden.

Durch den höheren Lichtstrom entstehen stärkere Gradienten in der Beleuchtungsstärke, welche am Green-Screen als kritisch angesehen werden. In Konzept 3 wurde aufgezeigt, dass es mit unmodifizierten Streifen des gleichen Typs keine praktikable Lösung für die Verbesserung der Green-Screen-Ausleuchtung besteht. Dies konnte in Konzept 4 durch das Umpositionieren der Hauptbeleuchtung aus Konzept 2 erreicht werden.

Nach der abschließenden Bewertung wurde die Entscheidung getroffen Konzept 4 zu implementieren. Da die zusätzlichen Komponenten nicht im Konflikt mit der bestehenden Anlage B2 stehen, kann diese mit ihrer Funktionalität weiter bestehen bleiben. Ohne weitere Untersuchung wird durch die RGB-LEDs weiterhin zumindest ein leichter Effekt zur Einstellbarkeit der Farbgebung im Videobild erwartet.

7 Realisierung

In diesem Kapitel wird die Realisierung des zuvor ausgewählten Konzepts 4 beschrieben.

Zunächst wird auf die Auslegung und Auswahl der Komponenten eingegangen, die für das Gesamtsystem notwendig sind. Für weitere Versuche zur direkten Ausleuchtung des Green-Screens wurden bei der Auslegung der Stromversorgung und bei der Bestellung zusätzliche 5 m des weißen LED-Streifens vorgesehen, die nicht in die Anlage integriert wurden.

Die bestellten Komponenten wurden sukzessive in Betrieb genommen. Neben dem Vorgehen wird auch die Lösung aufgetretener Probleme beschrieben.

Nach dem Einbau in das Studio wird abschließend die erreichte Beleuchtung mit dem simulierten Konzept verglichen und bewertet.

7.1 Komponentenauswahl

7.1.1 LED-Streifen

Die in Konzept 2 eingeführten LED-Streifen werden in einer Gesamtlänge von 25 m eingesetzt. Als Farbtemperatur wurde 4000 K („neutralweiß“) ausgewählt, damit durch die RGB-LEDs die Farbtemperatur in beide Richtungen verändert werden kann.

Die Streifen werden mit 12 V Konstantspannung versorgt. Das 12-V- und das Massepotential werden auf Leiterbahnen über die gesamte Streifenlänge geführt. Zwischen diesen zwei Potentialen sind abschnittsweise jeweils drei LEDs und zwei Vorwiderstände in Reihe geschaltet. Dadurch können die Streifen, die als Rollen à 5 m vertrieben werden, alle 5 cm geteilt werden.

Für 5-m-Streifen wird eine maximale Stromaufnahme von 7,5 A angegeben, was eine Nennleistung von 90 W ergibt. Über den Widerstand der Leiterbahnen wird keine Angabe gemacht; der Hersteller empfiehlt aber bei einer Länge von über 5 m eine mittige Stromspeisung. Module von 2,5 m Länge, wie sie im Konzept 4 vorgesehen sind, können also einseitig gespeist werden. Zur Wärmeabfuhr schreibt der Hersteller die Befestigung auf einem metallischen Träger vor. Diese sind in B2 bereits vorhanden.

7.1.2 Netzteil

Zur Spannungsversorgung wird ein Netzgerät gebraucht, das die 230 V des Wechselspannungsnetzes bei ausreichender Leistung zu 12 V Gleichspannung wandelt. Für 25 m der wei-

7. Realisierung

ßen LED-Streifen wird ein maximaler Gesamtstrom von $5 \cdot 7,5 \text{ A} = 37,5 \text{ A}$ benötigt, was 450 W Leistung entspricht. Um die Tonaufnahmen nicht zu beeinflussen, muss das Netzgerät weitestgehend lautlos arbeiten.

Gleichzeitig wurde versucht, das Industrienetzteil von B2 zu ersetzen, da sein unregelmäßiger, aktiver Kühler eine hohe Lautstärke erzeugt. Der Lüfter wird aktiv, sobald die Last über 35 % oder die Temperatur über 50 °C steigt. Für die RGB-LEDs werden in Summe bis zu 80 A bei 5 V benötigt.

Netzgeräte über 60 A ließen sich im Einzelhandel nicht finden. Die Leistungsklasse darüber wird von Industrienetzteilen bedient, die jedoch aktiv gekühlt und über industrielle Zulieferer vertrieben werden.

Für die kombinierte Spannungsversorgung mit 12 V und 5 V aus einem Gerät, sind ATX-Netzteile, die in Desktop-Computern verbaut werden, eine preisgünstige Option. Aber selbst Geräte der 1500-W-Klasse (Kostenpunkt 250 €) geben hier auf der 5-V-Schiene nur maximal 40 A aus. Ein Großteil der Leistung wird bei 12 V zur Verfügung gestellt. Unter den verbreiteteren 500-W-ATX-Netzteilen finden sich auch einige lüfterlose Modelle, die nur durch thermische Konvektion gekühlt werden.

Daraus wurde für B3 das Modell SST-NJ520 der Marke Silverstone ausgewählt. Es leistet 43 A auf der 12-V-Schiene, was für die Versorgung der weißen LEDs ausreicht. Zudem lassen sich zwei der bestehenden 2,5-m-RGB-LED-Streifen mit den 20 A der 5-V-Schiene des Netzteils versorgen. So kann die Last des Industrienetzteils um 25 % reduziert werden. Um das Einschalten des Lüfters ganz zu unterbinden, wird die Leistungsaufnahme durch die RGB-LEDs steuerungsseitig begrenzt. Es sollen nur noch Farbwerte ausgewählt werden können, bei denen sichergestellt ist, dass die Last-Schwelle für das Einschalten der Lüfters nicht überschritten wird.

7.1.3 Dimmer

Die weißen Samsung-LEDs sind analoge Bauteile mit nur zwei Kontakten. Ihr Lichtstrom ist direkt abhängig von dem elektrischen Strom, der durch die Diode fließt. Im Gegensatz zu den WS2812-Modulen, die eine interne Stromregleinheit besitzen, müssen die weißen LED-Streifen extern in ihrer Helligkeit gesteuert werden.

Deshalb sind zum variablen Einstellen der Beleuchtungsstärke zusätzliche Dimmer erforderlich. Da die Verschaltung der LEDs auf den Streifen mit Vorwiderständen auf 12 V Nennspannung festgelegt ist, werden solche Streifen mit dem Verfahren der Pulsweitenmodulation

7. Realisierung

(PWM) gedimmt. Dabei wird die Versorgungsspannung mit hoher Frequenz ein- und ausgeschaltet. Die Trägheit des menschlichen Auges mittelt die Lichtpulse zu einer Durchschnittshelligkeit.

Die PWM-Dimmer-Module für LEDs werden zwischen die Spannungsquelle und die Anschlüsse der LED-Streifen geschaltet. Sie werden mit unterschiedlichen Eingangsspannungsbereichen, maximalen Stromstärken und PWM-Frequenzen angeboten. Bei der Auswahl der PWM-Frequenz muss darauf geachtet werden, dass das Pulsen keine Auswirkungen auf das Kamerabild hat. Die im Studio verwendeten Kameras nehmen Bilder bei einer Wiederholfrequenz von 25 Hz auf. Die Belichtungszeit beträgt standardmäßig 1/50 s. Eine PWM-Frequenz von 250 Hz wird als ausreichend erachtet, da dabei innerhalb einer Belichtungszeit durchschnittlich fünf PWM-Perioden ablaufen, die in einem Sample gemittelt werden. Viele Dimmer werden allerdings ohne spezifizierte PWM-Frequenz angeboten.

Es wurden Dimmermodule der Marke Solarox ausgewählt. Sie sind bis 10 A belastbar, sodass jeweils zwei 2,5-m-Streifen von einem Dimmer gespeist werden können. Es bietet sich an, jeweils einen Dimmer am Anfang zwischen zwei Leuchtstreifen zu platzieren. Insgesamt werden 5 Dimmer benötigt.

Die PWM-Frequenz der Geräte liegt bei etwa 250 Hz. Die Helligkeit wird ihnen über eine Steuerspannung im Intervall von 0 bis 10 V vorgegeben. Dafür stellen sie auch eine 10-V-Hilfsspannung bereit. Diese kann am anderen Ende einer Steuerleitung durch ein 10-kOhm-Potentiometer heruntergeteilt werden.

Dazu wurden zwei Potentiometer vorgesehen, die zusätzlich in die Steuerkonsole von B2 integriert werden. Eines dient zur gemeinsamen Regelung der Helligkeit des Leuchtfeldes, das zweite ist für die Dimmung der angedachten Hintergrundbeleuchtung eingeplant.

7.1.4 Leitungen

Durch das zentrale Netzteil und die verteilten PWM-Dimmer ergeben sich zum Teil hohe Leitungslängen. Bei den großen Strömen, die auf ihnen fließen, muss ihr Einfluss als Ohm'scher Widerstand betrachtet werden. Bei zu kleinen Kabelquerschnitten kann ein erheblicher Spannungsabfall zu Stande kommen, der zu Helligkeitseinbußen bei den LEDs führt.

Neben der Betrachtung verschiedener Alternativen wurde auf die Leitungen zurückgegriffen, die auch in B2 verwendet wurden. Dabei handelt es sich um Kupferlitze mit einem Querschnitt von $A=6\text{mm}^2$. Kupfer hat bei 20° einen spezifischen Widerstand von

7. Realisierung

$\rho = 0,0178 \Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$ [Muel2008, Kap. 25.5]. Als längste mögliche Leitungslänge wurden 5 m abgeschätzt. Für Hin- und Rückleitung ergeben sich $l = 10 \text{ m}$. Der absolute Widerstand ist dann

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \approx 0,0296 \Omega .$$

Bei einem Stromfluss von 7,5 A (für zwei Streifen von 2,5 m Länge) fallen an der Leitung 0,22 V ab, was toleriert werden kann.

7.1.5 Kosten

Posten	Einzelpreis / €	Stückzahl	Gesamtpreis / €
LED-Streifen neutralweiß 4000K 5m-Rolle	99,99	5	499,95
PWM-Dimmer	39,99	5	199,95
ATX-Netzteil	126,98	1	126,98
Kleinposten: Leitungen, Verbindungstechnik, Bauteile für die Erweiterung der Steuerkonsole	81,10		81,10
Summe			907,98

Tabelle 7.1 Bruttopreise der eingesetzten Komponenten

Der nominale Gesamtlichtstrom der weißen LED-Streifen beträgt 39000 lm. Damit entspricht er nahezu dem der zwei in B1 verwendeten 800W-Halogen-Strahler mit insgesamt 41000 lm (vgl 3.2.1).

Teilt man die Summe der Komponentenkosten (siehe Tabelle 7.1) durch den Nominallichtstrom, so ergibt sich ein Lumenpreis von 2,32 ct/lm. Der Bruttopreis der LED-Leuchte aus B1 (vgl. 3.2.2) liegt bei 620 €. Bei ihrem Lichtstrom von 1790 lm ist der Lumenpreis 34,63 ct/lm. Damit ist der auf den Lichtstrom bezogene Anschaffungspreis der gewählten Lösung fast 15 mal günstiger als ein Vertreter der handelsüblichen LED-basierten Videoleuchten.

Dementsprechend kann die realisierte Beleuchtungsanlage auch in Anbetracht der Tatsache, dass im Preis der Aufwand für ihren Aufbau nicht eingerechnet ist, als sehr kostengünstig bewertet werden.

7.2 Inbetriebnahme

7.2.1 Einzelkomponenten

Nach erfolgter Bestellung und Lieferung der Einzelkomponenten wurden diese nacheinander in Betrieb genommen.

7. Realisierung

ATX-Netzgeräte laufen nach dem Verbinden mit dem Netz nicht sofort an. In Computergehäusen eingebaut geschieht dies erst nach Betätigung eines Tasters. Dieser ist mit der PS-ON-Leitung verbunden. Wird diese auf das Massepotential gezogen, ist das das Signal zum Start des Netzgeräts. Um das Netzteil außerhalb des Computergehäuses zu betreiben, wurde diese Verbindung permanent hergestellt. Anders als bei manchen ATX-Netzteilen ist bei dem verwendeten Modell zum Hochfahren keine Grundlast auf allen Spannungsschienen erforderlich.

Der direkte Betrieb eines 5-m-LED-Streifens am Netzgerät ist problemlos möglich. Im nächsten Schritt wurde provisorisch ein Dimmer mit Potentiometer dazwischen geschaltet. Dabei zeigten sich zweierlei Probleme.

Problem 1: Induktive Überlastung des Netzgeräts

Während der Streifen im unteren Dimmbereich scheinbar stabil strahlte, setzte ab einer gewissen Schwelle ein unregelmäßiges, mit dem bloßen Auge sichtbares Flackern ein. Wurden nur 2,5 m des Streifens angeschlossen, setzte dieses nicht ein. Daher wurde zunächst eine Überlastung des PWM-Dimmers angenommen. Eine weitere Hypothese zur Fehlerursache bestand darin, dass das ATX-Netzteil nicht in der Lage ist, die Spannung bei den starken impulsartigen Lastwechseln nachzuregulieren, da solche im regulären Anwendungsfall nicht vorkommen. Nach einigen Untersuchungen zeigte sich, dass die langen aufgewickelten Kabelrollen, die provisorisch als Zuleitung zum Dimmer verwendet worden sind, als Induktivität L fungierten. Bei Änderungen des Stromes ergibt sich entsprechend

$$u_L(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt}$$

ein Spannungsabfall u_L , der die Lichtausfälle verursacht hat.

Dem Problem konnte abgeholfen werden, indem für die erste Inbetriebnahme die Kabelrollen durch eine kürzere Zuleitung ersetzt wurden. Im weiteren Verlauf der Realisierung wurde darauf geachtet, dichte Leiterschleifen in den Leitungen zu vermeiden, die von großen Strömen durchflossen werden.

Problem 2: PWM banding

Das zweite Problem wurde erst bei Betrachtung der Beleuchtung durch eine Smartphone-Kamera deutlich. Die Durchschnittsbelichtung ändert sich zwischen den einzelnen Bildern nicht, es gibt also kein ganzheitliches Flackern auf Grund zu niedriger PWM-Frequenz. Innerhalb des Bildes entstehen allerdings Artefakte. Diese erscheinen als helle horizontale Streifen,

die von oben nach unten durch das Bild wandern. Die Geschwindigkeit der vertikalen Bewegung der Streifen ist abhängig von der eingestellten Dimmstufe. [Wood2011] beschreibt diesen Effekt als PWM banding. Er rührt daher, dass der CMOS-Kamerasensor des Smartphones nach dem Rolling-Shutter-Prinzip funktioniert. Dabei wird der Inhalt des Bildsensors nicht auf einmal, sondern zeilenweise ausgelesen.

Nach einem Testaufbau im Campus-TV-Studio bestätigte sich, dass auch die dort verwendeten, professionellen Kameras (vgl. Kapitel 3.1.1) mit ihren CMOS-Sensoren von dem Problem betroffen sind. Eine erheblichen Einfluss auf die Stärke der Artefakte hat der bei diesen Kameras einstellbare Shutter-Speed. Er gibt die Belichtungszeit des Sensors als Sekundenbruchteil an. Die übliche Belichtungsdauer ist $1/50$ s. Bei kürzeren Belichtungsdauern nehmen die Artefakte weiter zu. Die durch das PWM banding entstehenden Artefakte machen die Beleuchtung für Filmaufnahmen unbrauchbar.

Nach seiner Untersuchung wurde das schwerwiegende Problem behoben, indem die PWM-Frequenz der Dimmer von 250 Hz auf etwa 2500 Hz angehoben wurde. Dazu musste die Dimmer-Elektronik unter großem Aufwand modifiziert werden. Diese basiert auf einem PWM-IC, dessen Arbeitsfrequenz durch ein angeschlossenes RC-Glied parametrisiert wird. Nach der Analyse des Schaltkreises und des Datenblattes des ICs wurden die verbauten 82-nF-Kondensatoren durch Kapazitäten von 10 nF ausgetauscht. Dadurch ergibt sich laut Datenblatt des ICs eine Frequenz-Erhöhung um etwa eine Dekade. Es wurde experimentell verifiziert, dass bei den im Studio verwendeten Kameras bei dieser Frequenz keine PWM banding auftritt.

7.2.2 Systemtest

Um das Zusammenspiel der Komponenten in ihrer Gesamtheit zu überprüfen, wurde im Labor ein Testaufbau des gesamten Systems vollzogen.

Zuvor wurden alle elektrischen Verbindungen zwischen den Komponenten so hergestellt, wie sie für die Integration im Studio benötigt werden. Die LED-Streifen wurden auf die richtige Länge gekürzt und mit längeren Anschlussleitungen versehen. Die Hin- und Rückleitung der Stromversorgung der Dimmer wurden jeweils zu einem Kabelstrang gebunden, um elektromagnetische Abstrahlung durch die hochfrequenten Wechselströme zu minimieren. Desweiteren wurde die zweiadrige Steuerleitung zu dem Strang hinzugefügt.

Der Aufbau konnte ohne Probleme in Betrieb genommen werden und ist in Abbildung 7.1 zu sehen. Am 12-V-Ausgang des Netzteils wurden 12,14 V gemessen. Die Spannungen an den

7. Realisierung

anderen Enden der Leitungspaare sind in Tabelle 7.2 aufgeführt. Der größte Spannungsabfall mit einem Betrag von 0,25 V entsteht an der 5 m langen Zuleitung zu Dimmer 4. Dies entspricht in etwa dem in Abschnitt 7.1.4 berechneten Wert von 0,22 V.

Wegen fehlender Wärmeableitung stieg die Temperatur der lose ausgelegten Streifen schnell. Durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der eigentlichen LED-Streifen und des darunter befindlichen Klebestreifens lösten diese sich teilweise voneinander ab, sodass der Test nach einigen Minuten beendet wurde.

Messpunkt	Zuleitungslänge / m	Spannung / V
Dimmer 1	2,00	12,05
Dimmer 2	3,50	11,94
Dimmer 3	4,00	11,91
Dimmer 4	5,00	11,89
Dimmer Hintergrund	5,00	11,94

Tabelle 7.2 Am Eingang der Dimmer gemessene Spannung

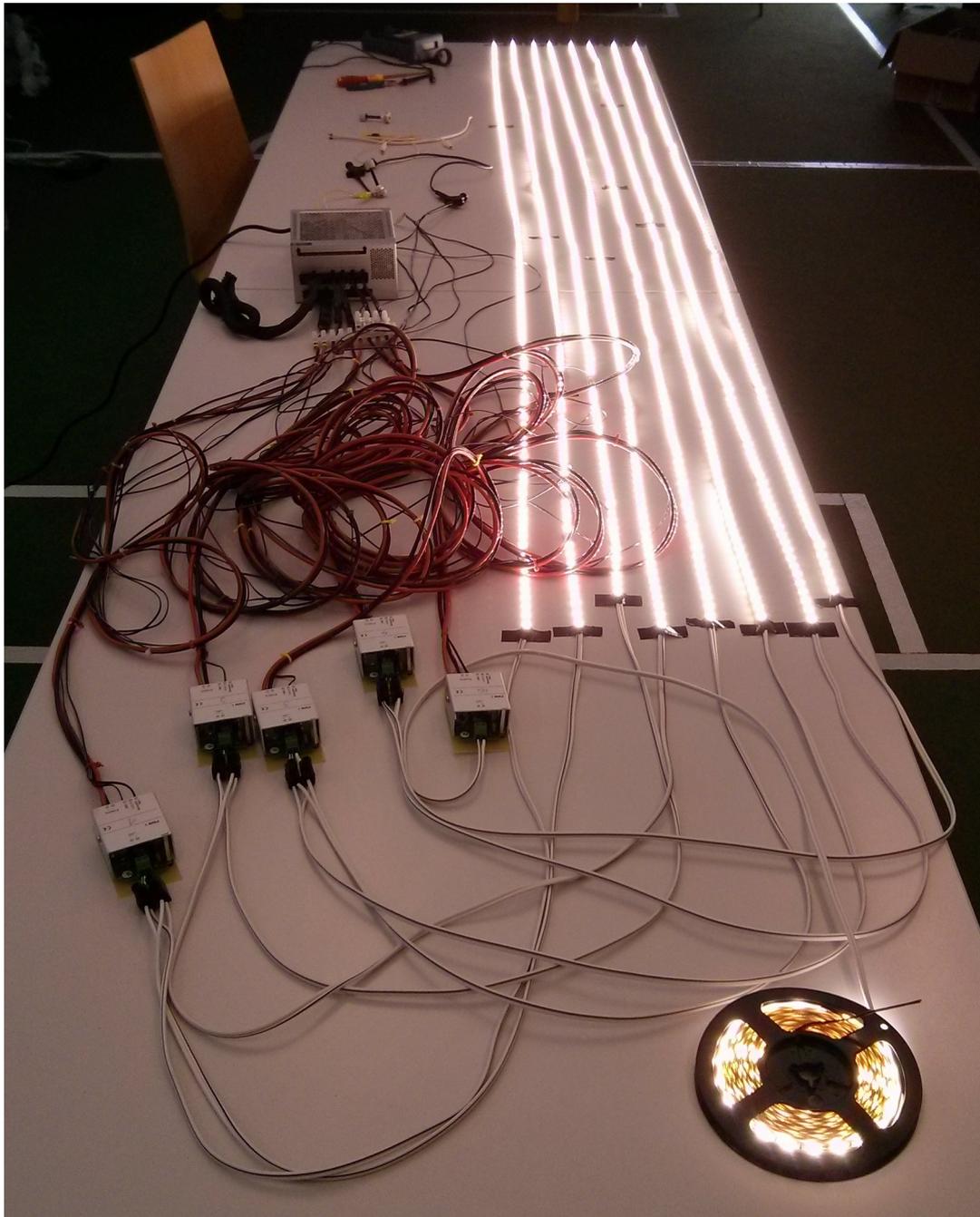


Abbildung 7.1: Alle Komponenten im Systemtest. Im Hintergrund ist das ATX-Netzteil zu sehen, unterhalb der ausgelegten LED-Streifen die daran angeschlossenen Dimmer.

7.3 Integration der Komponenten in das Studio

Nach dem erfolgreichen Systemtest wurden die zusätzlichen Komponenten für B3 im Studio zur Beleuchtungsanlage B2 hinzugefügt. Abbildung 7.2 zeigt die aufgebaute Beleuchtungsanlage B3.

Die LED-tragenden Längsprofile wurden abgebaut und um 60 cm verlängert. Da nicht alle elektrischen Verbindungen an den Streifen lösbar ausgeführt waren, mussten diese zerschnitten und später mittels Aderendhülsen und Lüsterklemmen wiederhergestellt werden. Die selbstklebenden weißen LED-Streifen wurden auf den Profilen direkt neben den bestehenden Streifen aufgebracht.

Um den existierenden Kabelbaum von B2 nicht verändern zu müssen, wurde die an den Studiowänden befestigte Querträgerkonstruktion in den Raum hinein verschoben. Anstelle des einfachen Auflegens der Längsprofile auf den Querträger wurden diese mit Kabelbindern von unten gegen jene festgezogen. Ebenso wurde mit den vier Dimmern für die Hauptbeleuchtung verfahren. Die vorkonfektionierten Zuleitungen wurden zusätzlich zu den bestehenden in das U-Profil des Querträgers eingelegt.

Aufgrund des Gewichts und der Größe des ATX-Netzteils wurde eine Montage an der Seitenwand des Green-Screen-Aufnahmebereichs präferiert. Die Einbaulage ist durch die passive Kühlung des Geräts vorgegeben. Daran angeschlossen wurden neben den vier Dimmern für B3 auch die naheliegendsten zwei Leuchtstreifen von B2, um dessen Netzgerät zu entlasten.

Die Steuerung der Anlage wurde um eine Schaltung erweitert, die auf einer Lochrasterplatte aufgebaut wurde. Sie trägt zwei Potentiometer und Steckverbinder für die Steuerleitungen der Dimmer.

Die Achsen der Potentiometer wurden mit Drehknöpfen aus Aluminium versehen. Diese bieten eine bessere Griffbarkeit als die dünnen, glatten Potentiometerachsen (vgl. Abbildung 3.13) und zeigen mit einer Markierung den Zustand des jeweiligen Reglers an. Um die Funktion der einzelnen Regler einfacher identifizieren zu können, wurden sie mit Beschriftungen versehen (siehe Abbildung 7.3).

Die Stromaufnahme der sechs RGB-Streifen, die ihre Energie vom aktiv gekühlten Industrienetzteil beziehen, wurde softwareseitig begrenzt. Dazu wurde eine Modifikation an der Firmware des Arduino-Boards vorgenommen. Der maximale Helligkeitswert im HSV-Farbraum wurde auf 50 % begrenzt. Dieser Wert wurde experimentell so bestimmt, dass unter Variation aller fünf Regler in keinem Zustand die kritische Lastgrenze überschritten wird.



Abbildung 7.2: Beleuchtungsanlage B3 mit neuem Netzgerät (Hintergrund) und am Querträger befestigte LED-Profile und PWM-Dimmer.

Diese Lösung ist mit geringem Aufwand zu implementieren, hat aber den Nachteil, dass die Helligkeit aller Farbmischungen pauschal halbiert wird. Auch in den Fällen, in denen nur eine der drei LEDs pro Modul leuchtet, kann nur die Hälfte ihres maximalen Lichtstromes erreicht

7. Realisierung

werden, obwohl diese womöglich ganz ausgelastet werden könnten, ohne den Lüfter auszulösen.

Ein Ansatz zur Limitierung, die das Verbrauchsverhalten der LEDs besser berücksichtigt, wäre die Limitierung im RGB-Farbraum. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass die Summe $R+G+B$ näherungsweise proportional zum Gesamtstrom ist, der den kritischen Wert nicht überschreiten darf. Beim Überschreiten müsste die Länge des RGB-Vektors auf diesen Wert normiert werden. Hierbei werden allerdings Nebenwirkungen auf die Intuitivität der HSV-Bedienerschnittstelle befürchtet. Es ist zu prüfen, wie sich die Normierung bei der Transformation von HSV- zu RGB-Werten auswirkt.



Abbildung 7.3: Bediener-Schnittstelle der Steuerung von B3

7.4 Bewertung

Die subjektiv wahrgenommene Helligkeit im Aufnahmebereich konnte deutlich erhöht werden: Während bei ausschließlicher Verwendung von B2 der Raum zuvor duster wirkte, ist er bei maximal eingestellter Helligkeit der weißen LEDs hell ausgeleuchtet (siehe Abbildung 7.4).



Abbildung 7.4: Von B3 beleuchteter Aufnahmebereich

Für eine objektive Erfassung der erreichten Beleuchtungsstärke wurden analog zu Kapitel 5.4 Messungen in der Bodenebene aufgenommen. Die weißen LEDs wurden bei maximaler einstellbarer Intensität betrieben, während die RGB-LEDs nicht zugeschaltet waren. Es werden die gleichen Messpunkte (P1 bis P16), wie sie bereits in Abbildung 5.2 definiert wurden, untersucht. Tabelle 7.3 stellt die dort gemessenen Beleuchtungsstärken prognostizierten Werten gegenüber. Letztere wurden dem Simulationsmodell zu Konzept 4 entnommen.

7. Realisierung

Messpunkt	Gemessene Beleuchtungs- stärke E_m / lx	Simulierte Beleuchtungs- stärke E_s / lx	Absolute Abweichung F / lx	Relative Abweichung $f / \%$
P1	646	584	-62	-9,6
P2	726	672	-54	-7,4
P3	788	735	-53	-6,7
P4	814	772	-42	-5,2
P5	816	774	-42	-5,1
P6	766	746	-20	-2,6
P7	696	688	-8	-1,1
P8	596	611	15	2,5
P9	725	641	-84	-11,6
P10	828	741	-87	-10,5
P11	886	809	-77	-8,7
P12	920	849	-71	-7,7
P13	909	851	-58	-6,4
P14	854	818	-36	-4,2
P15	766	752	-14	-1,8
P16	653	665	12	1,8
Mittelwert	774	732	-42	-5,3

Tabelle 7.3 Vergleich der in Konzept 4 simulierten mit den gemessenen Beleuchtungsstärken

Die geforderte Beleuchtungsstärke von 700 Lux konnte in fast allen Messpunkten erreicht werden. Ausnahmen bestehen lediglich in den Eckpunkten des Messfeldes (P1, P8 und P16). In der Mehrheit der Fälle liegt die gemessene Beleuchtungsstärke deutlich über 700 Lux, so dass sich im Durchschnitt 774 Lux ergeben.

Die Ergebnisse der Simulation haben die durch B3 erzeugte Beleuchtungsstärke in den 16 Punkten im Mittel 42 Lux zu dunkel eingeschätzt. Nur zwei Punkte (P8 und P16) wurden zu hell berechnet. Dies steht im Gegensatz zu den Simulationsergebnissen des B2-Modells (vgl. Kapitel 5.4), wo die Helligkeit grundsätzlich überschätzt wurde.

Die Präzision der hier betrachteten simulierten Werte ist deutlich höher, als bei der Simulation des Modells von B2. Der mittlere relative Fehler ist von 20,7 % auf –5,3 % gefallen. Auch die relative Abweichung der größten Ausreißer ist von 48,1 % auf –11,6 % reduziert.

7. Realisierung

Eine Hypothese für diese Verbesserung ist, dass das Lampenmodell der weißen LEDs, dessen Leuchtstärkeverteilung und Lichtstrom auf Herstellerangaben beruht, genauer ist, als die in dieser Arbeit für das RGB-LED-Modul ermittelten Daten.

Tabelle 7.4 zeigt die im Green-Screen erreichte Beleuchtungsstärke. Der vertikale Abfall um etwa 200 Lux entspricht den Beobachtungen in der Simulation (vgl. Kapitel 6.4.3).

	1 m	2 m	3 m
2,0 m	620	669 (677)	619
1,5 m	610	678 (643)	632
1,0 m	523	580 (544)	541
0,5 m	433	466 (456)	439

Tabelle 7.4 Gemessene Beleuchtungsstärke des Green-Screens in Lux. Die drei Spalten enthalten Messreihen in drei Entfernungen (1 m, 2 m, 3 m) von der linken Seitenwand. Zu jeder dieser vertikalen Messreihen ist in vier verschiedenen Höhen gemessen worden (2,0 – 0,5 m). In Klammern stehen die in Konzept 4 berechneten Werte.

Durch Zuschalten der um 50 % gedrosselten RGB-LEDs kann die maximale Beleuchtungsstärke in der Bodenebene von 920 lx auf 1011 lx erhöht werden. Durch Variation des Farbtons wird eine schwache Änderung der Farbgebung in Kamerabildern erzielt. Der Effekt kann deutlich verstärkt werden, indem die Helligkeit der weißen LED-Beleuchtung reduziert wird.

8 Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Beleuchtung eines semiprofessionellen Fernsehstudios erweitert. Die bestehende stationäre Beleuchtungsanlage auf Basis von RGB-LED-Modulen wurde um weiße LEDs ergänzt, so dass eine ausreichende Beleuchtungsstärke im Studio erreicht wird. Durch Änderung der Lichtquellenanordnung wurde eine homogenere Green-Screen-Ausleuchtung erreicht. Weitere praktische Ergebnisse sind die Reduzierung der Lautstärke und die verbesserte Benutzerfreundlichkeit der Anlagen-Steuerung.

Nach einer Analyse des Studios, der bereits bestehenden Beleuchtungssysteme und typischer Anwendungsfälle wurden Anforderungen an die Erweiterung der Beleuchtungsanlage definiert.

Mit Hilfe der Beleuchtungsplanungssoftware DIALux wurde ein Computermodell der bestehenden stationären Beleuchtungsanlage erstellt. Dazu wurde die Lichtstärkeverteilung der RGB-LEDs experimentell bestimmt. Die Software wurde genutzt, um die räumliche Verteilung der Beleuchtungsstärke im Studio zu simulieren. Darauf aufbauend wurden Konzepte zur Erweiterung der Beleuchtungsanlage modelliert.

In diesem Rahmen wurden RGB-LED-Module (anhand des Modells WorldSemi WS2812) und weiße LEDs (anhand von Samsung LM561A) darauf hin untersucht, inwiefern mit ihnen die lichttechnischen Anforderungen an die Beleuchtung des Studios erreicht werden können.

Die erforderliche Beleuchtungsstärke lässt sich mit den RGB-LEDs nur in einer großen Anzahl erreichen, deren Kosten den finanziellen Rahmen des Projekts übersteigen. Außerdem ist ihr Farbwiedergabeindex für Fernsehaufnahmen unzureichend. Die weißfarbigen LEDs erreichen mit ihrem höheren Lichtstrom die geforderte Beleuchtungsstärke wesentlich kostengünstiger und bieten einen ausreichenden Farbwiedergabeindex.

Dementsprechend wurden die RGB-LEDs der bestehenden Beleuchtungsanlage um weißfarbige ergänzt. Die dazugehörigen Komponenten zur Stromversorgung und Dimmung wurden ausgelegt und unter akzeptablem finanziellen Aufwand realisiert. Dabei mussten unvorhergesehene kritische Probleme, wie die induktive Überlastung des Netzgeräts und die Artefakte im Kamerabild auf Grund von PWM banding behoben werden. Es konnte gezeigt werden, dass ATX-Netzteile aus Desktop-Computern eine kostengünstige und lautlose Lösung zur Stromversorgung von LED-Streifen darstellen.

Nach der Realisierung der Anlage wurde durch praktische Messungen verifiziert, dass die geforderte Beleuchtungsstärke entsprechend der Simulation erreicht wurde.

Durch die Simulationsmethode lassen sich mit verhältnismäßigem Aufwand vor der Realisierung hilfreiche Einblicke in die Wirkung der Leuchtmittel gewinnen. Trotz der für die Software ungewöhnlich hohe Zahl simulierter Leuchten (bis zu 10.000 in Konzept 1) ist die Berechnung in akzeptabler Zeit möglich. Allerdings steigt beim Programm DIALux die Handhabung komplexer Strukturen stark. Zudem wurde das Benutzererlebnis durch viele Programmabstürze getrübt. Allgemein wirkt die recht junge Software an einigen Stellen noch unausgereift. Hier könnte sich ein Blick auf die Konkurrenzprodukte lohnen. Unabhängig davon kann durch eine genauere Bestimmung der Reflexionswerte der Oberflächen im Studio die Simulationsgenauigkeit gesteigert werden.

Ein zusätzlicher LED-Streifen zur Verbesserung der Green-Screen-Ausleuchtung wurde vorgesehen, aber aus Zeitgründen mangels Konzept nicht installiert. Dazu müssten die Möglichkeiten zur Lichtbündelung oder Abblendung (z.B. mittels Profil-Leisten) untersucht werden. Dabei kann auf das bestehende Simulationsmodell zurückgegriffen werden.

Gestalterische Aspekte der Studiobeleuchtung (z.B. Dreipunkt-Ausleuchtung) wurden zugunsten einer ausreichenden Grundbeleuchtung vernachlässigt. Bei Bedarf kann die realisierte Anlage jedoch problemlos mit anderen Leuchten kombiniert werden. Einerseits wird im Studio durch sie keine Stellfläche eingenommen und andererseits kann durch ihre Dimmbarkeit der Einfluss der Anlage zugunsten anderer Scheinwerfer flexibel angepasst werden.

Am Ende des Projekts steht dem Campus TV Studio somit eine benutzbare Beleuchtungsanlage zur Verfügung, die für Fernsehproduktionen verwendet werden kann. Für die speziellen Anforderungen an die Beleuchtung des kleinen Green-Screen-Studios ist die Verwendung von LEDs, die noch keinen festen Platz in der Lichttechnik in Film und Fernsehen haben, eine wertvolle Alternative zu konventionellen Leuchtmitteln.

9 Anhang

Anhang I: IES-Modelldatei des LED-Moduls WS2812, ws2812.ies

IESNA:LM-63-2002

[TEST]#1

[TESTLAB]Campus TV Studio, David Weigel

[ISSUEDATE]15-AUG-2014

[MANUFAC]worldSemi

[LAMP]WS2812

TILT=NONE

1 -1 1.0 19 4 1 2 0.005 0.005 0.001

1 1 0.3

0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90

0 90 180 270

1.58 1.58 1.58 1.56 1.56 1.63 1.56 1.44 1.56 1.50 1.42 1.34 1.12 1.05

0.90 0.75 0.59 0.38 0.16

1.71 1.71 1.45 1.56 1.45 1.56 1.43 1.35 1.28 1.13 1.05 0.98 0.75 0.61

0.39 0.29 0.16 0.11 0.16

1.56 1.45 1.45 1.45 1.43 1.43 1.35 1.28 1.28 1.13 1.05 1.05 0.83 0.67

0.52 0.32 0.27 0.09 0.07

1.71 1.87 1.91 1.86 1.73 1.66 1.47 1.47 1.51 1.51 1.37 1.30 1.15 1.00

0.85 0.63 0.50 0.27 0.11

10 Quellenverzeichnis

- [Acke2006] Ackermann, N. (2006): Lichttechnik. 2. Auflage. Wien: Oldenbourg.
- [Ande2014] Anders, T. (2014): CIE-Normfarbtafel.
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:CIE-Normfarbtafel.png> (15.09.2014).
- [ANSI2002] American National Standards Institute (2002): ANSI/IESNA LM-63-2002. Standard File Format for the Electronic Transfer of Photometric Data. <http://www.cn-hopu.com/upload/file/IES.pdf> (01.09.2014).
- [Baer2006] Baer, R. (2006): Beleuchtungstechnik. Grundlagen. 3., vollständig überarbeitete Auflage. Berlin: Huss-Medien.
- [Dial2012] DIAL GmbH (2012): DIALux evo – neue Methoden der Berechnung. http://www.dial.de/DIAL/fileadmin/download/dialux/wissen/DIALux_evo_%E2%80%93_Rechenkern.pdf (02.09.2014)
- [Dial2014] DIAL GmbH (2014): Über uns. Geschichte. <http://www.dial.de/DIAL/de/ueber-uns/geschichte.html> (02.09.2014)
- [Hahn2010] Hahn, H. (2010): V-lambda curves for photopic and scotopic view. <http://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AV-lambda-phot-scot.svg> (15.09.2014).
- [HTIn2011] HT Instruments GmbH (2011): Bedienungsanleitung HT309 Multi-LED Luxmeter. Korschbroich: HT Instruments GmbH
- [Kono2010] Konopka, A.; Wermke, M. (2010): Duden. Das Bedeutungswörterbuch. 4., aktualisierte und erweiterte Auflage. Mannheim: Dudenverlag.
- [Mess2013] Messer, W. (2013) Neu von Osram: 3000 Lumen LED-Power für Bühne und Studio. <http://fastvoice.net/2013/04/08/neu-von-osram-3000-lumen-led-power-fur-buhne-und-studio/> (30.09.2014).
- [Muel2008] Mueller, J. (2008): Handbuch der Lichttechnik. 4., aktualisierte und erweiterte Auflage. Bergkirchen: PPVMedien.
- [Musi2014] Musical Cocktails Ltd (2014): Dedolight TecPro Felloni LED Light Head (Daylight).
<http://www.mcl-media.co.uk/dedolight-tecpro-felloni-led-light-head-daylight> (08.08.2014).
- [Ris2003] Ris., H. R. (2003): Beleuchtungstechnik für Praktiker. 3. Auflage. Berlin: VDE-Verlag.
- [Sams2013] Samsung Electronics (2013): LM561A - 5630 Middle Power LED. Product Family Data Sheet. Rev. 002.
- [Schu2014] Schubert, E. F. (2014): Typical emission spectrum of blue, green and red LEDs at room temperature. <http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap12/F12-16%20RGB%20emission%20spectrum.jpg> (30.09.2014).
- [Spar2014] Sparkfun Electronics (2014): LED - SMD RGB (WS2812).
<https://www.sparkfun.com/products/11821> (08.08.2014).
- [Stak2014] Stake5.be bvba (2014): Arri Kit ARRlight 800W/2 met 1 x ARRI junior 650 plus. <http://www.stake5.be/verhuur/cameras/licht/arri-kit-arrrlite-800w2-met-1x-arri-junior-650-plus> (07.08.2014).
- [Szab2007] Szabó, F.; Schanda, J.; Bodrogi, P.; Radkov, E. (2007): A Comparative Study of New Solid State Light Sources. CIE Session 2007.
- [Tele2014] Telestream, Inc. (2014): Wirecast Features.
<http://www.telestream.net/wirecast/features.htm> (13.08.2014).

- [Uni2010] Universität Bremen (2014): Campus TV Homepage.
<http://www.campus-tv.uni-bremen.de> (28.07.2014).
- [Wood2011] Wood, Mike (2011): Camera light sensors react differently to images lit with PWM-dimmed LED. <http://www.mikewoodconsulting.com/articles/Protocol%20Summer%202011%20-%20Rolling%20Shutters.pdf> (21.09.2014)
- [Worl2014] Worldsemi Co. Ltd. (2014): WS2812 Datasheet.
<http://www.adafruit.com/datasheets/WS2812.pdf> (08.08.2014).
- [Zies2009] Zieseniß, C.-H.; Lindemuth, F.; Schmits, P. W. (2009): Beleuchtungstechnik für den Elektrofachmann. 8., völlig neu bearbeitete Auflage. München: Hüthig & Pflaum.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Schriften entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Bremen, den 1. Oktober 2014

David Weigel