



Zentrum für Optische Technologien (ZOT)
Arbeitsgruppe optische Mikro- und Nanophotonik

Optik Design für individuell gefertigte Mikrolinsen

Bachelorthesis von Larissa Schmidt

Matr.-Nr. 79631

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Engineering (B.Eng.)

Bearbeitungszeitraum: 01.03.2023 – 30.06.2023

Erstprüfer: Prof. Dr. Andreas Heinrich

Zweitprüfer: Prof. Dr. Anne Harth

Abstract

In dieser wissenschaftlichen Arbeit wird eine individuelle Mikrolinse simuliert, die die Beleuchtungsverteilung einer LED auf eine Fläche homogenisieren soll. Aufgrund der Herstellungsvariante, der Dielektrophorese, sind die Parameter für diese Untersuchung begrenzt. Da es sich um einen Aufbau für Mikrooptiken handelt, hat die Linse einen größtmöglichen Radius von 5 mm. Die Linsenoberfläche ist konvex und wird eine asphärische Form aufweisen. Die genauen Parameter werden in dem Lichtsimulationsprogramm Lighttools durchsimuliert. Die besten Werte werden anhand 4 Parameter ermittelt. Der erste ist die mittlere Beleuchtungsstärke, da die Leistung der LED nicht verloren gehen soll. Bei den anderen Parametern handelt es sich um drei Gleichmäßigkeitswerte, die beschreiben wie homogen eine Fläche beleuchtet ist. Nach Auswahl der Linse mit den besten Ergebnissen wird eine Simulation mit Vorsatzoptiken gemacht. Diese konnten das Ergebnis weiter verbessern und homogenisieren. Aufgrund der Simulationen konnte eine Linse ausgewählt werden, mit der die Fläche homogen beleuchtet wird.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	I
Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einführung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziele.....	2
2 Grundlagen	4
2.1 Licht	4
2.1.1 Reflexion.....	4
2.1.2 Brechung	6
2.2 Linsen	7
2.2.1 Linsenarten	7
2.3 Leuchtdioden	13
2.4 Lichttechnische Größen	14
2.4.1 Lichtstrom	14
2.4.2 Beleuchtungsstärke.....	14
2.5 Lighttools	15
2.5.1 Konstruktion und Simulation.....	15
2.5.2 Optimierungsfunktion	21
2.5.3 Auswertung.....	22
3 Simulationsaufbau	25
4 3x3-Spline-Patch mit Optimierungsfunktion	31
4.1 Simulation	33
4.2 Zwischenfazit	35
5 Konische Linsen	36
5.1 Vortests - Konische Konstante, Brennweite	37
5.1.1 Optimierung 1 - Konische Konstante.....	37
5.1.2 Optimierung 2 - Konische Konstante, Brennweite	40
5.1.3 Zwischenfazit	42
5.2 Testphase 1 - Konkave oder Konvexe Linsenoberfläche.....	43
5.2.1 Simulation	43
5.2.2 Zwischenfazit	46
5.3 Testphase 2 - Positionierung der LED im Brennpunkt.....	46
5.3.1 Simulation	46
5.3.2 Zwischenfazit	48

5.4	Testphase 3 - Konische Konstante.....	48
5.4.1	Simulation 1 - konische Konstante	48
5.4.2	Simulation 2 - Konische Konstante, Brennweite	50
5.4.3	Maxima-Suche	52
5.5	Testphase 4 - Position	53
5.5.1	Simulation	54
5.5.2	Zwischenfazit	55
5.6	Ergebnisse.....	55
6	Fazit und Ausblick	60
Anhang A:		i
6.1.1	Matlabfunktion.....	i
6.1.2	Ausschnitte der Datenblätter	ii
Literaturverzeichnis		iii
Eidesstattliche Versicherung		v

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Lichtverteilung eines LED-Moduls a) ohne Linsen; b) mit Linsen	1
Abbildung 2 a) schematische Darstellung eines Polymertropfens ohne elektrisches Feld; b) schematische Darstellung eines deformierten Tropfens beim Anlegen einer elektrischen Spannung; c) echter Polymertropfen ohne Spannung; d) echter Polymertropfen mit Spannung [2].....	2
Abbildung 3 a) gesamtes LED-Modul; b) Ausschnitt der zu simulierenden LED	3
Abbildung 4 Verkleinerung der Empfängerfläche	3
Abbildung 5 Für den Menschen sichtbares Spektrum [7].....	4
Abbildung 6 Reflexion [8].....	5
Abbildung 7 Totalreflexion [6]	5
Abbildung 8 Brechung [8]	6
Abbildung 9 Strahlenverlauf eines parallelen Lichtbündels durch eine Konvexe Linse.....	7
Abbildung 10 Strahlenverlauf eines divergierenden Lichtbündels durch eine konvexe Linse .	8
Abbildung 11 Strahlenverlauf eines parallelen Lichtbündels durch eine Konkave Linse.....	8
Abbildung 12 Strahlenverlauf eines a) parallelen Lichtbündels durch eine planparallele Platte b) schräg einfallendes Strahlenbündeln durch eine planparallele Platte	9
Abbildung 13 Plankonvexe Linse.....	9
Abbildung 14 a) Sphärische Linsenoberfläche; b) Oberflächenform Asphärischer gegenüber Sphärischer Linsen [11].....	10
Abbildung 15 Sphärische Linse mit Bildfehler "Sphärischer Aberration" (links); Asphärische Linse mit korrigiertem Brennpunkt (rechts) [11]	10
Abbildung 16 Beschreibung Asphäre [11].....	11
Abbildung 17 a) sphärischer Kegelschnitt; b) elliptischer Kegelschnitt; c) parabolischer Kegelschnitt; d) hyperbolischer Kegelschnitt	12
Abbildung 18 pn-Übergang mit angelegter Spannung an Energiebändern	13
Abbildung 19 Startbildschirm Lighttools.....	15
Abbildung 20 Konstruktionswerkzeuge Linsen	16
Abbildung 21 Eigenschaften der Linsenoberfläche	16
Abbildung 22 Linsenoberfläche mit a) 5x5 Punkten; b) 3x3 Punkten	17
Abbildung 23 Punkteverteilung auf der Linsenoberfläche von der Seite a) 5x5 Punkte; b) 3x3 Punkte.....	17
Abbildung 24 Einstellung der Spline Punkte in Lighttools	18
Abbildung 25 Definieren eines Benutzerdefinierten Materials	18

Abbildung 26 Konstruktionswerkzeuge für Lichtquellen	19
Abbildung 27 Eigenschaften der Lichtquelle	19
Abbildung 28 Digitizer.....	20
Abbildung 29 Dummy-Plane mit Receiveroberfläche.....	21
Abbildung 30 Gradientenverfahren [19].....	21
Abbildung 31 Optimierungsergebnisse	22
Abbildung 32 a) Lumviewer Beispiel; b) Einstellung der Eigenschaften und der Auflösung; c)Gitterergebnisse	23
Abbildung 33 Leuchtende Fläche in Lighttools mit Maßen der originalen LED.....	25
Abbildung 34 Parameter der LED a) zur Helligkeit; b) spektrales Bereichsdiagramm	26
Abbildung 35 Grundaufbau des Systems.....	26
Abbildung 36 Verteilung auf der Empfängerfläche a) mit großer Fläche und weitem Abstand; b) mit kleiner Fläche und kleinem Abstand	27
Abbildung 37 a) LED mit Strahlenverlauf zur Empfängerfläche b) Schema Strahlen nach außen lenken	27
Abbildung 38 Abstand der LED in Lighttools.....	28
Abbildung 39 a) Aufbau ohne Linsen; b) Lichtverteilung auf dem Schirm ohne Linsen	29
Abbildung 40 Beleuchtungsverteilung geplotet mit Matlab a) die gesamte Fläche; b) der beleuchtete Bereich.....	30
Abbildung 41 Definierung der Gütefunktion für die Homogenität	31
Abbildung 42 a) Linsenform vor der Optimierung; b) Lichtverteilung auf der Empfängerfläche	32
Abbildung 43 Schema der Einzelnen Anpassung der Punkte	33
Abbildung 44 Optimierungsablauf der Simulation	33
Abbildung 45 Optimierung 1: Linsendicke.....	34
Abbildung 46 Optimierung 2: Spline-Patch Punkte einzeln	34
Abbildung 47 a) Optimierung 3: Alle Punkte gemeinsam; b) Linsendicke; c) Durchmesser ..	35
Abbildung 48 Linsenform nach Optimierungsreihe	35
Abbildung 49 Linsenscheitel der Asphäre aus dem Mittelpunkt versetzt.....	36
Abbildung 50 Aufbau einzelner LED mit Linse im Ursprung.....	36
Abbildung 51 Strahlenverlauf a) mit großer Brennweite; b) mit kleiner Brennweite	37
Abbildung 52 Linsenform mit Kegelschnittkonstante $k = -1000$ und Brennweite von $f = 100$ mm.....	42

Abbildung 53 a) Änderung des Linsenradius; b) Änderung des Durchmessers	43
Abbildung 54 Lumviewer für Linse Nummer 5	44
Abbildung 55 Lumviewer a) Linse 5; b) Linse 6	45
Abbildung 56 Positionierung der LED in den Brennpunkt für jede Linse	46
Abbildung 57 Strahlenverlauf durch Linse mit Durchmesser von 2 mm	47
Abbildung 58 Lumviewer der besten Linse aus Tabelle 10	48
Abbildung 59 Änderung der Konischen Konstante.....	48
Abbildung 60 Lumviewer a) Linse Nummer 5; b) Linse Nummer 2; c) Linse Nummer 3; d) Linse Nummer 4.....	50
Abbildung 61 Lumviewer der homogensten Beleuchtungsverteilung	51
Abbildung 62 Lumviewer der quadratischen LED a) 2,8 mm; b) 3,5 mm; c) 4 mm.....	53
Abbildung 63 Positionsänderung der Linse gegenüber der LED.....	53
Abbildung 64 Verschobene Linse über der LED	54
Abbildung 65 Lumviewer verkippte Linse.....	55
Abbildung 66 Strahlenverlauf durch die ausgewählte Linse a) Standard; b) mit Vorsatzoptik	56
Abbildung 67 Lumviewer a) Standard; b) mit Zylinder.....	57
Abbildung 68 LED-Array.....	58
Abbildung 69 Lumviewer LED-Array a) Standard; b) mit Zylinder	59

Abkürzungsverzeichnis

IR *Infrarot*

k *konische Konstante*

LED *Leuchtdiode(n)*

lm *Lumen*

lx *Lux*

SMD *Surface-mounted device*

UV *Ultraviolett*

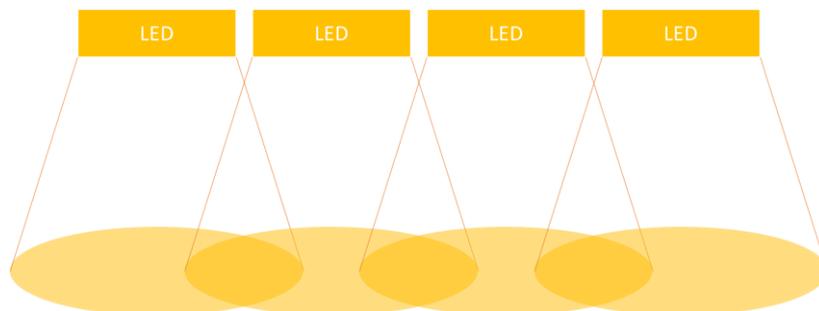
1 Einführung

Im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit liegt der Fokus auf der Untersuchung, wie eine konvexe asphärische Linse geformt werden kann, sodass eine große Fläche homogen ausgeleuchtet wird. Die Motivation dieser Studie wird im kommenden Abschnitt erläutert.

1.1 Motivation

Die Firma „Seto Light“ stellt Baustrahler für verschiedene Anwendungen her. Bei herkömmlicher Aneinanderreihung von Leuchtdioden entstehen durch die Abstrahlcharakteristik der Quellen verschiedene Maxima, die sich überlagern. An anderen Stellen entstehen dunklere Bereiche. Am Rand, an dem keine Überlagerung mehr stattfindet, laufen die Randstrahlen stetig aus (siehe Abbildung 1 a)). Dies kann bei vielen Anwendungen störend sein, bei der eine hohe Beleuchtungsstärke allerorts benötigt wird. In dieser wissenschaftlichen Arbeit soll mit Hilfe von Linsenoptiken diese Abnahme der Beleuchtungsstärke verhindert und eine Steigerung der Effizienz erzielt werden (siehe Abbildung 1 b)).

a)



b)

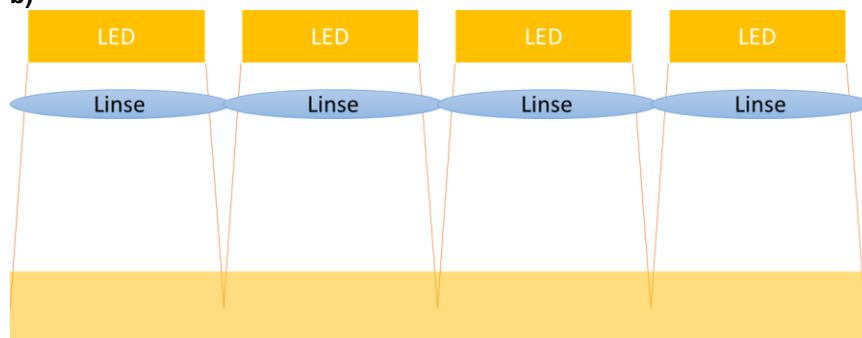


Abbildung 1 Lichtverteilung eines LED-Moduls a) ohne Linsen; b) mit Linsen

Die Herstellung soll mittels eines neuen Verfahrens namens „Dielektrophorese“ erfolgen. Mit dieser Methode können individuelle Asphären, die das Licht auf eine bestimmte Art und Weise brechen, hergestellt werden. Der Aufbau, der hier zur Verfügung steht, ist für Mikrolinsen bis

zu einem Durchmesser von 5 mm vorgesehen. Bei dem Prozess wird ein Tropfen aus Polymer über ein elektrisches Feld verformt. Die resultierende Form hängt von der Feldverteilung ab. Abbildung 2 a) und c) zeigen einen solchen Tropfen im Grundzustand. Das Polymer besteht aus mehreren Dipolen, welche sich mit angelegter Spannung in Richtung des elektrischen Feldes aufrichten (siehe Abbildung 2 b) und d)). [1]

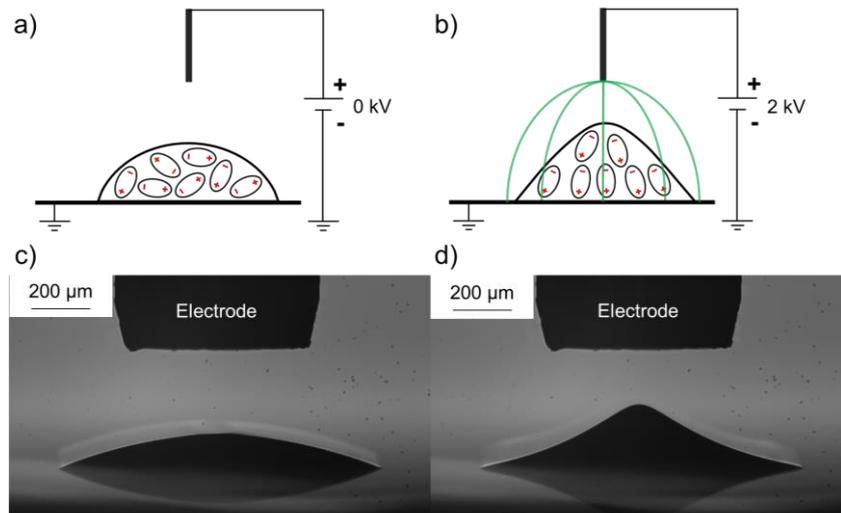


Abbildung 2 a) schematische Darstellung eines Polymertröpfchens ohne elektrisches Feld; b) schematische Darstellung eines deformierten Tropfens beim Anlegen einer elektrischen Spannung; c) echter Polymertröpfchen ohne Spannung; d) echter Polymertröpfchen mit Spannung [2]

1.2 Ziele

Das LED – Modul von „Seto Light“ besteht aus drei Reihen mit je 24 LEDs (siehe Abbildung 3 a)). Bei den LEDs handelt es sich um Surface-mounted devices (SMD). Diese haben kleinere Bauteile als andere LED und werden direkt auf die Platine gelötet. Dadurch haben sie einen geringeren Platzverbrauch und es können mehr LEDs auf einer kleineren Fläche verbaut werden. [3] Es handelt sich bei den SMD-Chips um die LM281B+ von Samsung. Der Abstand der Lichtquellen auf dem Modul beträgt von Mittelpunkt zu Mittelpunkt 12 mm in x-Richtung und 9,8 mm in y-Richtung (siehe Abbildung 3 a)).

In der Simulation dieser wissenschaftlichen Arbeit sollen mit dem Lichtsimulationsprogramm Lighttools vier Linsen erstellt werden, die eine Fläche homogen beleuchten. Dazu werden vier LED des Moduls ausgewählt (siehe Abbildung 3 b)), auf denen die Linsen platziert werden sollen. Für die Untersuchung stehen zwei unterschiedliche Datenblätter zur Verfügung. Eines ist für das gesamte Modul und eines für die einzelne Lichtquelle. Um die LED realitätsgetreu nachzubilden wird das Datenblatt „Samsung LM281B plus datasheet“ [4] gewählt (siehe Anhang 6.1.2). Dort werden die Informationen für eine einzelne LED aufgeführt. Diese Daten können dann in Lighttools übertragen und die Beleuchtungsquelle simuliert werden.

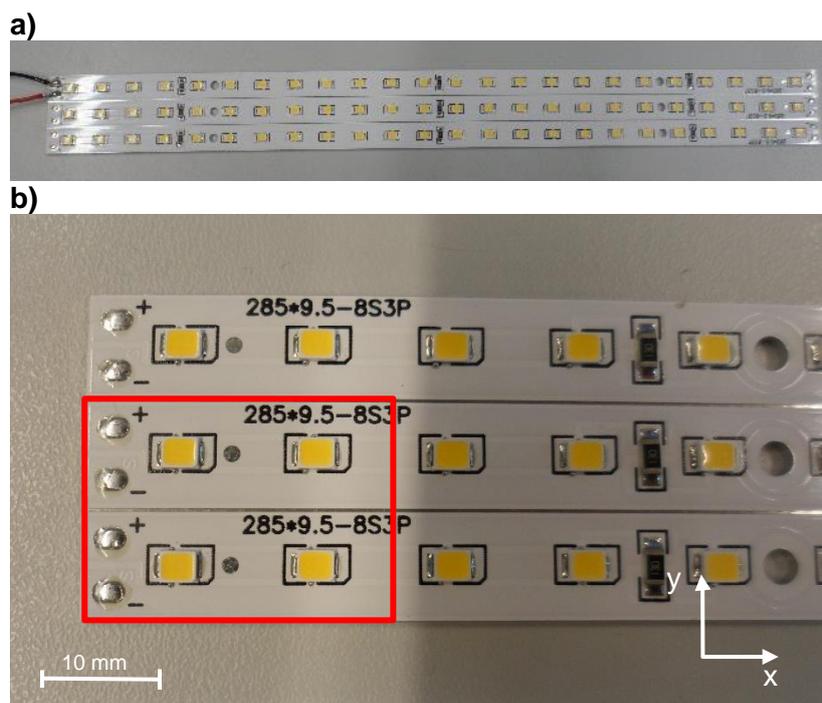


Abbildung 3 a) gesamtes LED-Modul; b) Ausschnitt der zu simulierenden LED

Das gesamte LED-Modul soll eine Fläche von 1000 m^2 in einem Abstand von 5 m homogen ausleuchten. Da die Anzahl der zu simulierenden LEDs reduziert wurde, wird auch die auszuleuchtende Fläche verkleinert. Der Abstand zur neuen Fläche beträgt $0,5 \text{ m}$. Die Seitenlängen werden von 33 m auf $1,65 \text{ m}$ verkürzt. Diese Veränderung ist schematisch in Abbildung 4 gezeigt und sorgt für eine Testbarkeit des Aufbaus nach Herstellung der Linsen.

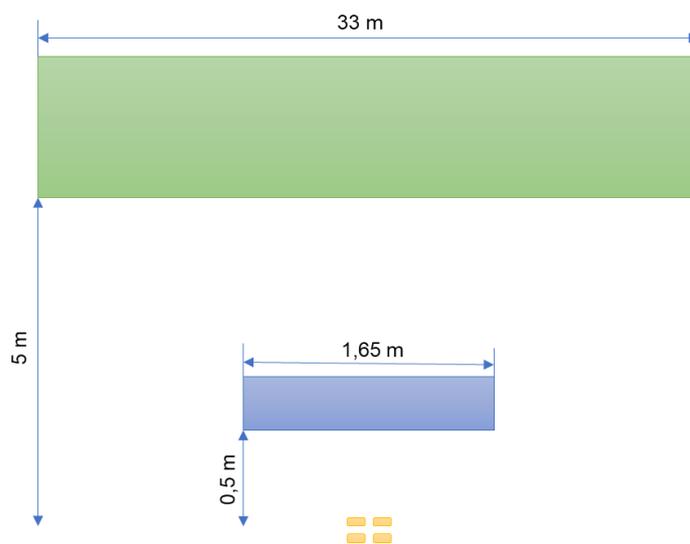


Abbildung 4 Verkleinerung der Empfängerfläche

2 Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden Leuchtdioden (LED), Grundlagen zur Lichttechnik, Lichtbrechung und Linsen erläutert. Außerdem werden ausgewählte Abbildungsfehler, die durch Linsen entstehen können, erklärt. Im Anschluss werden Funktionen des Lichtsimulationsprogramms „Lighttools“ vorgestellt. Darüber hinaus werden Bewertungskriterien für die Homogenität beschrieben.

2.1 Licht

Licht ist eine elektromagnetische Transversalwelle, die sich mit einer Geschwindigkeit von $c_0 = 3 \cdot 10^8$ m/s im Vakuum ausbreitet. In optischen Medien wird die Geschwindigkeit mit dem Brechungsindex n entsprechend kleiner.

$$c = \frac{c_0}{n} \quad (2.1)$$

Die Welle wird beschrieben durch die Frequenz f und die Wellenlänge λ . Abbildung 5 zeigt wie das Farbspektrum auf die Wellenlängen verteilt ist. Die für den Menschen sichtbaren Lichtstrahlen liegen in einem schmalen Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm. Die Bereiche direkt darüber und darunter, wie Infrarot (IR) und Ultraviolett (UV) können mit den menschlichen Sinneszellen nicht wahrgenommen werden. [5], [6]

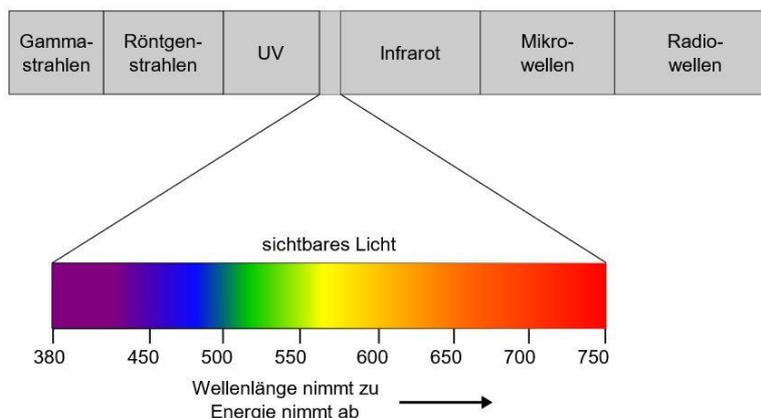


Abbildung 5 Für den Menschen sichtbares Spektrum [7]

Lichtstrahlen, wie sie in der geometrischen Optik bezeichnet werden, breiten sich senkrecht zu den Wellenfronten aus. Eine Wellenfront entsteht immer an Orten gleicher Phase. Trifft ein Lichtstrahl auf optische Medien kann es zur Umlenkung oder Reflexion des Strahls kommen. Diese beiden Eigenschaften an Grenzflächen werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

2.1.1 Reflexion

Bei jedem Übergang von Licht in ein anderes Medium wird ein Teil des Strahls reflektiert. Wie viel hängt von der Oberfläche ab, auf die der Strahl trifft. In Abbildung 6 ist der einfallende und

der reflektierende Strahl zu sehen. Der Einfallswinkel α hat die gleiche Größe zum Lot, wie der Reflektionswinkel α' . Formel (2.2) zeigt das Reflexionsgesetz, welches das Verhalten des Lichtstrahls bei Reflexion beschreibt. [8]

$$\alpha = \alpha' \tag{2.2}$$

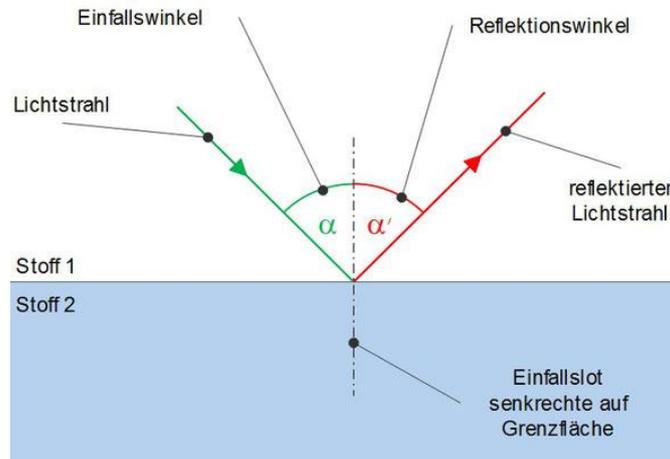


Abbildung 6 Reflexion [8]

Fällt das Licht in einem bestimmten Winkel auf die Grenzfläche eines Mediums mit kleinerem Brechungsindex, kann es zu einer Totalreflexion kommen. Abbildung 7 zeigt diesen Fall. Der Lichtstrahl geht nicht in das optisch dünnere Medium über, sondern wird an der Grenzfläche zurück in das Ausgangsmedium gebrochen. Auch wenn das Grenzmaterial Lichtdurchlässig ist, wird der Lichtstrahl an der Fläche komplett reflektiert. Der Grenzwinkel α_G , der für diese Reflexion verantwortlich ist, kann mit Formel (2.3) berechnet werden. [6]

$$\alpha_G = \sin^{-1} \frac{n_1}{n_2} \tag{2.3}$$

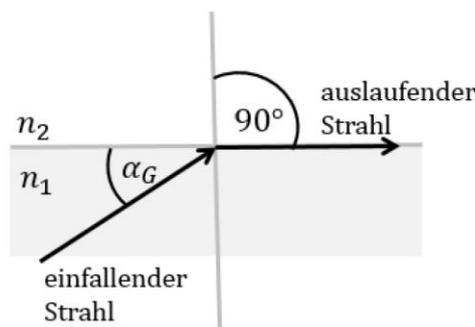


Abbildung 7 Totalreflexion [6]

Fällt Licht unter einem Winkel auf das Medium, der nicht dem Grenzwinkel entspricht, kommt es zu einer Brechung. Diese wird in dem folgenden Abschnitt erklärt.

2.1.2 Brechung

Trifft Licht auf ein durchlässiges Medium, das einen anderen Brechungsindex besitzt, wird ein Teil des Lichts reflektiert und ein anderer Teil gebrochen. Der Brechungswinkel β hängt von dem Brechungsindex der Stoffe und dem Winkel, in dem es auf das Medium trifft, ab. Abbildung 8 zeigt den Übergang eines Lichtstrahls von einem Medium in ein anderes. Besitzt Stoff 1 einen geringeren Brechungsindex als Stoff 2, wird der Lichtstrahl zum Lot hin gebrochen und der Brechungswinkel β verkleinert sich gegenüber dem Einfallswinkel α . Ist der Brechungsindex von Stoff 1 größer als der von Stoff 2, bricht der Strahl vom Einfallslot weg und vergrößert den Winkel β . Dieser Zusammenhang wird durch Formel (2.4) beschrieben.

$$n_1 * \sin \alpha = n_2 * \sin \beta \quad (2.4)$$

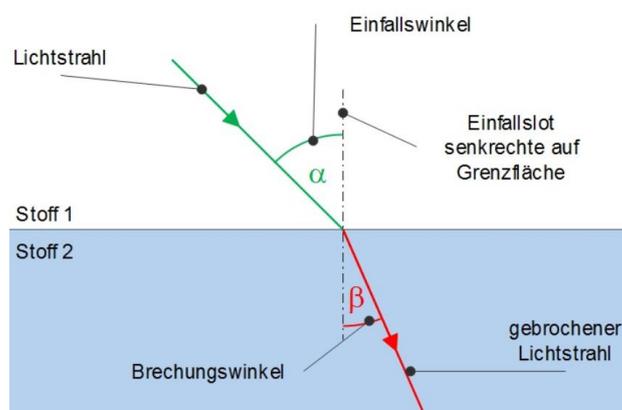


Abbildung 8 Brechung [8]

Die beschriebenen Verhaltensweisen von Licht in unterschiedlichen Medien und an den Grenzflächen kann dazu genutzt werden Lichtstrahlen umzulenken. Eine Möglichkeit dafür sind Linsen. Im folgenden Abschnitt werden verschiedene Linsenarten vorgestellt.

2.2 Linsen

Linsen sind Lichtbrechende Objekte, die auftretende Lichtstrahlen in gewünschte Richtungen lenken können. Die Richtung hängt dabei von der Art der Linse ab. Unterschiedliche Linsentypen und Oberflächenformen, die in diesem Kapitel näher erläutern werden, sorgen für verschiedene Effekte der Lichtbrechung.

2.2.1 Linsenarten

Durch verschiedene Kombinationen der zwei Linsenflächen lassen sich eine Vielzahl unterschiedlicher Linsen erstellen. Die Oberfläche wird in drei Arten unterschieden. Ist sie nach außen gewölbt, nennt sich das konvex, nach innen konkav und ohne Wölbung ist sie planar. [9]

2.2.1.1 Konvexe Linsen

Der Strahlenverlauf einer konvexen Linse ist in Abbildung 9 dargestellt. Fallen Lichtstrahlen auf die Linse, werden sie konvergiert und treffen sich in dem Brennpunkt auf der optischen Achse. Aus diesem Grund werden sie Sammellinsen genannt werden. Der Brennpunkt ist der Punkt, an dem die Strahlen zusammenlaufen. Durch den Strahlengang entsteht hinter der Linse, auf der Bildseite, eine Abbildung. Je nach Positionierung des Gegenstands zur Linse kann das Bild vergrößert, verkleinert oder gleich groß abgebildet werden. Durch diese Vergrößerungsmöglichkeit werden Sammellinsen auch als Lupen eingesetzt. [10]

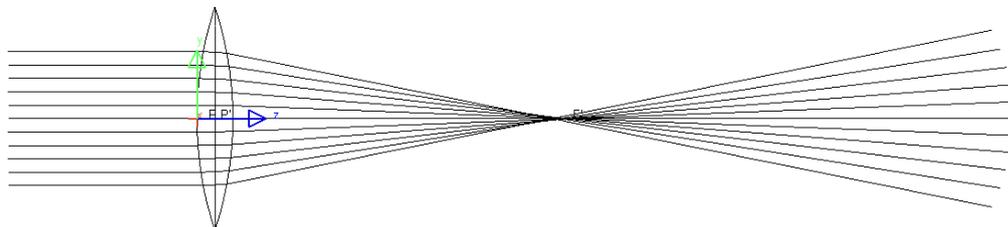


Abbildung 9 Strahlenverlauf eines parallelen Lichtbündels durch eine Konvexe Linse

Dieser Strahlengang ist reversibel. Geht ein divergenter Lichtstrahl vom Brennpunkt der Linse aus, werden die Strahlen nach dem Durchgang durch die Linse begradigt. Das Bild entsteht im unendlichen. In Abbildung 10 wird dieses Verhalten gezeigt.

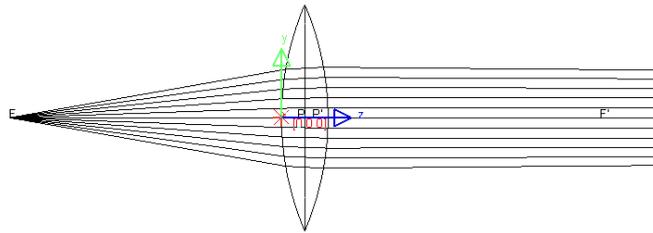


Abbildung 10 Strahlenverlauf eines divergierenden Lichtbündels durch eine konvexe Linse

Mit einer Sammellinse können viele Projekte umgesetzt werden. Wird eine Linse benötigt, die die Strahlen in die andere Richtung lenkt, wird die Krümmung an der Linsenoberfläche umgedreht. Durch diesen Vorgang entsteht eine konkave Linse. Diese Linsenart wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

2.2.1.2 Konkave Linsen

Konkave Linsen werden Zerstreulinse genannt. In Abbildung 11 ist zu sehen, wie sie ein Bündel achsparalleler Lichtstrahlen beeinflusst. Die Strahlen werden von der optischen Achse weggebrochen und gestreut. [10] Aus diesem Grund existiert hinter der Linse kein Schnittpunkt der Strahlen. Auf der Bildseite entsteht dadurch kein Bildpunkt.

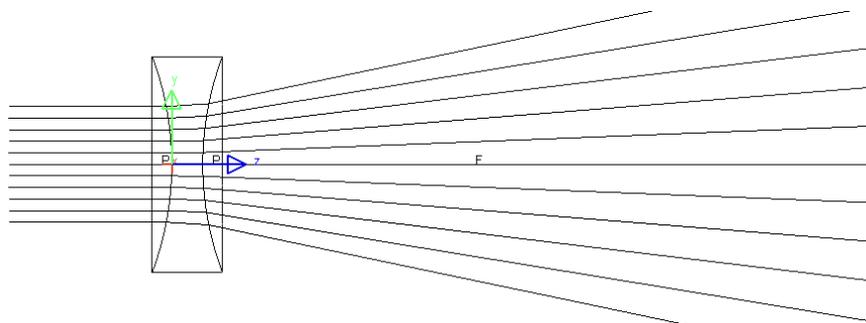


Abbildung 11 Strahlenverlauf eines parallelen Lichtbündels durch eine Konkave Linse

Die dritte Linsenart beschreibt eine flache Oberfläche. Ihre Eigenschaften werden im nächsten Abschnitt beschrieben.

2.2.1.3 Planare Linse

Eine planare Linse ist eine Plan Parallele Platte. Bei einem parallel zur optischen Achse ausgerichteten Strahlbündel, wird das Licht ohne Richtungsänderung durch die Platte geleitet (siehe Abbildung 12 a). Wenn der Lichtstrahl nicht parallel zur optischen Achse verläuft, ändert sich der Linsendurchgang. Der Lichtstrahl wird gebrochen, wenn er auf die vordere Fläche der Platte trifft und im gleichen Winkel zurückgebrochen, wenn er auf die hintere Fläche trifft. Dadurch verschiebt sich der Strahl. Die Richtung auf der Bildseite ist die gleiche, wie auf der Gegenstandsseite (siehe Abbildung 12 b).

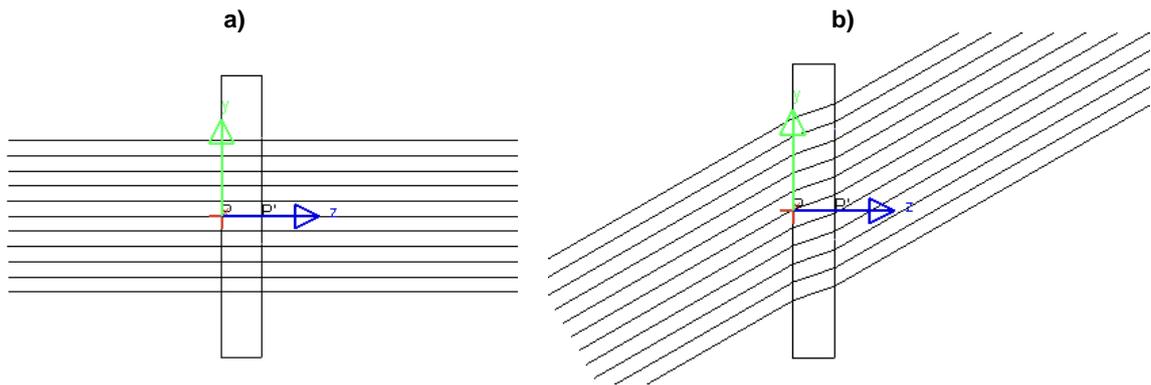


Abbildung 12 Strahlenverlauf eines a) parallelen Lichtbündels durch eine planparallele Platte b) schräg einfallendes Strahlenbündels durch eine planparallele Platte

In Abbildung 13 ist die Kombination aus einer Planaren und einer Konvexen Linse gezeigt. Sie wird plankonvex genannt. Dies ist die Grundform, für die in Kapitel 3 bis 5 durchgeführten Simulationen.

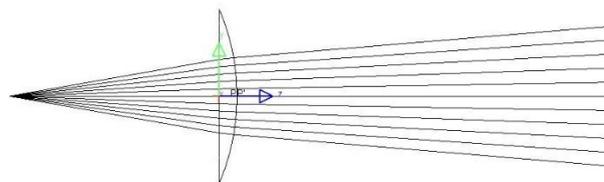


Abbildung 13 Plankonvexe Linse

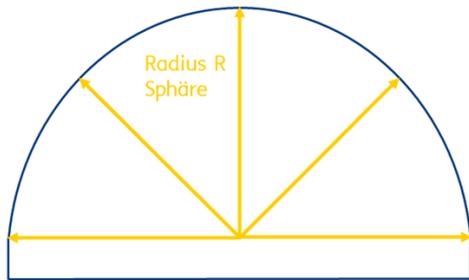
Durch Kombinationen der Linsenarten ist es möglich unterschiedliche optischen Systeme zu erstellen. Diese können Abbildungsfehler der Linsen ausgleichen. Durch die folgenden Anpassungen der Linsenform können diese optischen Systeme verkleinert werden.

2.2.1.4 Sphären und Asphären

Die vorher gezeigten Linsen haben eine sphärische Oberfläche (siehe Abbildung 14 a)). Dabei handelt es sich um rotationssymmetrische Optiken, bei denen die Oberfläche die Form einer Kugelfläche hat. Der Krümmungsradius ist an jeder Stelle gleich zum geometrischen Mittelpunkt. Die Herstellung der Linsenoberfläche ist wenig komplex, da sie nur durch den Radius beschrieben wird und keine Abweichungen vorhanden sind. Dadurch neigt die Linse zu Abbildungsfehlern. Diese können mit Hilfe von anderen Linsen angeglichen werden. Dafür werden mehrere Linsen in den optischen Systemen benötigt. Mithilfe von Asphären können diese Systeme für ausgewählte Fehler umgangen werden. In Abbildung 14 b) ist zum Vergleich die Oberfläche der Sphäre a) und der Asphäre b) zu sehen.

Eine Linse wird als Asphäre bezeichnet, sobald die Oberfläche nicht mehr kugelförmig ist. Im Bild ist zu sehen, dass die Oberfläche am Rand flacher gestaltet ist. Der Krümmungsradius weicht radial zum geometrischen Mittelpunkt ab. Die Linse bleibt rotationssymmetrisch. [11]

a)



b)

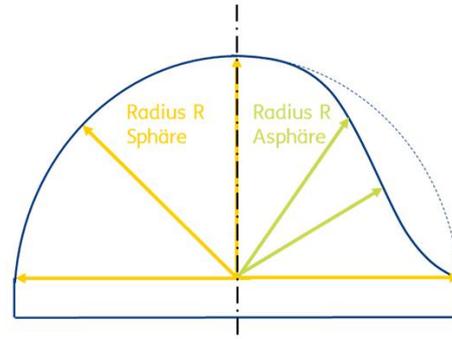
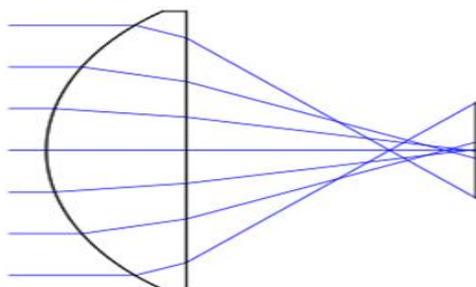


Abbildung 14 a) Sphärische Linsenoberfläche; b) Oberflächenform Asphärischer gegenüber Sphärischer Linsen [11]

Asphären sind optimierende Optiken. Der zuvor angesprochene Abbildungsfehler, den sie verbessern können, nennt sich Sphärische Aberration. Dies ist ein Schärfefehler, der bewirkt, dass achsparallel einfallende Strahlen hinter der Optik nicht die gleiche Schnittweite haben. Sie laufen in unterschiedlichen Punkten zusammen. Das hat zur Folge, dass das Bild nicht in einem gemeinsamen Punkt fokussiert. Die Ursache für diesen Bildfehler ist, wie in Abbildung 15 dargestellt, dass Strahlen, die weiter von der optischen Achse entfernt sind, am Rand von sphärischen Linsen stärker gebrochen werden. Dadurch haben die Randstrahlen eine kürzere Brennweite als die achsnahen. Asphären wirken dem entgegen, indem die Strahlen in den Randbereichen weniger stark gebrochen werden als die in der Mitte. Die Strahlen treffen sich auf einem Punkt und bilden ein scharfes Bild (siehe Abbildung 15). [11] Ein weiterer Linsenfehler, der von Bedeutung sein kann, ist die chromatische Aberration. Hierbei handelt es sich um einen Farbfehler, der durch Dispersion, der Abhängigkeit der Wellenlänge vom Brechungsindex, verursacht wird. Kurze Wellenlängen werden stärker gebrochen als lange, wodurch es farbige Umrandungen auf dem Schirm geben kann. Die weiteren Aberrationen sind für die Beleuchtungsoptik nicht von Relevanz und werden daher nicht weiter erläutert. [6]

a)



b)

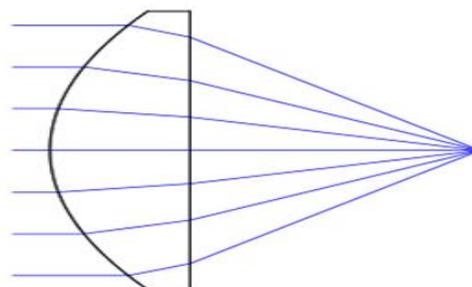


Abbildung 15 Sphärische Linse mit Bildfehler "Sphärischer Aberration" (links); Asphärische Linse mit korrigiertem Brennpunkt (rechts) [11]

Die Linsenoberfläche wird durch die Asphärengleichung beschrieben. Die Änderungsparameter sind der Radius, die Asphärenparameter und die konische Konstante. Sind die Asphärenkoeffizienten alle null, bildet die Oberfläche einen Kegelschnitt. Je nach Wert der Konischen Konstante ergibt sich die Art der Asphäre. In Abbildung 16 ist gezeigt, welche der Parameter welchen Teil der Linse beeinflusst. Die Pfeilhöhe z ist die Funktion, die mit der Gleichung beschrieben wird. [11]

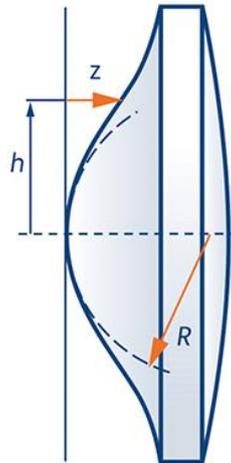


Abbildung 16 Beschreibung Asphäre [11]

$$Z(h) = \frac{Ch^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)C^2h^2}} + A_4h^4 + A_6h^6 + A_8h^8 + \dots \tag{2.5}$$

Mit

Z = Pfeilhöhe

h = radialer Abstand zur optischen Achse (Einfallshöhe)

C = Krümmung

k = konische Konstante

A_4, A_6, A_8, \dots = Asphärenkoeffizienten

In Tabelle 1 Abhängigkeit der konischen Konstante zur Linsenoberfläche Tabelle 1 sind die Zusammenhänge der Konstante und den Kegelschnitten aufgeführt.

Tabelle 1 Abhängigkeit der konischen Konstante zur Linsenoberfläche [11]

Konische Konstante	Art der Fläche
$k = 0$	Kugel
$k > -1$	Ellipsoid
$k = -1$	Paraboloid
$k < -1$	Hyperboloid

Die Art der Fläche benennt die Kegelschnitte, die sich ergeben. In Abbildung 17 ist dies noch einmal veranschaulicht.

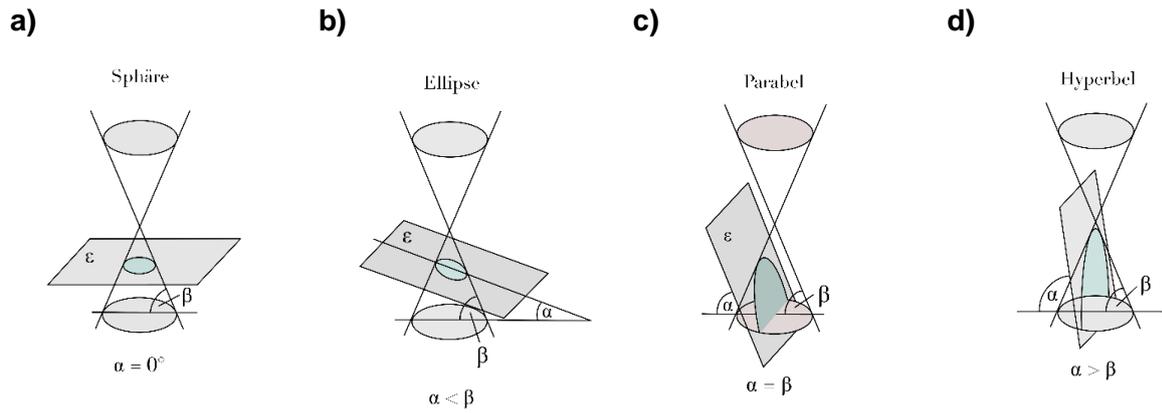


Abbildung 17 a) sphärischer Kegelschnitt; b) elliptischer Kegelschnitt; c) parabolischer Kegelschnitt; d) hyperbolischer Kegelschnitt

Es existieren verschiedene Arten von Lichtquellen mit unterschiedlichen Wegen der Lichtemission. In dem folgenden Kapitel soll es um die Entstehung einer Strahlung durch eine Leuchtdiode gehen.

2.3 Leuchtdioden

LED sind sehr effiziente Lichtquellen. Sie haben eine hohe Lichtstärke und benötigen dafür wenig Energie. Außerdem sind sie sehr klein und haben eine hohe Lebensdauer. Dadurch lösen sie die meisten anderen Leuchtmittel ab, da sie effizienter und günstiger sind. [12]

Es handelt sich um Halbleiterdioden, die durch spontane Emission Licht emittieren. Dies geschieht an einem pn-Übergang. Dabei ist das Halbleitermaterial mit unterschiedlichen Materialien dotiert. Von dieser Dotierung hängt später die Wellenlänge ab, also die Farbe, mit der die LED emittiert. Liegt eine Spannung an, verkleinert sich die Bandlücke, sodass die aufzuwendende Energie sie zu überwinden gering wird. Bei dem Übergang der beiden Materialien rekombinieren dann die Löcher mit den Elektronen in der Raumladungszone. Durch die freigesetzte Energie entsteht die elektromagnetische Strahlung (siehe Abbildung 18). [6], [13]

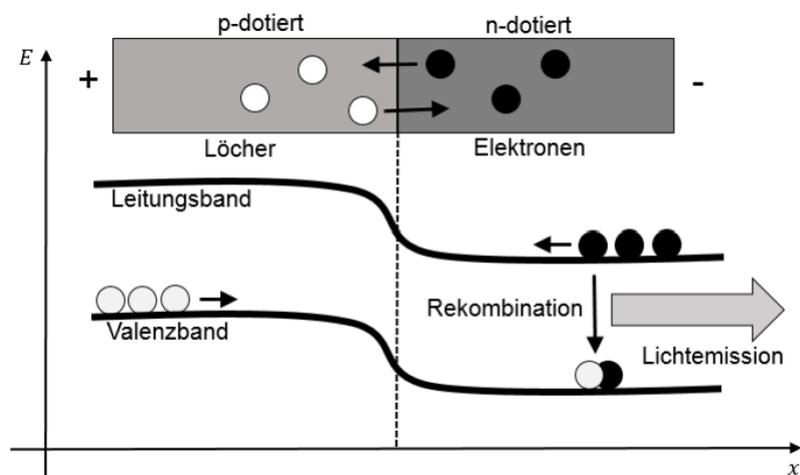


Abbildung 18 pn-Übergang mit angelegter Spannung an Energiebändern

Mit den Leuchtdioden wurde eine Quelle für künstliche Beleuchtung dargestellt. Wie gut eine Beleuchtungsquelle ist, hängt von einigen physikalischen Größen, wie zum Beispiel der Leistung ab. Um die Lichtquellen bewerten zu können, werden die Lichttechnischen Größen verwendet. Diese werden im kommenden Abschnitt erläutert.

2.4 Lichttechnische Größen

Licht hat eine visuelle Wirkung auf den Menschen. Es beschränkt sich auf den für das menschliche Auge sichtbaren Bereich des optischen Spektrums. Die Lichttechnik ist eine Art die Erzeugung und Anwendung des Lichts für Beleuchtungszwecke zu beschreiben. Sie zeigt, wie Licht auf den Menschen wirkt und kann die Lichtstrahlung beschreiben. Mit den lichttechnischen Größen kann die Helligkeit des Senders und der Empfängerfläche beschrieben und bewertet werden. [14]

2.4.1 Lichtstrom

Beim Lichtstrom ϕ handelt es sich um eine Größe, die die Lichtleistung einer Lichtquelle beschreibt. Er wird in Lumen (lm) angegeben und ist die gesamte Lichtmenge, die das menschliche Auge von einer Lichtquelle wahrnehmen kann. Das macht ihn zu einem Maß für die Helligkeit einer Lichtquelle. Die Helligkeitsempfindung ist abhängig von der Entfernung, der Fläche und der Lumenzahl der Lampe. Trotz gleichen Lichtstroms können Lichtquellen unterschiedlich hell erscheinen. [6], [15]

Um zu beschreiben wie viel Licht auf eine Fläche trifft wird die Beleuchtungsstärke genutzt.

2.4.2 Beleuchtungsstärke

Bei der Beleuchtungsstärke E handelt es sich um eine Größe, die die Helligkeit von Oberflächen beschreibt. Sie entspricht dem Lichtstrom pro Fläche und wird in Lux (lx) angegeben (2.6). [6]

$$E = \frac{d\phi}{dA} \quad (2.6)$$

Die Beleuchtungsstärke hängt von dem Winkel und der Entfernung ab, in dem das Licht die Fläche trifft. Das Photometrische Entfernungsgesetz sagt aus, dass die Beleuchtungsstärke proportional zum Quadrat der Entfernung zur Lichtquelle abhängt. [16]

Das hier vorgestellte System soll eine Verbesserung durch Homogenität bringen. Diese Lichttechnische Größe hat einen großen Einfluss auf den Menschen. Der Schlaf- und Wachrhythmus hängt davon ab, es sagt aber auch aus wie einfach eine Aufgabe bewerkstelligt werden kann. Das hat vor allem im Büro an Computerarbeiten einen Einfluss. Das menschliche Auge ist dabei bei zu wenig Helligkeit überfordert. Arbeiten, die mit Lesen und Schreiben zu tun haben, sollten einer Beleuchtungsstärke von 500 lx zugrunde liegen. Dieser Wert ist jedoch von mehreren Faktoren abhängig. Der Zweck und die Umgebung der zu beleuchtenden Fläche spielt ebenfalls eine Rolle. [17]

Die Bewertungskriterien und alle benötigten Bauteile, um ein optisches System zu erstellen wurden beschrieben. Im folgenden Abschnitt werden die Grundlagen des Lichtsimulationsprogramms erläutert.

2.5 Lighttools

Lighttools ermöglicht dem Benutzer den Strahlenverlauf von Lichtquellen, Reflektoren, Linsen und weiteren Beleuchtungssystemen zu simulieren. Dafür stehen die unterschiedlichsten Werkzeuge und Materialien zur Verfügung. Abbildung 19 zeigt den Startbildschirm des Programms. In dem roten Bereich ist der Navigator zu sehen, mit dem unter anderem die Komponenten verwaltet werden können. Am anderen Bildrand befindet sich, blau markiert, die Toolbox, in der alle Werkzeuge zur Erstellung unterschiedlichster Komponenten zu finden sind. Dazu gehören Linsen, Lichtquellen und Formen, aber auch Tools zur Bearbeitung der Konstruktion, wie zum Beispiel das Verschieben, Gruppieren, Abschneiden oder Zusammenfügen von Objekten. Im grünen Bildabschnitt befindet sich das Ausgabefenster. Hier wird der Status der ausgeführten Aktionen angezeigt. Dazu gehören auch Ergebnisse von Optimierungen und Fehler, die auftreten. Der große gelbe Bereich ist der Arbeitsbereich. Dort werden die optischen Systeme konstruiert und die Lichtsimulationen dargestellt.

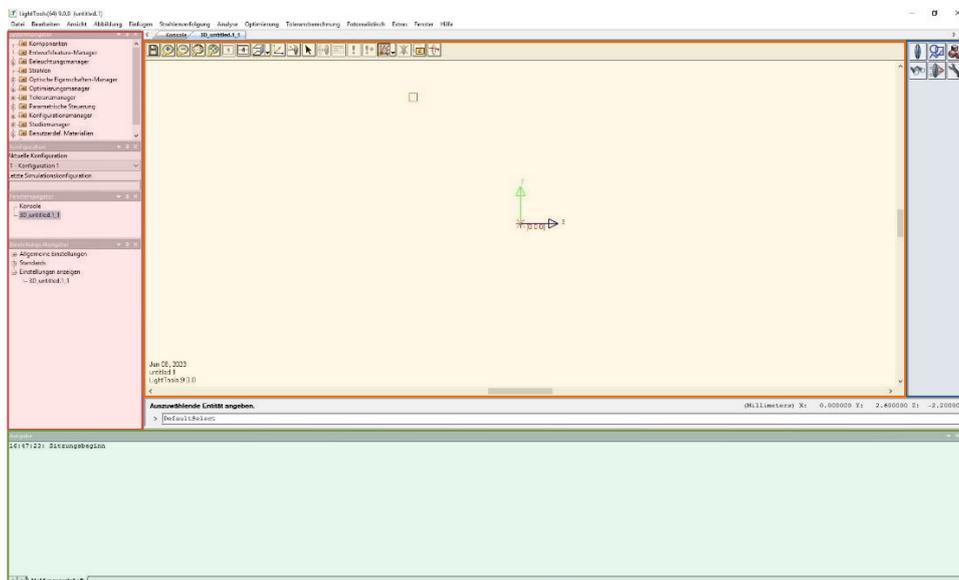


Abbildung 19 Startbildschirm Lighttools

Um die Simulationen zu starten, werden die optischen Systeme aufgebaut und konstruiert. Wie dies in Lighttools umgesetzt wird, wird fortlaufend beschrieben.

2.5.1 Konstruktion und Simulation

Bei der Konstruktion verschiedener Komponenten besitzt die Software eine umfassende Bibliothek an vorgefertigten Materialien und Bauteilen. Es besteht die Möglichkeit alle Komponenten manuell zu erstellen. Dafür sind in dem Werkzeugbereich Linsen, Reflektoren, Quader, Zylinder, Prismen, Lichtquellen und weitere Objekte, um optische und mechanische Elemente zu konstruieren. In den nächsten Abschnitten werden die Erstellung von Linsen, Lichtquellen und die Bedeutung von Empfängerflächen in Lighttools erklärt.

2.5.1.1 Linsen

Für die Linsenerstellung gibt es unterschiedliche Werkzeuge. In Abbildung 20 sind diese gezeigt. Der größte Unterschied zwischen den verschiedenen Auswahlmöglichkeiten besteht aus der Linsenform und wie viele Punkte an ihr verändert werden sollen. Die markierte Linse ist die Standardlinse. Bei dieser Art werden zwei einfache Linsenoberflächen und eine Randfläche erstellt. Diese Flächen können in den Eigenschaften beliebig angepasst werden.

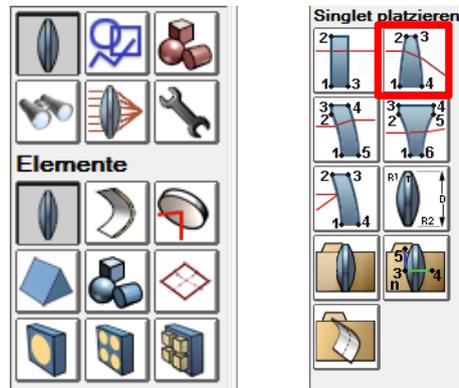


Abbildung 20 Konstruktionswerkzeuge Linsen

In Abbildung 21 ist zu sehen, welche verschiedenen Formen für die Linsenoberfläche eingestellt werden können. Jede dieser Oberflächen hat andere veränderbare Parameter. Bei der Einstellung „Sphärisch“ kann zum Beispiel nur der Radius und das Linsenvorzeichen (konvex oder konkav) angepasst werden. Von allen Formtypen entspricht das den wenigsten Einstellungsparametern, da es sich einfach um eine kugelförmige Oberfläche handelt. Im Bereich „Konisch“ kann zusätzlich zum Radius die konische Konstante angepasst werden, welches die Sphäre zu einer rotationssymmetrischen Asphäre werden lässt (siehe Kapitel 2.2.1.4).

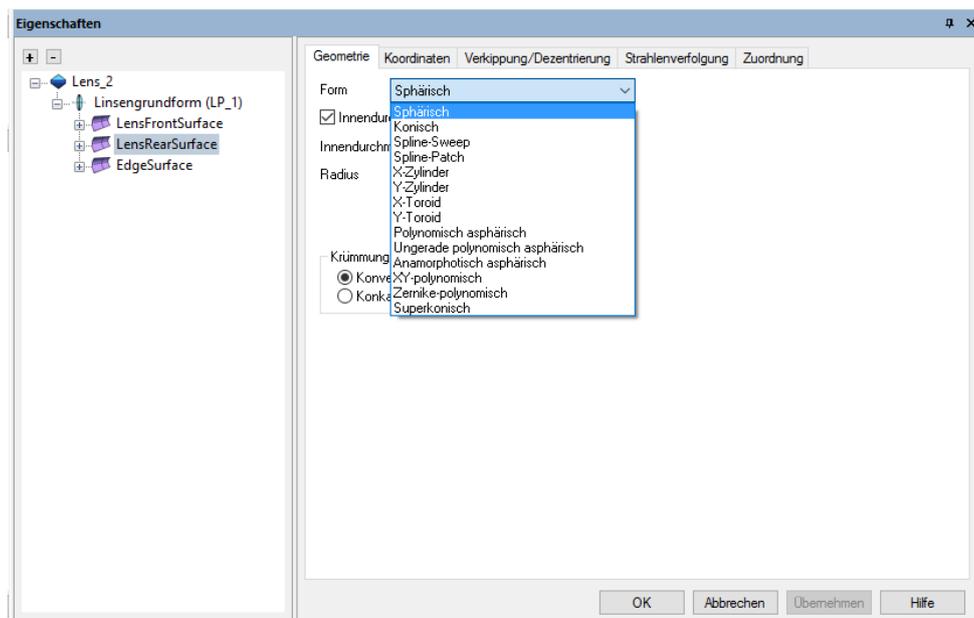


Abbildung 21 Eigenschaften der Linsenoberfläche

Des Weiteren gibt es die Möglichkeit so genannte Spline Patches zu erstellen. Dabei handelt es sich um eine Rasterung der Linsenoberfläche. Die Anzahl der Punkte kann manuell eingestellt werden. Es ist sinnvoll eine ungerade Zahl zu wählen, damit am höchsten Ort der Oberfläche, dem Scheitelpunkt, ein Punkt existiert. Mit diesen wird die Dicke der Linse an dem jeweiligen Punkt zur Kante der Linse bestimmt. Je mehr Punkte ausgewählt werden, desto feiner wird die Oberfläche gerastert. Das bedeutet, dass mehr Punkte zur Verfügung stehen, die verändert werden. Das hat eine höhere Rechenzeit zur Folge. Außerdem wird aus der Linsenoberfläche wird eine Freiformfläche. Abbildung 22 a) zeigt die Verteilung mit 5x5 Punkten auf der Oberfläche und Abbildung 22 b) zeigt die gleiche Linsenoberfläche mit 3x3 Punkten. Der Unterschied besteht hier also auch aus der Anordnung der Punkte. Die 5x5 Verteilung hat eine zusätzliche Reihe mit anzupassenden Punkten, dadurch können individuellere Formen gestaltet werden.

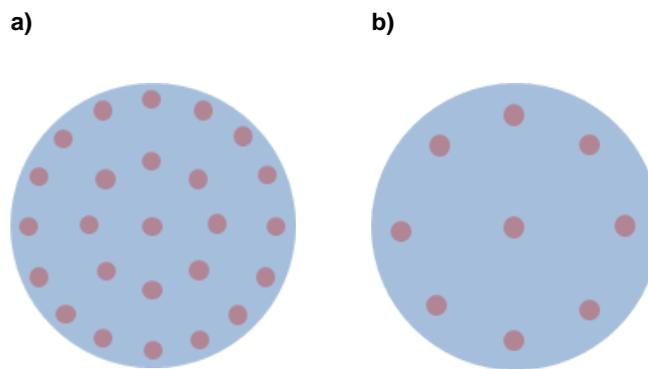


Abbildung 22 Linsenoberfläche mit a) 5x5 Punkten; b) 3x3 Punkten

Abbildung 23 a) und b) zeigt die gleichen Linsenoberflächen im Querschnitt von der Seite. Die roten Ovale sind die Veränderungspunkte. Der Punkt auf dem Linsenscheitel bestimmt die Höhe bis zur Randfläche der Linse. Soll diese Linsenform genutzt werden, können die z-Werte der Punkte entweder selbst eingestellt, oder die Optimierungsfunktion von Lighttools genutzt werden, um die Werte automatisch bestimmen zu lassen (siehe Kapitel 2.5.2).

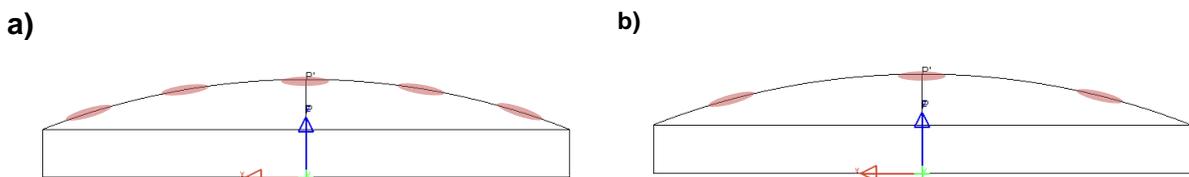


Abbildung 23 Punkteverteilung auf der Linsenoberfläche von der Seite a) 5x5 Punkte; b) 3x3 Punkte

Abbildung 24 zeigt die zugehörige Einstellung in Lighttools. U und V geben die Anzahl der Punkte an, die in diesem Fall 3x3 betragen. Die markierte Matrix zeigt die aktuellen Werte der Punkte. Beim Einstellen der Linsenform sind alle Werte automatisch 0. Die Linsen haben eine flache Oberfläche, bis ein Wert geändert oder optimiert wird. Die Punkte werden für die Optimierung einzeln als Optimierungsvariable definiert. Bei dieser Anzahl an Punkten ergeben das neun Optimierungsvariablen für eine Linse.

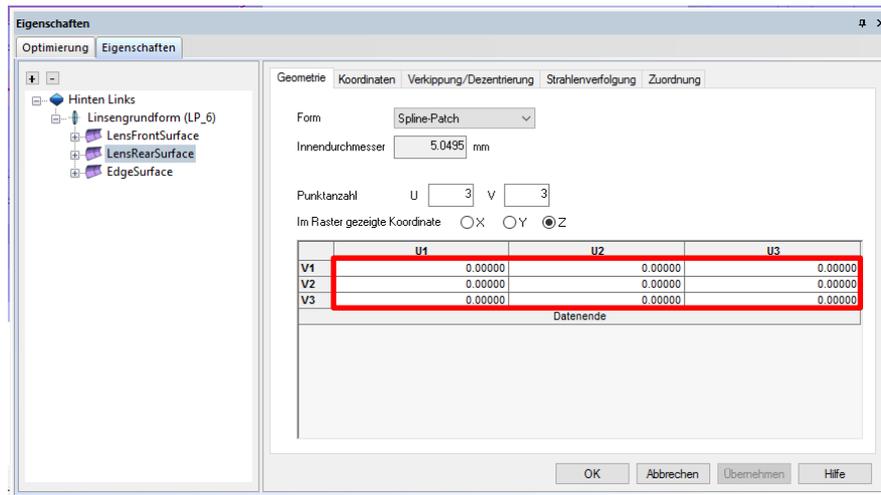


Abbildung 24 Einstellung der Spline Punkte in Lighttools

Neben der Form ist das Material der Linse sehr wichtig. Je nach Brechungsindex können unterschiedliche Lichtverteilungen auf der Empfängerfläche entstehen. Das Programm liefert eine Vielzahl von Katalogmaterialien, welche nach Herstellern sortiert sind. Sollte ein selteneres Material verwendet werden, welches nicht in der Liste aufgeführt ist, kann ein Benutzerdefiniertes Material erstellt werden. Abbildung 25 zeigt das Bearbeitungsfenster für die Einstellungen der Eigenschaften des Materials. Neben dem Materialtyp können der Brechungsindex, der Absorptionstyp und die Volumenstreuung bestimmt werden. Der Brechungsindex kann Wellenlängenabhängig definiert werden.

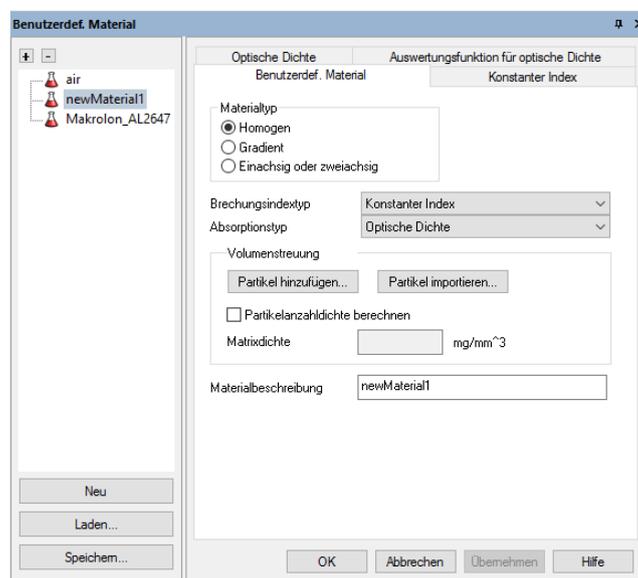


Abbildung 25 Definieren eines Benutzerdefinierten Materials

Mit dieser Funktion können reelle Lichtverläufe durch die Linsen dargestellt werden. Die Parameter werden bei der Simulation berücksichtigt. Um den Strahlenverlauf zu sehen, benötigt das System eine Beleuchtungsquelle. Dazu werden Leuchtmittel erstellt.

2.5.1.2 Lichtquellen

Es befindet sich eine Vielzahl an Lichtquellen in der Bibliothek des Simulationsprogramms. Diese sind nach Hersteller und Modell sortiert. Sollte das gesuchte Objekt nicht vorhanden sein, kann manuell eine eigene Quelle erstellt werden. Um eine LED realitätsnah zu konstruieren, gibt es verschiedene Bauteile. Für einen SMD-Chip kann eine eckige oder runde flächige Lichtquelle als Basis ausgewählt werden (siehe Abbildung 26).

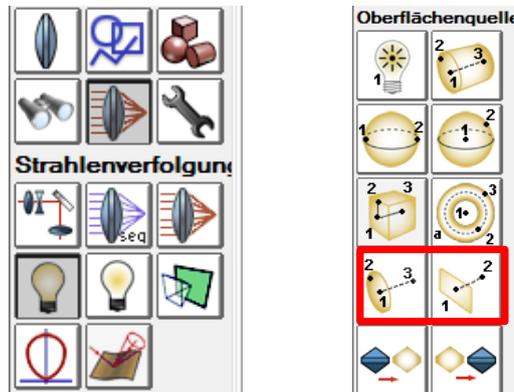


Abbildung 26 Konstruktionswerkzeuge für Lichtquellen

Mithilfe des Datenblatts der LED, die nachgebildet werden soll, können viele Parameter angepasst werden. Abbildung 27 zeigt Einstellungen, mit denen die originale Lichtverteilung wiedergegeben werden kann. Die Registerkarte „Helligkeit“ lässt Einstellungen zum Lichtstrom, zur Winkelverteilung und weiteren spezifischen Abstrahlparametern zu. Damit hat die konstruierte Quelle die gleichen Eigenschaften wie die originale. Die anderen Registerkarten sind für die restlichen Parameter wie Größe, Position, Abstrahlcharakteristik und Spektrales Bereichsdiagramm zuständig.

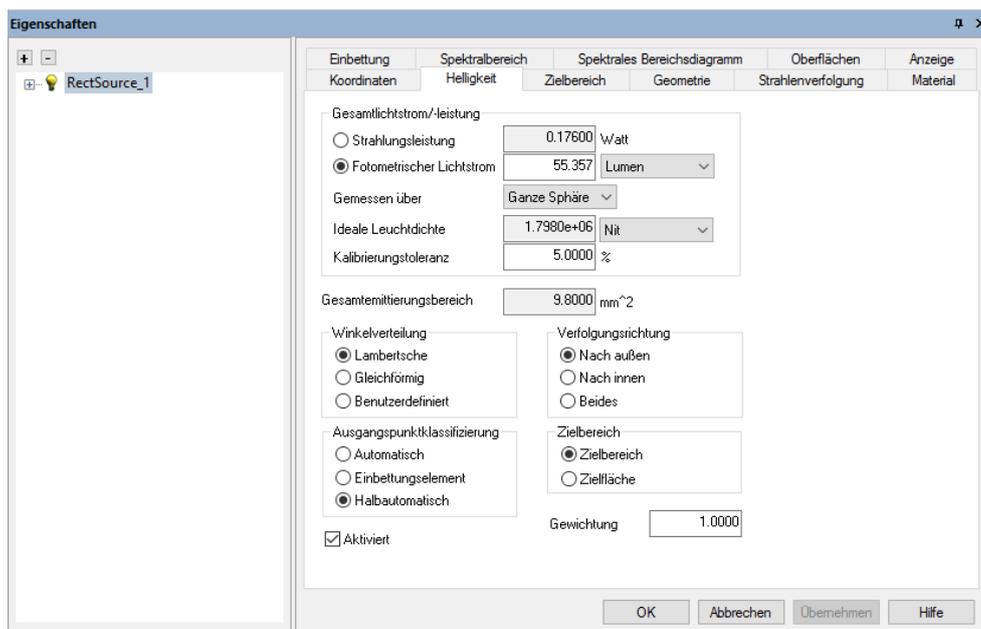


Abbildung 27 Eigenschaften der Lichtquelle

Da das spektrale Bereichsdiagramm individuell für jede LED ist, kann mithilfe des integrierten „Digitizer“ der genaue Graph aus dem Datenblatt eingelesen werden. In Abbildung 28 ist diese Funktion aus der Dienstprogramm-bibliothek gezeigt. Der darin zu sehende Graph ist das spektrale Bereichsdiagramm der LED, die für die Simulationen in dieser Arbeit verwendet wird. Um die Daten zu übernehmen, wird zunächst die Skala angepasst und die äußeren Kanten mit dem orangefarbenen Kasten eingegrenzt. Als nächstes wird die Kurve manuell mit Punkten gerastert. Diese werden am Ende vom System automatisch gefittet, weshalb der gewählte Abstand der Punkte die Genauigkeit wiedergibt. Die Datei wird vom Programm als Text-File mit den Punktkoordinaten gespeichert und kann später in den Quelleneigenschaften eingefügt werden. So ist garantiert, dass die modellierte LED in den gleichen Spektralfarben abstrahlt wie die originale. Mit der gleichen Methode kann die Abstrahlcharakteristik aus dem Datenblatt eingelesen werden.

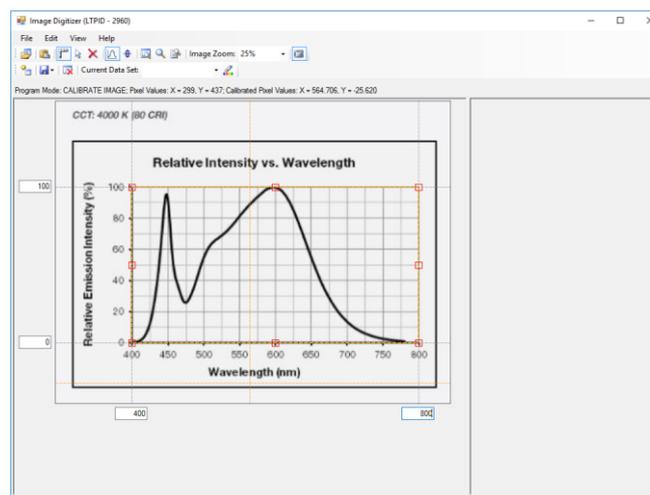


Abbildung 28 Digitizer

Um den Strahlenverlauf der gerade konstruierten LED darzustellen und somit eine Simulation starten zu können, benötigt der Aufbau eine Empfängerfläche, auf die das Licht trifft.

2.5.1.3 Empfängerflächen

Empfängerflächen sind durch Hilfsflächen, namens „Dummy Plane“ zu erstellen. Diese sind über den Werkzeugkasten zu finden und lassen sich auf jede Größe und jeden Abstand skalieren. In Abbildung 29 ist eine Empfängerfläche mit dem dazugehörigen Empfänger (Receiver_5) zu sehen. Durch diesen weiß Lighttools, dass dies die zu betrachtende Oberfläche ist und kann die auftreffenden Strahlen berechnen. Für den Fall, dass unterschiedliche Bereiche ausgeleuchtet werden sollen, können mehrere Empfängerflächen gleichzeitig erstellt und simuliert werden. Die Fläche hat, da sie als Empfänger arbeitet, die Eigenschaft die Simulationsergebnisse direkt anzuzeigen. Dabei wird, ähnlich dem Lumviewer (siehe Kapitel 0), in einem ausgewählten Farbschema (Echtfarben oder Falschfarben) angezeigt, wie die Strahlen auf die Fläche treffen und wie stark die Lichtverteilung ist. Dabei handelt es sich um eine rein visuelle Bewertung der Verteilung.

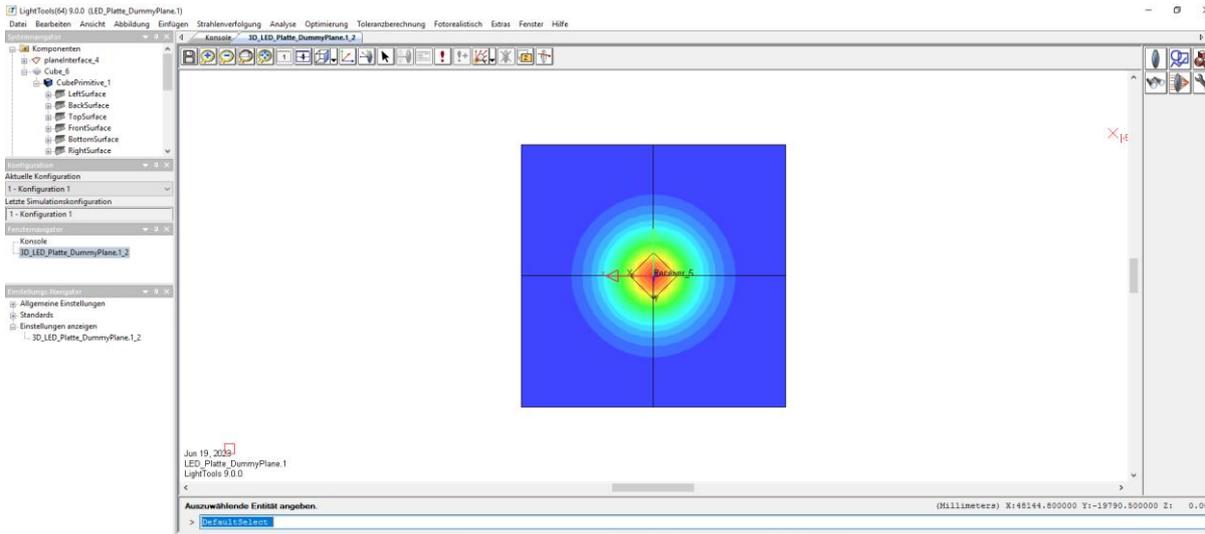


Abbildung 29 Dummy-Plane mit Receiveroberfläche

2.5.2 Optimierungsfunktion

Bei der automatischen Optimierung in Lighttools handelt es sich um eine Minima-Suche über ein Gradientenverfahren. Es wird ein Parameter als Gütefunktion festgelegt. Die gewählten Optimierungsvariablen werden von dem Programm berechnet, sodass das gewünschte Ergebnis entsteht. Die Optimierung startet mit der Minima-Suche an den angegebenen Startparametern. Es ist wichtig, dass die Differenz zu den Ergebniswerten nicht zu groß ist, da ein globales Minimum verfehlt werden und stattdessen ein lokales Minimum gefunden werden kann. Abbildung 30 zeigt ein Schema dieses Systems. Von den Startwerten aus werden die umliegenden Punkte betrachtet und ein Schritt in die Richtung gemacht, in der die Funktion kleiner wird. Dieser Punkt wird zum neuen Startpunkt. Die Schrittweite hängt von der Größe des Gradienten ab. Je näher das Minimum ist, desto kleiner werden die Schritte, um das Minimum nicht zu überspringen. [18]

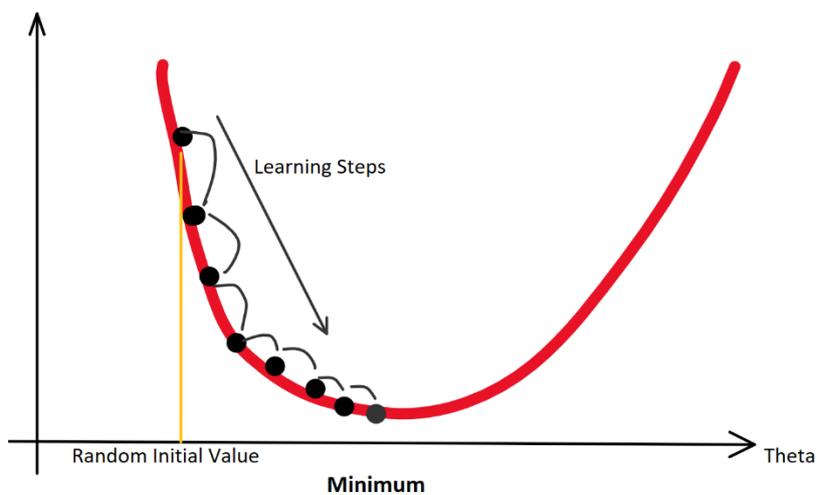
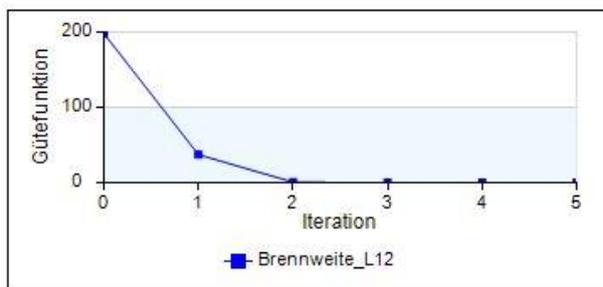


Abbildung 30 Gradientenverfahren [19]

Um sicher zu gehen die richtigen Startparameter gewählt zu haben, kann die Optimierung mit unterschiedlichen Werten durchgeführt werden. Im Nachhinein kann entschieden werden welches Minimum das globale ist. [18] Pro Optimierung wird eine bestimmte Anzahl an Iterationen berechnet. Voreingestellt sind fünf Durchgänge, da dies meist ausreicht, um das gewünschte Minimum zu finden. Das Ausgabefenster am unteren Rand von Lighttools, zeigt den Status der Optimierung und ob das Minimum gefunden wurde. Ist dies nicht der Fall, kann sie von dem aktuellen Stand noch einmal gestartet werden. Die Einzelergebnisse können ebenfalls dargestellt werden, um genaue Schlüsse über die Optimierung ziehen zu können.

In Abbildung 31 ist ein Beispiel für eine optimierte Gütefunktion zu sehen. In dem Beispiel benötigte das Programm genau 5 Iterationen, um das Minimum zu finden. Die Grafik im unteren Teil des Bildes zeigt den Verlauf der Optimierung an. Das Ziel der Funktion ist, wie oben beschrieben, das Minimum. Das bedeutet, dass die Funktion Null werden soll. In diesem Beispiel ist der fünfte Wert so klein, dass er gegen Null geht und daher als Null angenommen werden kann. Damit hat die Funktion einen Wert gefunden, der sehr nah am Minimum liegt.

	Wert
0 [Anfänglich]	198.33
1	37.328
2	0.91608
3	0.0023339
4	4.7434e-08
5	5.0154e-14
Datenende	



Skala der Y-Achse: Linear Logarithmisch

Abbildung 31 Optimierungsergebnisse

Um die berechneten Ergebnisse zu bewerten, gibt es außer den Optimierungsergebnissen, weitere Möglichkeiten. Diese werden im folgenden Abschnitt behandelt.

2.5.3 Auswertung

Je nach Aufbau und Ziel des Projekts gibt es unterschiedliche Funktionen, die darstellen, ob die Konstruktion die gewünschten Ergebnisse liefert oder noch Verbesserungen vorgenommen werden sollten. Um die Gleichmäßigkeit der Ausleuchtung einer Empfängerfläche zu bewerten, eignet sich der „Lumviewer“. In Abbildung 32 c) ist dieser abgebildet. Er zeigt die Beleuchtungsstärke an, die auf der Empfängerfläche ankommt. Unter und neben der Fläche werden die Querschnitte der Verteilung abgebildet. Durch diese ist zu erkennen, wie homogen das Licht die Fläche ausleuchtet. In der rechten unteren Ecke ist eine

Legende zu sehen, die gleichzeitig als Histogramm arbeitet und damit anzeigt wie viel des Lichts in welcher Beleuchtungsintensität vorhanden ist. Die Auflösung kann mit der Anzahl der Bins festgelegt werden (siehe Abbildung 32 a)). Die Bins geben die Größe des Gitters auf der Empfängerfläche an. Bei einer zu groben Auflösung kann kein Aussagekräftiges Ergebnis dargestellt werden, da zu große Bereiche betrachtet werden. Die Anzahl sollte auch nicht zu hoch sein, da mit der Anzahl der Bins auch die Strahlenanzahl und die Simulationszeit steigt. Ein Orientierungsmaß ist die Fehlerschätzung (siehe Abbildung 30 b)). Der Durchschnittswert sollte unter 10 % liegen, dann ist das Verhältnis von Bin- zu Strahlenanzahl aussagekräftig.

a)

Eigenschaften Gitterergebnisse Strahlenbreite Glättung Gitterdaten

Gittergröße

X	141 Bins	X Durchschnitt	11.702 mm
Y	141 Bins	Y Durchschnitt	11.702 mm

Autom. Gittergenzen

Gittergenzen

Min X	-825.00 mm	Min Y	-825.00 mm
Max X	825.00 mm	Max Y	825.00 mm

Datenmittelung

Keine

Symmetrie Drehungsbezogen

Aperturmodus

Keine Apertur Analyse in einem Bereich

Grafik anzeigen

Begrenzung Gitter

b)

Eigenschaften Gitterergebnisse Strahlenbreite Glättung Gitterdaten

Fehlerschätzung

Bei Höchstwert	2.27 %	Durchschnitt	5.27 %
----------------	--------	--------------	--------

Anzahl der Stichproben 9.891.196

Gesamtlichtstrom/-leistung (nicht geglätteten)

Einheiten	Lumen	Durch Apertur abgeschnitten	
Einfallend	192.30 Lumen	Absorbiert	0.00000 Lumen
Absorbiert	0.00000 Lumen		0.00000 Lumen

Statistik basiert auf geglätteten Gitterdaten

Beleuchtungsstärke

Min.	0.00000 Lux	Kontrastverhältnis	1.0000
Max.	283.88 Lux	Standardabweichung	63.664
Durchschnitt	70.637 Lux	Variationskoeffizient	0.90128

Verteilungsposition und -ausmaß

Schwerpunkt		Standardabweichung	
X	0.010691 mm	Sigma X	341.53 mm
Y	-0.020652 mm	Sigma Y	342.96 mm

c)

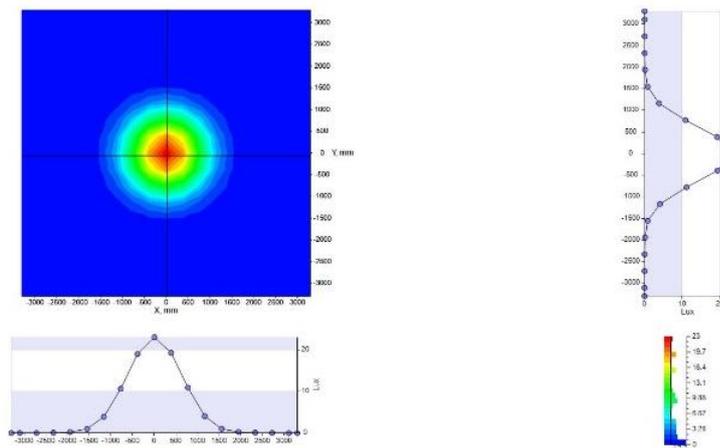


Abbildung 32 a) Lumviewer Beispiel; b) Einstellung der Eigenschaften und der Auflösung; c)Gitterergebnisse

Um sicher definieren zu können welche Verteilung die beste ist, ist es sinnvoll einen Wert zu bestimmen, mit dem die Homogenität dieser Fläche beschrieben wird. Eine Fläche ist homogen, wenn die Lichtverteilung an allen Stellen des Schirms gleichmäßig ist. Das heißt, dass die Fläche an allen Punkten gleich hell erscheint. Der Begriff „Homogenität“ beschreibt dies auf eine visuelle Weise, daher wird es nach Definition des CIE-Standardbetrachters „Gleichmäßigkeit“ genannt. Die Berechnung der Gleichmäßigkeit wird mit der Beleuchtungsstärke berechnet. Dies kann auf drei unterschiedliche Arten erfolgen.

$$g1 = \frac{E_{min}}{E_{mittel}} \quad (2.7)$$

$$g2 = \frac{E_{max}}{E_{min}} \quad (2.8)$$

$$g3 = \frac{s}{E_{mittel}} \quad (2.9)$$

mit

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (E_i - E)^2} \quad (2.10)$$

Formel 2.7 und Formel 2.8 beschreiben die Gleichmäßigkeit mit dem Verhältnis der geringsten zur mittleren Beleuchtungsstärke bzw. der höchsten zur geringsten Beleuchtungsstärke des Systems. Die Gleichmäßigkeit ist am höchsten bei einem Wert von „1“. Formel 2.9 wird dagegen mit der Standardabweichung berechnet. Die Standardabweichung gibt die durchschnittliche Differenz der gemessenen Beleuchtungsstärke vom Mittelwert an. [20] Dabei ist n die Anzahl der Einzelwerte der Beleuchtungsstärke. E_{mittel} ist der Mittelwert der Beleuchtungsstärke. Dieser Wert soll möglichst klein sein, im besten Fall Null, um eine hohe Gleichmäßigkeit zu erreichen. [21]

Mithilfe dieser Grundlagen ist es möglich die Simulationen zur Verbesserung vorzunehmen. Die kommenden Kapitel beschäftigen sich mit der Homogenisierung des Lichtstrahls auf der Fläche und der Umlenkung des Lichts in die Randbereiche. Dazu wird zunächst der Simulationsaufbau erläutert und dann so realitätsnah wie möglich erstellt.

3 Simulationsaufbau

Mit Hilfe des im vorherigen Kapitel beschriebenen Programms Lighttools, werden unterschiedliche Simulationsprojekte realisierbar. Die vorgegebene LED ist nicht in der Bibliothek zu finden, daher wird sie manuell nach dem in Kapitel 2.5.1.2 beschriebenen System modelliert. Auch das Material der Linse ist spezifisch und wird Benutzerdefiniert eingestellt.

Die Leuchtdiode wird anhand des Datenblatts in Lighttools erstellt (siehe Abbildung 33 a)). Die Leuchtfläche hat Außenmaße von 2,8 mm x 3,5 mm und einen Abstrahlwinkel von 120°. Die Abbildung b) zeigt die fertige LED in Lighttools. Der Diamantförmige Strahlenlauf zeigt die Abstrahlung der LED. In diesem Winkel sendet sie von jedem Punkt der orangenen Fläche Lichtstrahlen aus.

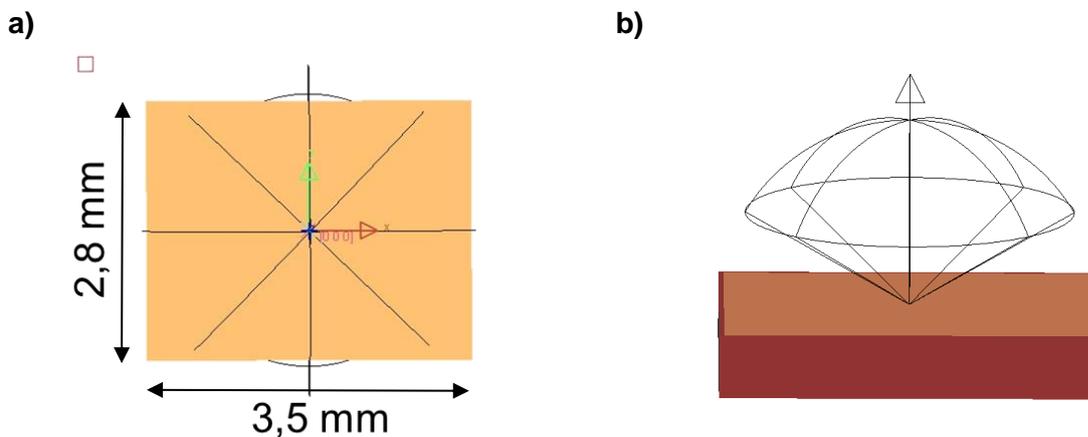


Abbildung 33 Leuchtende Fläche in Lighttools mit Maßen der originalen LED

In den Grundlagen wurden die Parameter, die für die Erstellung der LED angepasst werden können, erläutert. Auf diese Weise wird die Lichtquelle in das Programm integriert. Abbildung 34 zeigt die Einstellungen für die verwendete LM281B+. In a) sind die Helligkeitseinstellungen zu sehen. Der Lichtstrom wird mit 78 Lumen angegeben. Der andere Parameter, der verändert wurde, ist die Winkelverteilung. Diese ist als Lambertsch eingestellt. Das bedeutet, dass sie von allen Blickrichtungen aus gleich hell erscheint. [22] Die Abbildung b) zeigt das eingeleseene spektrale Bereichsdiagramm. Dieses wurde mit dem Digitizer digitalisiert. Im Datenblatt sind unterschiedliche spektrale Verteilungen für verschiedene Lichttemperaturen angegeben. Da in dem Datenblatt des LED-Moduls der Firma Seto-Light eine Farbtemperatur von 4000 K angegeben ist, wird diese für die LED übernommen. Die Leuchtfläche wird in einer Höhe angezeigt, die aus der Seitenperspektive nicht zu sehen ist. Um sie sichtbar zu machen wird ein Block unter die beleuchtende Fläche gesetzt. Dieser ist rein optisch, um die Position der LED aus einem Winkel von 90 ° sehen zu können und hat keine Funktion in der Simulation.

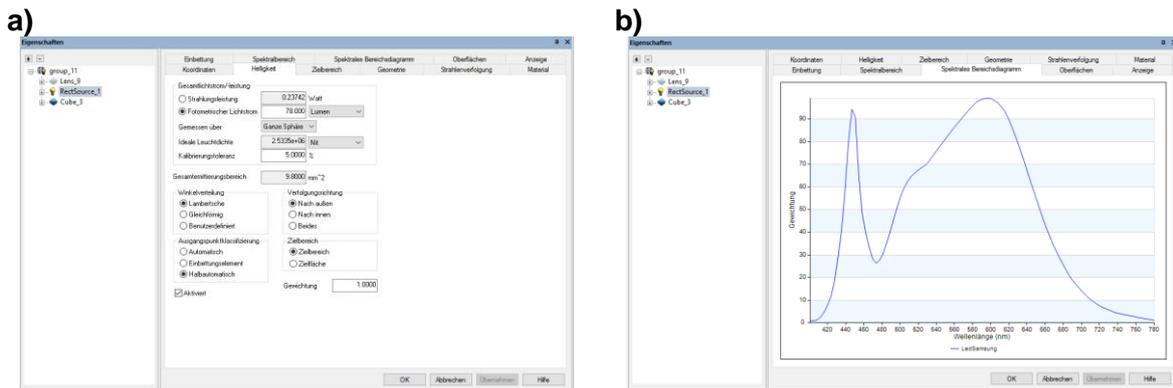


Abbildung 34 Parameter der LED a) zur Helligkeit; b) spektrales Bereichsdiagramm

In Abbildung 35 ist der fertige Simulationsaufbau gezeigt. Am oberen Rand des roten Rechtecks ist die LED platziert. Direkt darüber ist eine PMMA-Platte mit einem Brechungsindex von 1,5. Die Höhe beträgt 0,5 mm.

Die Platte soll die Basis für die Linsen sein. Das Material, aus dem die Linsen bestehen ist ebenfalls ein polymer, namens Luxaprint, der Firma Detax. Es ist ein Polymer welches bei einer Wellenlänge von 385 nm (UV) aushärtet.

Die Linsenform ist plankonvex. Durch ihre Herstellungsmethode sind der Durchmesser der Linse, die Form und der Radius begrenzt. Der Aufbau lässt einen maximalen Durchmesser von 5 mm zu, da er für Mikrooptiken konzipiert ist. Die Linse in Abbildung 35 ist eine sphärische Beispiellinse, die nicht das Endergebnis darstellt.

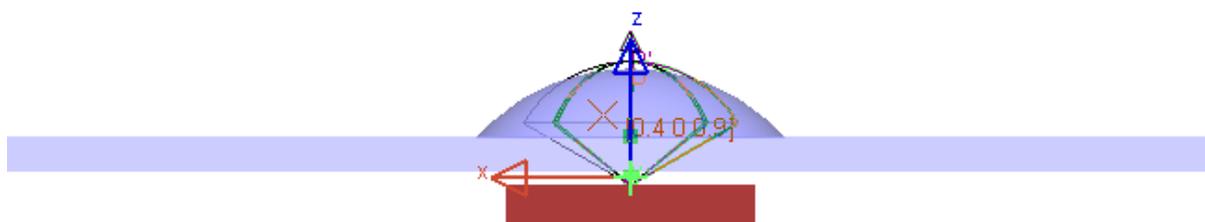


Abbildung 35 Grundaufbau des Systems

Wie in den Zielen (Kapitel 1.2) erklärt, soll eine 1000 m² große Fläche in einem Abstand von 5 m ausgeleuchtet werden. Wird mit dieser einzelnen LED auf die Fläche simuliert, kommt wie in Abbildung 36 a) zu sehen ist, kaum Leistung auf dem Empfänger an. Da die Fläche mit einem ganzen Modul und nicht nur einer LED beleuchtet werden soll, wird die Fläche zur Vereinfachung angepasst und entsprechend verkleinert. Der neue Abstand ergibt sich zu 0,5 m. Die neuen Seitenlängen der Fläche betragen 0,82 m. Wird die gleiche LED mit der neuen Fläche simuliert ergibt sich die Verteilung von Abbildung 36 b). Auf der Empfängerfläche kommen mit einer LED etwa 100 Lx an.

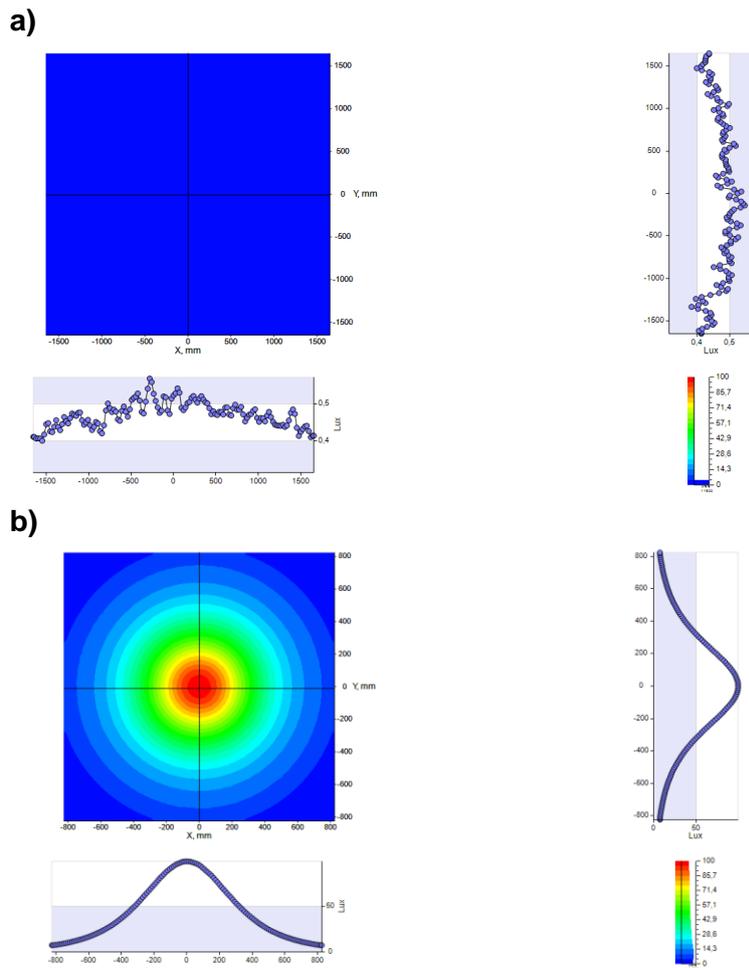


Abbildung 36 Verteilung auf der Empfängerfläche a) mit großer Fläche und weitem Abstand; b) mit kleiner Fläche und kleinem Abstand

Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 37 a) der Abstand zur kleinen Fläche dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Aufbau, welcher sich am Punkt $[0,0,0]$ des Koordinatensystems befindet gegenüber der Fläche klein erscheint. Wie zu sehen ist, ist der Empfänger auf den Abstand immer noch sehr groß. Die Strahlen sind im Zentrum der Fläche zentrierter als am Rand. Diese sollen homogen auf der Fläche verteilt werden (siehe Abbildung 37 b)).

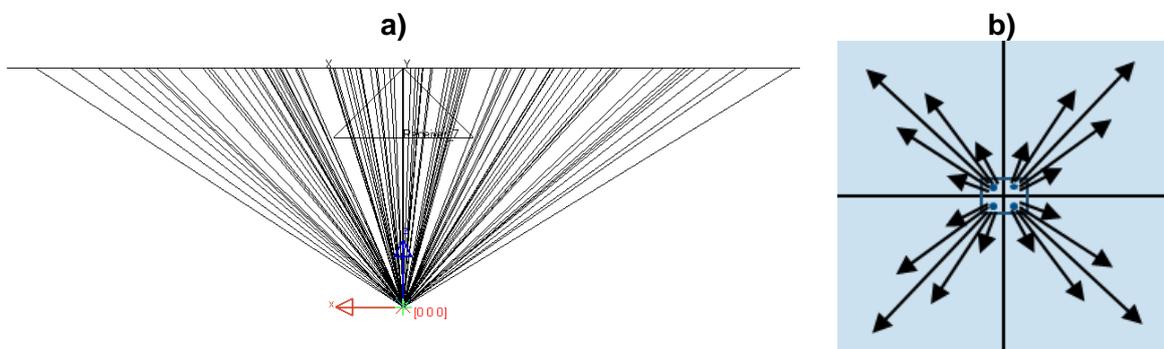


Abbildung 37 a) LED mit Strahlenverlauf zur Empfängerfläche b) Schema Strahlen nach außen lenken

Die Simulationen in Kapitel 4 werden mit einem System aus vier Linsen gestartet. Dazu werden sie im gleichen Abstand angeordnet, wie sie auf dem realen Modul zu sehen sind. In Abbildung 38 sind die genauen Abstände zwischen den LED gezeigt. Horizontal haben sie einen Abstand von 8,5 mm und vertikal liegen 7 mm zwischen ihnen.

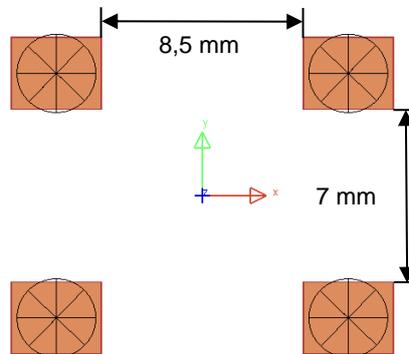
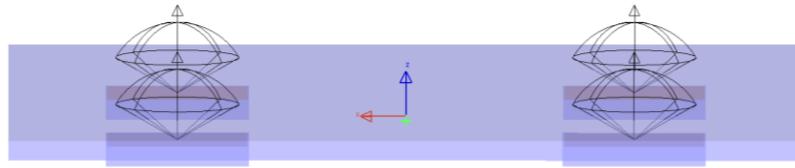


Abbildung 38 Abstand der LED in Lighttools

Um nach der Optimierung bewerten zu können, ob sich durch die Linsen eine Verbesserung einstellt, wird die Simulation erstmals ohne Linsen durchgeführt. Die Ergebnisse, die mithilfe des Lumviewers angezeigt werden, werden auf eine Beleuchtungsstärke von 500 Lux skaliert. Damit können die unterschiedlichen Simulationsergebnisse miteinander verglichen werden. Die gelben Anteile, die in der Mitte der Abbildung 39 b) zu sehen sind, sind, wie in der Legende zu erkennen, die beleuchtungsstärksten Anteile auf der Fläche. In den Querschnitten ist zu erkennen, dass es ein eindeutiges Maximum in der Mitte gibt, welches entfernt werden soll. Da die auslaufenden Strahlen am Rand die Werte verfälschen können wird ein Teilausschnitt des Bildes betrachtet. Dabei handelt es sich um eine Fläche von 47 cm x 47 cm. Diese ist in der Abbildung mit dem roten Quadrat markiert.

a)



b)

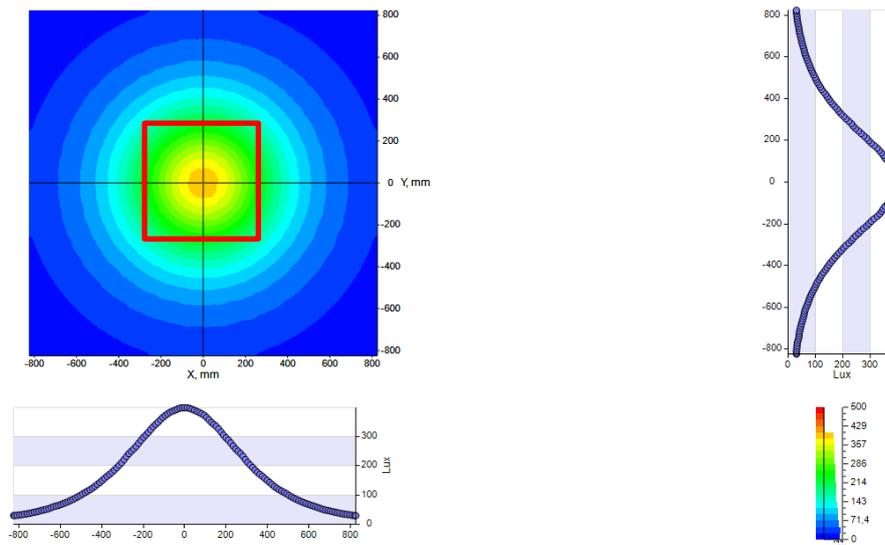


Abbildung 39 a) Aufbau ohne Linsen; b) Lichtverteilung auf dem Schirm ohne Linsen

Für die Bewertung werden mithilfe einer Matlab Funktion die Gleichmäßigkeitswerte aus den Formeln 2.7, 2.8 und 2.9 berechnet (siehe Anhang 6.1.1). In Tabelle 2 sind die berechneten Werte für die Simulation aus Abbildung 39 zu sehen. In der zweiten Spalte erfolgt die Berechnung auf die gesamte Fläche. Die Außenbereiche sind nicht beleuchtet und die minimale Beleuchtungsstärke 0, daher geben die ersten beiden Werte keine Auskunft über die Homogenität. Ausschließlich der dritte Wert gibt in diesem Beispiel Auskunft über die Verteilung. Aus diesem Grund wird ein Teil der Fläche für die Berechnung der Werte ausgeschnitten. In Abbildung 40 b) sind die Bereiche gezeigt. Abbildung 40 a) zeigt die gleiche Fläche wie Abbildung 39.

Tabelle 2 Gleichmäßigkeit der Ausgangssituation ohne Linsen

<i>Gleichmäßigkeit</i>	<i>Gesamte Fläche</i>	<i>Beleuchteter Bereich</i>
<i>g1 [soll:1]</i>	0	0,5968
<i>g2 [soll:1]</i>	Inf	2,1840
<i>g3 [soll:0]</i>	1,022	0,1639

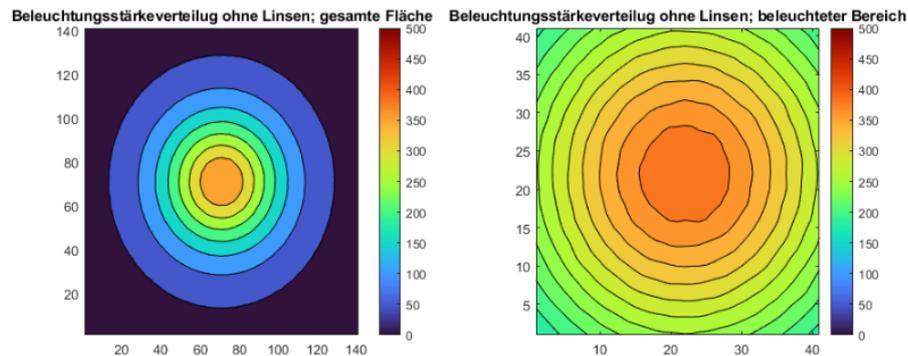


Abbildung 40 Beleuchtungsverteilung geplottet mit Matlab a) die gesamte Fläche; b) der beleuchtete Bereich

Diese Ausgangssituation bildet die Grundlage und Vergleichswerte für die kommenden Simulationen. Wird eine Linse in dem Simulationsprogramm erstellt, können in den Eigenschaften drei Flächen unabhängig voneinander bearbeitet werden. Die vordere Linsenfläche, die Randfläche und die hintere Linsenfläche. Die vordere Fläche ist die, die auf der planparallelen Platte aufliegt, daher wird die sphärische Linseneinstellung mit einem Radius von „0“ eingestellt. Die Randfläche soll in dem finalen Ergebnis nicht vorhanden sein, denn das Ziel ist eine Asphäre mit auslaufenden Rändern. In den Grundlagen (Kapitel 2.5.1.1) sind einige Oberflächenformen, die für die hintere Linsenfläche in Frage kommen beschrieben worden.

Die ersten Simulationen werden mit der Einstellung „Spline Patches“ durchgeführt. Dabei soll die Optimierungsfunktion verwendet werden, um eine gleichmäßig beleuchtete Fläche zu generieren.

4 3x3-Spline-Patch mit Optimierungsfunktion

Jeden Punkt manuell zu verändern ist zeitaufwendig. Außerdem ist die Wahrscheinlichkeit hoch Werte zu übergehen, die die Lichtverteilung erheblich verbessern würden. Daher wird die Optimierungsfunktion von Lighttools verwendet, um die bestmöglichen Ergebnisse zu finden.

Als Gütefunktion wird das „Illuminance Mesh“ ausgewählt. Das sind die Gitterdaten der Empfängerfläche. In Abbildung 41 a) ist die Funktionsdefinierung gezeigt. Im Optimierungsmanager können nun weitere Einstellungen für die Optimierung vorgenommen werden. Abbildung 41 b) zeigt das Gitterbereichsziel. Zu sehen ist eine Matrix mit Werten, die die gewünschte Verteilung zeigen. Das Gitterbereichsziel wird mit Werten zwischen 0 (schwarz) und 1 (weiß) angegeben.

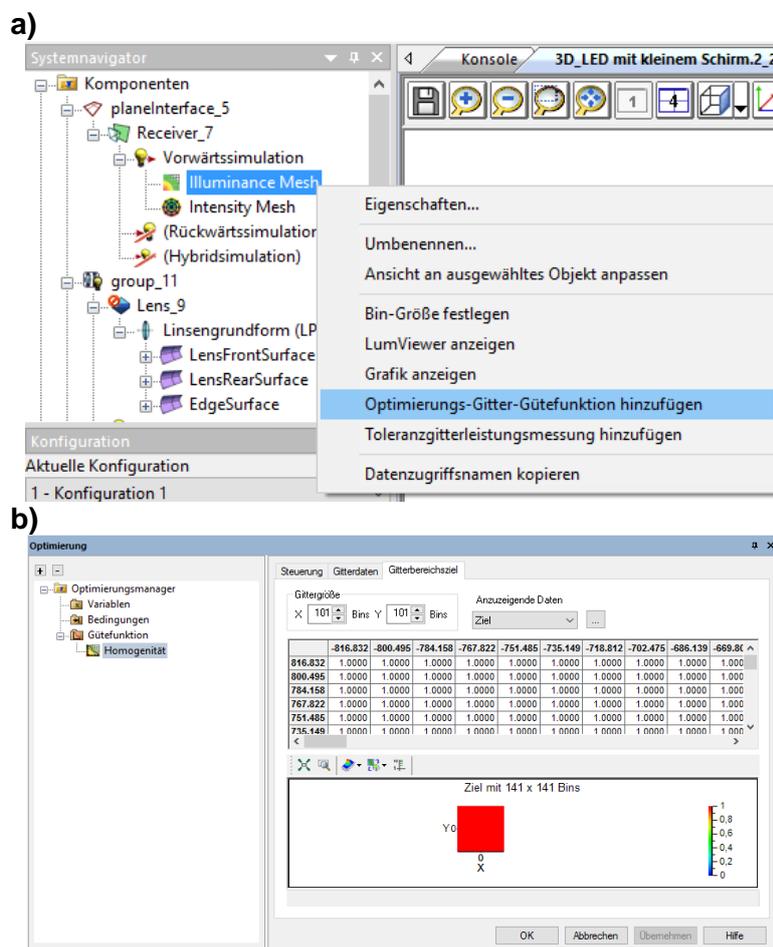


Abbildung 41 Definierung der Gütefunktion für die Homogenität

In dieser Simulation werden die Spline-Patches genutzt. Sobald die Spline-Patches als Oberflächenform gewählt wird ergibt sich die Linse aus Abbildung 42 a). Jeder Punkt auf der Oberfläche hat den Wert „0“, dadurch handelt es sich um Zylinder. Bei dieser Simulation wird getestet, welche Form Lighttools ermittelt, um die Fläche zu beleuchten. Das schließt die Linsenart, ob konvex oder konkav, mit ein. Der Durchmesser der Linse beträgt 5 mm. Die Linsendicke beträgt 1.2242 mm und ist aus der Voreinstellung. Zu Vergleichszwecken wird die Ausgangslinse vor der Optimierung simuliert. Abbildung 42 b) zeigt den Lumviewer der

Beleuchtung. Die Linsen streuen das Licht in Ringform auf die Oberfläche. Außerdem kommt wenig Beleuchtungsstärke auf der Fläche an. Aus diesem Grund wird die maximal angezeigte Beleuchtungsstärke in dieser Simulation auf 100 Lx skaliert.

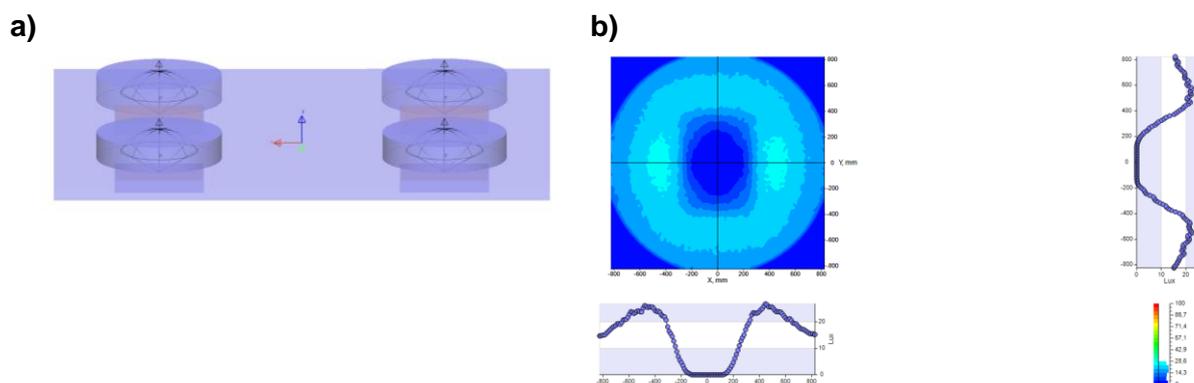


Abbildung 42 a) Linsenform vor der Optimierung; b) Lichtverteilung auf der Empfängerfläche

Die Ergebnisse können in Tabelle 3 eingesehen werden. Der Ringform ist geschuldet, dass hier nur die Verteilung auf der ganzen Fläche berücksichtigt werden kann. Da auch hier die Beleuchtungsstärke ein Minimum von 0 hat, sind g_1 und g_2 nicht aussagekräftig. Das Beleuchtungsminimum im Zentrum zeigt zudem eine Inhomogenität.

Tabelle 3 Gleichmäßigkeit der Ausgangssituation mit Linsen

<i>Gleichmäßigkeit</i>	<i>Gesamte Fläche</i>
g_1 [soll:1]	0
g_2 [soll:1]	inf
g_3 [soll:0]	0,5558

Wenn alle Linsen gleichzeitig optimiert werden sollen, ergibt das 36 Optimierungsvariablen. Da dies viel Rechenleistung kostet und zeitaufwendig ist werden die Punkte einzeln optimiert. Von jeder Linse wird ein Punkt gleichzeitig optimiert. Das ergibt sich zu 4 Variablen pro Durchgang. Das Schema der Optimierung ist in Abbildung 43 dargestellt. Der erste Startparameter ist der Punkt in dem Winkel, an dem die Linsen zueinander gerichtet sind. Dieser Punkt soll am Ende den Strahlengang so verändern, dass die sich überlagernden Strahlen, die das Maximum bilden, nicht mehr in der Intensität auftreten wie bisher.

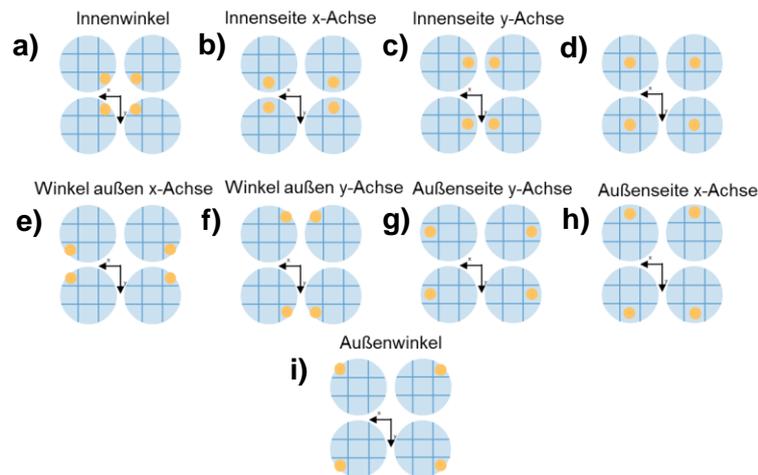


Abbildung 43 Schema der Einzelnen Anpassung der Punkte

Abbildung 44 zeigt den Ablauf der folgenden Simulation. Die Parameter, die sich ändern sollen sind die Dicke, die einzelnen Spline-Punkte und der Durchmesser. Diese Optimierungen werden zu Vereinfachung für das System nacheinander durchgeführt.



Abbildung 44 Optimierungsablauf der Simulation

4.1 Simulation

Die Simulationen werden nacheinander durchgeführt. Angefangen mit der Dicke. In den folgenden Abbildungen sind die Verteilungen der Beleuchtungsstärke nach jeder Optimierung zu sehen. Mit den optimierten Linsen ist eine Verbesserung zu der Ausgangssituation zu erkennen. Die Beleuchtungsstärke, die ankommt hat sich nach der ersten Optimierung verdoppelt. Wie in Abbildung 45 - Abbildung 47 zu erkennen ist, stellt sich danach keine signifikante Verbesserung mehr ein. Die Gleichmäßigkeitswerte zeigen, dass jede Optimierung die Homogenität erweitert. Diese Verbesserung ist so gering, dass sie für das bloße Auge nicht zu sehen ist.

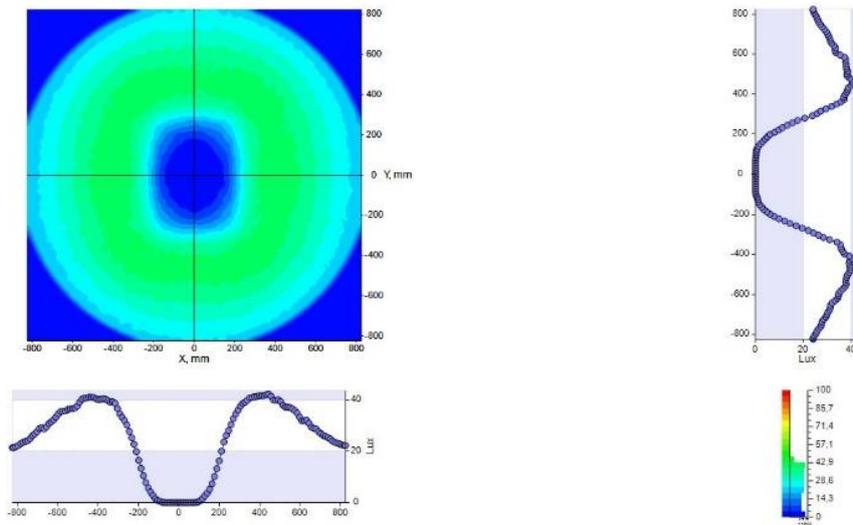


Abbildung 45 Optimierung 1: Linsendicke

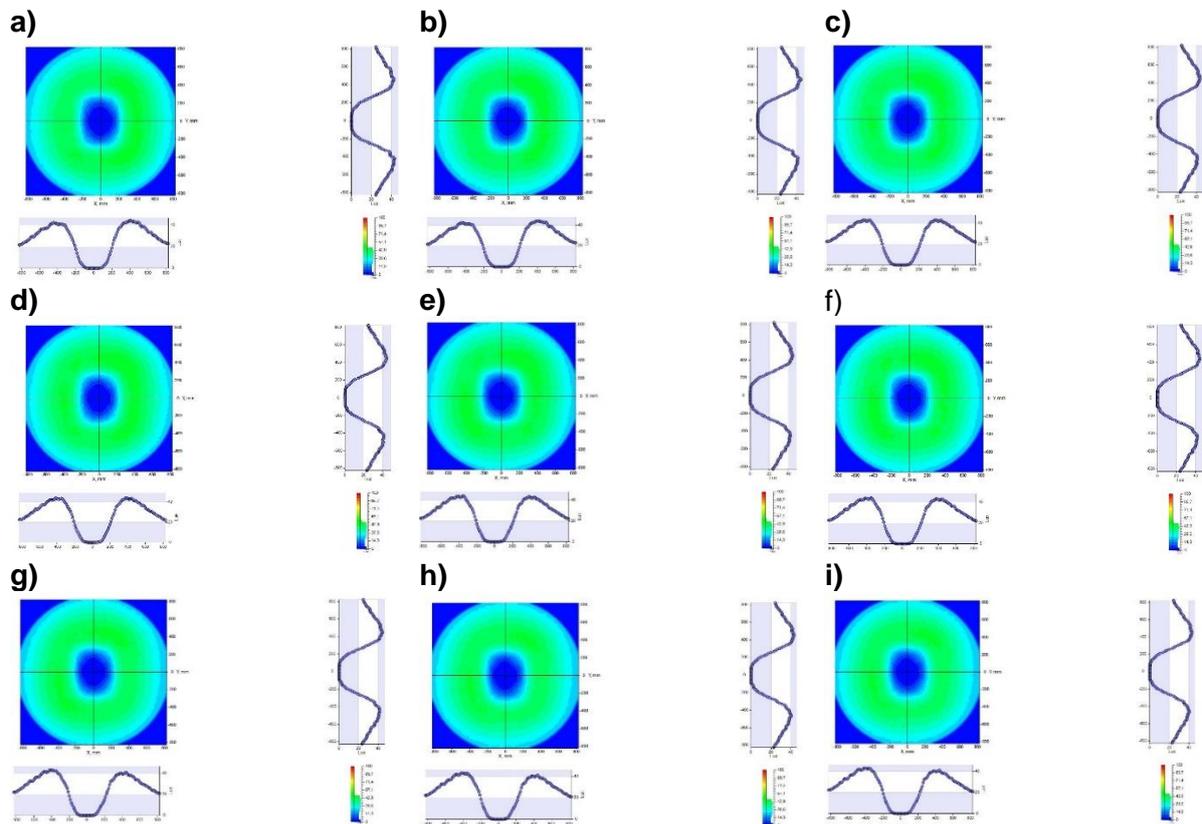


Abbildung 46 Optimierung 2: Spline-Patch Punkte einzeln

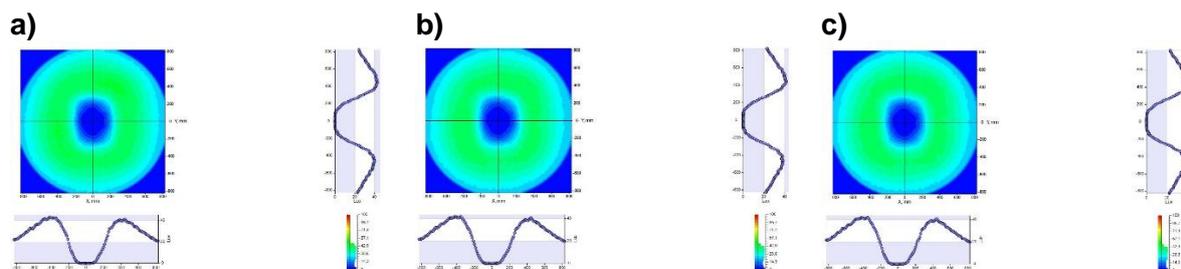


Abbildung 47 a) Optimierung 3: Alle Punkte gemeinsam; b) Linsendicke; c) Durchmesser

Nachdem alle Optimierungen durchgeführt wurden, stellt sich folgende Linsenform ein (siehe Abbildung 48). Die Linsen haben eine frei geformte Oberfläche und sind eine Mischung aus konkaver und konvexer Oberfläche. Jede Linse hat eine andere Oberfläche und wurde individuell erstellt.

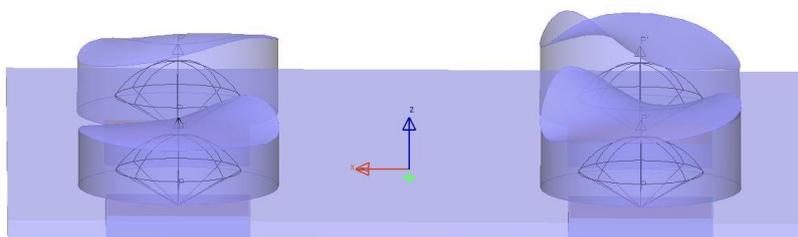


Abbildung 48 Linsenform nach Optimierungsreihe

4.2 Zwischenfazit

Mittels der Spline-Patch Einstellung können die 4 Linsen nicht homogen beleuchten und auch die Oberfläche der Linsen entspricht nicht der angestrebten Asphäre. Diese Form der Oberfläche formt eine Freiformfläche, die in der Herstellung aufwendig ist. Außerdem wurde mit dieser Art der Optimierung nicht das gewünschte Ergebnis erzielt. Die Startparameter sind willkürlich zu wählen. Der Zeitfaktor ist ebenfalls hoch, da das Programm je nach Anzahl der Variablen lange Rechenzeiten hat. Werden die Variablen aufgeteilt dauert es die komplette Simulation dennoch viel Zeit, da vier Linsen gleichzeitig berechnet werden müssen. Dies ist also keine effektive Methode die optimalen Linsenparameter zu erforschen.

Bei den erhaltenen Einstellungen wurde viel Beleuchtungsstärke verloren, weshalb in dem folgenden Kapitel eine Parameterstudie durchgeführt wird. Diese soll eine höhere Leistung und Homogenität auf der Bildfläche verursachen. Um eine Asphäre zu generieren, werden die folgenden Simulationen mit der Oberflächenform: „konisch“ durchgeführt.

5 Konische Linsen

Vor dem Start der Simulation ist die Überlegung wichtig, mit welcher Linsenform die Strahlen umgelenkt werden können. Da die Auflage der Herstellungsart wenig Variation zulässt, werden mithilfe einer konvexen Asphäre die Strahlen aus dem Mittelpunkt gelenkt. Dafür wird eine Simulation gemacht, die in Abbildung 49 zu sehen ist. Der Scheitelpunkt der Linse wird aus dem Zentrum versetzt. Dadurch wird die Rotationssymmetrie aufgehoben. Die Strahlen, die am flachen Teil der Linse gebrochen werden, werden auch in die gleiche Richtung gebrochen. Wird die Linse mit den Rändern zur Mitte platziert, werden weniger Strahlen in den Mittelpunkt der Fläche, sondern weiter nach außen gelenkt. Die Strahlen in der Mitte überlagern sich und es entsteht ein breiterer Bereich, der ähnlich stark beleuchtet ist.

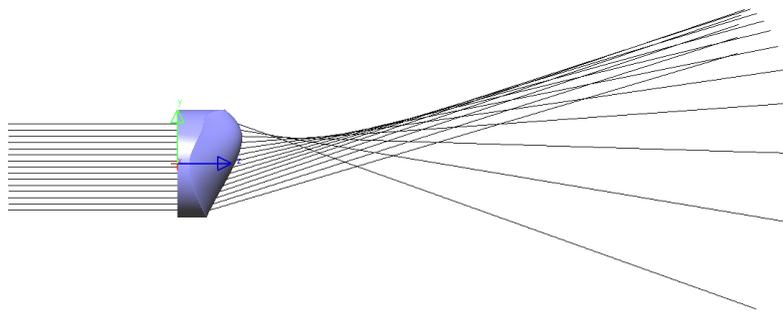


Abbildung 49 Linsenscheitel der Asphäre aus dem Mittelpunkt versetzt

Wie im vorherigen Kapitel zu sehen, ist es aufwendig vier Linsen gleichzeitig zu optimieren, daher wird nachfolgend der Aufbau erneut vereinfacht (siehe Abbildung 50). Es wird eine einzelne LED genutzt, die im Ursprung positioniert wird. Anschließend wird die Linse mit der ausgewählten Oberflächenform erstellt.

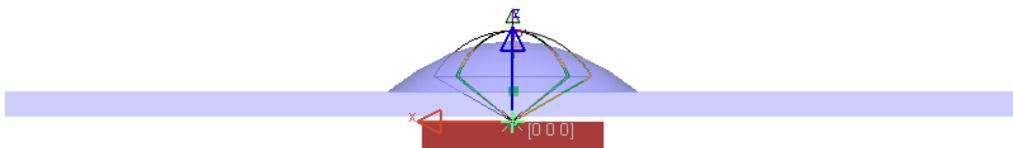


Abbildung 50 Aufbau einzelner LED mit Linse im Ursprung

Die konischen Linsen in Lighttools haben, im Gegensatz zu den Spline-Patches, weniger individuelle Einstellungen, um die Linsenoberfläche zu verändern. Der Vorteil dabei ist, dass die Oberfläche eben bleibt und nicht deformiert werden kann. Die Hauptparameter der Einstellung sind der Radius, die konische Konstante und das Krümmungsvorzeichen, das angibt, ob eine konvexe oder konkave Linse entstehen soll. In den Vortests wird die Optimierungsfunktion noch verwendet, um die Brennweite einzustellen. Bei der danach folgenden Parameterstudie wird sie auf Grund der Berechnungsdauer vernachlässigt. Die Variablen werden dort stattdessen durch verschiedene ausgewählte Werte simuliert.

5.1 Vortests - Konische Konstante, Brennweite

In diesem Abschnitt werden Vorstudien durchgeführt, um die Parameter für die Recherche auszuwählen. Bisher wurde versucht die Strahlen mit der Linse nach außen zu lenken. Auf der Empfängerfläche soll ein Defokus entstehen. Wenn eine Sammellinse eine kleine Brennweite hat, fokussieren die Strahlen in geringem Abstand zur Linse auf der optischen Achse. Nach dem Brennpunkt defokussieren sie wieder und weiten sich auf. In Abbildung 51 ist dieser Ansatz dargestellt. Bei der Linse a) ist am Ende auf dem Schirm ein kleinerer Bereich als bei Linse b), bei der die Brennweite verkürzt wurde. In den folgenden Simulationen wird getestet, welche Brennweite am besten defokussiert. Anschließend wird die Konische Konstante angepasst, welche durch die asphärische Verformung der Oberfläche ebenfalls für eine Zerstreuung des Strahls sorgt.

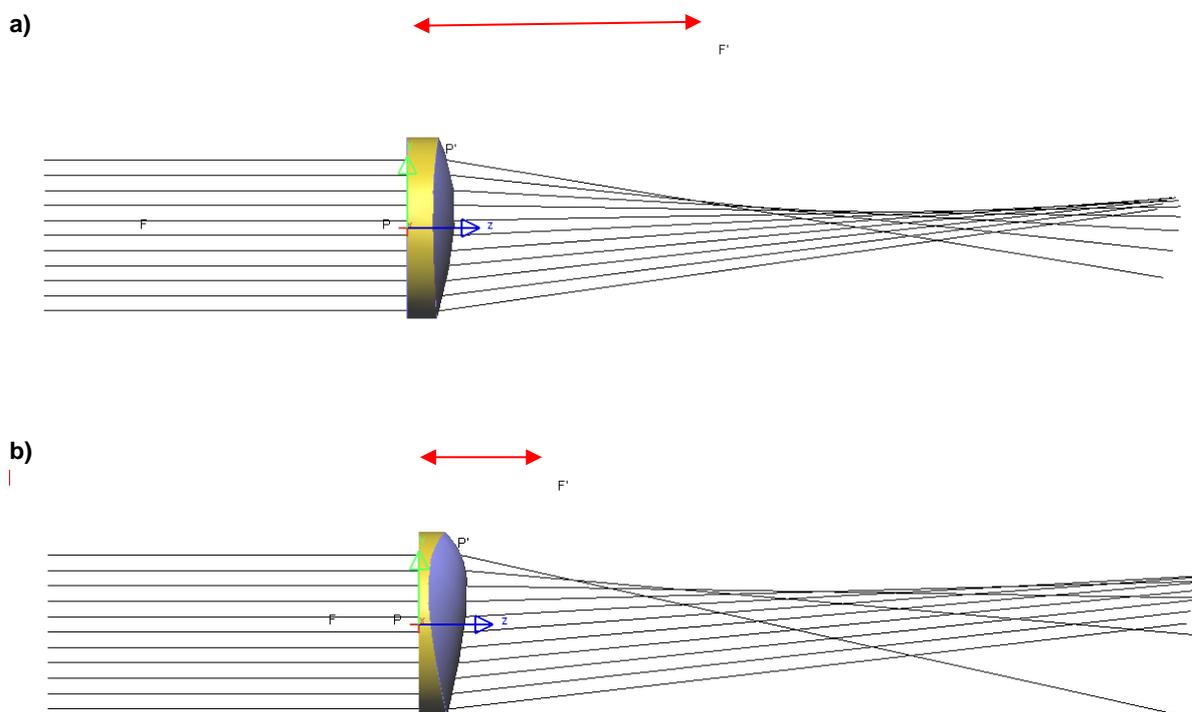


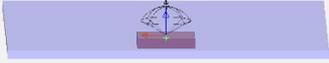
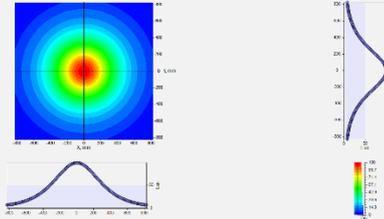
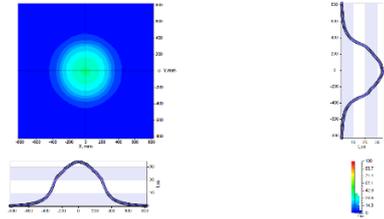
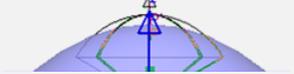
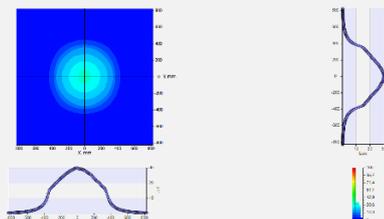
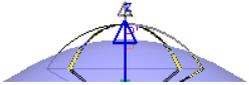
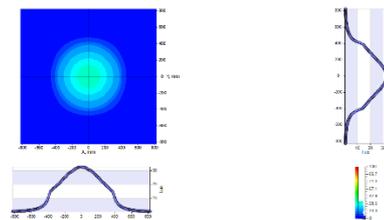
Abbildung 51 Strahlenverlauf a) mit großer Brennweite; b) mit kleiner Brennweite

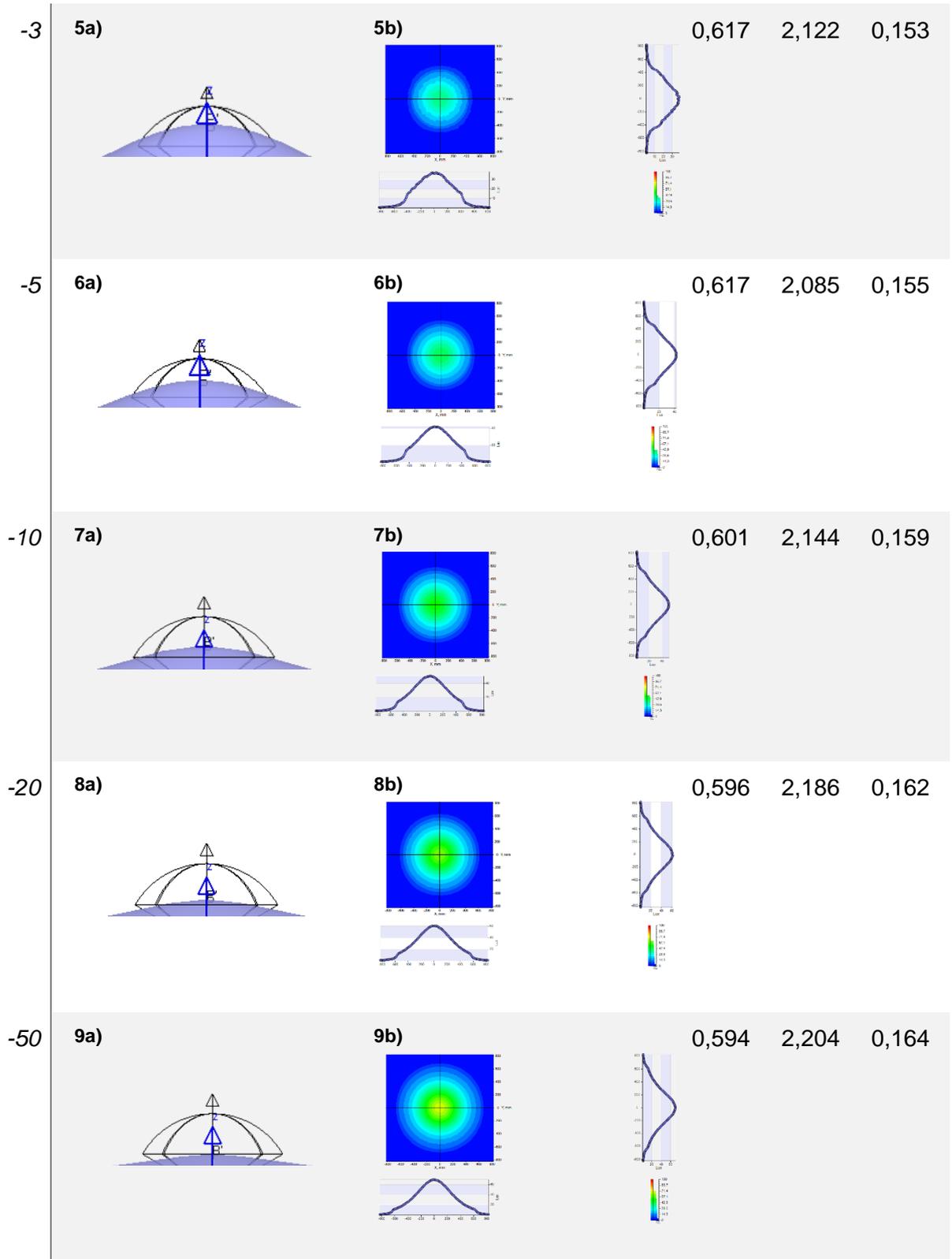
5.1.1 Optimierung 1 - Konische Konstante

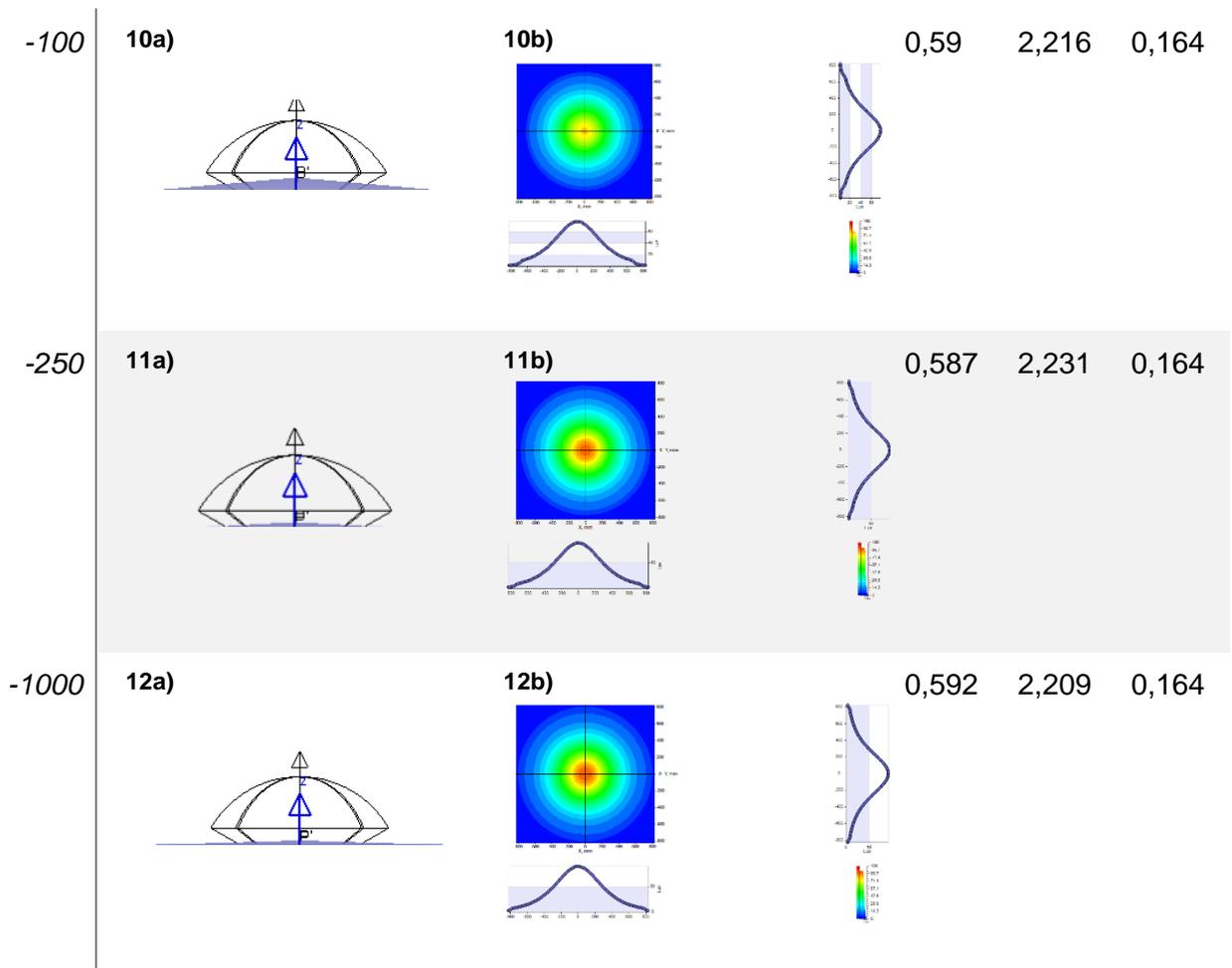
Die konische Konstante verändert, wie in den Grundlagen erläutert, die Oberflächenform der Linse. Je nach Wert der Variable, wird die Oberfläche flacher oder steiler zum Rand auslaufen. Die Werte der nachfolgenden Testreihe sind alle kleiner als minus eins, wodurch sich eine Hyperboloide Form einstellt. Das bedeutet, dass die Oberfläche, proportional zur Verkleinerung des Werts, flacher wird. Die Folgen sollen in dieser Simulation untersucht werden, da, wie in Kapitel 2.2.1.4 beschrieben wird, die Lichtstrahlen an abgeflachten Flächen weniger stark brechen als an sphärischen Oberflächen. Die Untersuchung soll außerdem zeigen, ob sich das Maximum, welches in der Mitte besteht, homogen verteilen lässt.

Zunächst wird die LED ohne Linse simuliert. Dieses Ergebnis soll der Ausgangswert sein, den es zu verbessern gilt. Wie in Tabelle 4 in Abbildung 1b) zu sehen ist, ist der beleuchtete Bereich groß, aber nicht homogen. Die Gleichmäßigkeitswerte g_1 , g_2 und g_3 sind entfernt von den Sollwerten eins, eins und null. Es wurden verschiedene Konstanten simuliert, um herauszufinden in welchem Bereich die besten Einstellungen zu finden sind. In den nachstehenden Zeilen ist zu sehen, wie sich die Verteilung zusammen mit der konischen Konstante ändert. Bei den ersten Simulationen fällt auf, dass sich das Maximum verbreitert hat. Dies ist auch an den Querschnitten der Abbildungen 2b) - 5b) zu erkennen. Die ankommende Beleuchtungsstärke ist mit 30 lx – 40 lx gering.

Tabelle 4 Optimierung der konischen Konstante

Konische Konstante	Linsenform	Lumviewer	g_1	g_2	g_3
Ohne Linse	1a) 	1b) 	0,592	2,201	0,164
0	2a) 	2b) 	0,455	2,811	0,153
-1	3a) 	3b) 	0,587	2,162	0,14
-2	4a) 	4b) 	0,635	2,001	0,146





5.1.2 Optimierung 2 - Konische Konstante, Brennweite

Nach den in Optimierung 1 durchgeführten Simulationen, wird in den kommenden Versuchen die Brennweite angepasst. Für diese Testreihe wird die Optimierungsfunktion von Lighttools genutzt. Die Brennweite wird als Gütefunktion definiert. Die Optimierungsvariable ist der Radius. Der Durchmesser wird für alle Linsen auf 5 mm eingestellt, da diese Größe die meisten Strahlen von der LED einfängt und dies die maximale Größe für den Aufbau der Dielektrophorese ist. Es werden verschiedene Werte für die Brennweite getestet. Die mittlere Beleuchtungsstärke wird ebenfalls betrachtet, da ein homogener Wert keinen Nutzen bringt, wenn die Fläche kaum beleuchtet wird. Die zur Simulation ausgewählten Konstanten sind die mit einer Konischen konstante von -5,-10 und -1000. Die Brennweite bei diesem Versuch beträgt 0,5 mm, 1 mm, 5 mm, 10 mm, 50 m und 100 mm. Durch diese Werte sollen kurze, mittlere und lange Brennweiten getestet werden. Diese sollen zeigen, ob die kurzen Brennweiten bessere Homogenität erreichen als lange. Die Simulationsergebnisse sind in Tabelle 5 bis Tabelle 7 einzusehen. Anhand der Gitterdaten des Lumviewers, kann mit einer Matlab-Funktion die mittlere Beleuchtungsstärke berechnet werden. Diese soll Aufschluss darüber geben, ob die Fläche nicht nur Homogen erscheint, sondern auch genügend Leistung auf sie trifft. Neben den Parametern und der mittleren Beleuchtungsstärke zeigen die Tabellen die Gleichmäßigkeitswerte g_1 , g_2 und g_3 . Die besten Ergebnisse sind dabei die mit dem roten Kasten markierten Zeilen.

In Tabelle 5 ist eine konische Konstante von -5 eingestellt. Den Gleichmäßigkeitswerten zufolge, erreicht die Linse mit einer Brennweite von 5 mm die höchste Gleichmäßigkeit der Beleuchtung. Nach der mittleren Beleuchtungsstärke lässt sie die Fläche am dunkelsten erscheinen.

Tabelle 5 Anpassung der Brennweite für die Konische Konstante $k = -5$

<i>Brennweite [mm]</i>	<i>E_{Mittel} [lx]</i>	<i>$g1$ [soll = 1]</i>	<i>$g2$ [soll = 1]</i>	<i>$g3$ [soll = 0]</i>
0,5 mm	54,6543	0,5845	2,2608	0,1665
1 mm	48,7585	0,6066	2,1436	0,1596
5 mm	35,6883	0,615	2,0969	0,1558
10 mm	39,7147	0,6094	2,1307	0,1591
50 mm	65,0433	0,5877	2,2292	0,1642
100 mm	68,6903	0,594	2,2012	0,1645

In Tabelle 6 ist die Linse mit 0,5 mm Brennweite die mit der besten Verteilung. Auch die Beleuchtungsstärke ist im oberen Bereich der simulierten Linsen.

Tabelle 6 Anpassung der Brennweite für die Konische Konstante $k = -10$

<i>Brennweite [mm]</i>	<i>E_{Mittel} [lx]</i>	<i>$g1$ [soll = 1]</i>	<i>$g2$ [soll = 1]</i>	<i>$g3$ [soll = 0]</i>
0,5 mm	54,1157	0,6052	2,1392	0,1613
1 mm	50,6092	0,597	2,1932	0,1639
5 mm	41,0557	0,6039	2,1575	0,1594
10 mm	42,6743	0,6041	2,1569	0,161
50 mm	63,505	0,5876	2,2327	0,1643
100 mm	68,6797	0,5941	2,2002	0,1645

Tabelle 7 zeigt abschließend für diese Reihe die Linsen mit einer Konstante von -1000. Dies ist ein Extrembeispiel, die Linsen sind sehr flach und kaum noch auf der Platte zu erkennen. Das ist der Grund dafür, dass die Werte keine große Varianz zeigen (siehe Abbildung 52). Die Werte der Homogenität haben ähnliche Werte, wie die der anderen Konstanten. Das zeigt sich auch in der mittleren Beleuchtungsstärke.

Tabelle 7 Anpassung der Brennweite für die Konische Konstante $k = -1000$

<i>Brennweite [mm]</i>	<i>E_{Mittel} [lx]</i>	<i>$g1$ [soll = 1]</i>	<i>$g2$ [soll = 1]</i>	<i>$g3$ [soll = 0]</i>
0,5 mm	69,6559	0,5928	2,2043	0,1643
1 mm	69,6154	0,5928	2,2042	0,1643
5 mm	69,3095	0,5922	2,2063	0,1644
10 mm	68,9426	0,5919	2,2071	0,1645
50 mm	70,1674	0,5915	2,2048	0,1643
100 mm	71,2441	0,5905	2,2201	0,1644

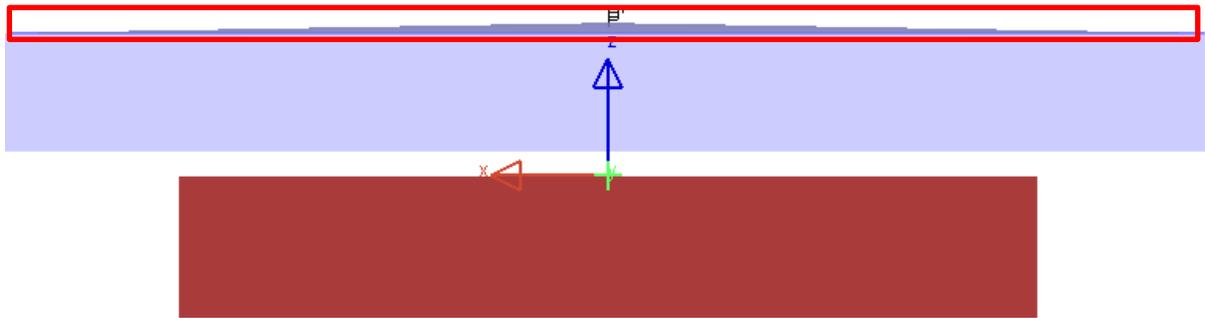


Abbildung 52 Linsenform mit Kegelschnittkonstante $k = -1000$ und Brennweite von $f = 100$ mm

5.1.3 Zwischenfazit

Die Linsen mit den konischen Konstanten und der Brennweite ergibt keine bessere Verteilung der Beleuchtungsstärke. Zu der Situation ohne eine Linse konnte keine Verbesserung stattfinden. Stattdessen wurde die Beleuchtungsstärke bei einigen Linsen trotz gleicher Homogenität verringert. Aufgrund dessen, und dass die Linsen nicht die erwartete Form zeigen, wird mit dieser Testreihe kein homogenes Ergebnis erfolgen können.

5.2 Testphase 1 - Konkave oder Konvexe Linsenoberfläche

In dieser Testphase werden zunächst identische Simulationen für eine konvexe und eine konkave Linsenoberfläche durchgeführt. Damit soll festgestellt werden, welche Linsenart die besseren Ergebnisse liefert. Für die Simulationen wird die Linse mit drei verschiedenen Durchmessern und Radien durchgeführt. Nachfolgend ist in der Grafik zu sehen, was folgende Änderungen bei der Linsenoberfläche bewirken. Der Radius beschreibt die Krümmung der Oberfläche (siehe Abbildung 53 a)) und der Durchmesser verändert die Größe der Linse (siehe Abbildung 53 b)). Die LED ist in Gelb dargestellt. Die Größen wurden so gewählt, dass eine Linse deutlich größer ist als die LED (7 mm), eine gleich groß (4 mm) und die letzte deutlich kleiner (2 mm). Die gleichen Werte wie für den Radius werden auch für den Durchmesser gewählt. Dabei ist der 7 mm - Durchmesser größer, als die in dem Aufbau herstellbaren Linsen sein dürfen. Damit soll ausgeschlossen werden, dass eine größere Linse homogenere Ergebnisse erzielt.

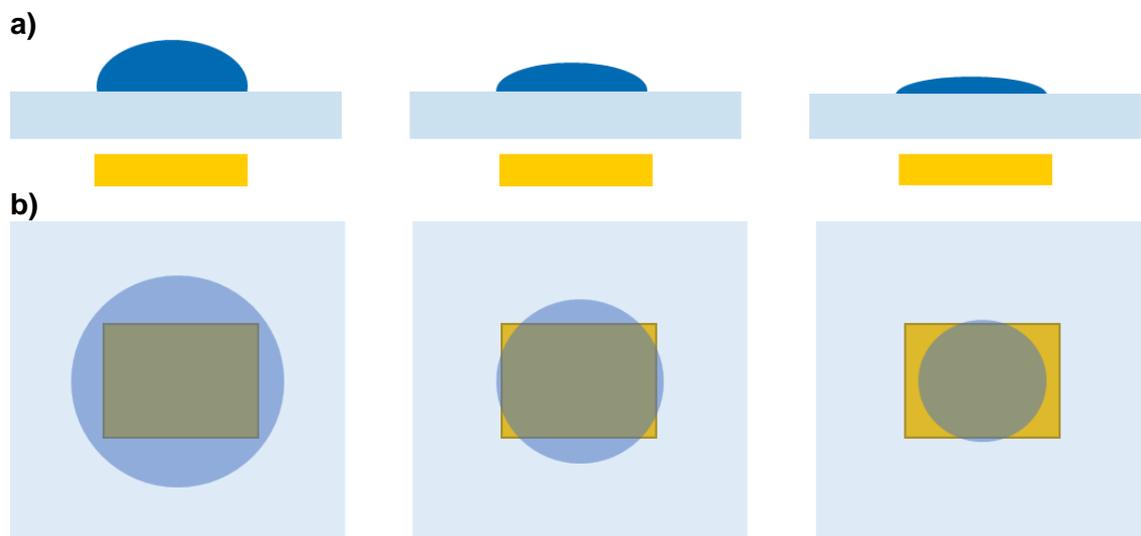


Abbildung 53 a) Änderung des Linsenradius; b) Änderung des Durchmessers

5.2.1 Simulation

Die Versuche werden nacheinander durchgeführt. Jeder Durchmesser und jeder Radius werden miteinander kombiniert. Vor dem Start der Simulation wird erneut eine Referenz ohne Linse erstellt, die zeigen soll, dass sich eine Verbesserung durch die Linsen einstellt.

In Tabelle 8 sind die Simulationsergebnisse der konkaven Linse zu sehen. Die Linse Nummer 3 hat laut Werte die höchste Gleichmäßigkeit erzielt. Auch wenn die Verteilung auf der Empfängerfläche betrachtet wird (siehe Abbildung 54) ist die Fläche homogen. Die mittlere Beleuchtungsstärke ist dagegen im Vergleich zu den anderen Linsen niedrig.

Tabelle 8 Simulationsdaten der Konkaven Linse

Linsen Nr.	Radius [mm]	Durchmesser [mm]	E_{mittel} [lx]	$g1$ [soll = 1]	$g2$ [soll = 1]	$g3$ [soll = 0]
1	Keine Linse		76,0964	0,5925	2,2007	0,164
2	7	7	50,2149	0,7696	1,4805	0,754
3	7	4	52,73469	0,7937	1,4245	0,0694
4	7	2	80,8485	0,7933	1,4343	0,0712
5	4	7	39,5152	0,7499	1,5336	0,0792
6	4	4	43,0324	0,7796	1,4611	0,0696
7	4	2	79,4184	0,791	1,437	0,0718
8	2	4	27,2922	0,7878	1,4791	0,0735
9	2	2	76,0886	0,7923	1,4433	0,0755

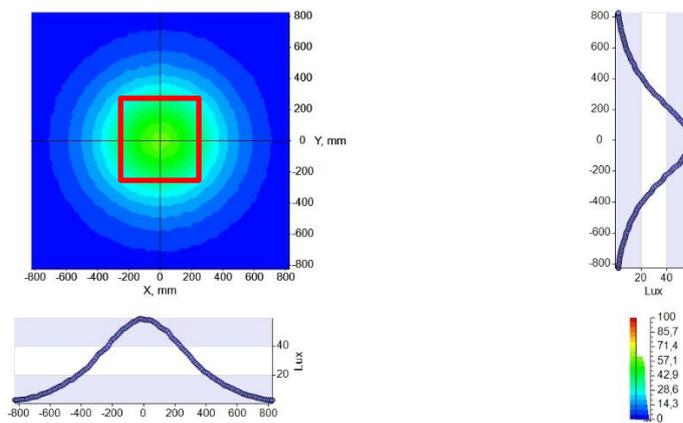


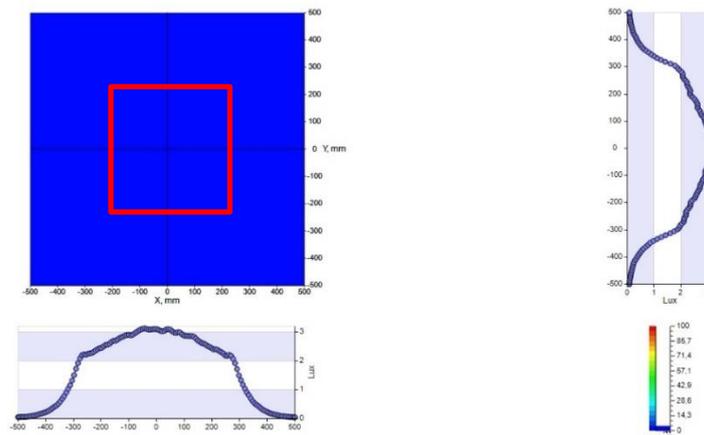
Abbildung 54 Lumviewer für Linse Nummer 5

In Tabelle 9 sind die Ergebnisse der konvexen Linsen gezeigt. Laut der Tabelle ist Linse Nummer 5 die beste Wahl. Werden die Beleuchtungsstärken verglichen, ist zu sehen, dass bei dieser Linse im Durchschnitt zirka 3 lx auf der Empfängerfläche ankommen. Dies ist weniger als eine Kerze ausstrahlt und ist daher keine gute Wahl. Die Linse, die laut Tabelle, danach die höchste Homogenitätsverteilung besitzt, ist Linse Nummer 6. Werden die Grafiken des Lumviewers von beiden Linsen verglichen, ist ein deutlicher Unterschied der Beleuchtungsstärke zu erkennen. Bei Linse 5 (Abbildung 55 a)) ist die Beleuchtungsstärke so gering, dass bei der Skalierung von 100 lx keine Verteilung mehr zu erkennen ist. Der Schirm bleibt blau. Abbildung 55 b) dagegen zeigt, unter Berücksichtigung der Querschnitte, dass am Empfänger immer noch eine Glockenförmige Verteilung ankommt.

Tabelle 9 Simulationsdaten der Konvexen Linse

Linsen Nr.	Radius [mm]	Durchmesser [mm]	E_{mittel} [lx]	$g1$ [soll = 1]	$g2$ [soll = 1]	$g3$ [soll = 0]
1	Keine Linse		76,0964	0,5925	2,2007	0,164
2	7	7	16,685	0,7994	1,4171	0,0701
3	7	4	65,3496	0,8108	1,3927	0,0676
4	7	2	87,1108	0,8017	1,4052	0,0677
5	4	7	2,843	0,8382	1,3429	0,0586
6	4	4	52,4836	0,7947	1,4285	0,0671
7	4	2	85,786	0,8091	1,3906	0,0679
8	2	4	6,6424	0,6378	2,0367	0,1446
9	2	2	82,1475	0,8138	1,3857	0,0679

a)



b)

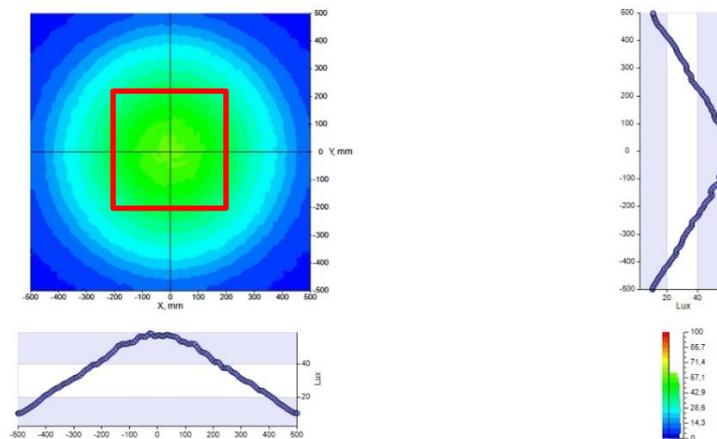


Abbildung 55 Lumviewer a) Linse 5; b) Linse 6

5.2.2 Zwischenfazit

Wie den Tabellen zu entnehmen ist, verteilen einige der Konvexen Linsen das Licht, trotz hoher Beleuchtungsstärke, sehr homogen. Die Konkaven Linsen können zur Referenz ebenfalls eine bessere Homogenität erzeugen. Da einige der Sammellinsen vergleichbare Ergebnisse liefern, wird diese Form weiterverfolgt. Der Grund dafür ist die Anforderung eine konvexe Asphäre zu konstruieren. Mit diesem Resultat wird in den nächsten Testphasen fortgefahren.

5.3 Testphase 2 - Positionierung der LED im Brennpunkt

Die konvexen Linsen haben das größere Potenzial die Fläche zu homogenisieren. Bei der nächsten Testphase wird die Position der LED verändert.

Die bisherigen Simulationen beschränkten sich ausschließlich auf die Linsenform. Die Position der LED blieb dabei stets gleich. Der Grund dafür ist die Idee, den Lichtstrahl mithilfe der LED zu defokussieren, also zu zerstreuen. Diese Vorgehensweise soll in der kommenden Studie geändert werden. Wie in den Grundlagen (Kapitel 2.2.1.1) gezeigt, haben Sammellinsen die Eigenschaft, dass sie parallele Lichtstrahlen im Brennpunkt bündeln. Dieser Strahlenverlauf ist umkehrbar. Wenn der Gegenstand im Brennpunkt positioniert wird, kann die Linse die Strahlen begradigen und ein einheitlicher Lichtstrahl wird auf die Fläche gerichtet. Dadurch, dass die Fläche Homogen sein soll, ist nun das Ziel eine Abbildung der LED auf der Empfängerfläche zu erzeugen. Dies soll umgesetzt werden, indem die LED in dem vorderen Brennpunkt der Linse positioniert wird (siehe Abbildung 56). Das passiert zunächst mit einer Genauigkeit von 4 Nachkommastellen. Die Strahlen, die ungerichtet auf die Linse treffen, sollen umgelenkt werden. Ein Großteil soll gerichtet auf die Empfängerfläche treffen. Dadurch soll eine eckige, beleuchtete Fläche entstehen, die an jeder Stelle die gleiche Beleuchtungsstärke zeigt.

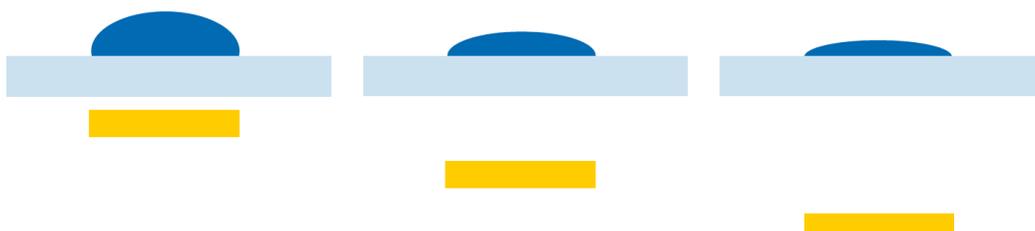


Abbildung 56 Positionierung der LED in den Brennpunkt für jede Linse

5.3.1 Simulation

Es werden die gleichen Werte getestet, die in Testphase 1 (Kapitel 5.2.1) simuliert wurden. Dieses Mal wird die LED für jede Linse im Brennpunkt positioniert. Die LED der Referenz ohne Linse wird hier nicht verändert, da die Planparallele Platte keinen Brennpunkt besitzt. Die LED bleibt also auf ihrer Position im Ursprung.

Tabelle 10 zeigt die Simulationsdaten. Die markierte Zeile zeigt die Linse, die die besten Werte hat. Die mittlere Beleuchtungsstärke ist hier in einem Mittelfeld der anderen Werte. Im weiteren

Verfahren soll diese mit anderen Parametern verbessert werden. Auffällig ist, dass die Linsen mit einem Durchmesser von 7 mm die schlechtesten Werte besitzen und mit ihnen die niedrigste mittlere Beleuchtungsstärke, auf der Fläche empfangen wird. Die Linsen mit einem Durchmesser von 2 mm übermitteln die meiste Beleuchtungsstärke, jedoch gehen sehr viele Lichtstrahlen an der Linse vorbei (siehe Abbildung 57). Die schwarzen Linien in der Abbildung sind die Lichtstrahlen. Es ist zu sehen, dass knapp die Hälfte aller Strahlen an der Linse vorbei strahlen.

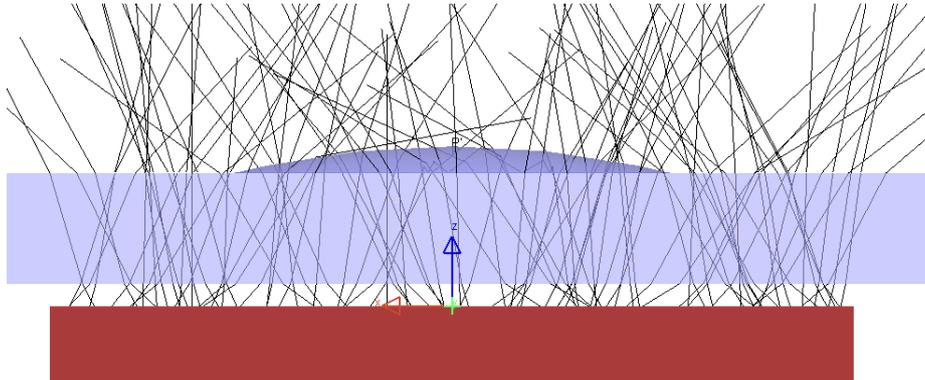


Abbildung 57 Strahlenverlauf durch Linse mit Durchmesser von 2 mm

Tabelle 10 Simulationsdaten der konvexen Linse mit LED im Brennpunkt

Radius [mm]	Durchmesser [mm]	E_{mittel} [lx]	$g1$ [soll = 1]	$g2$ [soll = 1]	$g3$ [soll = 0]
Keine Linse		76,0964	0,5925	2,2007	0,164
7	7	54,4568	0,0192	148,7351	0,7545
7	4	79,9205	0,5581	2,9659	0,2043
7	2	84,8261	0,8131	1,4935	0,0722
4	7	21,4328	0,443	5,689	0,5291
4	4	73,921	0,5824	2,5169	0,2526
4	2	85,6184	0,8165	1,4341	0,0975
2	7	13,1234	0,5538	2,8025	0,2452
2	4	50,0094	0,8782	1,2468	0,0437
2	2	83,2867	0,8732	1,2509	0,0465

In Abbildung 58 sind die Daten des Lumviewers der besten Linse aus Tabelle 10 gezeigt. Sie ist mit einem roten Kasten markiert und bildet die LED homogen auf die Empfängerfläche ab. An den Querschnitten ist zu erkennen, dass die Glockenform nicht mehr so stark ausgeprägt ist. Stattdessen ist dort ein steiler Anstieg und mit einer geraden Fläche. Diese Fläche gilt es in den kommenden Testphasen weiter zu vergrößern.

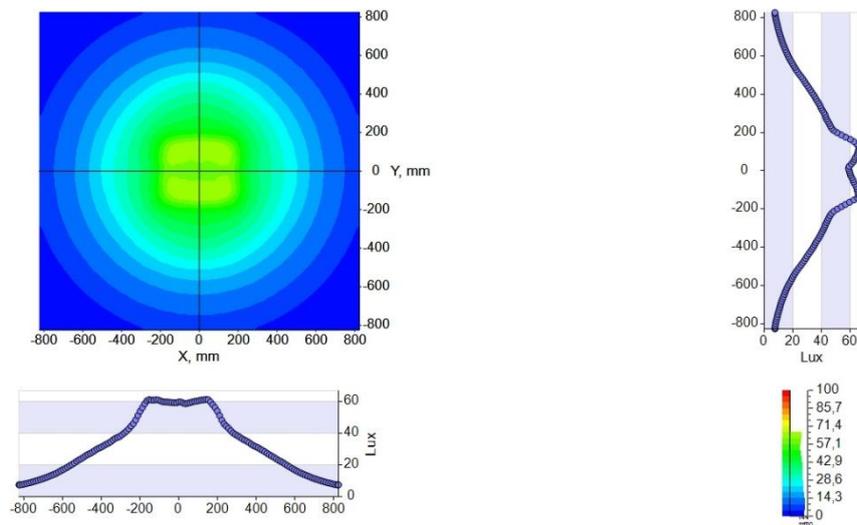


Abbildung 58 Lumviewer der besten Linse aus Tabelle 10

5.3.2 Zwischenfazit

Die Simulationen haben gezeigt, dass die Linse mit einem Durchmesser von 4 mm und einem Radius von 2 mm die höchste Homogenität mit einer guten Beleuchtungsstärke liefert. Diese gilt es nun in den nächsten Versuchen weiter zu optimieren. Dazu wird die konische Konstante angepasst. Da die Brennweite in den vorherigen Simulationen genau im Brennpunkt war und dies in der Realität nicht umsetzbar ist, werden auch hier noch einmal zwei gerundete Werte, die um den Brennpunkt schwanken, getestet.

5.4 Testphase 3 - Konische Konstante

Der dritte Teil dieser Testphase bezieht sich auf die Konische Konstante. Dafür werden 6 Werte ausgewählt, mit denen die Linse simuliert wird. Es werden verschiedene Kegelschnitte gewählt, da die Linsen in durch die Dielektrophorese (Kapitel 1.1) eine solche Form haben. Die Kugel wurde in Testphase 2 simuliert. Nun werden Ellipsoide mit „-0,3“ und „-0,7“ getestet, ein Paraboloid „-1“ und Hyperboloide mit „-3“ und „-10“ (siehe Abbildung 59).



Abbildung 59 Änderung der Konischen Konstante

5.4.1 Simulation 1 - konische Konstante

Diese Untersuchung soll zeigen, ob und welche konische Konstante (k) die vorherigen Ergebnisse noch verbessern kann. Außerdem soll ausgeschlossen werden, dass ein anderer Kegelschnitt die Lichtverteilung besser beeinflusst. Insgesamt werden 36 Simulationen durchgeführt. Die besten 5 Ergebnisse werden nachfolgend in Tabelle 11 gezeigt. Es fällt auf,

dass die besten Werte, die Linse mit einem Durchmesser von 4 mm ergeben. Die anderen beiden Linsen haben deutlich schlechtere Ergebnisse bezüglich der Homogenität ergeben.

Tabelle 11 Simulationsdaten der konvexen Linse mit Anpassung der Konischen Konstante und der LED im Brennpunkt

Linse Nr.	R [mm]	D [mm]	k	E_{mittel} [lx]	$g1$ [soll = 1]	$g2$ [soll = 1]	$g3$ [soll = 0]
1	7	4	-0,7	71,2780	0,62	2,9025	0,1781
2	4	4	-1	65,5774	0,6656	2,5556	0,2257
3	4	4	-10	68,3901	0,6544	2,3974	0,2102
4	2	4	-0,3	35,7697	0,7962	1,5922	0,1338
5	2	4	-3	61,012	0,4818	2,5489	0,1696

Die Linse, die die größte Homogenität zeigt, ist Linse Nummer 4. Sie hat einen Durchmesser von 4mm, einen Radius von 2 mm und eine Konischen Konstante von -0,3. Die zugehörige Beleuchtungsverteilung ist in Abbildung 60 a) zu sehen. Beim Anblick der mittleren Beleuchtungsstärke, fällt auf, dass sie nur etwas über die Hälfte an mittlerer Beleuchtungsstärke auf die Empfängerfläche sendet. Die Linse, die danach die nächsthöhere Homogenität besitzt, ist bei jedem Gleichmäßigkeitswert unterschiedlich. Beim visuellen Vergleich ist zu erkennen, dass die Linsen, die nach $g1$ und $g2$ die höchste Homogenität zeigen, in der Mitte zusätzliche Maxima aufweisen (siehe Abbildung 60 b) und c)). Diese entstehen durch die LED, da die Abbildung, die von der LED auf dem Empfänger entsteht, sehr klein ist. Die Abbildung der Linse Nummer 5 hingegen wird auf den Bereich, der betrachtet wird, verteilt und ist somit die bessere Wahl für die weitere Studie. Dies kann auch an den Querschnitten beobachtet werden. In Abbildung 60 c) ist eine gleichmäßige Fläche zu sehen, während in Abbildung 60 b) und c) kleine Erhöhungen mit einer Einbuchtung zu vermerken sind.

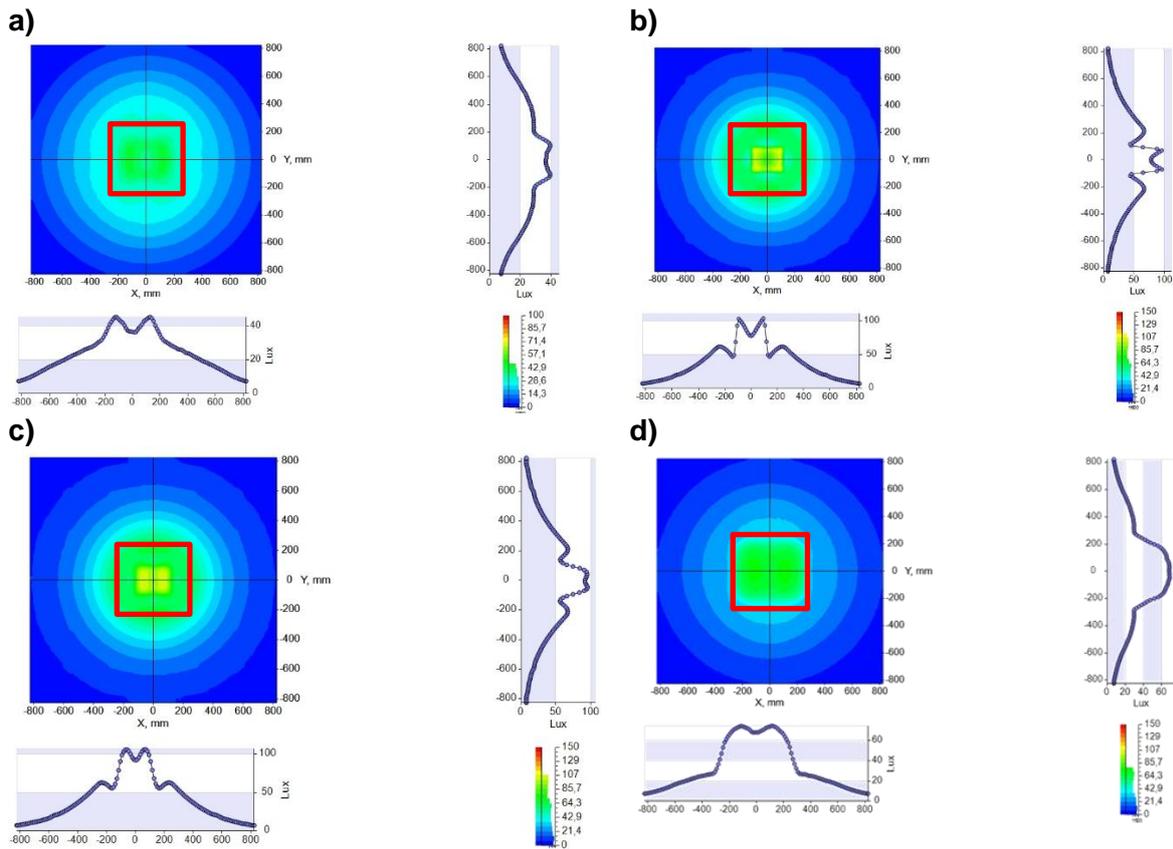


Abbildung 60 Lumviewer a) Linse Nummer 5; b) Linse Nummer 2; c) Linse Nummer 3; d) Linse Nummer 4

5.4.2 Simulation 2 - Konische Konstante, Brennweite

Diese Simulation gilt der Feinoptimierung der in Kapitel 5.4.1 vorgenommenen Simulationen. Es wird von nun an mit der Linse fortgefahren, die in der vorherigen Simulation die besten Ergebnisse lieferte. Dabei handelt es sich um die Linse mit einem Durchmesser von 4 mm, einem Radius von 2 mm und einer konischen Konstante von -3. Vorher wurden die Werte der Konstante grob getestet, wodurch unter Umständen bessere Parameter übergangen wurden. In der folgenden Simulation wurden 6 Werte zwischen -0,5 und -3 in einem Abstand von 0,5 ausgewählt. Bei den vorherigen Simulationen wurde die LED auf 4 Nachkommastellen genau in den Brennpunkt gesetzt. Da dies in der Praxis nicht möglich ist, wird in der kommenden Simulation die Brennweite auf eine Nachkommastelle gerundet. Die Brennweite, die vorher 3,4604 mm betrug, wird nun einmal mit 3 mm und einmal mit 3,5 mm getestet. Es wird durch diese Anpassung eine leichte Verschlechterung der Homogenität erwartet, daher soll bei dem Versuch nach einer anderen konischen Konstante dieser Rückgang der Homogenität ausgeglichen werden.

In Tabelle 12 sind die Ergebnisse der Simulation zu sehen. Es war zu erwarten, dass die Linse mit einem LED-Abstand von 3,5 mm die besseren Ergebnisse liefert als die 3 mm, da sie näher an der exakten Brennweite liegt. Dies ist, wie der Tabelle zu entnehmen ist, nicht der Fall. Das lässt sich darauf zurückführen, dass die konische Konstante die Brennweite noch einmal ändert und dass der knappe Defokus für eine weitere Homogenisierung der Abbildung auf der Empfängerfläche sorgt.

Tabelle 12 Simulationsdaten der Präzisierung der konischen Konstante und Rundung der Brennweite

Linse Nr.	Konische Konstante k	Brennweite [mm]	E_{mittel} [lx]	$g1$ [soll = 1]	$g2$ [soll = 1]	$g3$ [soll = 0]
1	-3	3	63,4757	0,6754	1,7243	0,0939
		3,5	65,6395	0,5525	2,1289	0,1255
2	-2,5	3	62,6167	0,6778	1,6924	0,0861
		3,5	64,7364	0,5425	2,1287	0,1271
3	-2	3	61,383	0,6827	1,647	0,0773
		3,5	63,3233	0,5702	1,989	0,1333
4	-1,5	3	58,8586	0,653	1,6846	0,0724
		3,5	60,1893	0,4724	2,4483	0,1504
5	-1	3	54,9017	0,6413	1,6934	0,0813
		3,5	54,8012	0,5534	2,2168	0,1534
6	-0,5	3	44,5682	0,6556	1,7744	0,1273
		3,5	43,9397	0,747	1,6741	0,1359

In dieser Simulation ist die Linse Nummer 3 für zwei von drei Gleichmäßigkeitswerten die beste Wahl. Auch die Beleuchtungsstärke, die am Empfänger auftritt, ist für eine LED ausreichend (siehe Abbildung 61). In den Querschnitten ist eine gewünschte Verteilung der Fläche zu sehen. Die abgeflachten Bereiche in der Mitte des Querschnitts zeigen die Homogenisierung der Fläche im Zentrum. Es fällt auf, dass in einer Richtung zwei Maxima entstehen. Nachfolgend werden einige Simulationen durchgeführt, um die Ursache für diese zu finden.

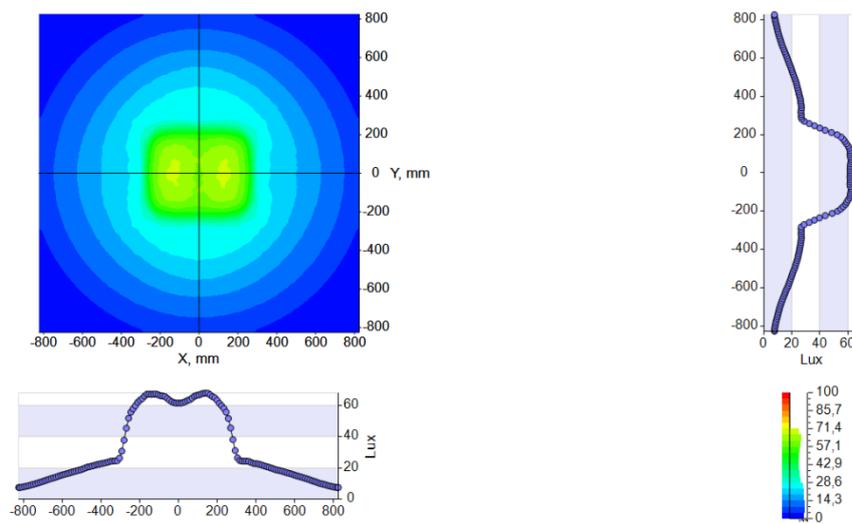
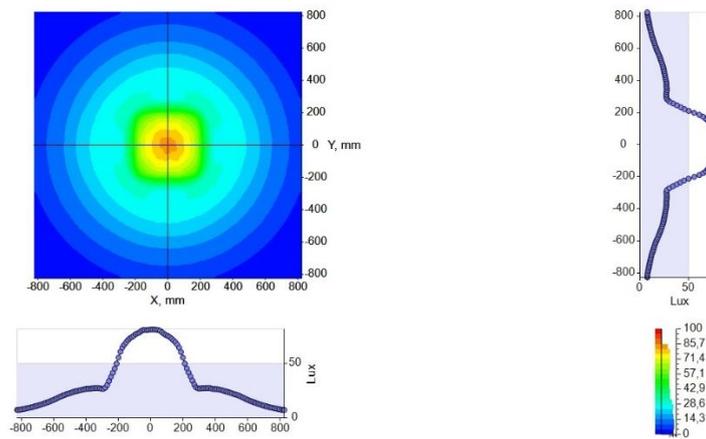


Abbildung 61 Lumviewer der homogensten Beleuchtungsverteilung

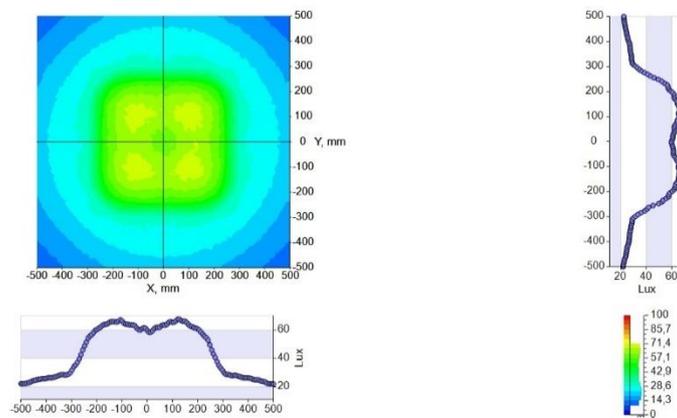
5.4.3 Maxima-Suche

In den kommenden Versuchen wird die LED in eine quadratische Lichtquelle umgewandelt. Das hat den Grund, dass die Maxima in Richtung der längeren Seite der LED entstehen. Die Versuche sollen zeigen, ab welcher Breite die Maxima entstehen und ob sie mit dem Einstrahlwinkel der Leuchtdiode auf die Linse zusammenhängen. Dafür werden zum einen die Maße der LED (2,8 mm und 3,5 mm) gewählt, da es mit diesen zu dem Maximum kommt, und zum anderen ein größerer Wert (4mm), der zeigen soll, ob dieses Phänomen nur in einem bestimmten Bereich existiert. In Abbildung 62 sind die Ergebnisse der Simulation zu sehen. Simulation a) zeigt die LED mit einer Kantenlänge von 2,8 mm. Das ist der Wert der kurzen Kante der verwendeten Leuchtdiode. Die Verteilung auf der Empfängerfläche demonstriert, dass der Einstrahlwinkel auf die Linse keine Maxima erzeugt. Werden die anderen beiden Größen verglichen, ist zu beobachten, dass sowohl bei einer Größe von 3,5 mm als auch bei 4 mm die Maxima zu sehen sind. Jedoch schwachen sie bei Abbildung 62 c) deutlich wieder ab. Diese Beobachtung lässt darauf schließen, dass die Ballungszentren durch einen Abbildungsfehler entstehen, der auf den Einstrahlwinkel und die Oberflächenform der Linse zurückzuführen ist.

a)



b)



c)

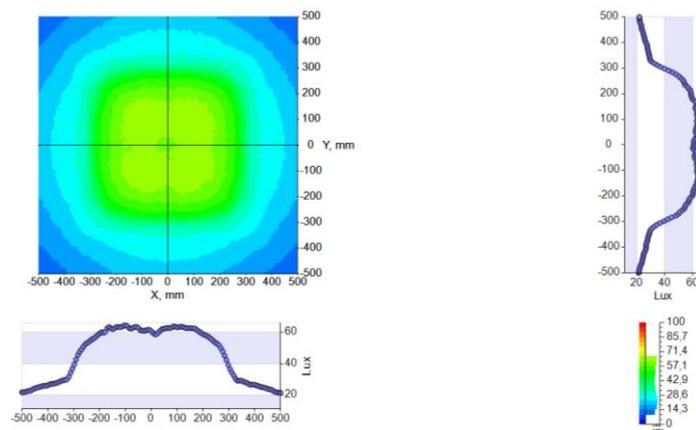


Abbildung 62 Lumviewer der quadratischen LED a) 2,8 mm; b) 3,5 mm; c) 4 mm

5.5 Testphase 4 - Position

Die Linse, die die Strahlen homogen auf die Fläche bringen kann, wurde in den vorherigen Testphasen ermittelt. Die homogene Fläche ist klein und zentriert im Mittelpunkt. Mit den nächsten Testreihen soll diese vergrößert werden. Dafür wird die Linse auf der planparallelen Platte verschoben. Abbildung 63 zeigt das Schema, in welchem die Linse positioniert wird. Für jede Simulation wird die Linse um $\frac{1}{3}$ der Fläche der LED verschoben. Da die Strahlen mit den vier Linsen auch in die vier Ecken der Empfängerfläche gestreut werden sollen, wird die Linse schräg über die LED verschoben. Die Strahlen, die weiter außen sind, werden auf die Empfängerfläche gelenkt. Die Strahlen, die nun auf der anderen Seite nicht mehr von der Linse eingefangen werden können, sollen später, die Strahlen im Mittelpunkt sein, welche sich mit denen der anderen Linsen überlagern. Dadurch soll die Homogene Fläche weiter bestehen bleiben.

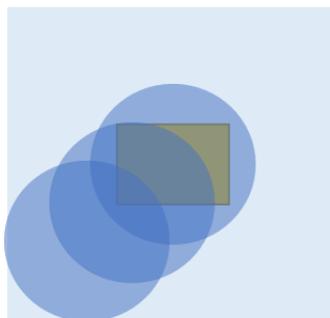


Abbildung 63 Positionsänderung der Linse gegenüber der LED

5.5.1 Simulation

In Abbildung 64 ist eine Draufsicht der verschobenen Linse zu sehen. Die LED schaut an drei Ecken am Rand der LED vorbei. An diesen Stellen werden die Lichtstrahlen nicht gelenkt, sondern geraten ungerichtet auf die Empfängerfläche.

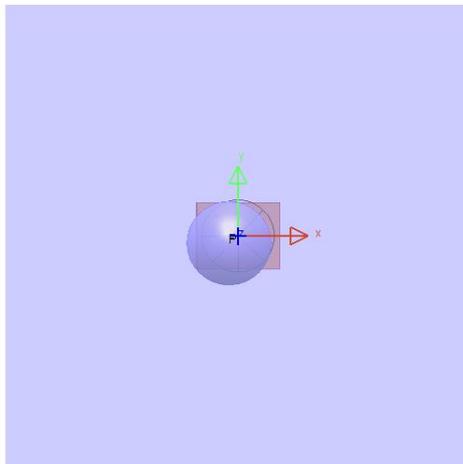


Abbildung 64 Verschobene Linse über der LED

Tabelle 13 zeigt die Auswertung der verschobenen Linse. Die Position der Linse an erster Stelle zeigt von allen drei Versuchen das beste Ergebnis. Der Lumviewer in Abbildung 65 zeigt, dass das gewünschte Ergebnis nicht eingetreten ist. Die Fläche wirkt verkippt und die Homogenität hat sich um Faktor 10 verschlechtert. Das Abbild der LED wird durch die Positionierung verzerrt, aber nicht großartig in den Randbereich gelenkt (siehe Abbildung 65).

Tabelle 13 Simulationsdaten der verschobenen Linse

Position Nr.	x [mm]	y [mm]	E_{mittel} [lx]	$g3$ [soll = 0]
1	0,388	0,311	18,0228	0,8892
2	-0,778	-0,622	17,5013	0,8971
3	-1,167	-0,933	17,3422	0,9696

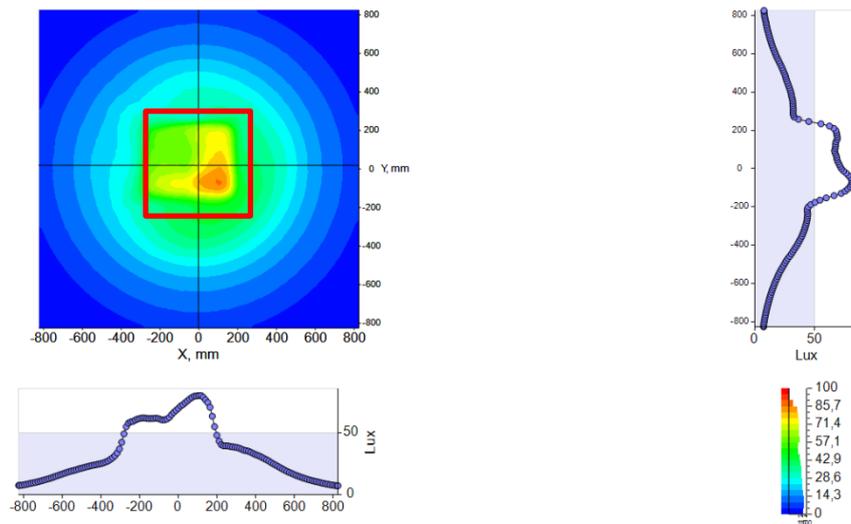


Abbildung 65 Lumviewer verkippte Linse

5.5.2 Zwischenfazit

Durch die Verschiebung der Linse ist die Fläche mittig des Empfängers nicht mehr so homogen, wie vor der Dezentrierung. Des Weiteren kommen zu viele Lichtstrahlen an der Linse vorbei, die ungerichtet auf den Empfänger treffen. Diese Testphase zeigt somit, dass die aus den vorherigen Testphasen erzeugte homogene Fläche über eine Positionsänderung der Linse nicht vergrößert werden kann.

5.6 Ergebnisse

Die resultierende Linse der vorherigen Simulationen ist in Abbildung 66 a) zu sehen. Die Position der LED ist die gerundete Brennweite von 3,5 mm und die schwarzen Linien zeigen den Strahlenverlauf. Trotz homogener Fläche geht einiges an Strahlung verloren, da Lichtstrahlen an der Linse vorbei gehen (siehe Abbildung 66 a)). Dies ist dem Abstand der LED geschuldet. Um die Randstrahlen ebenfalls noch einzufangen, werden Vorsatzoptiken in zylindrischer Form zwischen der LED und der PMMA-Platte platziert. Das soll verhindern, dass die Strahlen direkt am Rand der Platte vorbeigehen. Die Zylinder bestehen aus dem gleichen Material wie die PMMA – Platte und haben ebenfalls einen Brechungsindex von 1,5. Die Lichtstrahlen aus der LED koppeln in diesen ein und werden kurz vor der PMMA-Platte wieder entlassen (siehe Abbildung 66 b)). Die Zylinder wirken als Lichtleiter, durch die alle Lichtstrahlen durch die Linse geleitet werden.

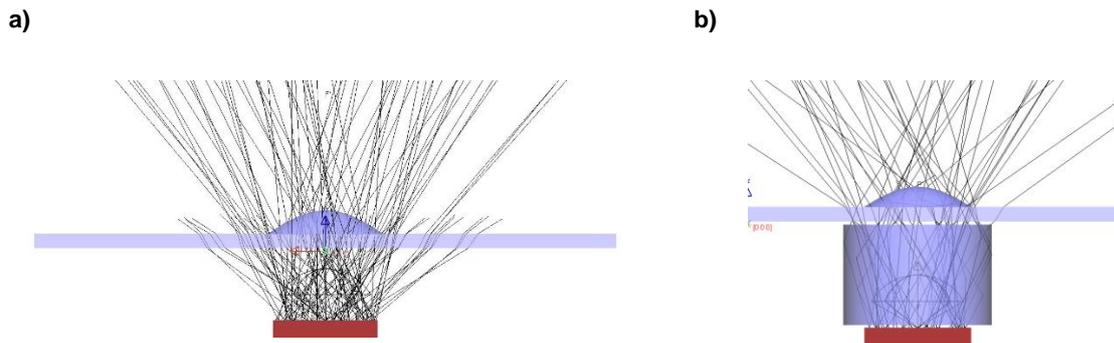


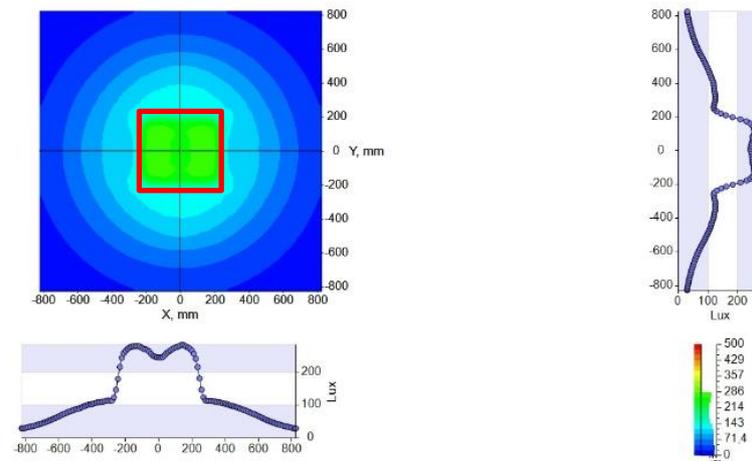
Abbildung 66 Strahlenverlauf durch die ausgewählte Linse a) Standard; b) mit Vorsatzoptik

Wird der Aufbau auf 4 Linsen erweitert, können folgende Verteilungen auf der Empfängerfläche beobachtet werden (siehe Abbildung 67 a) und b)). Durch die 4-Fache Leistung kommt ein Vielfaches der Beleuchtungsstärke an. Daher werden die Simulationsergebnisse wieder auf 500 lx skaliert. In Tabelle 14 sind Simulationsvergleiche von dem 4-LED-System ohne Linsen, mit Linsen und mit Linsen und Vorsatzoptik. Die homogenste Verteilung zeigt das System mit den Vorsatzoptiken. In Abbildung 67 c) ist die Lichtverteilung zu den Daten gezeigt. Es ist zu erkennen, dass die homogene Fläche sich, gegenüber dem System ohne Vorsatzoptiken (siehe Abbildung 67 b)), vergrößert hat. Dennoch ist die mittlere Beleuchtungsstärke bei dieser Kombination im Mittelfeld der anderen. Die Randstrahlen, die das System ohne Vorsatzoptik aufweist, sind in dem mit Vorsatzoptik nicht vorhanden. Die Beleuchtungsstärke verteilt sich homogen auf die Bereiche, die beleuchtet werden sollen.

Tabelle 14 Simulationsergebnisse des vierlinsigen Aufbaus ohne Linsen, mit Linsen und mit Vorsatzoptik

Aufbau Nr.	Art des Aufbaus	E_{mittel} [lx]	$g1$ [soll = 1]	$g2$ [soll = 1]	$g3$ [soll = 0]
1	Ohne Linsen	301,0599	0,5993	2,1712	0,162
2	Ohne Vorsatzoptik	244,3323	0,6236	2,092	0,234
3	Mit Vorsatzoptik	248,7287	0,6477	1,7345	0,0981

a)



b)

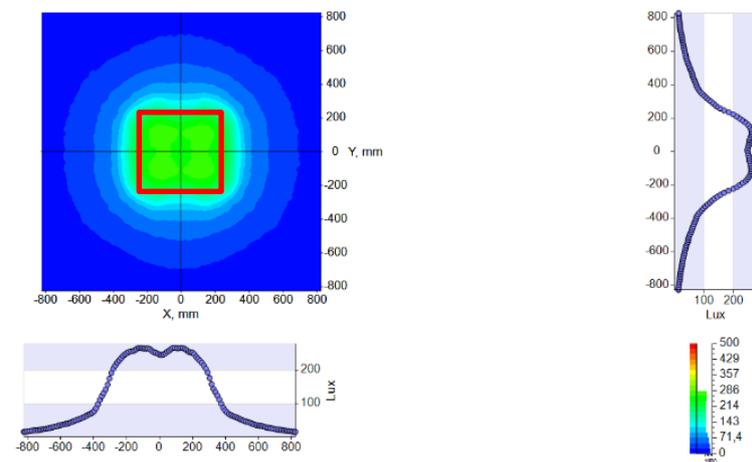


Abbildung 67 Lumviewer a) Standard; b) mit Zylinder

Die nachfolgenden Simulationen zeigen die Auswirkungen auf die Homogenität, wenn ein LED-Array erstellt wird. Dafür wird der Aufbau mit vier LEDs aus der vorherigen Simulation an 9 Stellen vor der Empfängerfläche verteilt. Das ergibt eine Anzahl von 36 LED pro Fläche. Die Aufbauten werden gleichmäßig auf der Empfängerfläche verteilt (siehe Abbildung 68). Dies soll Aufschluss darüber geben wie die Lichtstrahlen sich überlagern und ob sich mit oder ohne Vorsatzoptiken eine homogenere Verteilung einstellt.

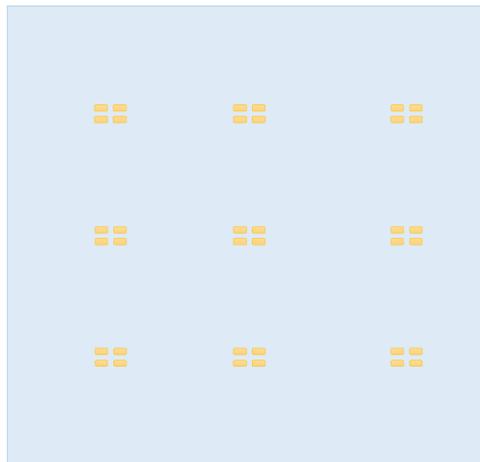


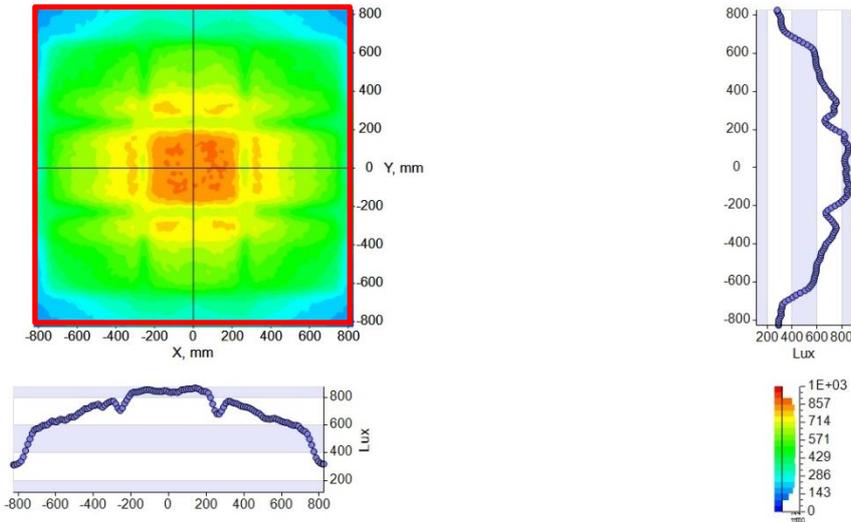
Abbildung 68 LED-Array

Die Ergebnisse dieser Simulation sind in Tabelle 15 und die Lichtverteilung in Abbildung 69 zu sehen. Aufgrund der hohen Beleuchtungsstärke im Zentrum von Aufbau 1 wird die Legende auf 1000 lx skaliert. Die Fläche ist in dieser Simulation allerorts beleuchtet, daher wird der betrachtete Bereich für die Berechnung der Gleichmäßigkeitswerte auf die originale Größe der Fläche zurückgesetzt. Aufbau Nummer 1 in der Tabelle zeigt die Verteilung ohne Vorsatzoptiken, Aufbau Nummer 2, die mit den Optiken. Ohne Vorsatzoptik kann eine deutlich höhere mittlere Beleuchtungsstärke erreicht werden. Das liegt an dem Maximum, welches sich in der Mitte zeigt (siehe Abbildung 69 a)). Die Werte der Gleichmäßigkeit sind um einiges schlechter, gerade im Wert g_2 variieren die beiden Systeme stark. Bei einer visuellen Bewertung der Lichtverteilungen wird auch der zweite Aufbau als deutlich gleichmäßiger wahrgenommen. Diese Simulation hat gezeigt, dass die Ausleuchtung der Fläche mit einem LED-Array möglich ist.

Tabelle 15 Simulationsergebnisse des LED-Arrays mit und ohne Vorsatzoptik

Aufbau Nr.	Art des Aufbaus	E_{mittel} [lx]	g_1 [soll = 1]	g_2 [soll = 1]	g_3 [soll = 0]
1	Ohne Vorsatzoptik	524,7035	0,2164	7,7281	0,3413
2	Mit Vorsatzoptik	394,5139	0,3326	4,1828	0,2183

a)



b)

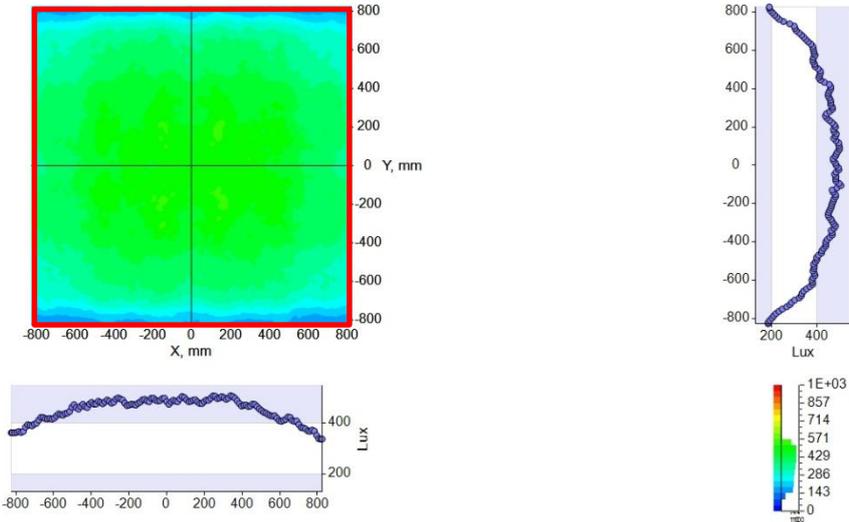


Abbildung 69 Lumviewer LED-Array a) Standard; b) mit Zylinder

6 Fazit und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es Linsen zu simulieren, mit denen eine Fläche homogen beleuchtet werden kann. Die durch die Herstellungsart vorgegebenen Parameter der Linse konnten bei der Lösungsfindung eingehalten werden. Mit dem Lichtsimulationsprogramm Lighttools war es möglich den Aufbau realitätsgetreu nachzustellen und die Simulationen durchzuführen. Durch die umfangreichen Funktionen von Lighttools, wurden verschiedene Wege studiert, Linsenoberflächen zu gestalten. In unterschiedlichen Testphasen konnte mittels einer Parameterstudie eine Linse simuliert werden, die eine Fläche homogen beleuchten kann. Der Auswahl der Linse lagen vier Bewertungskriterien zugrunde. Drei Gleichmäßigkeitswerte, die mittels der Beleuchtungsstärke berechnet wurden und die Beleuchtungsstärke selbst. Die ausgewählte Linse wurde anschließend in den Aufbau mit vier LED implementiert. Die Homogenität konnte dadurch erhalten und die Beleuchtungsstärke erhöht werden. Durch den Abstand zwischen der LED und der Linse konnten einige Randstrahlen nicht homogenisiert werden, aus diesem Grund wurde eine Vorsatzoptik über den LEDs positioniert. Diese konnte die Verteilung weiter verbessern. Aus diesem Aufbau wurde als nächstes ein Array erstellt. Der Aufbau mit vier LEDs und Linsen wurde weitläufig über der Fläche platziert. Die Beleuchtungsstärke wurde nicht beachtlich erhöht, die Experimente haben aber gezeigt, dass eine Fläche mit den Vorgaben für die Linsenform ausgeleuchtet werden kann.

Im späteren Prozess können unterschiedliche Maßnahmen ergriffen werden, die Fläche weiter zu homogenisieren. Ein Verkippen der Linsen zur Fläche und zueinander, kann die Lichtstrahlen unter einem Startwinkel auf die Oberfläche lenken. Auf diese Weise werden sie nicht gänzlich durch die Optiken umgelenkt. Dies könnte die Fläche der homogenen Stellen vergrößern. Dabei ist das photometrische Entfernungsgesetz zu beachten. Durch dieses werden die Strahlen zum Rand hin Lichtleistung verlieren.

Verbesserungspotenzial hat auch die Oberfläche der Linse. Die Dielektrophorese ist in der Lage den Scheitelpunkt der Linse aus dem Zentrum zu verschieben. Mit einer asymmetrischen Asphäre könnten die Lichtstrahlen stärker in eine Richtung gebrochen werden. Diese Möglichkeit bietet sich außerdem an, da der Aufbau bereits existiert und die Anordnung des LED-Moduls bleiben kann, wie es ist. Dadurch wird die Herstellung dieser Simulation gegenüber der anderen vorgezogen.

Anhang A:

6.1.1 Matlabfunktion

Berechnung der Gleichmäßigkeitswerte und der Beleuchtungsstärke.

```
function [g1,g2,g3,E_m, E_max, E_min] = uniform(LumDaten)
%Gibt an wie homogen eine Fläche ausgeleuchtet wird und dazu die mittlere,
minimale und maximale Beleuchtungsstärke.
% Optimalwert g1: 1
% Optimalwert g2: 1
% Optimalwert g3: 0

E_min = min(LumDaten(:));
E_max = max(LumDaten(:));
E_m = mean(LumDaten(:));
standardabweichung = std(LumDaten(:));

g1 = E_min/E_m;
g2 = E_max/E_min;
g3 = standardabweichung/E_m;
end
```

Vergleiche der Lumdaten und der Verkleinerung des Betrachtungsfeldes für die Gleichmäßigkeitswerte.

```
ohneLinsen = readmatrix(['BA\Ausgangssituation\4LED_ohneLinsen.1.txt']);

f = figure;
f.Position = ([1000 1000 1000 370]);

subplot(121)
contourf(ohneLinsen)
caxis([0 500])
colorbar
colormap("turbo")
title(['Beleuchtungsstärkeverteilug ohne Linsen; gesamte Fläche']);
[g1,g2,g3,E_m,E_max,E_min] = uniform(ohneLinsen)

subplot(122)
ohneLinsen = ohneLinsen(50:90,50:90);
contourf(ohneLinsen)
caxis([0 500])
colorbar
title(['Beleuchtungsstärkeverteilug ohne Linsen; beleuchteter Bereich']);
```

Gleichmäßigkeit:

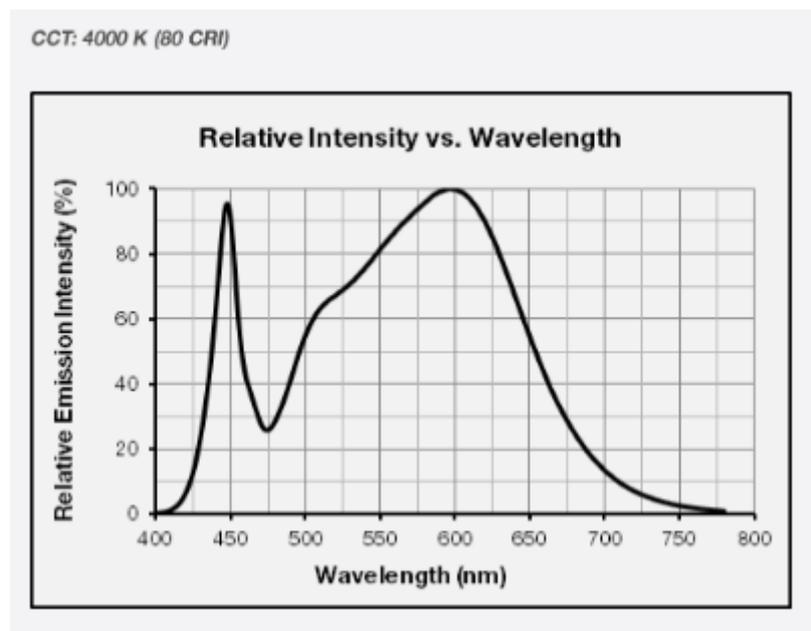
```
[g1,g2,g3,E_m,E_max,E_min] = uniform(ohneLinsen)
clear;
```

6.1.2 Ausschnitte der Datenblätter

Ausschnitte Datenblatt „Samsung LM281B plus datasheet“ für die Erstellung der LED in Lighttools.

Item	CRI (R _a) Min.	Nominal CCT (K)	Bin	150mA	
				Min.	Max.
Luminous Flux (Φ _v)	80	2700	SJ	70.5	74.5
		3000	SJ	72.5	76.5
		3500	SJ	73.5	77.5
		4000	SJ	76.0	80.0
		5000	SJ	77.0	81.0
		5700	SJ	76.5	80.5
		6500	SJ	76.0	80.0

Spektrales Bereichsdiagramm bei 4000 K



Ausschnitt aus Datenblatt des LED-Moduls der Firma „Seto light“. Farbtemperatur.

Ähnliche Farbtemperatur	4000	K
-------------------------	------	---

Daten des Linsenmaterials Detax (385) Luxaprint.

Harz	Wellenlänge	Transmission	Brechungsindex	Dc in µm	Ec in mJ/cm ²	Elastizität	Elastizitätsmodul
CMET 355	355	ja	1,523				
Detax 385 (Luxaprint)	385	ja	1,507	234,00	7,50	nicht elastisch	

Literaturverzeichnis

- [1] M.-J. Ilhan, M. Dohmen und A. Heinrich, „Additive Fertigung asphärischer Mikrolinsen mittels Dielektrophorese,“ DGaO Proceedings 2021, Zentrum für Optische Technologien, Hochschule Aalen, 2021.
- [2] M. Dohmen und A. Heinrich, *Behavior of Glycerol Droplets in High Electric Fields*, Hochschule Aalen, Zentrum für optische Technologien, 2022.
- [3] Traditech B.V. / TRALERT, „Trahlert,“ [Online]. Available: <https://www.tralert.com/de/beleuchtungsbegriffe/smd-led/>. [Zugriff am 29 06 2023].
- [4] Samsung, „Samsung,“ [Online]. Available: <https://led.samsung.com/lighting/mid-power-leds/2835-leds/lm281b-plus/>. [Zugriff am 2023 06 29].
- [5] Joachim Herz Stiftung, „LEIFiPhysik,“ [Online]. Available: <https://www.leifiphysik.de/optik/elektromagnetisches-spektrum/grundwissen/sichtbares-licht/>. [Zugriff am 22 06 2023].
- [6] P. D. J. Unterhinninghofen, *Moderne Beleuchtungsoptik in der Praxis*, München: 2022 Carl Hanser Verlag München, 2022, pp. 1,2.
- [7] Study Help, „Study Help online lernen,“ [Online]. Available: <https://www.studyhelp.de/online-lernen/chemie/licht/>. [Zugriff am 25 06 2023].
- [8] M. Josch, „Studimup Physik,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.studimup-physik.de/themen/optik/reflexion-und-brechung-von-licht/>. [Zugriff am 06 2023].
- [9] D. C. Eisenhut, „lernort MINT,“ 15 06 2023. [Online]. Available: <https://www.lernort-mint.de/physik/optik/phaenomen-licht-in-der-optik/linsenarten-in-der-optik/>. [Zugriff am 17 06 2023].
- [10] StudySmarter, „StudySmarter,“ StudySmarter GmbH, [Online]. Available: <https://www.studysmarter.de/schule/physik/optik/optische-linsen/>. [Zugriff am 16 06 2023].
- [11] A. Polinski, „asphericon,“ 31 07 2020. [Online]. Available: <https://www.asphericon.com/blog/detail/sphaeren-vs-asphaeren>. [Zugriff am 06 2023].
- [12] M. Löffler-Mang, H. Naumann und G. Schröder, „Leuchtdioden,“ in *Handbuch Bauelemente der Optik*, Saarbrücken, 2020 Carl Hanser Verlag München, 2019, pp. 193-195.

- [13] P. Laube, „Halbleiter,“ [Online]. Available: <https://www.halbleiter.org/grundlagen/der-p-n-uebergang/>. [Zugriff am 15 06 2023].
- [14] P. D. I. h. S. Kokoschka, „Grundlagen der Lichttechnik,“ Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2023.
- [15] Leuchtenland, „Leuchtenland Lichtstrom,“ [Online]. Available: <https://www.leuchtenland.com/lexikon/lichtstrom-lm/>. [Zugriff am 25 06 2023].
- [16] M. Wagner, *Einführung in die Lichttechnik*, Aalen: Hochschule Aalen, 2021.
- [17] Leuchteland, „Leuchteland Beleuchtungsstärke,“ [Online]. Available: <https://www.leuchtenland.com/lexikon/beleuchtungsstaerke-lx/>. [Zugriff am 25 06 2023].
- [18] A. Heinrich, *Vorlesung Optik mit Matlab WS21/22*, Aalen: Hochschule Aalen, 2022, pp. 41-44.
- [19] B. Aunkofer, „Data Science Blog,“ 13 01 2019. [Online]. Available: <https://data-science-blog.com/blog/2019/01/13/training-eines-neurons-mit-dem-gradientenverfahren/>. [Zugriff am 22 06 2023].
- [20] Statista GmbH, „Statista,“ [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/lexikon/definition/126/standardabweichung/>. [Zugriff am 25 06 2023].
- [21] C. Hupe, „Homogenitätsbewertung flächiger Lichtquellen und Leuchten,“ TU Ilmenau, Ilmenau, 2013.
- [22] Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, „Spektrum,“ Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1999. [Online]. Available: <https://www.spektrum.de/lexikon/optik/lambert-strahler/1715>. [Zugriff am 27 06 2023].

Eidesstattliche Versicherung

Hiermit versichere ich, "Larissa Schmidt", an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel "Optik Design für individuell gefertigte Mikrolinsen" selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinne nach anderen Werken entnommen wurden, sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Ich habe die Bedeutung der eidesstattlichen Versicherung und prüfungsrechtlichen Folgen (§ 42 Bachelor-SPO 29 der Hochschule Aalen) sowie die strafrechtlichen Folgen einer unrichtigen oder unvollständigen eidesstattlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.

Ort, Datum

Unterschrift