

Lichttechnische und elektrooptische Optimierung organischer Leuchtdioden

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt der
Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Ilmenau

von Herrn
Dipl.-Ing. (FH) Malte Hagemann
geboren am 04.05.1981 in Kronberg im Taunus

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 29. November 2011

Tag der Einreichung: 14. Juni 2011

1. Gutachten:	Prof. Dr. rer. nat. habil. Stefan Sinzinger
2. Gutachten:	Prof. Dr. rer. nat. Matthias Brinkmann
3. Gutachten:	Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz

urn:nbn:de:gbv:ilm1-2012000288

Zusammenfassung

Diese Arbeit behandelt die lichttechnische sowie elektrooptische Optimierung von organischen Leuchtdioden (OLED) auf Basis löslicher Polymere. Hierfür wird zunächst die Lichtpropagation ausgehend von dem OLED Schichtsystem über die Auskoppeloptik und Strahlformungsoptik bis hin zur anwendungsbezogenen Nutzebene unterteilt. Für jeden Abschnitt erfolgt eine Beschreibung eines effektiven physikalischen Modells zur Berechnung der Lichtausbreitung und die dafür verwendete Softwarelösung. Unter Berücksichtigung der Merkmale für eine hochwertige Beleuchtung erfolgt eine Optimierung der Schichtdickenkonfiguration, Strukturierung der Polymeranode und Design von Primär- sowie Sekundäroptiken. Mit entscheidend für eine gute Optimierung ist die simultane Berücksichtigung der elektrischen Effekte (ohmsche Verluste in der Anode) sowie optischen Effekte (Absorption und Interferenz im Schichtsystem). Durch Anpassungen der Schichtdicken ist es möglich die Leuchtdichte des OLED Musters um den Faktor 1,23 zu erhöhen. Eine geeignete Strukturierung der Polymeranode mit metallischen Leiterbahnen führt zu Bauteilen, welche einen um Faktor 3 größeren Lichtstrom im Verhältnis zu den nicht strukturierten Bauteilen aufweisen. Mittels diffuser Primäroptik kann die Leuchtdichte der OLED um den Faktor 1,2 weiter gesteigert werden.

Durch die in dieser Arbeit entwickelten anwendungsspezifischen Sekundäroptiken sowie einem innovativen OLED Treiber konnten erste Anwendungsfelder im Bereich der Beleuchtungstechnik mit organischen Leuchtdioden auf Basis löslicher Polymere realisiert werden.

Abstract

This PhD thesis describes the electro-optical optimization of solution based organic light emitting diodes (OLED) in respect to illuminating engineering aspects. The basic principles of light propagation starting inside the OLED layer system through the primary- and secondary optics to the working plane are delineated. For the evaluation of the different mathematical light propagation models the corresponding software tools are presented. Taking into account the criteria for advanced illumination the OLED layer system, the busbar structures for polymer anodes and finally the out-coupling as well as the ray-shaping optics are designed and optimized. To achieve an excellent optimization the simultaneous simulation of the optical effects (absorbance and interference) and the electrical effects (ohmic losses inside the anode) have to be executed. Modifying the thickness of layers the luminance of the OLED samples could be increased by a factor of 1.23. An appropriate busbar layout for polymer anodes could increase the luminance flux by a factor of 3 compared to unstructured OLEDs. Applying a diffuse primary optic an increase of the luminance can be achieved by a factor of 1.2.

New areas of applications for advanced illumination could be realized with the results of this thesis by engineering special ray-shaping optics and an innovative power supply unit for solution based organic light emitting diodes.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	xi
1 Einleitung	1
1.1 Überblick der aktuellen OLED-Forschung	4
2 Grundlagen	7
2.1 Aufbau und Funktionsprinzip der OLED	7
2.2 Radio- und Photometrie	10
2.3 Beschreibung der Lichtausbreitungsmodelle	19
2.3.1 Wellenmodell	19
2.3.2 Strahlenmodell	23
2.3.3 Streuung an Oberflächen	27
2.4 Elektrodynamische Feldsimulation der Anode	32
2.5 Treiberelektronik für Leuchtdioden	35
3 Messtechnik	41
3.1 Spektral sensitive Verfahren	41
3.2 Ortsaufgelöste Lichtmesstechnik	44
3.3 Winkelselektive Messtechnik	46
3.4 Messung des Streuverhaltens an Oberflächen	56
3.5 Lichttechnischer Ringversuch	64
4 Ergebnisse und Diskussion	71
4.1 Simulation des OLED Schichtsystems	71
4.2 Homogenisierung der lateralen Leuchtdichteverteilung	81
4.3 Simulation diffuser Auskoppelstrukturen	88
4.4 Optimierung effizienter Sekundäroptiken	100
4.5 Entwicklung eines innovativen OLED Treibers	114
5 Abschließende Betrachtungen	125

Literaturverzeichnis	129
Anhang	137
A Spezifikation EULUMDAT-Format	139
B Danksagung	145
C Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge	147
C.1 Buchbeiträge	148
D Betreute Diplomarbeiten	149
E Thesen der Dissertation	151

Abbildungsverzeichnis

1.1	Einflussfaktoren für hochwertige Beleuchtung.	2
1.2	Erste OLED Demonstratoren für die Beleuchtung.	3
2.1	Schichtaufbau einer OLED.	8
2.2	Energieniveaus verschiedener OLED Schichtsysteme.	9
2.3	Veranschaulichung der lichttechnischen Maßzahlen.	13
2.4	Grundlagen des CIE XYZ-Farbraums.	15
2.5	Grundlagen des schwarzen Strahlers.	16
2.6	Einführung der Farbwiedergabe von Licht.	17
2.7	Indizierung des Schichtsystems für Wellen-Matrixformalismus.	22
2.8	Lichtstrahl als Vektor im Strahlen-Matrixformalismus.	23
2.9	Brechung und Reflexion im Strahlen-Matrixformalismus.	26
2.10	Mögliche Phänomene bei Streuung.	28
2.11	Energiepfade im Harvey-Modell.	29
2.12	Auftragung der Streuerverteilung im Harvey-Modell.	31
2.13	Potentialverteilung beim RC-Netz der OLED.	32
2.14	Vereinfachtes OLED Modell für Potentialberechnung.	33
2.15	Elektrotechnische Grundlagen der OLED.	36
2.16	Charakterisierung des OLED RC-Gliedes.	37
2.17	Diskreter Aufbau einer Stromquelle.	38
2.18	Diskreter Aufbau eines Signalgenerators.	39
3.1	Funktionsprinzip eines Freiraumspektrometers.	42
3.2	Messung der OLED Emissionsspektren.	43
3.3	Funktionsprinzip der Leuchtdichtekamera.	44
3.4	Messung der lateralen Leuchtdichteverteilung.	46
3.5	Strahlensatz eines Nahfeldgoniometers.	47
3.6	Koordinatensystem bei einer Leuchte.	49
3.7	Darstellung des C-Ebenensystems.	50
3.8	Darstellung des B-Ebenensystems.	53
3.9	Aufbau eines 1 dim. Fernfeldgoniometers.	54
3.10	Winkelverteilung einer OLED.	55

3.11	Messprinzip der Streulichtmessung (winkelabhängig).	57
3.12	Foto des Streulichtgoniometers.	58
3.13	Messprinzip der Streulichtmessung (integral).	59
3.14	Foto der Streulichtulbrichtkugel.	60
3.15	Messprinzip der Streulichtmessung (spekular).	61
3.16	Exemplarische Streumessung in Transmission und Reflexion.	63
3.17	Messmittel während des Ringversuchs.	65
3.18	OLED Muster des Ringversuchs.	66
3.19	Ergebnis der Leuchtdichte des Ringversuchs.	67
3.20	Ergebnis des CIE x Wertes beim Ringversuch.	68
3.21	Ergebnis des CIE y Wertes beim Ringversuch.	69
4.1	Materialdaten für Schichtsystemsimulation.	73
4.2	Generierung der Elektrolumineszenzspektren.	74
4.3	Simulation der winkelabhängigen Leuchtdichtevertelung.	75
4.4	Parameterstudie für Schichtdickenkonfigurationen.	78
4.5	Variation des Spektrums durch Schichtdickenoptimierung.	79
4.6	Parameterstudie der Schichtdicken mit Polymeranode.	81
4.7	Simulation der Potentialverteilung.	82
4.8	Potentialverteilung mit Busbars.	83
4.9	Verschiedene Busbar-Morphologien.	87
4.10	Busbar-OLED, Vergleich Simulation und Messung.	88
4.11	REM Aufnahmen der Streuproben.	90
4.12	Streumessung der Proben in Transmission und Reflexion.	92
4.13	Harvey-Darstellung der Proben in Transmission und Reflexion.	93
4.14	Struktogramm für Simulation der Auskoppeloptik	95
4.15	Winkelverteilungen für die Streusimulation.	97
4.16	Parameterstudie des Harvey-Wertes s.	98
4.17	Parameterstudie des Harvey-Wertes l.	99
4.18	Designstudie OLED im Automobilbereich.	100
4.19	Simulierte Beleuchtungsstärkeverteilung mit der Leseleuchte.	102
4.20	Winkelverteilung, OLED mit Sekundäroptik für Automobil.	103
4.21	Prinzipskizze für OLED-Displayhinterleuchtung.	104
4.22	Simulation von Leuchtdichtehomogenisierungsoptiken.	105
4.23	Vermessung der Homogenisierungsoptiken.	107
4.24	Simulation der Abstrahlcharakteristik der Sekundäroptiken.	108
4.25	Simulation der Raumbeleuchtungsstärkeverteilung mit OLEDs.	110
4.26	Raumbeleuchtungsstärkeverteilung mit OLEDs und Sekundäroptik.	111
4.27	Beleuchtungsstärke in der Nutzebene mit OLEDs.	112

4.28	Beleuchtungsstärke in der Nutzebene mit OLEDs und Sekundäroptik.	113
4.29	Impedanzgang der OLED, Betrag.	115
4.30	Impedanzgang der OLED, Phase.	116
4.31	Grenzfrequenz der OLED.	117
4.32	Bestückungsplan der Platine.	119
4.33	Schaltplan des OLED Treibers.	120
4.34	Foto des OLED Treibers.	121
4.35	Messergebnisse mit dem OLED Treiber, Leuchtdichte.	121
4.36	Kennlinien für Betrieb mit konstanter Leuchtdichte.	122
4.37	Messergebnisse mit dem OLED Treiber, Farbortverschiebung. . . .	123

Tabellenverzeichnis

2.1	Photometrische Maßzahlen.	12
2.2	Farbwiedergabeklassen	19
2.3	Liste von kommerziellen PWM-ICs	40
3.1	Lichttechnische Maßzahlen der OLED Proben	43
3.2	Statistik der lateralen Leuchtdichte	45
3.3	Transformation der Ebenensysteme	51
3.4	Energieverteilung einer Streumessung	62
4.1	Parameterstudie PEDOT Materialien	76
4.2	Schichtdickenkonfigurationen	77
4.3	Ergebnisse der Schichtdickenstudie	77
4.4	Auflistung der Busbar-Proben	85
4.5	Harvey-Parameter der Streuproben in Transmission	91
4.6	Harvey-Parameter der Streuproben in Reflexion	91
4.7	RC-Werte der OLED Muster	115
A.1	Leuchtendaten (EULUMDAT) für die OLEDs Muster	139

1 Einleitung

Organische Leuchtdioden (organic light-emitting diode - OLED) sind ausgedehnte sehr dünne Bauteile, bei denen ein Polymer mit Halbleitereigenschaften zwischen zwei Elektroden eingebettet ist. Bei dem Anlegen einer elektrischen Spannung wird Licht emittiert, basierend auf dem Prinzip der Elektrolumineszenz.

Die Anfänge der OLEDs begannen bereits 1960 durch die Demonstration der Ladungsträgerinjektion in organischen Kristallen, durchgeführt von Wissenschaftlern der Universität von New York [1]. In weiteren Arbeiten konnte darauf aufbauend 1962 die direkte Elektrolumineszenz in einem organischen Einkristall (Anthracene) gezeigt werden [2]. Kurze Zeit später gelang die Injektion von Elektronen und Defektelektronen in den organischen Kristall [3], welches die Grundlage für die heutigen Bauteile darstellt. Aufgrund der schlechten elektrischen Leitfähigkeit der organischen Materialien benötigten diese Experimente sehr hohe Spannungen und wiesen eine geringe Effizienz auf. Erst die Entwicklung hochleitfähiger Polymere führte zu Bauteilen, die mit geringeren Spannungen betrieben werden konnten [4]. Der eigentliche Durchbruch begann 1987 mit der Präsentation der ersten organischen Leuchtdiode von Ching W. Tang and Steven Van Slyke, Forscher bei Eastman Kodak [5]. Die Messungen dieser OLED zeigten bei einer Stromdichte von 5 mA/cm^2 eine Leuchtdichte von 50 cd/m^2 . Seit diesem Zeitpunkt liegt das Bestreben in der Steigerung der Lichtausbeute, Vergrößerung der Licht emittierenden Fläche sowie der Reduzierung der Herstellungskosten. Bereits Tang und Van Slyke postulierten in ihrer Veröffentlichung die erste Anwendung der OLED im Bereich der Displaytechnik. Demzufolge waren es kompakte Displaygeräte wie Mobiltelefone und mp3-Player, bei denen die OLED-Technologie erstmals zum Einsatz kam. Dabei liegen die Vorteile der OLED-Displays gegenüber den Flüssigkristall-Displays in ihrem guten Wirkungsgrad, großem Betrachtungswinkel sowie den potenziell geringen Herstellungskosten. Folglich hat sich die OLED-Technologie im Bereich Displays bereits jetzt etabliert.

Jedoch besitzt die OLED-Technologie zusätzlich zu den Displayanwendungen das Potenzial die Lichtquelle der Zukunft für die Beleuchtungsindustrie zu werden aufgrund ihrer im Folgenden geschilderten Eigenschaften. Die Geburtsstunde dieses wichtigen Industriezweigs beginnt mit den bahnbrechenden Entwicklungen der Kohlebogenlampe sowie der „Electric Lamp“ von Thomas Alva Edison und dem im Jahre 1880 folgenden Ausbau des Stromnetzes. Seit diesem Zeitpunkt ist

der Stellenwert für Beleuchtung mit künstlichem Licht stetig gewachsen. Diesem Trend folgt auch die Lichtausbeute η der entwickelten Lichtquellen. Mit einer Lichtausbeute der Glühlampe von $\eta_{\text{Glühlampe}} \approx 5 \text{ lm/W}$ war der Ausgangspunkt dieses Forschungsfeldes festgelegt. Im Vergleich hierzu liegt die theoretische Lichtausbeute für ein weißes konstantes Spektrum bei $\eta_{\text{Theorie}} \approx 180 \text{ lm/W}$. Entwicklungen wie die Halogenlampe sowie die Leuchtstofflampe steigerten die Lichtausbeute weiter auf $\eta_{\text{Halogen}} \approx 20 \text{ lm/W}$ und $\eta_{\text{Leuchtstoff}} \approx 105 \text{ lm/W}$. Gleichzeitig ist das Verständnis für die Bedeutung der Qualität des Lichtes und der Beleuchtung gewachsen. Darunter versteht man die direkte Sehleistung durch die Beleuchtung in Form der Helligkeit (Beleuchtungsniveau) und Blendung (Blendungsbegrenzung) durch die Lichtquelle. Letzteres wird weiter unterteilt in die physiologische- sowie psychologische Blendung, welches eine Unterscheidung ermöglicht zwischen der Beeinträchtigung der Sehleistung und dem Erzeugen eines Unbehagens beim Menschen. Des Weiteren tragen die Aspekte des Sehkomforts in Form der Farbwiedergabeeigenschaften, als auch das visuelle Ambiente, beeinflusst durch die Lichtfarbe der Lichtquelle, zu einer hochwertigen Beleuchtung bei [6]. Diese Einflussfaktoren sind in Abbildung 1.1 zusammengefasst.

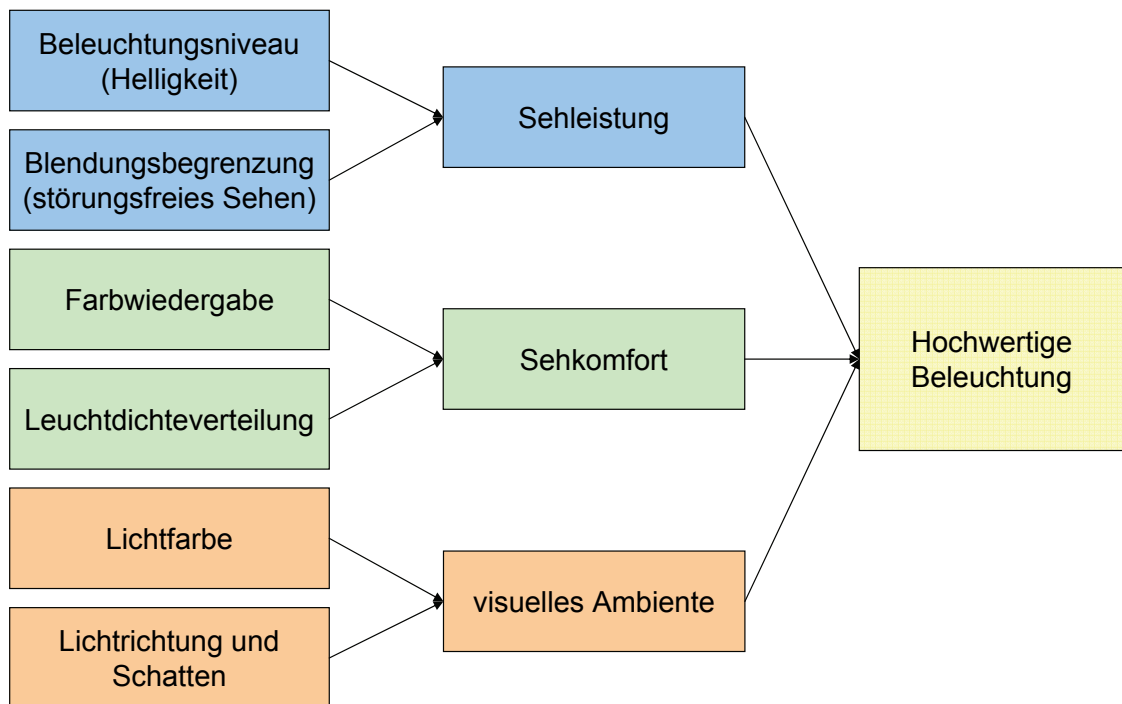


Abbildung 1.1: Einflussfaktoren für eine hochwertige Beleuchtung. Gemäß [6].

Die OLED als Lichtquelle für Beleuchtung mit künstlichem Licht erfüllt alle Anforderungen in Bezug auf Sehleistung, Sehkomfort sowie visuelles Ambiente, aufgrund ihrer großen Licht emittierenden Fläche und einem kontinuierlichen, breitbandigen Spektrum. Zusätzlich bietet die OLED als alleiniges Leuchtmittel die Möglichkeit, flexible und biegsame Bauteile herzustellen [7]-[10] sowie im ausgeschalteten Zustand völlige Transparenz aufzuweisen [11]-[13]. Diese Alleinstellungsmerkmale führen zu Marktstudien, die dem Bereich OLED-Beleuchtung im Jahr 2015 ein globales Marktvolumen von 4 Milliarden Euro prognostizieren [14]. Zum Vergleich wird dem Bereich Flachbildschirme auf OLED Basis nur ein globales Marktvolumen von ca. 1,4 Milliarden Euro im Jahr 2010 zugesprochen [14]. Ein erster Demonstrator für OLEDs im Bereich Beleuchtung wurde von Ingo Maurer auf der Light and Building 2008 präsentiert (Abbildung 1.2).



Abbildung 1.2: Präsentation der ersten OLED Bauteile für Beleuchtungsanwendungen auf der Light and Building 2008 von Ingo Maurer. Zu sehen ist eine Deckenleuchte (links) sowie Tischleuchte (rechts). Quelle [15]

Alle diese Faktoren dienen als Motivation, diese Arbeit im Bereich der Optimierung von organischen Leuchtdioden für Beleuchtungsanwendungen durchzuführen. Dabei ist das Herausstellungsmerkmal dieser Arbeit die Leuchte im Gesamten zu

betrachten, und sowohl das Bauteil als auch die zusätzlichen Komponenten wie Auskoppeloptiken, Strahlformungsoptiken und elektrische Ansteuerung in Abhängigkeit der Verwendungszwecke zu untersuchen und zu optimieren. Im Vergleich hierzu fokussieren sich viele wissenschaftliche Arbeiten sehr detailliert auf einen Bereich der OLED-Grundlagen wie beispielsweise den Ladungsträgertransport in Polymeren [16, 17], der reinen Polymeroptimierung [18]-[21] oder der Lichtauskoppelung [22]. Diese Arbeiten sind existenziell für das Verständnis und den Fortschritt der OLED-Technologie. Jedoch ist es ebenfalls von Bedeutung, das gesamte System interdisziplinär zu betrachten und dieses bei den Optimierungen zu berücksichtigen. Anhand konkreter Anwendungsbeispiele aus dem Automobilbereich sowie der allgemeinen Beleuchtung werden Optimierungen für:

- das Schichtsystem der OLED
- Lichtauskoppeloptiken
- Strahlformungsoptiken
- die Reduzierung der ohmschen Verluste
- die elektronische Ansteuerung

durchgeführt und die jeweiligen Einflüsse untereinander erörtert. Bei den Simulationen für die optischen Optimierungen wird darauf geachtet, die entsprechenden effizienten Lichtausbreitungsmodelle zu verwenden, um eine schnelle Berechnung durchführen zu können.

1.1 Überblick der aktuellen OLED-Forschung

In dem sich schnell entwickelnden Bereich der OLED-Forschung haben sich verschiedenste Forschungsfelder ausgeprägt, die sich mit den unterschiedlichen OLED-Systemen beschäftigen. Bei einem Vergleich der Qualität einer OLED anhand beispielsweise der Lichtausbeute, ist dies zu berücksichtigen. Ein Unterscheidungskriterium ist zum Beispiel die Verwendung von löslichen Systemen oder der Einsatz von kleinen Molekülen. Bei den Bauteilen auf Basis der löslichen Systeme kommen kostengünstige Herstellungsverfahren, wie das Rotationsbeschichten und die Drucktechnik zum Einsatz. Hier sind aktuell optimierte Muster realisierbar, welche eine Lichtausbeute von $20,9 \text{ lm/W}$ aufweisen [23]. Aufgrund der Vernetzungseigenschaften können nur einfache Schichtsysteme mit wenigen Schichten hergestellt werden. Bei den Bauteilen auf Basis der kleinen Molekülen werden komplexe, vielschichtige

Systeme im Vakuum aufgedampft. Hier ist es möglich, beispielsweise mittels Genetischer Algorithmen optimierte Konzentrationsprofile für Elektronen-Transport- sowie Defektelektronen-Transport-Schichten herzustellen [24]. Derzeit sind Bauteile für Beleuchtungsanwendungen realisierbar mit einer niedrigen Farbtemperatur von 1745 K und einer Lichtausbeute von $44,3\text{ lm/W}$ [25].

Einen weiteren Einfluss auf die Bauteiloptimierung hat das Spektrum des verwendeten Licht emittierenden Polymers. Eine Optimierung für einen monochromatischen Emitter (z.B. Alq_3), kann gezielter erfolgen und das Bauteil weist eine größere Steigerung der Lichtausbeute auf. Weitere Forschungsfelder haben die Realisierung von Metall freien OLEDs [26] sowie Indiumzinnoxid freie OLEDs [27] zum Inhalt. Bei Indiumzinnoxid freien OLEDs werden semitransparente Metalle als Anode sowie Kathode verwendet. Hier treten größere Mikrokavitäts-Effekte, welche zu einer starken Farbortverschiebung in Abhängigkeit des Emissionswinkels führen. Die Simulation dieser Effekte mittels kommerzieller Programme wird beispielsweise in [28] dargestellt. In der Arbeit von Hsu [29] wird hierzu ein Schichtsystem mit einer Lichtausbeute von $9,6\text{ lm/W}$ veröffentlicht, welches aus einer CF_x -beschichteten Ag Anode sowie einer SnO_2 -Schicht in Verbindung mit einer Ca/Ag Kathode besteht. Aktuelle Veröffentlichungen präsentieren hingegen Indiumzinnoxid freie OLED-Schichtsysteme mit einer Lichtausbeute von $17,6\text{ lm/W}$ [30].

Die exakte Beschreibung der Lichtpropagation durch ein monochromatisches (gelb) small molecule Bauteil wird beispielsweise in der Arbeit von Nowy behandelt [31]. Anhand des physikalischen Modells [32] welches unter anderem die Plasmonenmodenbildung berücksichtigt, ist es möglich die Fernfeldverteilung der OLED absolut zu berechnen und anhand dieses Kriteriums das Schichtsystem zu optimieren. In dieser Arbeit wird hingegen ein einfacheres Modell verwendet, welches ausschließlich zu einem lichttechnisch charakterisierten Bauteil relative Änderungen berechnet und dadurch Optimierungen zulässt.

Explizit behandelt die vorliegende Arbeit weiß emittierende OLED Bauteile, bei denen zwischen die Indiumzinnoxid Anode und der Aluminium Kathode eine lichtemittierende Schicht mittels Rotationsbeschichten aufgebracht wird. Wie gezeigt wird, weist dieses OLED System geringe Farbortverschiebungen in Abhängigkeit des Emissionswinkels im Vergleich zu den Indiumzinnoxid freien OLEDs auf und eignet sich daher sehr gut für Beleuchtungsanwendungen. Der Neuheitswert dieser Arbeit liegt in der gesamten, sowie interdisziplinären Betrachtung des komplexen OLED-Systems in Abhängigkeit des zu realisierenden Anwendungsfeldes. Eine Bewertung in wie weit sich diese Ergebnisse auf die weiteren genannten OLED Systeme verallgemeinern lassen erfolgt in der abschließenden Betrachtung.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel erfolgt eine Zusammenfassung der benötigten Grundlagen. Dies soll dem Leser die Beurteilung der im Kapitel 4 erarbeiteten Ergebnisse und deren Diskussion vereinfachen. Beginnend wird der Aufbau und die Funktionsweise der OLED beschrieben und die Optimierungsmöglichkeiten dargelegt. Im folgenden Unterkapitel 2.2 werden die für die Messtechnik und Simulationen benötigten lichttechnischen Kenngrößen erarbeitet. Darauf aufbauend erfolgt die Beschreibung der einzelnen physikalischen Lichtpropagationsmodelle (Kapitel 2.3), welche für die Simulation sowie Optimierung der OLED benötigt werden. Die darauf folgenden Unterkapitel im Bereich der Elektrotechnik schildern kurz die Grundlagen für die Simulation der Potenzialverteilung in der Anode (Kapitel 2.4) sowie die Konzipierung der OLED-Ansteuerung (Kapitel 2.5). Weiterführende Details zu den einzelnen Themengebieten befinden sich jeweils in der aufgeführten Sekundärliteratur.

2.1 Aufbau und Funktionsprinzip der OLED

Der prinzipielle Aufbau einer OLED ist einfach und bietet die Möglichkeit, kostengünstige Leuchtmittel zu realisieren. Auf ein Folien- oder Glassubstrat wird ein transparentes Anodenmaterial abgeschieden, welches aufgrund seiner hohen Leitfähigkeit vorzugsweise Indiumzinnoxid (ITO) ist. Alternativ hierzu ist die Verwendung des hochleitfähigen Polymers Clevios PH500 [33] möglich. In den nächsten Prozessschritten wird die Lochtransportschicht (PEDOT) sowie das Licht emittierende Polymer (LEP) aufgebracht. Handelt es sich bei dem LEP um ein lösliches System (konjugierte Polymere), spricht man von PLEDs. Die nicht löslichen Systeme (Aromaten) werden als SMOLED bezeichnet. Ebenfalls unterscheiden sich die Herstellungsverfahren der LEP Schicht. Bei der PLED wird das kostengünstigere Rotationsbeschichtungsverfahren [34] verwendet. Hingegen werden die Schichten der SMOLED mit dem aufwendigeren Verfahren der physikalischen Gasphasenabscheidung (PVD) [35] hergestellt. Abschließend wird bei beiden OLED-Typen eine metallische Kathode im Vakuum aufgedampft und das gesamte Schichtsystem mittels eines weiteren Substrates verkapselt (Abbildung 2.1). Die Verkapselung, bestehend aus den beiden Substratschichten, schützt das empfindliche LEP vor

der Degradation, hervorgerufen durch die Diffusion von Sauerstoff (O_2) sowie das Eindringen von Feuchtigkeit (H_2O). Hierbei ist die Lebensdauer der OLED stark mit der Qualität der Verkapselung korreliert. Aufgrund der kleineren Molekülabstände bei Glas weisen OLEDs mit Glasverkapselung eine höhere Lebensdauer auf.

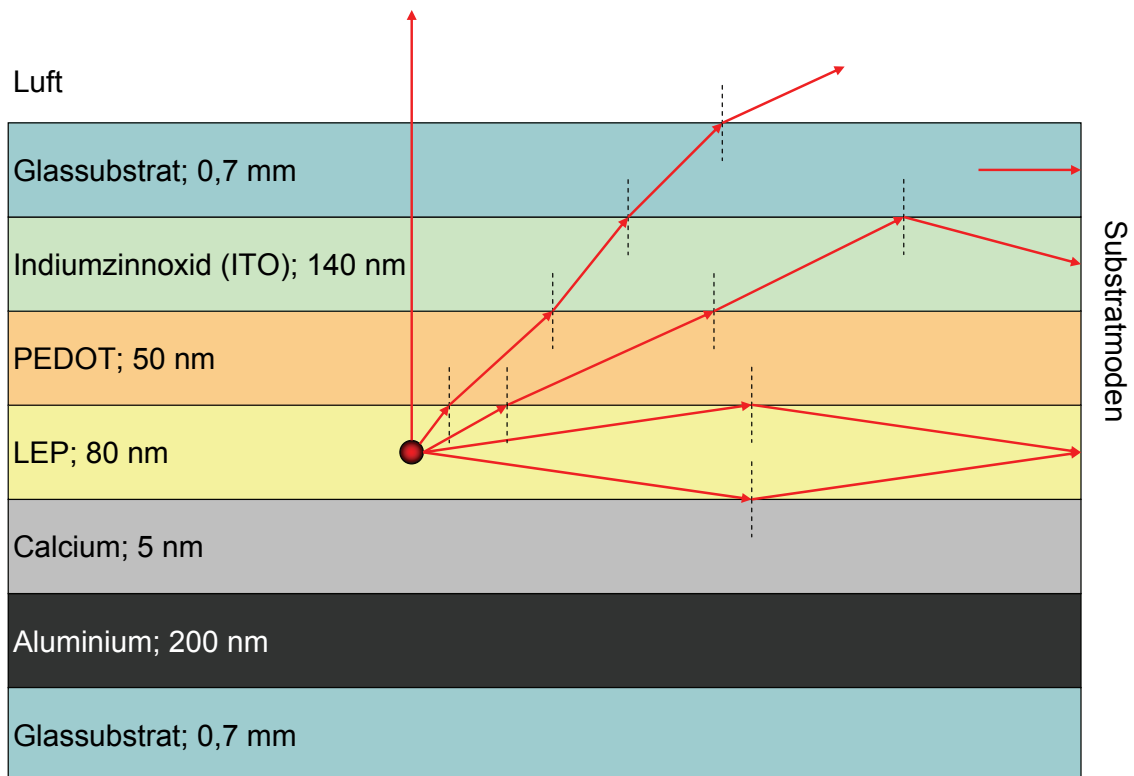


Abbildung 2.1: Klassischer Fünfschichtaufbau einer OLED mit den entsprechenden Schichtdicken. An den Grenzübergängen von dem optisch dichteren in das optisch dünnere Medium tritt Totalreflexion auf.

Durch Anlegen einer äußeren Spannung an die Kathode und der Anode entsteht in dem Schichtsystem ein elektrisches Feld. Aufgrund dieses elektrischen Felds werden Defektelektronen (Löcher) von der Anode und Elektronen von der Kathode in den organischen Halbleiter injiziert (Abbildung 2.2, a). Die Größe der Bandlücke des Halbleiters wird durch die Differenz der Ionisierungsenergie zwischen dem lowest unoccupied molecular orbital (LUMO) und dem highest occupied molecular orbital (HOMO) bestimmt (Abbildung 2.2). Es erfolgt eine Diffusion der Ladungsträger durch das Polymer auf die jeweilige Gegenelektrode. Treffen Elektronen und Defektelektronen aufeinander, bilden sie einen gebundenen Zustand das sogenannte Exziton (Elektronen-Loch Paar). Die beim Zerfall des Exzitons freiwerdende Energie, dem

Übergang des Moleküls in den Grundzustand, wird in Form eines Photons abgegeben. Bei OLEDs, die ausschließlich auf der Elektrolumineszenz basieren, geschieht dies jedoch nur, wenn das Exziton einen Singulettzustand einnimmt. Welches nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 25 % erfolgt. Es ist jedoch möglich, zusätzlich den Effekt der Phosphoreszenz bei OLEDs auszunutzen. Dies ermöglicht die Exzitonen im Triplettzustand (75 %) für die Photonenerzeugung nutzbar zu machen, welches die interne Quantenausbeute deutlich erhöht [36].

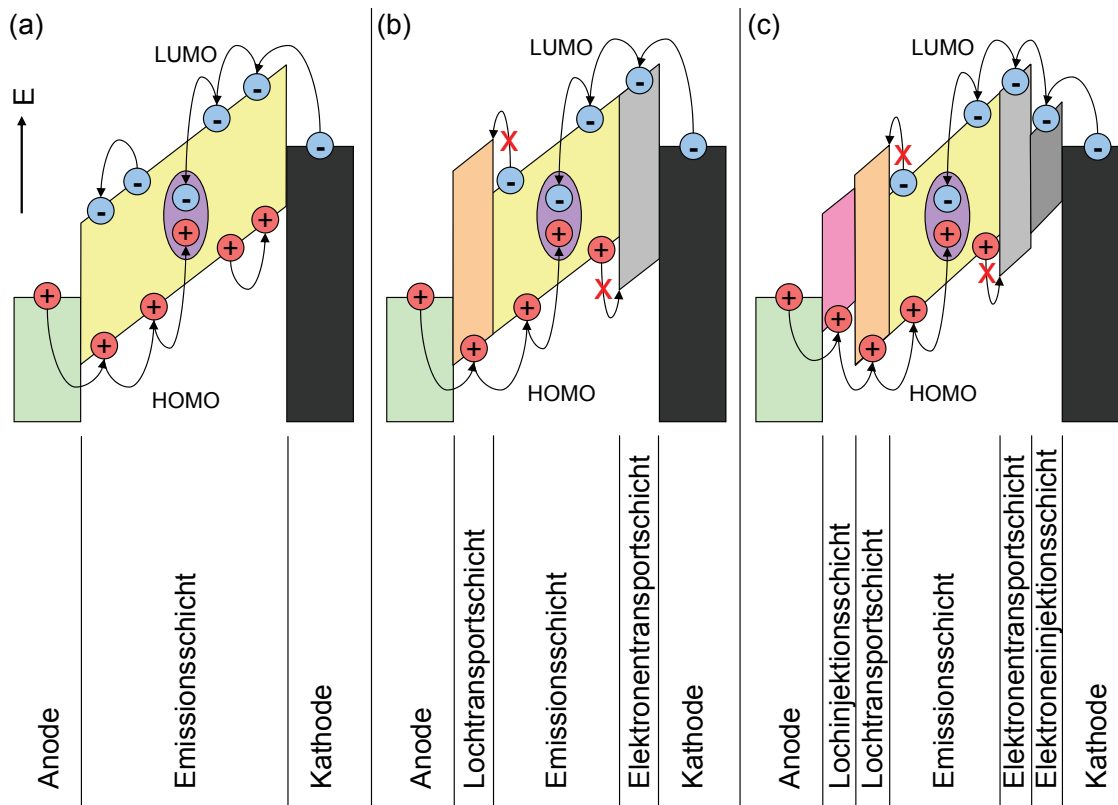


Abbildung 2.2: (a) Energieniveaus eines einfachen OLED Dreischichtsystems. (b) Energieniveaus eines Fünfschichtsystems mit Reduzierung des Kriechstroms. (c) Komplexes Schichtsystem mit sieben Schichten zur zusätzlichen Reduzierung der Betriebsspannung.

Jedoch nicht jedes intern erzeugte Photon kann im Fernfeld genutzt werden. Wasey et. al. [37] hat mithilfe der Maxwellgleichungen gezeigt, dass in einem OLED-Schichtsystem mehr als 50 % der generierten Photonen die OLED nicht verlassen. Diese Photonen werden einerseits an der metallischen Kathodenschicht in Form von Plasmonenmoden geführt. Andererseits sorgt die Totalreflexion an den Schicht-

übergängen, gerade beim Grenzübergang zwischen Glas und Luft, für die Bildung von Substratmoden (Abbildung 2.1). Die im Schichtsystem verbleibenden Photonen haben die Möglichkeit im Polymer absorbiert zu werden, welches zu einer Erwärmung der OLED führt und deren Lebensdauer verkürzt. Folglich besteht die Herausforderung das Schichtsystem sowie die Grenzübergänge derart auszulegen, dass die Modenbildung weitestgehend unterdrückt wird.

Zusätzlich bietet die Implementierung weiterer funktionaler Schichten die Möglichkeit einer Effizienzsteigerung. Einfache Schichtsystemkonfigurationen, bestehend aus dem LEP und den Elektroden, weisen schlechtere Effizienzen auf, da die Bildung von Exzitonen sehr gering ist. Deutlich wahrscheinlicher ist, dass die Ladungsträger an ihrer Gegenelektrode das System ohne Interaktion verlassen. Eine erste Verbesserung bringt die Implementierung einer Elektronen- (ETL) sowie Lochtransportschicht (HTL) (Abbildung 2.2, b). Diese Schichten wirken als Blockade für die gegensätzlichen Ladungsträger. Folglich steigt die Dichte von Löchern und Elektronen im Polymer und erhöht somit die Wahrscheinlichkeit für die Bildung von Exzitonen. Eine Reduzierung des Kriechstroms ist zu beobachten. Durch die Verwendung einer zusätzlichen Lochinjektions- sowie Elektroneninjectionsschicht (Abbildung 2.2, c) ist es möglich, die Betriebsspannungen der OLED herabzusetzen und die Effizienz weiter zu steigern. Es ist jedoch eine Herausforderung Mehrschichtsysteme auf Basis der löslichen Systeme (PLED) herzustellen, weil mit jedem Auftragen einer neuen Schicht die vorherige Schicht beansprucht wird. Aus diesem Grund werden im Folgenden ausschließlich Fünfschichtsysteme verwendet.

2.2 Radio- und Photometrie

Wie beim Funktionsprinzip der OLED geschildert, entstehen die Photonen in der LEP-Schicht durch Anlegen einer Spannung an den Elektroden. Es findet folglich eine Konvertierung von elektrischer Energie in Strahlungsenergie statt. Quantitativ wird die Energie Q des Photons durch seine Frequenz f bzw. Wellenlänge λ sowie des planckschen Wirkungsquantums h bestimmt.

$$Q_{\text{Photon}} = h \cdot f \tag{2.1}$$

Die gesamte monochromatische Strahlungsenergie ergibt sich aus der Multiplikation der Photonenenergie und der Anzahl n der Photonen. Jedoch technisch relevanter ist der Strahlungsfluss bzw. die Strahlungsleistung, welche die Strahlungsenergie auf ein Zeitintervall dt bezieht. Zur Verdeutlichung, dass es sich um

strahlungsphysikalische Größen handelt, werden die Formelzeichen mit einem e indiziert.

$$\Phi_e = dQ/dt \quad (2.2)$$

Diese strahlungsphysikalische Größe berücksichtigt jedoch nicht die geometrische Verteilung der Photonen. So ist es ein Unterschied, ob die Strahlungsquelle die Photonen in den gesamten Raum abstrahlt oder diese stark gerichtet emittiert werden. Hierfür wird ein Raumbereich definiert, der sog. Raumwinkel Ω , der durch den Abstand r zur Strahlquelle und dem bestrahlten Kugelflächenausschnitt A aufgespannt wird.

$$d\Omega = dA/r^2 \quad (2.3)$$

Die Einheit dieser dimensionslosen Größe wird als Steradian (sr) bezeichnet. Strahlt ein Emitter in den gesamten Raum ab, entspricht dies einem Raumwinkel von $\Omega = 4\pi$. Betrachtet man nun die Strahlungsleistung in einem definierten Raumwinkel, entspricht dies der Strahlstärke I_e .

$$I_e = d\Phi_e/d\Omega \quad (2.4)$$

Zur vollständigen Beschreibung einer ausgedehnten Strahlquelle wird die Strahldichte L_e definiert. Sie berücksichtigt sowohl die Winkelabhängigkeit wie auch die laterale Verteilung der emittierten Photonen. Entscheidend dabei ist nicht die reale Fläche dA_1 , sondern die effektiv sichtbare Fläche $\cos(\varphi) \cdot dA_1$ in Abhängigkeit des Emissionswinkels φ , welcher sich auf den Normalenvektor (Abbildung 2.3) bezieht.

$$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{\cos(\varphi) \cdot dA_1 \cdot d\Omega} = \frac{dI_e}{\cos(\varphi) \cdot dA_1} \quad (2.5)$$

Um die Helligkeit auf einer Fläche im Raum zu charakterisieren, wird die Strahlungsenergie pro Fläche und Zeit verwendet. Diese Maßzahl wird als Bestrahlungsstärke E_e bezeichnet.

$$E_e = d\Phi_e/dA_2 \quad (2.6)$$

Für die radiometrische Charakterisierung der OLED ist einzig der Strahlungsfluss sowie dessen geometrische Verteilung entscheidend. Dieses ist jedoch unzureichend für den Fall, dass das menschliche Auge als Detektor der Photonen dient. Basierend auf den Stäbchen und Zapfen in der Netzhaut erfolgt die Umwandlung der Photonen in ein neuronales Signal, in Abhängigkeit der Wellenlänge des Photons. Somit ist eine spektrale Gewichtung der radiometrischen Größen nötig, um die Helligkeitsempfindung des Menschen nachzubilden. Zu diesem Zweck ist die Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ im Spektralbereich von 380 nm bis 780 nm durch das Deutsche Institut für Normung (DIN) festgelegt (Abbildung 2.4, $\bar{y}(\lambda)$) [38]. Die Umrechnung der radiometrischen Größen in die lichttechnischen Größen erfolgt gemäß Gleichung 2.7, wobei das maximale photometrische Strahlungsäquivalent $K_m = 683 \text{ lm/W}$ beträgt.

$$\Phi_v = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda \quad (2.7)$$

Die lichttechnischen Größen werden zur Verdeutlichung mit einem v indiziert. Entsprechend der Gleichung 2.4 kann die Lichtstärke bestimmt werden. Analog hierzu ist die Berechnung der Leuchtdichte durch Gleichung 2.5 sowie die Beleuchtungsstärke durch Gleichung 2.6 möglich. Eine geometrische Veranschaulichung der lichttechnischen Maßzahlen ist in Abbildung 2.3 gezeigt. Die zusammenfassende Auflistung der radiometrischen sowie lichttechnischen Kenngrößen und deren Einheit zeigt Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Wichtige radiometrische und photometrische Maßzahlen zur Charakterisierung der OLED.

Radiometrie			Photometrie		
Bezeichnung	Symbol	Einheit	Bezeichnung	Symbol	Einheit
Strahlungsfluss	ϕ_e	W	Lichtstrom	ϕ_v	lm
Strahlstärke	I_e	W/sr	Lichtstärke	I_v	cd
Strahldichte	L_e	W/m ² sr	Leuchtdichte	L_v	cd/m ²
Bestrahlungsstärke	E_e	W/m ²	Beleuchtungsstärke	E_v	lx

Das menschliche Auge ist jedoch nicht nur in der Lage verschiedene Leuchtdichten zu unterscheiden, es vermag vielmehr auch den Farbton zu differenzieren. Dies ermöglichen die drei verschiedenen Sehzapfen (Typ-L, Typ-M, Typ-S) in der Netzhaut. Wie bereits zuvor geschildert, resultieren unterschiedlich große neuronale Signale in Abhängigkeit der einfallenden Photonenwellenlänge und erzeugen folglich eine Farbeempfindung im Gehirn. Die Transformation der physikalischen Wirkung (Farbreiz)

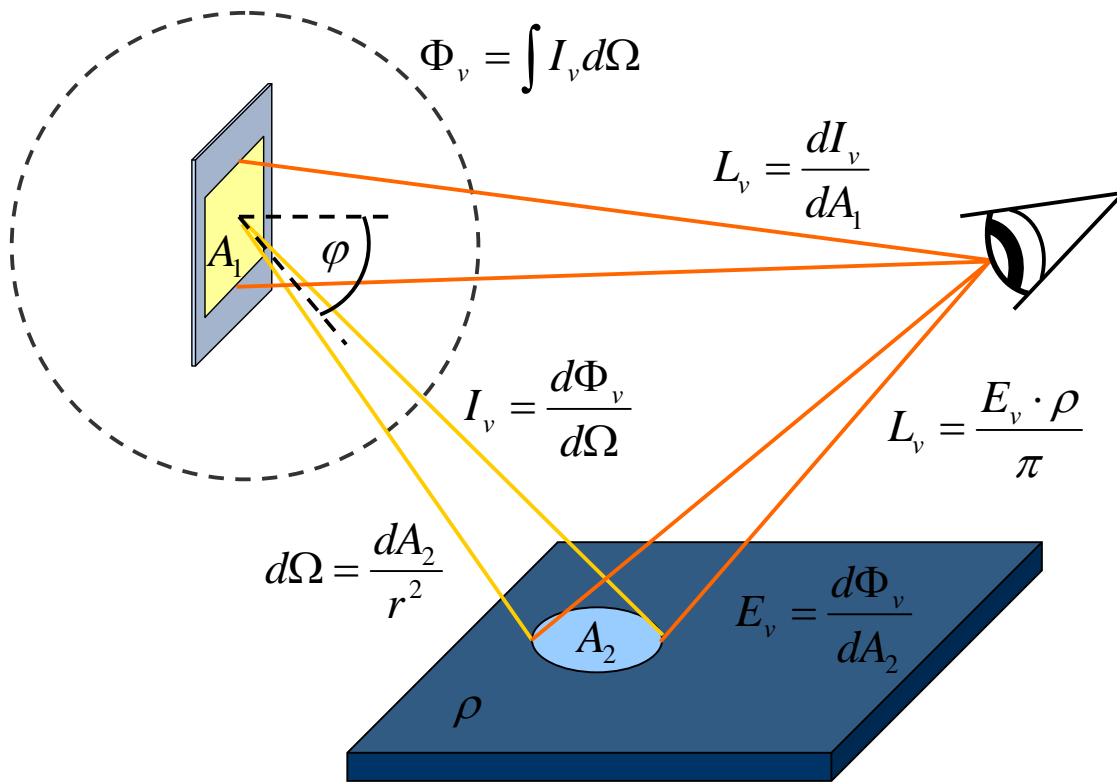


Abbildung 2.3: Veranschaulichung der lichttechnischen Maßzahlen wie Leuchtdichte L_v , Lichtstärke I_v , Lichtstrom ϕ_v und Beleuchtungsstärke E_v .

in die menschliche Farbwahrnehmung ermöglichen die Normspektralwertfunktionen (Abbildung 2.4, a), welche durch Reihenuntersuchungen der Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) ermittelt wurden [39]. Folglich führt die Gewichtung des einfallenden Spektrums mit den Normspektralwertfunktionen und anschließender Integration über den sichtbaren Spektralbereich zu den drei Normfarbwerten X, Y

und Z (Gleichung 2.8).

$$\begin{aligned}
 X &= k \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_e(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \, d\lambda \\
 Y &= k \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_e(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \, d\lambda \\
 Z &= k \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_e(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \, d\lambda
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

Der Normierungsfaktor k ist bei Körperfarben derart zu wählen, dass Y auf 100 normiert ist. Für eine Vereinfachung der Darstellung ist es zweckmäßig, die dreidimensionale Farbvalenz in eine zweidimensionale Normfarbtafel zu projizieren. Dies erfolgt durch Gleichung 2.9.

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \tag{2.9}$$

Durch die Normfarbtafel (Abbildung 2.4, b)¹ ist es möglich, den Farbort (x, y) der Lichtquelle anschaulich grafisch darzustellen. Basierend auf diesem Farbsystem existieren eine Vielzahl weiterer Farbräume mit unterschiedlichsten Eigenschaften, die durch Basistransformationen realisiert werden. Jedoch sei an dieser Stelle für weitere Informationen auf die Sekundärliteratur verwiesen [40].

Der Farbort alleine reicht jedoch nicht aus, um die Qualität des Spektrums des Leuchtmittels zu charakterisieren, wie es in der Einleitung gefordert ist. Zu diesem Zweck muss der Farbwiedergabeindex R_a des Emissionsspektrums der OLED bestimmt werden [41]. Bei diesem Verfahren werden rechnerisch 8 Testfarben (siehe Abbildung 2.6) mit dem zu untersuchenden Spektrum beleuchtet und analysiert, wie gut die Farben reproduziert werden. Entscheidend bei diesem Verfahren ist, dass das zu kennzeichnende OLED-Spektrum bis zu einer Farbtemperatur von 5000 K mit dem Spektrum eines Temperaturstrahlers (Schwarzkörperstrahler) mit äquivalenter Temperatur verglichen wird. Zur Verdeutlichung: der Farbwiedergabeindex einer Glühlampe, mit einem eminenten warmweißen Spektrum, ist sehr gut $R_a \approx 100$, weil das Testspektrum gleich dem Referenzspektrum ist. Jedoch wird der Farbeindruck

¹ In dieser Arbeit ist das Dezimaltrennzeichen in Abbildungen als Dezimalpunkt definiert.

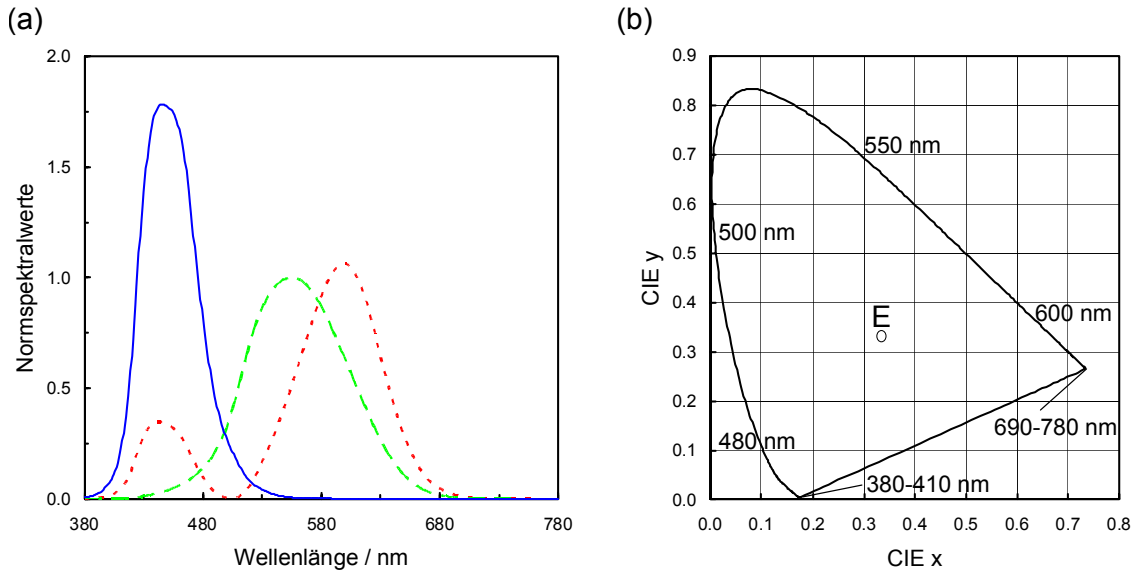


Abbildung 2.4: (a) Normspektralwertfunktionen $\bar{z}(\lambda)$ (Volllinie), $\bar{y}(\lambda)$ (Strichlinie) und $\bar{x}(\lambda)$ (Punktlinie) für den 2°-Normalbeobachter [39]. (b) Normfarbtafel für das 2°-Normvalenz-System. Der Weißpunkt E ($x = 0,333$; $y = 0,333$) repräsentiert den Farbort für ein energiegleiches Spektrum ($\Phi_e(\lambda) = \text{konst.}$).

der bläulichen Farben schwach ausfallen, aufgrund der starken Unterrepräsentanz des kurzwelligen Anteils im Spektrum (Abbildung 2.5). Folglich sagt ein hoher Farbwiedergabeindex nicht zwangsweise aus, dass alle Farben sehr gut wiedergegeben werden. Dies geschieht nur im Vergleich zu dem entsprechenden Referenzspektrum.

Für die Berechnung des Farbwiedergabeindex R_a muss zunächst das Referenzspektrum des Temperaturstrahlers ermittelt werden. Hierfür wird die correlated color temperature (CCT) des OLED Spektrums ermittelt gemäß der Approximation von McCamy [42] (Gleichung 2.10).

$$CCT = -449n^3 + 3525n^2 - 6823,3n + 5520,33 \quad \text{mit } n = \frac{x - 0,3320}{y - 0,1858} \quad (2.10)$$

Mit der ermittelten Farbtemperatur ist es möglich das Emissionsspektrum eines Schwarzkörperstrahlers [43] zu berechnen (Gleichung 2.11). In Abbildung 2.5 sind die spektralen Verläufe sowie die dazugehörigen Farborte (x, y) exemplarisch für die Farbtemperaturen von 3500 K, 4000 K, 4500 K und 5000 K dargestellt. Entsprechend des wienschen Verschiebungsgesetzes $\lambda_{max} = 2897,8 \mu\text{m K}/T$ liegen die Maxima der

Spektren bei 828 nm, 724 nm, 644 nm und 580 nm.

$$L_e(\lambda, T) = \frac{c_1 \cdot \sigma \cdot T^4}{\pi^2 \cdot \lambda^5 \cdot (e^{c_2/\lambda T} - 1)} \quad (2.11)$$

Die Faktoren betragen: $c_1 = 3,741832 \cdot 10^{-16} \text{ W m}^2$, $c_2 = 1,438786 \cdot 10^{-2} \text{ m K}$ sowie $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$.

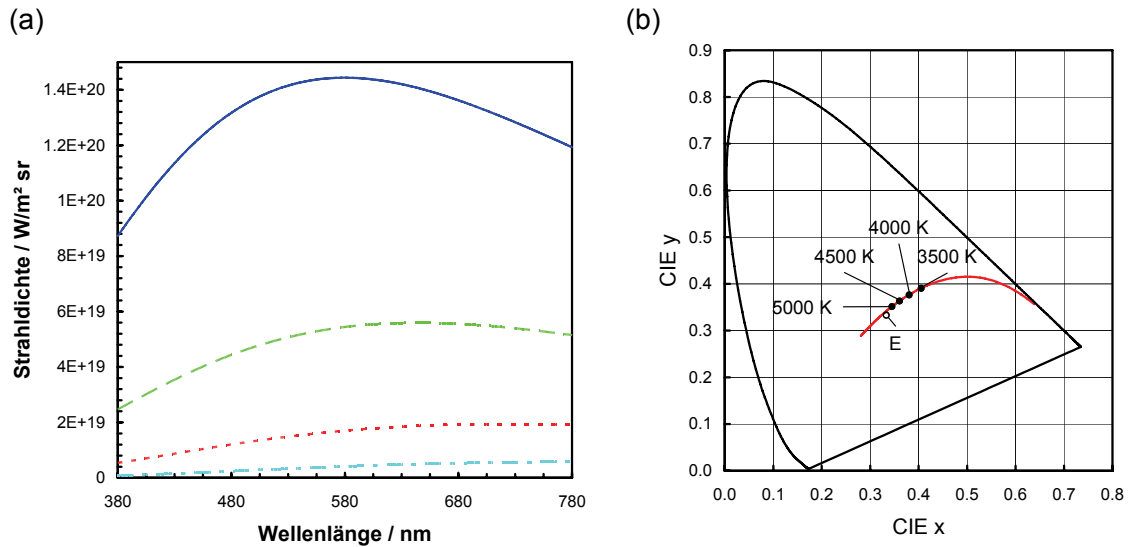


Abbildung 2.5: (a) Spektrale Verteilung der Strahlendichte eines Schwarzkörperstrahlers mit den Temperaturen 5000 K (Volllinie), 4500 K (Strichlinie), 4000 K (Punktlinie) und 3500 K (Strichpunktlinie). (b) Die Farbkoordinaten im CIE-Farbraum des Schwarzkörperstrahlers in Abhängigkeit der Temperatur.

Da nun das Referenzspektrum $L_{e,r}(\lambda)$ und das zu testende Spektrum $L_{e,k}(\lambda)$ bestimmt sind, erfolgt die Gewichtung der Spektren jeweils mit den in der DIN [41] spezifizierten wellenlängenabhängigen Remissionsgraden der Testfarben TF_1 bis TF_8 (Abbildung 2.6).

$$\begin{aligned} L'_{k,i}(\lambda) &= L_{e,k}(\lambda) \cdot TF_i(\lambda) \\ L'_{r,i}(\lambda) &= L_{e,r}(\lambda) \cdot TF_i(\lambda) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Die rechnerisch ermittelten Remissionsspektren für die Referenzlichtart $L'_{r,i}$ und die zu untersuchende OLED-Lichtart $L'_{k,i}$ werden zunächst gemäß Gleichung 2.8 und Gleichung 2.9 in das CIE1931 Farbsystem umgerechnet. Daraufhin erfolgt die

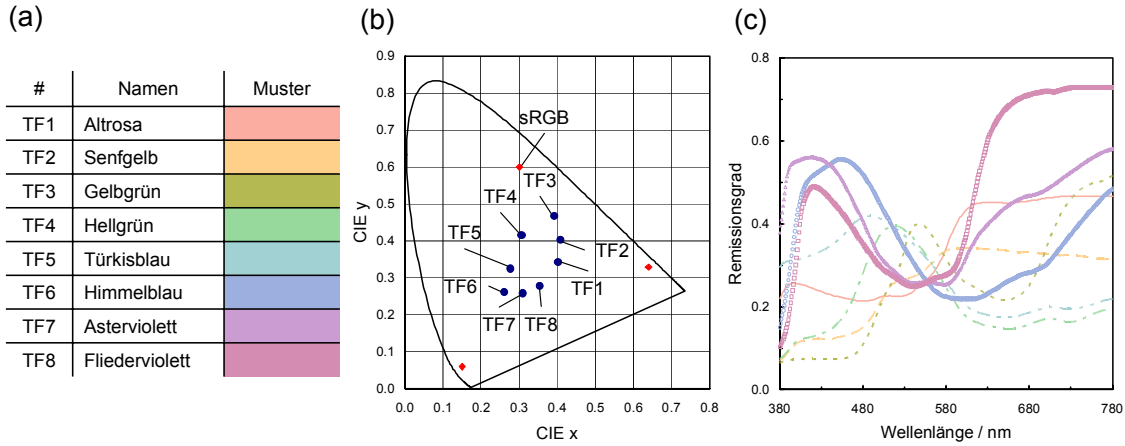


Abbildung 2.6: (a) Tabelle mit den Bezeichnungen und Mustern der Testfarben (TF_1 bis TF_8). (b) Die Koordinaten der Testfarben (Punkte) in der Normfarbtafel sowie der Farbraum des sRGB Farbraums (Rauten). (c) Remissionsgrade der Testfarben, TF_1 (Volllinie), TF_2 (Strichlinie), TF_3 (Punktlinie), TF_4 (Strichpunktlinie), TF_5 (Strichzweipunktlinie), TF_6 (Kreise), TF_7 (Dreiecke) und TF_8 (Quadrate).

Umrechnung der Normfarbwertanteile (x, y) in das CIE1960 Koordinatensystem, jeweils für die Bezugslichtart r und die Testlichtart k (siehe Gleichung 2.13).

$$u = 4x/(-2x + 12y + 3) \quad v = 6y/(-2x + 12y + 3) \quad (2.13)$$

Diese ermittelten Werte (u, v) werden zur Berechnung der Hilfsgrößen c und d verwendet (Gleichung 2.14).

$$c = 1/v \cdot (4 - u - 10v) \quad d = 1/v \cdot (1,708v + 0,404 - 1,481u) \quad (2.14)$$

Nun kann die Farbwandlung [44] gemäß Gleichung 2.15 erfolgen.

$$u'_{k,i} = \frac{10,872 + 0,404 \frac{c_{k,i}}{c_k} c_r - 4 \frac{d_{k,i}}{d_k} d_r}{16,518 + 1,481 \frac{c_{k,i}}{c_k} c_r - \frac{d_{k,i}}{d_k} d_r}$$

$$v'_{k,i} = \frac{5,52}{16,518 + 1,481 \frac{c_{k,i}}{c_k} c_r - \frac{d_{k,i}}{d_k} d_r}$$
(2.15)

Als Nächstes müssen die berechneten Farborte ($u'_{k,i}, v'_{k,i}$) in den gleichförmigen Farbenraum CIE1964 gemäß Gleichung 2.16 transformiert werden.

$$W_{r,i}^* = 25(Y_{r,i})^{1/3} - 17; \quad W_{k,i}^* = 25(Y_{k,i})^{1/3} - 17$$

$$U_{r,i}^* = 13 W_{r,i}^* (u_{r,i} - u_r); \quad U_{k,i}^* = 13 W_{k,i}^* (u'_{k,i} - u_r)$$

$$V_{r,i}^* = 13 W_{r,i}^* (v_{r,i} - v_r); \quad V_{k,i}^* = 13 W_{k,i}^* (v'_{k,i} - v_r)$$
(2.16)

Erst in diesem Farbraum ist es zweckmäßig die Differenz der Farborte für die jeweiligen Testfarben zwischen dem Referenzspektrum r und dem Testspektrum k zu berechnen. Dies erfolgt durch Anwendung von Gleichung 2.17.

$$\Delta E_i = \left[(U_{r,i}^* - U_{k,i}^*)^2 + (V_{r,i}^* - V_{k,i}^*)^2 + (W_{r,i}^* - W_{k,i}^*)^2 \right]^{1/2}$$
(2.17)

Durch geeignete Normierung der Farbverschiebung ΔE_i berechnet sich der spezielle Farbwiedergabeindex R_i für die jeweilige Testfarbe (Gleichung 2.18).

$$R_i = 100 - 4,6 \cdot \Delta E_i$$
(2.18)

Die Mittelung aller speziellen Farbwiedergabeindizes R_i führt zu dem allgemeinen Farbwiedergabeindex R_a . Anhand dieses Wertes ist es möglich, die Güte des Spektrums der OLED zu charakterisieren. Abhängig von der Art des Innenraums werden in der Norm [6] die Mindestanforderungen für den Farbwiedergabeindex definiert. Einige Beispiele für die Mindestanforderung des Index R_a sind in Tabelle 2.2

aufgeführt.

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (2.19)$$

Tabelle 2.2: Beispiele für die Anforderungen an die Farbwiedergabe von Leuchtmitteln in Abhängigkeit der Art des Innenraums [6].

Farbwiedergabeindex R_a	Art des Innenraumbereichs
90	Farbprüfung, Bearbeitung von Edelsteinen
80	Büroarbeitsplatz, Uhrenherstellung
60	Lagerräume, Bahnsteige mit vielen Personen
40	Aufzüge, Park-/Abstellflächen
20	Zugtunnel, Keller

2.3 Beschreibung der Lichtausbreitungsmodelle

Für die lichttechnische Optimierung der OLED ist es nötig, die Propagation des Photons von der Entstehung bis zu seiner Nutzung zu berechnen. Aufgrund der Komplexität der physikalischen Lichtbeschreibung ist es zweckmäßig, für die spezifischen OLED-Simulationen entsprechende vereinfachte Modelle anzuwenden. Die Propagation des Lichtes im Schichtsystem muss als Wellenausbreitung betrachtet werden, da es sich um sehr dünne Schichten handelt. Hierfür wird die Vereinfachung der Maxwell-Gleichungen in Form von komplexwertigen Transfermatrizen verwendet (Kapitel 2.3.1). Die Berechnung der Auskoppeloptik sowie anwendungsspezifischer Sekundäroptik benötigt jedoch nur die Verwendung des Strahlenmodells in Form von einfachen Transfermatrizen (Kapitel 2.3.2). Eine Besonderheit stellt jedoch die Berechnung der Primäroptik dar. Hier werden die Vektorfelder durch das Harvey-Modell charakterisiert (Kapitel 2.3.3).

2.3.1 Wellenmodell

Wie bereits geschildert handelt es sich beim Aufbau einer OLED um ein Mehrschichtsystem mit Schichtdicken, die kleiner sind als die Wellenlängen des sichtbaren elektromagnetischen Spektrums (Kapitel 2.2). Für eine gültige Berechnung der Lichtausbreitung in der OLED muss der Wellencharakter des Lichtes berücksichtigt werden. Folglich ist eine Beschreibung der Lichtstrahlen als Vektoren (Kapitel 2.3.2)

nicht möglich. Eine elegante Methode, die Propagation einer elektromagnetischen Welle durch variierende Medien (Schichten) zu berechnen, ist die Verwendung von Transfermatrizen [45]. Hierbei werden die Feldstärken auf beiden Seiten einer Grenzfläche eintretenden Welle sowie austretenden Welle zu Gesamtfeldern zusammengefasst. Zunächst wird bei dieser Methode unterschieden, ob die Welle innerhalb eines Mediums i propagiert (Propagationsmatrix) oder an einen Grenzübergang zweier Medien stößt (Transfermatrix). Die Propagationsmatrix (P_i) wird beschrieben durch:

$$P_i = \begin{pmatrix} e^{-j\beta_i} & 0 \\ 0 & e^{j\beta_i} \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad \beta_i = \frac{2\pi}{\lambda} d_i n_i \cos\theta_i \quad (2.20)$$

mit der Schichtdicke d_i , der Brechzahl n_i (Abbildung 2.7, a) sowie dem Propagationswinkel θ_i . Dies ergibt die Phasenverschiebung β_i in der Schicht. Der Übergang einer Welle von Schicht $i - 1$ zur Schicht i wird durch die Transfermatrix $T_{i-1,i}$ abgebildet.

$$T_{i-1,i} = \frac{1}{t_{i-1,i}} \begin{pmatrix} 1 & r_{i-1,i} \\ r_{i-1,i} & 1 \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

Hierbei sind $r_{i-1,i}$ die Reflexionskoeffizienten sowie $t_{i-1,i}$ die Transmissionskoeffizienten, welche durch Verwendung der polarisationsabhängigen Fresnelgleichungen berechnet werden können.

$$t_{s,i-1,i} = \frac{2N_{i-1} \cos\theta_{i-1}}{N_{i-1} \cos\theta_{i-1} + \frac{\mu_{r,i-1}}{\mu_{r,i}} \sqrt{N_i^2 - N_{i-1}^2 \sin^2\theta_{i-1}}} \quad (2.22)$$

$$r_{s,i-1,i} = \frac{N_{i-1} \cos\theta_{i-1} - \frac{\mu_{r,i-1}}{\mu_{r,i}} \sqrt{N_i^2 - N_{i-1}^2 \sin^2\theta_{i-1}}}{N_{i-1} \cos\theta_{i-1} + \frac{\mu_{r,i-1}}{\mu_{r,i}} \sqrt{N_i^2 - N_{i-1}^2 \sin^2\theta_{i-1}}} \quad (2.23)$$

$$t_{p,i-1,i} = \frac{2N_{i-1}N_i \cos\theta_{i-1}}{N_i^2 \frac{\mu_{r,i-1}}{\mu_{r,i}} \cos\theta_{i-1} + N_{i-1} \sqrt{N_i^2 - N_{i-1}^2 \sin^2\theta_{i-1}}} \quad (2.24)$$

$$r_{p,i-1,i} = \frac{N_i^2 \frac{\mu_{r,i-1}}{\mu_{r,i}} \cos \theta_{i-1} - N_{i-1} \sqrt{N_i^2 - N_{i-1}^2 \sin^2 \theta_{i-1}}}{N_i^2 \frac{\mu_{r,i-1}}{\mu_{r,i}} \cos \theta_{i-1} + N_{i-1} \sqrt{N_i^2 - N_{i-1}^2 \sin^2 \theta_{i-1}}} \quad (2.25)$$

In den Gleichungen wird die komplexe Brechzahl $N_i = n_i + ik_i$ durch den Ex-
 tinktionskoeffizienten k_i und den Brechungsindex n_i definiert. Die Permeabilität
 des Schichtmaterials wird seitens μ_r charakterisiert. Anhand der Multiplikation
 von Transfermatrizen sowie Propagationsmatrizen kann eine Systemmatrix für das
 Schichtsystem berechnet werden. Der Hauptunterschied zwischen der Simulation
 eines klassischen Dünnschichtsystems (Vergütungsschicht) und einer OLED besteht
 darin, dass sich bei dem OLED-Schichtsystem die Startfeldverteilung (Licht emit-
 tierende Schicht) innerhalb des optischen Interferenzsystems befindet. Um diesem
 Unterschied Rechnung tragen zu können, werden zunächst die auftretenden elektri-
 schen Felder differenziert bezüglich ihrer Propagationsrichtung und Positionierung
 (Abbildung 2.7, a) innerhalb des Schichtsystems. Es wird unterschieden:

- $E_i^{(o)}$: Schicht i , oberer Grenzübergang (bei Schicht $i+1$), Propagationsrichtung
 der Welle ist nach oben gerichtet ($i+1$)
- $E_i^{(o)}$: Schicht i , unterer Grenzübergang (bei Schicht $i-1$), Propagationsrichtung
 der Welle ist nach oben gerichtet ($i+1$)
- $E_i^{(u)}$: Schicht i , oberer Grenzübergang (bei Schicht $i+1$), Propagationsrichtung
 der Welle ist nach unten gerichtet ($i-1$)
- $E_i^{(u)}$: Schicht i , unterer Grenzübergang (bei Schicht $i-1$), Propagationsrichtung
 der Welle ist nach unten gerichtet ($i-1$)

Eine weitere Besonderheit der OLED-Schichtsystemsimulation liegt in dem Vor-
 handensein der metallischen Kathode, welche als Spiegel auf das elektrische Feld
 wirkt. Aus diesem Grund müssen in der LEP-Schicht (Index $i=2$) zwei Propaga-
 tionsrichtungen unterschieden werden (Abbildung 2.7, a; 2a und 2b), die direkte
 Emission in Richtung der Anode ($i=4$) sowie die indirekte Emission über die Refle-
 xion an der Kathode ($i=1$). Hierfür wird die LEP-Schicht in zwei Unterschichten $2a$
 und $2b$ aufgeteilt. Die Systemmatrix für die OLED mit beiden Propagationswegen
 setzt sich, basierend auf Gleichung 2.20 und Gleichung 2.21, wie folgt zusammen:

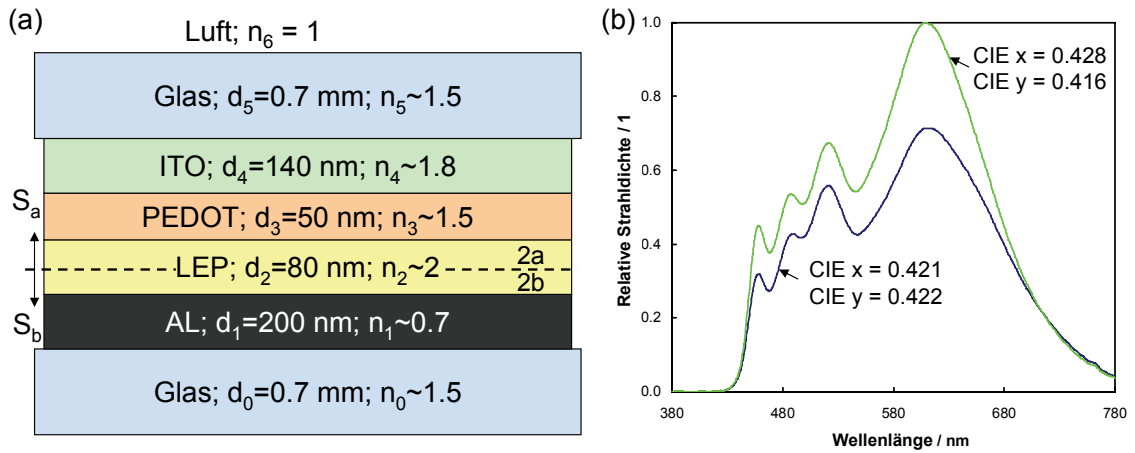


Abbildung 2.7: (a) Schematischer Aufbau des OLED Schichtsystems mit den benötigten Schichtdicken sowie komplexen Brechungsindizes. (b) Simulation des Emissionsspektrums einer OLED, bei der das Anodenmaterial von ITO (grün) auf PH500 (blau) ausgetauscht worden ist. Die Änderung des Interferenzsystems bewirkt eine deutliche Farbortverschiebung.

$$S_a = \begin{pmatrix} S_{a,11} & S_{a,12} \\ S_{a,21} & S_{a,22} \end{pmatrix} = P_{2a} T_{2a,3} P_3 \cdots T_{5,6} \quad (2.26)$$

$$S_b = \begin{pmatrix} S_{b,11} & S_{b,12} \\ S_{b,21} & S_{b,22} \end{pmatrix} = T_{0,1} P_1 T_{1,2b} P_{2b}$$

Durch Verwendung von Gleichung 2.27 kann nun die resultierende Feldverteilung in der Luft $E_6^{(o)}$ berechnet werden.

$$E_{emitter} = S_a \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ E_6^{(o)} \end{pmatrix} ; \quad E_0'^{(o)} = S_b \cdot E_{emitter} \quad (2.27)$$

Ein komfortabler Weg, diesen Formalismus durchzuführen, ist die Verwendung der Simulationssoftware ETFOS [46]. Durch diese Software ist es möglich, für beliebige Schichtdickensysteme unter Kenntnis der Materialeigenschaften die winkelabhängige sowie wellenlängenabhängige Strahldichteverteilung L_e der OLED zu berechnen. Die Ergebnisse dieser Simulationen befinden sich im Kapitel 4.1.

2.3.2 Strahlenmodell

Sobald die winkelabhängige Strahldichteverteilung L_e an Luft mithilfe des geschilderten Wellenformalismus simuliert ist, genügt die Verwendung des einfacheren Strahlenmodells des Lichtes, um den weiteren Propagationsweg zu berechnen. Im Strahlenmodell wird das elektrische Feld durch einen Satz von N Lichtstrahlen repräsentiert [47]. Diese Strahlen starten von der OLED und sind zunächst mit dieser Lichtquelle verknüpft. Jeder Lichtstrahl s wird durch einen Vektor repräsentiert, der einen Aufpunkt (x_s, y_s, z_s) sowie eine Raumrichtung $\Omega_s = (\theta_s, \phi_s)_s$ besitzt. Dabei wird die Raumrichtung durch die beiden Winkel θ_s sowie ϕ_s relativ zur z -Achse beschrieben. Dies ist in Abbildung 2.8, a visualisiert. Jeder Lichtstrahl trägt einen Bruchteil Φ_s des gesamten von der OLED abgegebenen Strahlungsflusses Φ_e . Folglich gilt:

$$\Phi_e = \sum_{s=1}^N \Phi_s \quad (2.28)$$

Es sei darauf hingewiesen, dass die räumliche Länge des Strahlvektors in diesem Modell nicht von Bedeutung ist und folglich auf 1 normiert wird. Die Herausforderung der Modellierung der OLED im Strahlenmodell besteht darin, einen repräsentativen Satz von N Strahlen zu bestimmen, welcher das Lichtfeld bestmöglich bezüglich der lateralen sowie winkelabhängigen Verteilung beschreibt.

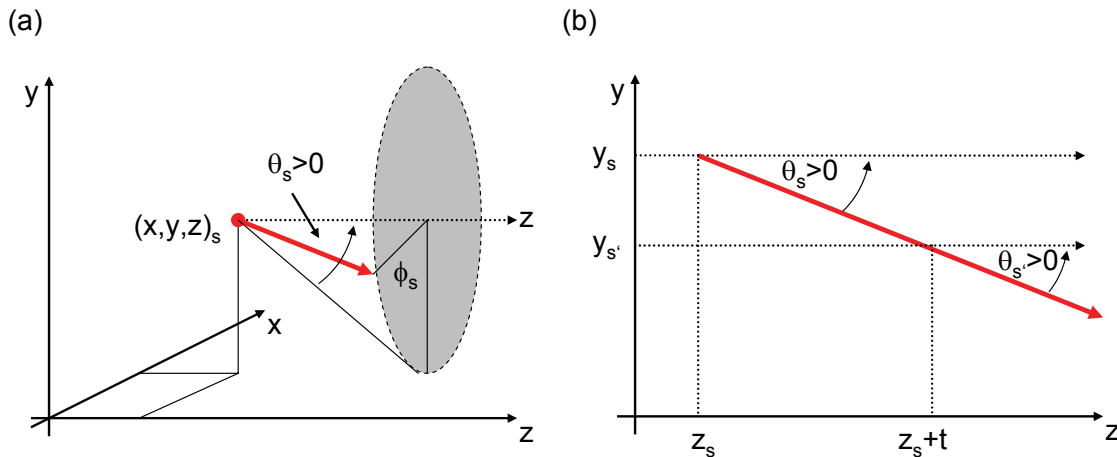


Abbildung 2.8: (a) Darstellung eines Lichtstrahls mit Aufpunkt $(x, y, z)_s$ und Raumrichtungswinkeln θ_s und ϕ_s . (b) Darstellung eines Lichtstrahls im Propagationsformalismus. Gemäß [48].

Beispielsweise lässt sich das Lichtfeld einer Punktlichtquelle (sehr kleine OLED) im Koordinatenursprung gut durch N Strahlen beschreiben, welche alle den Aufpunkt $P_0(0, 0, 0)$ und den Strahlungsfluss $\frac{\Phi_e}{N}$ besitzen. Der halbe Raumwinkelbereich (Abbildung 2.1) von 2π vor der OLED wird nun in N Teilraumwinkel $\frac{2\pi}{N}$ unterteilt. In das Zentrum jedes Teilraumwinkels zielt jeweils einer der Strahlen. In dem Fall einer hohen Strahlzahl ($N > 10000$) kann die jeweilige Raumrichtung des Strahls von einem Zufallsgenerator bestimmt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die statistische Verteilung dieser Werte der simulierten Feldverteilung entsprechend Kapitel 2.3.1 gewichtet ist. Weiterführende Details, wie dies umgesetzt werden kann, befinden sich in Kapitel 4.4.

Als darauf aufbauendes Beispiel wird eine OLED mit einer ausgedehnten rechteckigen Fläche A betrachtet. Zunächst wird diese Fläche in N Teilflächen der Größe $\frac{A}{N}$ zerlegt, in deren Zentrum jeweils M Strahlen ihren Aufpunkt aufweisen. Die Raumwinkelverteilung innerhalb des N -ten Strahlensatzes folgt ebenfalls der simulierten Strahlstärkeverteilung aus Kapitel 2.3.1. Alle $N \cdot M$ Strahlen sollen wiederum den gleichen Teilfluss $\frac{\Phi_e}{N \cdot M}$ tragen.

Eine numerische Strahlverfolgung, das sogenannte Raytracing, erfolgt nun darin, den Aufpunkt jedes Strahls entlang der Strahlrichtung so weit zu verschieben, bis der Strahl die Oberfläche eines optischen Elements trifft. Besitzt diese Oberfläche absorbierende Eigenschaften, so bleibt der Aufpunkt am Auftreffpunkt dieser Fläche haften. Der Strahl wird nicht weiter verfolgt. Alternativ kann an der Oberfläche Reflexion oder Brechung stattfinden. In diesem Fall ändert sich die Strahlrichtung und der Aufpunkt des Strahls und wird entlang der neuen Strahlrichtung weiter verschoben. Dieses Verfahren wird so lange fortgeführt, bis der Strahl entweder auf eine absorbierende Fläche trifft oder sich kein weiteres optisches Element im Strahlengang befindet.

Die Propagation der Strahlen durch ein beliebiges optisches System kann mathematisch formal durch einen Matrixoperator-Formalismus erfolgen. Für eine vereinfachte Beschreibung des Formalismus wird lediglich der zweidimensionale Fall betrachtet, folglich die Strahlausbreitung in der z - y -Ebene (Abbildung 2.8, b). Wie bereits angedeutet, wird jeder Strahl durch einen Vektor \vec{s} repräsentiert.

$$\vec{s} = \begin{pmatrix} y_s \\ \theta_s \end{pmatrix}_{z_s} \quad (2.29)$$

Hierbei stellen die ersten beiden Komponenten z_s sowie y_s den Aufpunkt des Strahls in der z - y -Ebene dar. Der Strahlwinkel zur z -Achse wird durch die dritte Komponente θ_s beschrieben. Bei einem Winkel $\theta_s = \frac{-\pi}{2} \dots \frac{+\pi}{2}$ verlaufen die Strahlen

in positive z -Richtung. Strahlen mit $|\theta_s| > \frac{\pi}{2}$ zeigen in negative z -Richtung und werden im Folgenden nicht betrachtet. Insbesondere gelten hier nicht die unten angegebenen Propagationsoperatoren.

Mathematisch erfolgt die Strahlberechnung nun durch sogenannte Propagationsoperatoren in Form von 2×2 Matrizen. Im Folgenden werden nun die Operatoren für Translation, Reflexion sowie Brechung eingeführt.

Der Translationsoperator P_t beschreibt die Bewegung des Aufpunktes zwischen den optischen Oberflächen. Hierbei ist es nicht von Bedeutung in welchem optischen Medium sich der Strahl ausbreitet. Die mathematische Verschiebung des Aufpunktes entlang der z -Achse um die Distanz t erfolgt durch die Matrix:

$$P_t = \begin{pmatrix} 1 & (-t \cdot \tan(\cdot)) \\ 0 & 1 \end{pmatrix}_t \quad (2.30)$$

Wendet man diesen Operator auf den Aufpunktvektor \vec{s} an, so erhält man den verschobenen Aufpunktvektor \vec{s}' .

$$\vec{s}' = \begin{pmatrix} y_s - t \cdot \tan(\theta_s) \\ \theta_s \end{pmatrix}_{z_s+t} \quad (2.31)$$

Erreicht man mit dem Translationsoperator eine spiegelnde Oberfläche (hier als planar angenommen), so findet an dieser Fläche eine Reflexion statt. Diese Änderung der Ausbreitungsrichtung des Strahlvektors wird durch den Reflexionsoperator P_r beschrieben:

$$P_r = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & (2\alpha - (\cdot)) \end{pmatrix} \quad (2.32)$$

Dabei weist die Normale der Spiegelfläche den Winkel α zur y -Achse (Abbildung 2.9, a) auf. Jedoch besitzt diese Matrix ihre Gültigkeit nur für den Fall, dass der Strahl weiter in positive z -Richtung propagiert.

Die dritte wichtige Propagationsmatrix beschreibt die Brechung des Strahls an einer planen Fläche, folglich der Übergang von einem Medium mit Brechzahl n_s in ein Medium mit der Brechzahl $n_{s'}$. Dies wird in Abbildung 2.9, b visualisiert. Der

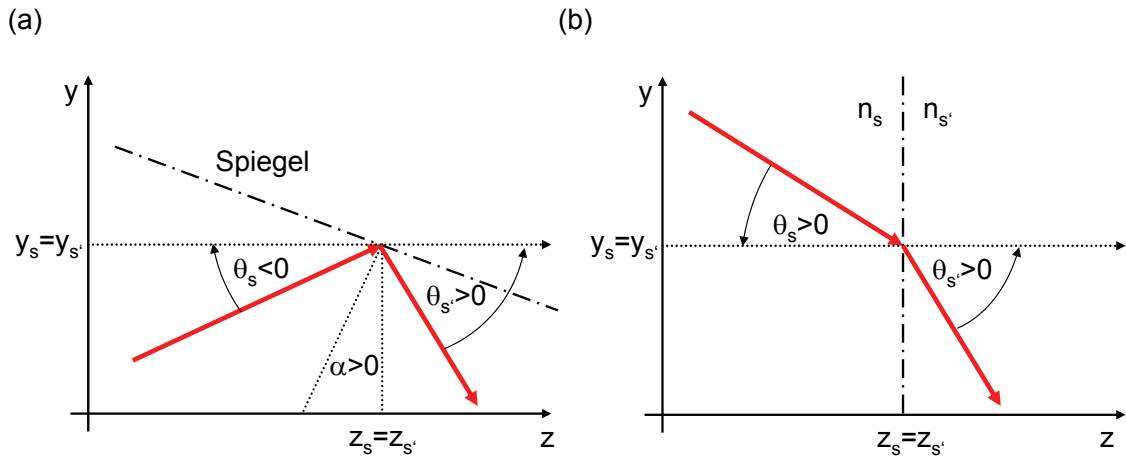


Abbildung 2.9: (a) Reflexion eines Lichtstrahls im Propagationsformalismus. (b) Brechung eines Lichtstrahls im Propagationsformalismus. Gemäß [48].

Brechungsoperator P_n lautet:

$$P_n = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \left(\arcsin \left(\frac{n_s}{n_{s'}} \sin(\cdot) \right) \right) \end{pmatrix} \quad (2.33)$$

Für die Berechnung der Lichtausbreitung durch ein optisches System werden nun die benötigten Operatoren miteinander kombiniert. Durch Multiplikation des Startvektors \vec{s} mit den Systemoperatoren führt dies zu dem Ergebnisvektor \vec{s}^j .

$$\vec{s}^j = P_n \cdot P_{(n-1)} \cdots P_2 \cdot P_1 \cdot \vec{s} \quad (2.34)$$

Wie bereits in Kapitel 2.3.1 eingeführt, ist es zweckmäßig, diese Matrix- und Vektoroperationen durch spezielle Optik-Programme berechnen zu lassen. Mittels kommerzieller Lösungen wie z. B. ZEMAX [49], CodeV [50], ASAP [51] oder SPEOS [52] ist dies schnell und effizient möglich. Somit können in kurzer Rechenzeit Millionen von Lichtstrahlen durch optische Systeme propagiert werden und deren Endpositionen sowie Endwinkelverteilungen analysiert werden. Die Ergebnisse dieser Simulationen mithilfe von ZEMAX befinden sich im Kapitel 4.4.

2.3.3 Streuung an Oberflächen

Mithilfe der in den beiden vorherigen Kapiteln beschriebenen Lichtausbreitungsmodellen ist die Berechnung der Propagation des Lichtes durch das Schichtsystem sowie der Sekundäroptik möglich. Für die Berechnung der Lichtausbreitung durch die Auskoppeloptik, in diesem Fall durch Diffusoren, werden zusätzlich Streumodelle herangezogen.

Allgemein betrachtet bezeichnet der Begriff Streuung in der Optik die Ablenkung eines Photons oder Welle durch ein Objekt allgemeiner Größe. Bei dieser Wechselwirkung kann eine Vielzahl von Effekten auftreten, folglich existieren mehrere physikalische Modelle, um die jeweiligen Phänomene zu beschreiben. Beispielsweise sind in Abbildung 2.10 mögliche Streuprozesse mit einem Elektron in Form der elastischen Streuung, inelastischen Streuung, Fluoreszenz, stimulierten Emission, Absorption sowie Lumineszenz visualisiert.

In dem klassischen Aufbau einer OLED (Abbildung 2.1) sind die Effekte der Fluoreszenz (c) sowie Lumineszenz (f) die entscheidenden Prozesse zur Erzeugung der Photonen (Kapitel 2.1). Wie bereits erwähnt, tritt an dem Grenzübergang der planparallelen Schichten vom optisch dichteren ins optisch dünnere Medium Totalreflexion auf, welches zur Ausbildung von Substratmoden sowie verstärkter Absorption (Abbildung 2.10, e) führt. Gerade beim Übergang von Glas zur Luft tritt bereits bei einem Einfallswinkel von ca. 41° Totalreflexion auf (Abbildung 2.1). Dies führt zu einer Erwärmung des Bauteils sowie Reduzierung der Gesamteffizienz der OLED.

Durch die Änderung der Ausbreitungsrichtung bei der elastischen Streuung (Abbildung 2.10, a) eignet sich dieser Effekt, um die Bildung von Moden in der OLED zu reduzieren. Eine einfache Möglichkeit dies zu realisieren, ist das Aufrauen der Glassubstratfläche am Grenzübergang von Glas zur Luft. Dies führt zu unregelmäßigen Gradienten auf der Oberfläche, welche makroskopisch betrachtet als Streuobjekte wirken. Es ist zwar möglich, die Streuobjekte geometrisch zu beschreiben und die Methode entsprechend Kapitel 2.3.2 für die Berechnung der Lichtpropagation anzuwenden. Dies stellt jedoch einen erhöhten Rechenaufwand dar. Aus diesem Grund wird ein Modell eingeführt, welches die Auswirkungen der Streuobjekte auf die Lichtstrahlen abbildet. Eine elegante Methode hierfür ist das Harvey-Modell [54]. Ursprünglich findet dieses Modell seine Anwendung bei der Beschreibung des Streuverhaltens von polierten Glasoberflächen mit Restrauigkeit. Einerseits berücksichtigt es die spekulare Transmission T_s sowie spekulare Reflexion R_s , die beide dem Brechungsgesetz $n \cdot \sin(\theta) = n' \cdot \sin(\theta')$ folgen. Andererseits wird die diffuse Transmission T_d sowie diffuse Reflexion R_d an dem Grenzübergang unterschieden. Diese Aufteilung der Lichtstrahlen ist in Abbildung 2.11, a verdeutlicht.

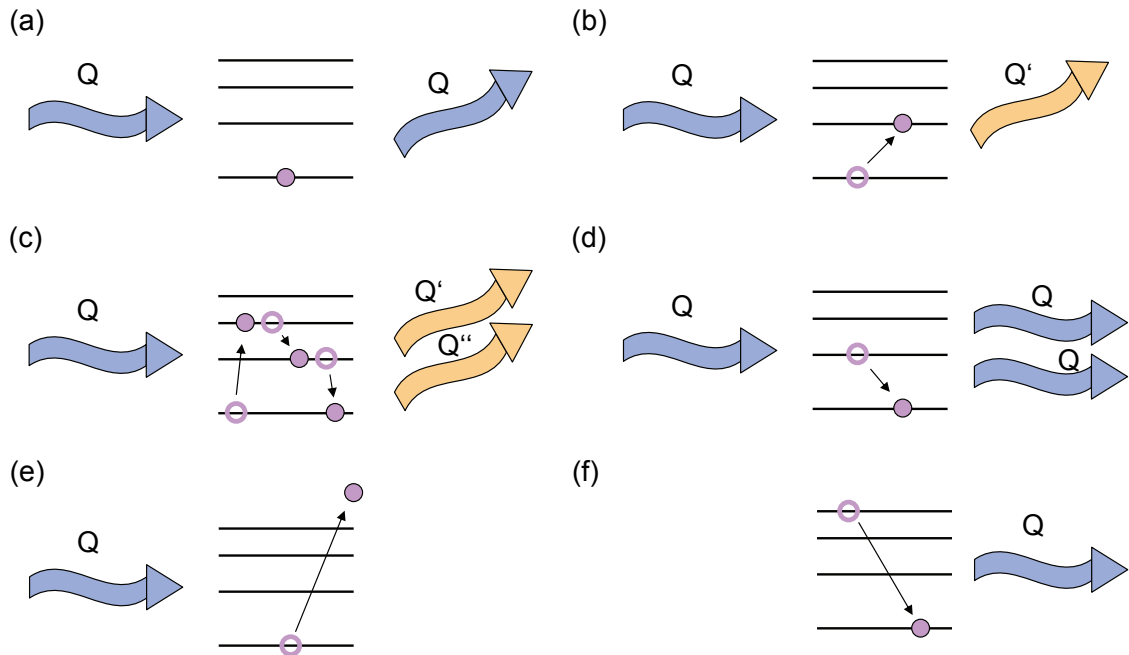


Abbildung 2.10: Visualisierung der Streuphänomene: (a) elastische Streuung - die Energie der Photonen bleibt erhalten, jedoch kann sich die Ausbreitungsrichtung ändern; (b) inelastische Streuung - sowohl die Energie der Photonen wie auch die Ausbreitungsrichtung werden verändert; (c) Fluoreszenz - Energie, Ausbreitungsrichtung sowie Anzahl der Photonen ändern sich; (d) stimulierte Emission - die Energie und Ausbreitungsrichtung bleibt konstant, jedoch ändert sich die Anzahl der Photonen; (e) Absorption - die gesamte Energie des Photons wird an das Elektron abgegeben; (f) Lumineszenz - die Energie beim Übergang in den Grundzustand wird in Form eines Photons abgegeben. Gemäß [53].

Eine anschauliche Beschreibung des Modells ist möglich beim Betrachten eines einfachen Experiments, indem man eine raue Oberfläche (Diffusor) mit einem Laserstrahl beleuchtet. Der polare Einfallswinkel relativ zur Flächennormalen wird durch θ_0 beschrieben. Zur Vereinfachung der Beschreibung wird zunächst der azimutale Einfallswinkel ϕ_0 nicht berücksichtigt. Durch den Laserstrahl wirkt der Diffusor als sekundäre Lichtquelle, welche die Leistung P_{Laser} in den Vollraum $\Omega = 4\pi$ verteilt. Ein Detektor (mit der Fläche A_{det}) in einem Abstand r misst die auftreffende Leistung P_{det} in Abhängigkeit des Winkels θ in Reflexion sowie θ' in Transmission (siehe Abbildung 2.11, b). Aus den Messwerten kann durch Anwendung von Gleichung 2.35 die bidirectional reflection distribution function (BRDF) sowie Gleichung 2.36 die bidirectional transmission distribution function (BTDF) als Funktion

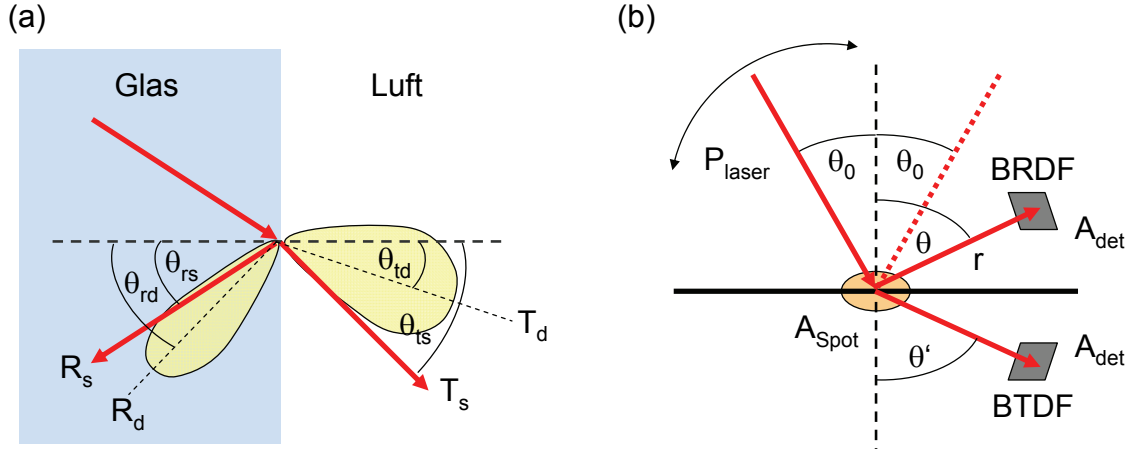


Abbildung 2.11: (a) Visualisierung der möglichen Energiepfade beim Harvey-Modell. Ein einfallender Lichtstrahl wird spekulär transmittiert (T_s, θ_{ts}), spekulär reflektiert (R_s, θ_{rs}), diffus transmittiert (T_d, θ_{td}) sowie diffus reflektiert (R_d, θ_{rd}). (b) Prinzipskizze eines Messaufbaus zur Bestimmung der BRDF sowie BTDF in Abhängigkeit des Einfallswinkels θ_0 .

des Einfallswinkels θ_0 berechnet werden [55].

$$BRDF(\theta_0, \theta) = L(\theta_0, \theta) / E = \frac{P_{det} \cdot r^2}{A_{det} P_{laser} \cdot \cos(\theta)} \quad (2.35)$$

$$BTDF(\theta_0, \theta') = L(\theta_0, \theta') / E = \frac{P_{det} \cdot r^2}{A_{det} P_{laser} \cdot \cos(\theta')} \quad (2.36)$$

Die Integration der BTDF und BRDF über den gesamten Halbraum führt zum total integrated scattered für Transmission TIS_t und Reflexion TIS_r (siehe Gleichung 2.37 sowie Gleichung 2.38) [56].

$$TIS_t(\theta_0, \phi_0) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} BTDF(\theta', \phi', \theta_0, \phi_0) \cos(\theta') \sin(\theta') d\theta' d\phi' \quad (2.37)$$

$$TIS_r(\theta_0, \phi_0) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} BRDF(\theta, \phi, \theta_0, \phi_0) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi \quad (2.38)$$

Zusätzlich lassen sich folgende Zusammenhänge zwischen der gesamten Leistung in Reflexion R sowie Transmission T und Absorption P_{abs} ableiten:

$$\begin{aligned} P_{laser} &= P_{abs} + R + T \\ R_d &= TIS_r \cdot R \\ T_d &= TIS_t \cdot T \\ R_s &= (1 - TIS_r) \cdot R \\ T_s &= (1 - TIS_t) \cdot T \end{aligned} \quad (2.39)$$

Eine exemplarische Messung einer BTDF mit den Einfallswinkeln von $\theta_0 = 0^\circ$ sowie $\theta_0 = 20^\circ$ ist in Abbildung 2.12, a dargestellt. Sowohl die spekularen wie auch die diffusen Anteile sind in dem Diagramm zu erkennen. Die eigentliche Modellbildung erfolgt nun durch die Anwendung der Harvey-Funktion (Gleichung 2.40). Im Gegensatz zu anderen Streumodellen ist das Ziel des Harvey-Modells nicht die Berechnung der Beschaffenheit des Streukörpers selbst. Es ist ein rein phänomenologisches Modell und stellt somit eine sehr elegante Möglichkeit zur Datenreduktion dar. Mithilfe der Harvey-Funktion (Gleichung 2.40) lässt sich eine Ausgleichsrechnung an den Messdaten durchführen, dessen Ergebnis Triplet $(b_0, s, l)_{t,r}$ die gesamte diffuse Winkelverteilung jeweils getrennt für Transmission und Reflexion beschreibt. Dabei ist zu beachten, dass die Werte b_0 , s und l nicht vom Einfallswinkel θ_0 abhängig sind.

$$BSDF = b_0 \cdot \left[1 + \left(\frac{\sin\theta}{l} \right) \right]^{s/2} \quad (2.40)$$

Dies wird durch eine Zentrierung der BTDF bzw. BRDF um den Einfallswinkel θ_0 erreicht. Eine visuelle Beschreibung erfolgt durch die Harvey-Auftragung der Messwerte in einem doppellogarithmischen Diagramm. Hierfür wird der Winkel θ' entsprechend $|\sin\theta' - \sin\theta_0|$ transformiert (siehe Abbildung 2.12, b).

Durch diese Auftragung fallen alle Streufunktionen in Abhängigkeit von θ_0 aufeinander. Der Achsenabschnitt b_0 charakterisiert den maximalen Wert der diffusen

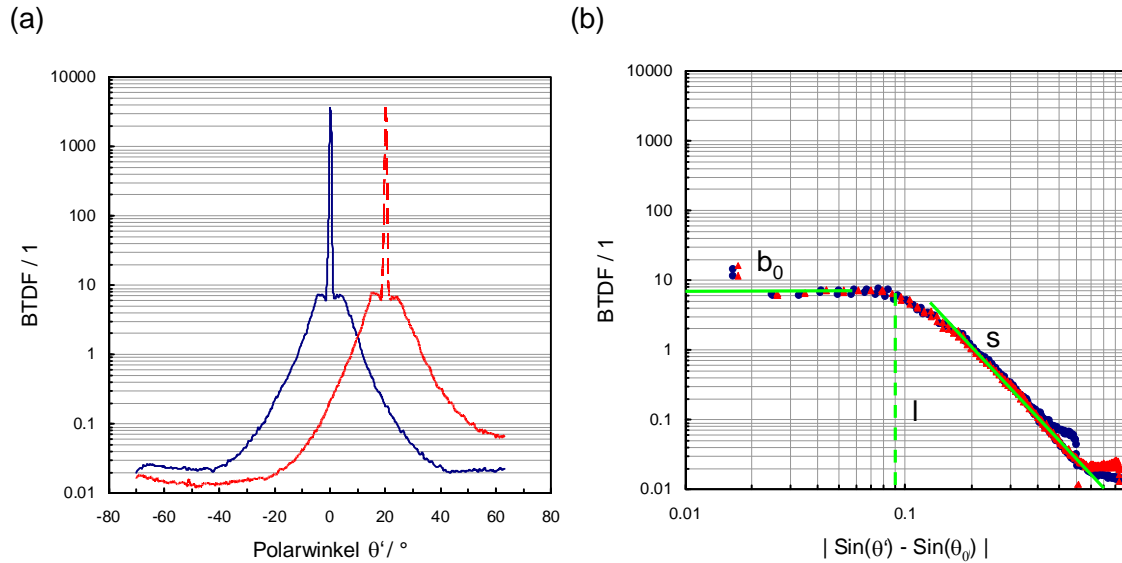


Abbildung 2.12: (a) Beispiel einer Messung eines Diffusors mit variierenden Einfallswinkeln in Transmission. Als Beispiel $\theta_0 = 0^\circ$ (Volllinie) und $\theta_0 = 20^\circ$ (Strichlinie). (b) Auftragung der Messung aus (a) in das Harvey-Modell. Die Daten werden zentriert um den Einfallswinkel und doppellogarithmisch dargestellt. Eine Ausgleichsrechnung mit Gleichung 2.40 ergibt einen Achsenabschnitt $b_0 = 7$, eine Steigung von $s = -4,5$ sowie den Schulterparameter $l = 0,09$.

Verteilung (ohne spekularen Anteil). Mithilfe der Steigung s wird bestimmt, ob es sich bei dem Diffusor um einen schmal- oder breit abstrahlenden Streukörper handelt. Der Schulterparameter l hingegen gibt an, ab welchem Winkel die deutliche Reduzierung der Leistung beginnt. Für die vorherige exemplarische Messung ergibt die Ausgleichsrechnung mit der Harvey-Funktion folgende Werte: $b_0 = 7$, $s = -4,5$ sowie $l = 0,09$. Eine Beschreibung des reflektierten Anteils R erfolgt analog zu dem beschriebenen Vorgehen. Die Ergebnisse der Simulation der Lichtausbreitung durch die Auskoppeloptik, beschrieben durch das Harvey-Modell, befinden sich in Kapitel 4.3.

Grundsätzlich ist es möglich die Oberfläche von Diffusoren messtechnisch (z.B. mittels Rasterelektronenmikroskopie) zu erfassen und als charakteristisches Merkmal die mittlere Rauheit R_m zu bestimmen. Dieser Wert stellt das arithmetische Mittel der Höhenabweichungen einer gemittelten Fläche zu jedem Höhenmesspunkt der Oberfläche dar. Für die Simulation des optischen Verhaltens eines Diffusors ist dieses Merkmal jedoch nicht aussagekräftig genug, aufgrund des sehr beschränkten Messfeldes [57]. Folglich wird ein näherer Zusammenhang zwischen den Harveyparametern

und der mittleren Rauheit nicht weiter untersucht.

2.4 Elektrodynamische Feldsimulation der Anode

In den vorangegangenen Kapiteln erfolgte die mathematische Beschreibung der Lichtausbreitung aus dem OLED-Schichtsystem durch die Anode bis hin zur anwendungsspezifischen Strahlformungsoptik. Für die Realisierung einer effizienten und homogenen OLED ist zusätzlich eine Beschreibung der elektrischen Prozesse in der Anode notwendig.

Im Gegensatz zu anorganischen Leuchtdioden, bei denen eine mittige Kontaktierung über Bonddrähte möglich ist, erfolgt bei der OLED die elektrische Kontaktierung nur über die Ränder (Abbildung 2.13, a). Somit wird gewährleistet, dass keine Abschattung der emittierenden Fläche erfolgt. Aufgrund der endlichen Leitfähigkeit der Anode resultiert bei dieser Kontaktierungsart ein Spannungsabfall vom Rand zur Mitte hin. Die inhomogene Spannungsverteilung führt zu einer korrespondierenden Leuchtdichteinhomogenität der OLED (Abbildung 2.13, b).

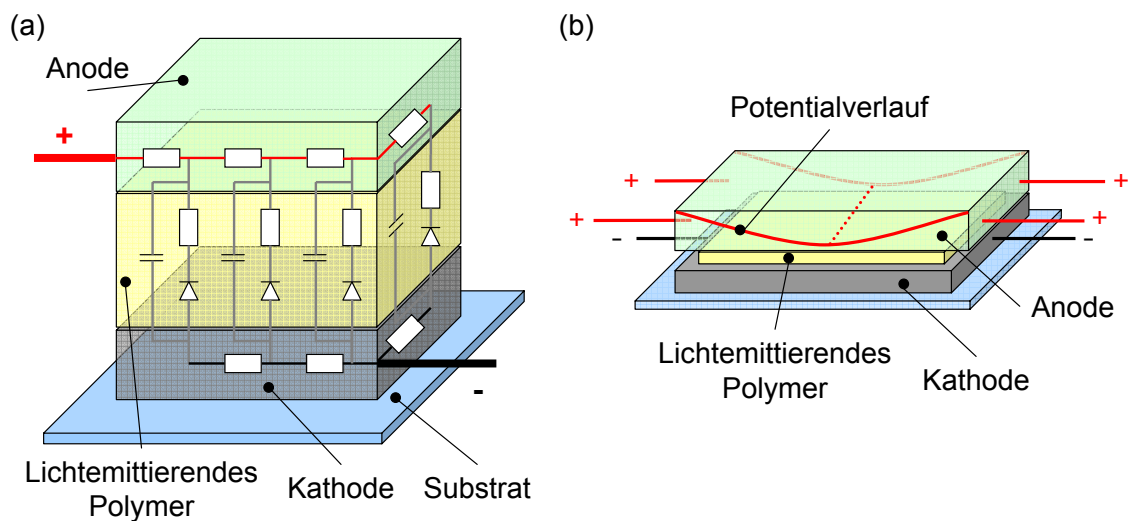


Abbildung 2.13: (a) Veranschaulichung des Ersatzschaltbildes für eine OLED. (b) Aufgrund der begrenzten Leitfähigkeit des Anodenmaterials kommt es zu einem Potentialabfall innerhalb der Anode.

Für die Berechnung der Potentialverteilung in der Anode muss das Ersatzschaltbild der Diode [58] aus Abbildung 2.15, b zu einem Widerstands- und Kapazitätsnetz erweitert werden (siehe Abbildung 2.13, a). Auf Basis der Laplace-Gleichung, welche die Potentialverteilung im ladungsfreien Raum beschreibt, wird im Folgenden eine

partielle Differentialgleichung (DGL) hergeleitet, die das RC-Netz der OLED abbildet. Mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) erfolgt in Kapitel 4.2 die numerische Lösung der DGL in Abhängigkeit des OLED Layouts.

Zunächst wird für die elektrische Simulation ein idealisierter Aufbau der OLED angenommen. Er besteht aus der transparenten Anode mit der Dicke d_{anode} und der spezifischen Leitfähigkeit der Anode σ_{anode} , welche zunächst lateral konstant bleibt ($d_{anode}(x, y) = konst.$, $\sigma_{anode}(x, y) = konst.$). Darunter liegt die halbleitende organische Emitterschicht mit ihrer Dicke $d_{emitter}$ sowie spezifischen Leitfähigkeit $\sigma_{emitter}$. Die letzte für das Modell relevante Schicht ist die metallische Kathode mit der sehr hohen spezifischen Leitfähigkeit $\sigma_{kathode}$ (Abbildung 2.14, a). Aufgrund $\sigma_{kathode} \gg \sigma_{anode}$ wird der laterale Spannungsabfall in der Kathode nicht berücksichtigt und das Potential auf $U = 0$ V gesetzt.

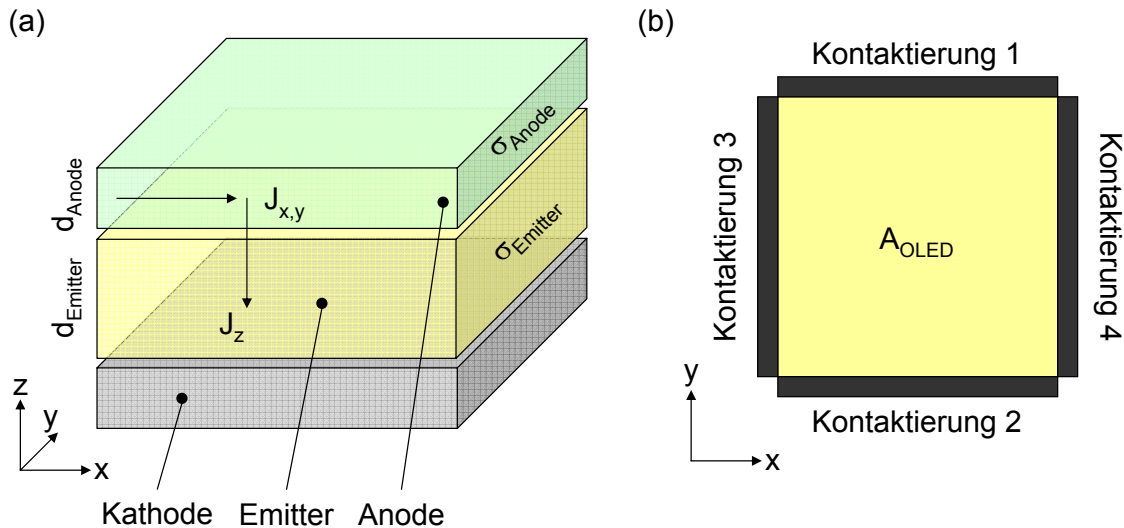


Abbildung 2.14: (a) Vereinfachung des Schichtsystems für die elektrische Beschreibung des Stromflusses. (b) Kontaktierungsmöglichkeiten der Anode, welche einen starken Einfluss auf die Potentialverteilung aufweist.

Für eine weitere Vereinfachung des Modells wird eine rechteckige Form der OLED festgelegt, welche eine Fläche von A_{OLED} aufweist. Diese Vereinfachung führt zu drei möglichen Kontaktierungskonfigurationen der Anode (siehe Abbildung 2.14, b):

- nur eine Kontaktierung (1, 2, 3 oder 4)
- nur zwei Kontaktierungen (1 und 2) oder (3 und 4)
- alle vier Kontaktierungen (1, 2, 3 und 4)

Aufgrund der Unsymmetrie der resultierenden Potentialverteilung wird von der Kontaktierungsart (1 und 4) sowie (3 und 2) abgesehen. Die Wahl der Kontaktierung hat folglich direkt einen Einfluss auf die berechnete Potentialverteilung in der Anode. Offensichtlich ist jedoch, dass die Verbindung aller Kontaktierungen mit der Stromquelle die homogensten Ergebnisse hervorbringt.

Um das mathematische Modell weiter zu vereinfachen, wird das Potential innerhalb der Anode, entlang der z -Achse als konstant angesehen $U(x, y, z) = U(x, y)$. Folglich lässt sich die Stromdichte in der Anode J_{anode} beschreiben durch:

$$J_{anode}(x, y) = -\frac{\partial}{\partial x, y} (\sigma_{anode} \cdot U_{anode}(x, y)) \quad (2.41)$$

Unter der Voraussetzung, dass der Stromfluss innerhalb des Emitters orthogonal zur OLED-Fläche verläuft und sich nicht entlang der z -Achse ändert $J_{emitter}(x, y, z) = J_{emitter}(x, y)$, lässt sich die Stromdichte im Emitter $J_{emitter_z}$ vereinfacht berechnen. Entsprechend des Ohmschen Gesetzes und der Voraussetzung, dass $J_{emitter_z}$ sich proportional zum Gradienten des elektrischen Feldes verhält, ergibt sich folgende Stromdichte:

$$J_{emitter_z}(x, y) = -\sigma_{emitter} \frac{\partial}{\partial z} U(x, y, z) = -\sigma_{emitter} \frac{U_{anode}(x, y)}{d_{emitter}} \quad (2.42)$$

Basierend auf den Kirchhoffschen Gesetzen [59] lässt sich nun die Stromdichte im Emitter wie folgt beschreiben:

$$\frac{\partial}{\partial x} (d_{anode}(x, y) \cdot J_{anode_x}(x, y)) + \frac{\partial}{\partial y} (d_{anode}(x, y) \cdot J_{anode_y}(x, y)) = -J_{emitter_z}(x, y) \quad (2.43)$$

Durch Nutzung der Gleichungen 2.41 - 2.43 lässt sich die Differentialgleichung zur Berechnung der lateralen Potentialverteilung in der Anode $U_{anode}(x, y)$ wie folgt aufstellen:

$$\begin{aligned}
 & \operatorname{div}_{x,y}(d_{anode}(x,y) \cdot \operatorname{grad}_{x,y}(\sigma_{anode}(x,y) \cdot U_{anode}(x,y))) \\
 &= \frac{1}{A_{OLED} \cdot R_{emitter}} U_{anode}(x,y) \\
 R_{emitter} &= \frac{d_{emitter}}{\sigma_{emitter} \cdot A_{OLED}} \approx R_{OLED}
 \end{aligned} \tag{2.44}$$

Die Simulationsergebnisse sowie eine weiterführende Beschreibung der numerischen Lösung von Gleichung 2.44 befinden sich in Kapitel 4.2.

2.5 Treiberelektronik für Leuchtdioden

Für die Entwicklung eines elektronischen Treibers speziell für organische Leuchtdioden ist es zunächst nötig, das Bauteil elektrisch zu charakterisieren, um eine entsprechende Dimensionierung des Treibers vornehmen zu können. Wie bereits in Kapitel 2.1 geschildert, handelt es sich bei der OLED um ein Dünnschichtsystem mit organisch-halbleitendem Material. Aus diesem Grund ist es legitim, in erster Näherung die OLED als normale anorganische Diode zu betrachten und das korrespondierende Ersatzschaltbild [58] heranzuziehen (Abbildung 2.15, a). Zur Vereinfachung des Modells werden der elektrische Widerstand der einzelnen Schichten, der Kontaktierungswiderstand sowie der geringe Leitungswiderstand zu einem Bahnwiderstand R_B zusammengefasst. Die Diffusionskapazität, welche die in den Schichten gespeicherte Diffusionsladung repräsentiert, wird durch den Kondensator C_{DD} beschrieben. Des Weiteren werden die kapazitiven Eigenschaften der Grenzflächen zu der Sperrschichtkapazität C_S zusammengefasst. Eine Differenzierung im Modell erfolgt bei den Diodenströmen. Zum einen beschreibt I_{DD} den Stromanteil, der ohne Exzitonenbildung durch das Polymer fließt (Kriechstrom), und zum anderen charakterisiert I_{DR} den Stromfluss, bei dem eine Rekombination erfolgt. Um möglichst effiziente Bauteile zu realisieren ist es nötig, dass $I_{DR} \gg I_{DD}$ ist. Wie bereits in Kapitel 2.1 geschildert, ist dies durch Verwendung eines Fünfschichtsystems möglich. Abbildung 2.2, b visualisiert hierfür die Energieniveaus. In dem Fall, dass die OLED in Sperrrichtung betrieben wird, ist in dem Ersatzschaltbild eine spannungsgeregelte Stromquelle vorgesehen, welche den Stromfluss I_{DBR} nach Erreichen der Durchbruchspannung realisiert.

Zusammenfassend lässt sich die OLED als ein Bauteil mit einer kapazitiven Wirkung sowie einem elektrischen Widerstand beschreiben (RC-Glied). Die Bestimmung dieser physikalischen Größen wird im Folgenden erläutert. Um eine Messung des

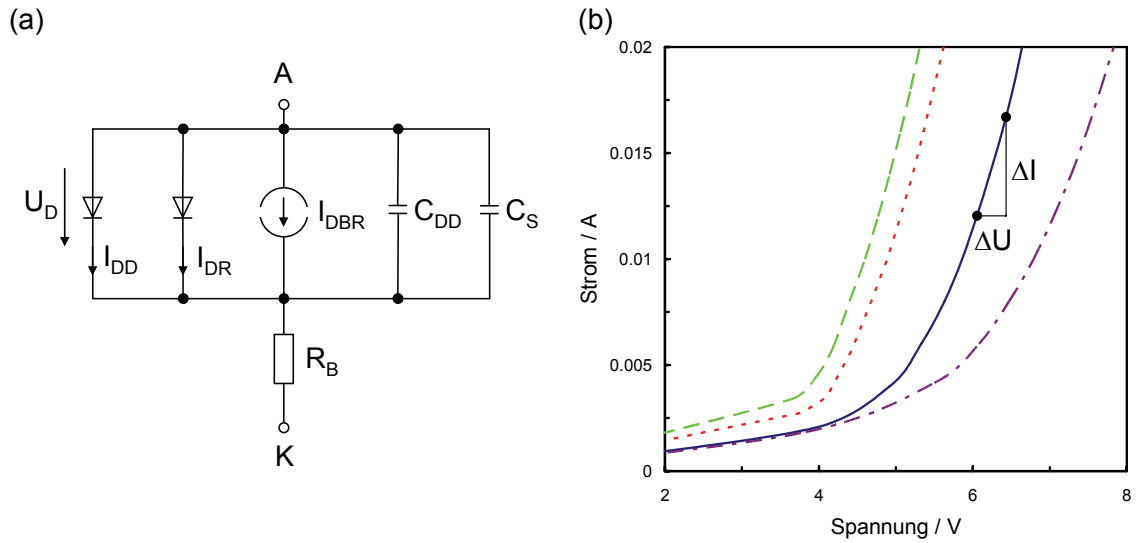


Abbildung 2.15: (a) Vollständiges elektrisches Modell einer Diode, gemäß [58]. Mit den wichtigen Kenngrößen des Bahnwiderstands R_B , Sperrschichtkapazität C_S sowie Rekombinationsstrom I_{DR} . (b) Strom-Spannung-Kennlinie verschiedener OLED Muster mit variierenden Schichtsystemdicken. Dies führt zu unterschiedlichen differentiellen Widerständen R_B von 87Ω (Volllinie), 75Ω (Strichlinie), 76Ω (Punktlinie) sowie 111Ω (Strichpunktlinie).

elektrischen Widerstandes R_B vorzunehmen, wird die OLED mit einer konstant ansteigenden Spannung betrieben und der resultierende Stromfluss gemessen. Die Auftragung der Messergebnisse führt zu einer typischen Strom-Spannung-Kennlinie einer Diode (Abbildung 2.15, b). Für den jeweiligen Arbeitsbereich, in dem der differentielle Widerstand konstant ist, erfolgt eine lineare Ausgleichsrechnung mit den Messdaten. Die resultierende reziproke Steigung der Geraden ist der zu bestimmende Bahnwiderstand R_B entsprechend des Ohmschen Gesetzes $R_B = \Delta U / \Delta I$.

Für die Bestimmung der kapazitiven Größe C_S ist es nötig, das Ladeverhalten der OLED zu analysieren. Zu diesem Zweck wird das Bauteil mit einer Rechteckspannung betrieben und der Spannungsverlauf aufgenommen. Dabei wirkt die OLED als Tiefpassfilter, welcher das Signal zeitlich verzögert (Abbildung 2.16, a).

Die Zeitdauer die benötigt wird, um ca. 63 % der Maximalspannung zu erreichen, wird als Zeitkonstante τ bezeichnet. Mithilfe einer exponentiellen Ausgleichsrechnung gemäß Gleichung 2.45 ist es möglich die Zeitkonstante zu bestimmen.

$$U_{laden}(t) = U_{max} \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad U_{entladen}(t) = U_{max} \cdot e^{-t/\tau} \quad (2.45)$$

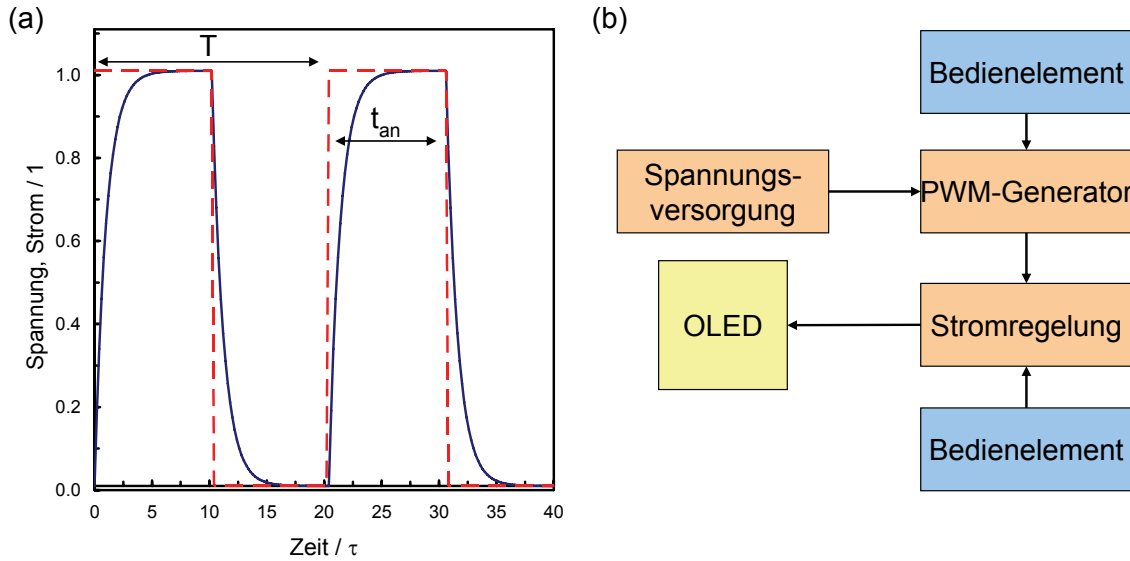


Abbildung 2.16: (a) Resultierender Stromverlauf (Volllinie) beim Betrieb der OLED mit einer Rechteckspannung (Strichlinie). Die Zeitkonstante $\tau = R \cdot C$ ergibt sich aus der Dauer, die benötigt wird, bis ca. 63 % der Maximalspannung erreicht ist. Nach einer Zeit von ca. 5τ ist die Maximalspannung erreicht. (b) Schematischer Aufbau der benötigten Komponenten für einen universalen OLED Treiber.

Unter der Annahme, dass es sich bei der OLED um ein RC-Glied handelt, kann durch Verwendung des Bahnwiderstandes R_B und der Zeitkonstanten τ die Kapazität C_S entsprechend Gleichung 2.46 berechnet werden.

$$C_S = \tau / R_B \tag{2.46}$$

Hieraus resultiert unmittelbar die maximale Frequenz, mit der die OLED gepulst betrieben werden kann. Sie wird durch die Grenzfrequenz f_c gemäß Gleichung 2.47 beschrieben.

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R_B \cdot C_S} = \frac{1}{2\pi \cdot \tau} \tag{2.47}$$

Aufgrund der Vorüberlegungen, dass die OLED ein typisches Diodenverhalten aufweist, lassen sich die im Folgenden geschilderten Betriebsvorschriften ableiten. Würde

man die OLED mit einer konstanten Spannung betreiben, verursacht der variierende differentielle Widerstand (Abbildung 2.15, b) des Bauteils einen unterschiedlichen Stromfluss. Folglich ist es möglich, dass die maximal zulässige Stromdichte im Polymer überschritten wird und eine Schädigung der OLED verursacht. Gerade die Betriebstemperatur sowie das Alter der OLED haben einen zusätzlichen Einfluss auf den differentiellen Widerstand. Aus diesem Grund ist es unabdingbar, dass die OLED stromregelt betrieben werden muss, um eine gleich bleibende Leuchtdichte zu gewährleisten. Ein diskretes Beispiel für eine klassische Stromregelung, basierend auf einem Operationsverstärker und einem FET [60], ist in Abbildung 2.17 gezeigt [58].

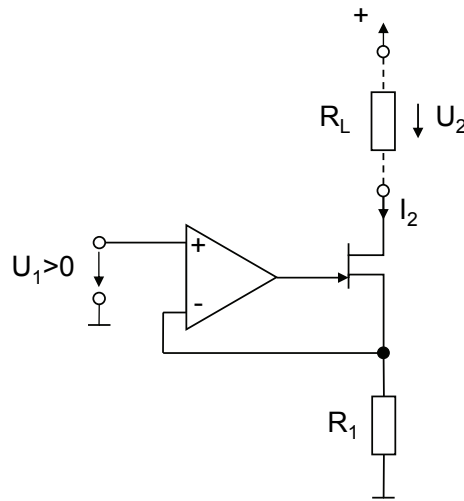


Abbildung 2.17: Diskreter Aufbau einer Stromregelung, basierend auf einem Operationsverstärker sowie einem FET, gemäß [58].

Bei dieser Schaltung stellt sich die Ausgangsspannung des Operationsverstärkers derart ein, dass die Spannung an dem Messwiderstand R_1 äquivalent der Spannung U_1 ist. Folglich ist der Ausgangsstrom I_2 gleich dem Strom durch R_1 . Mittels geeigneter Wahl des Widerstandes R_1 lässt sich die Stromstärke, die durch die OLED fließt einstellen.

$$I_2 = U_1/R_1 \tag{2.48}$$

Durch diese Kombination des Operationsverstärkers mit dem FET ist ein linear definierter Zusammenhang zwischen der Eingangsspannung und dem Ausgangsstrom realisiert. Allgemein betrachtet besitzen solche Linearregler einen einfachen Aufbau,

können allerdings schlechte Wirkungsgrade bei hohen Strömen aufweisen. Die resultierende Verlustleistung wird in Form von Wärme abgegeben, und eventuell werden komplexe Kühlkonzepte benötigt [61]. Alternative Schaltregler dagegen besitzen sehr gute Wirkungsgrade, sind aber im diskreten Aufbau komplexer und werden aus diesem Grund in dem Kapitel nicht weiter betrachtet.

Gemäß des Anspruchs dieser Arbeit (Kapitel 1), eine hochwertige Beleuchtung zu realisieren, ist es unerlässlich das Dimmen der OLED mithilfe des Treibers zu ermöglichen. Die nächstliegende Möglichkeit hierfür ist die Reduzierung der OLED Stromstärke. Für das diskrete Schaltungsbeispiel aus Abbildung 2.17 bedeutet dies die Verkleinerung der Eingangsspannung U_1 . Die Differenz der Leistung muss jedoch über den FET in Form von Wärme abgeführt werden. Folglich reduziert sich die gesamte Energiebilanz der Beleuchtung, weil die resultierende Wärmeleistung nicht zur Lichtleistung beiträgt. Eine Möglichkeit dies abzuwenden und somit die Effizienz zu steigern, ist der gepulste Betrieb der OLED mit Frequenzen $f > 300$ Hz [62] (Abbildung 2.16, a). Aufgrund der Trägheit des Auges werden die einzelnen Lichtpulse nicht wahrgenommen, und über das Verhältnis der An-Zeit (t_{an}) zur Periodendauer T kann der Helligkeitseindruck eingestellt werden (duty-cycle: $DC = t_{an}/T$). Diese Betriebsart wird Pulsweitenmodulation (PWM) genannt und hat den Vorteil, dass die Stromstärke konstant gehalten werden kann. Ein diskretes Schaltungsbeispiel für einen Funktionsgenerator, bei dem nur das Rechtecksignal als PWM-Generator benutzt wird, ist in Abbildung 2.18 gemäß [58] dargestellt.

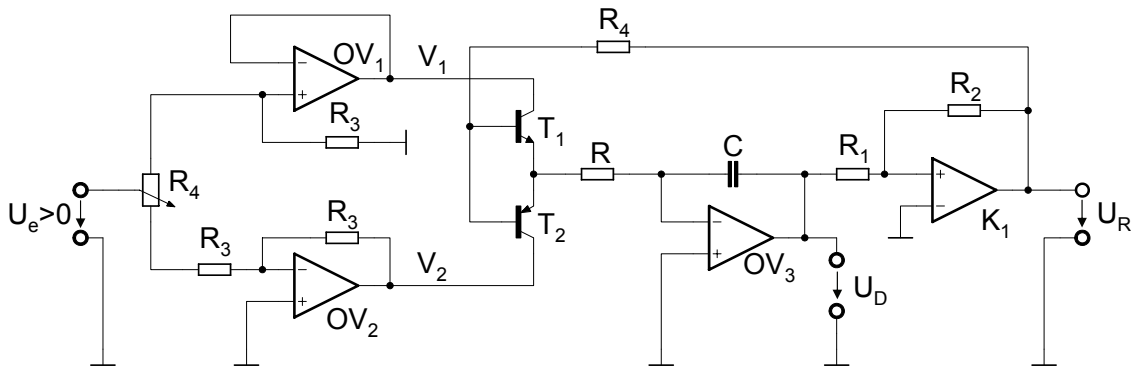


Abbildung 2.18: Diskreter Aufbau eines PWM-Generators mit steuerbarer Frequenz und variablem Tastverhältnis [58].

Grundlegend für diese Schaltung ist die Variation der Spannungen V_1 und V_2 , welche über die Transistoren T_1 und T_2 an den Eingang eines Integrators gelegt

werden. Durch gezielte Auswahl der Kapazitäten sowie Widerstände ist es mit dieser Schaltung möglich, die Frequenz f des Rechtecksignals (Gleichung 2.49) sowie das Tastverhältnis DC einzustellen. Für die Konfiguration $R_4 = 3R_3$ ist es möglich, das Tastverhältnis mittels R_4 zwischen 20 % und 80 % zu variieren.

$$f = \frac{R_3}{2RC(2R_3 + R_4)} \cdot \frac{U_e R_2}{U_{R_{max}} R_1} \quad (2.49)$$

Abstrakt betrachtet besteht ein universaler OLED-Treiber aus drei Funktionsgruppen und zwei Bedienelementen (Abbildung 2.16, b). Zu den Funktionsgruppen zählen die Elemente Spannungsversorgung, PWM-Generator sowie Stromregelung. Die Bedienelemente (beispielsweise Potentiometer) werden für die Einstellung des Tastverhältnisses (DC) sowie der Stromstärke benötigt.

In diesem Kapitel sind diskrete Schaltungsbeispiele für die Funktionsgruppen PWM und Stromregelung demonstriert und erläutert worden. In der Praxis empfiehlt sich jedoch die Verwendung komplexer integrierter Schaltkreise (IC) für die Realisierung der einzelnen Funktionen. Durch ihren Einsatz ist es möglich, die Platinengröße sowie Herstellungskosten zu optimieren. Zusätzlich erhöht dies die Lebensdauer des Treibers aufgrund der geringeren Anzahl an benötigten Bauteilen. In Tabelle 2.3 sind daher exemplarisch einige kommerzielle PWM-IC aufgelistet.

Tabelle 2.3: Auflistung einiger kommerziell erhältlicher ICs, die als PWM-Generator dienen.

Hersteller	IC	Bemerkung
ST	SG1524	Duty Cycle bis 100 %
Maxim	MAX038	Duty Cycle von 15 % bis 85 %
Atmel	U2352B	MOSFET integriert
TI	TL494	Duty Cycle bis 90 %

Eine detaillierte Beschreibung zur Umsetzung der Funktionsgruppen zu einem OLED-Treiber sowie die damit erzielten Ergebnisse im Betrieb sind in Kapitel 4.5 beschrieben.

3 Messtechnik

In diesem Kapitel werden die verwendeten Messmittel beschrieben, die zur vollständigen lichttechnischen Charakterisierung der OLED benötigt werden. Anhand der Messergebnisse ist es einerseits möglich, die Simulationen mit den entsprechenden Randbedingungen zu initialisieren, andererseits dienen die Messungen zum Abgleich der Simulation mit der Realität. Für jedes Messmittel erfolgt eine Abschätzung der erreichbaren Messgenauigkeit.

Das letzte Unterkapitel 3.5 behandelt die Auswertung eines lichttechnischen Ringversuchs. Hierbei wurden verschiedene Messmittel der beteiligten Firmen verglichen und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse anhand eines OLED Musters untersucht.

3.1 Spektral sensitive Verfahren

Wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt, ist die spektrale Zusammensetzung einer weiß emittierenden OLED für die Qualität der Beleuchtung entscheidend. Die Messungen der Emissionsspektren in dieser Arbeit erfolgten durch Verwendung eines Spektroradiometers Typ: Specbos 1201 von der Firma JETI Technische Instrumente GmbH, Jena (Abbildung 3.1, a).

Bei dieser Art von Spektrometer wird die Strahldichte (Kapitel 2.2) als Funktion der Wellenlänge innerhalb eines definierten Feldes gemessen. Eine absolute Messung der Strahldichte erfolgt jedoch nur, wenn die zu messende leuchtende Fläche größer ist als das Messfeld des Spektrometers. Dieses wird über eine Feldlinse auf $1,8^\circ$ begrenzt. Licht, welches innerhalb dieses Kegels in das Spektrometer fällt, wird in eine Faser eingekoppelt. Das Faserende dient hierbei als Spalt, der über ein komplexes Gitter, basierend aus Konkavspiegel und diffraktivem Gitter, auf den Detektor abgebildet wird (Abbildung 3.1, b). Für die Justage der OLED relativ zum Messfeld wird über einen Strahlteiler ein Pilotlaserstrahl mit einem Divergenzwinkel von $1,8^\circ$ in den Messstrahlengang eingekoppelt.

Gemäß dem Datenblatt des Herstellers lassen sich folgende technische Daten zusammenfassen [63]:

- Wellenlängenbereich: 380 nm bis 780 nm

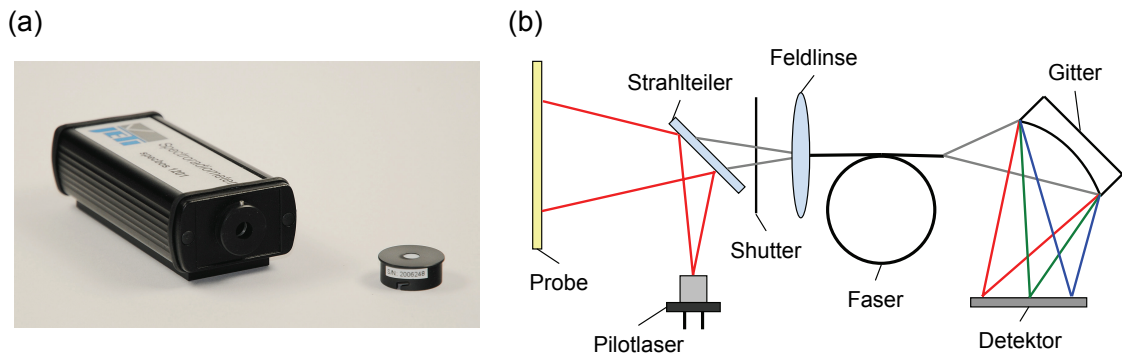


Abbildung 3.1: (a) Spektroradiometer specbos 1201 der Firma Jeti. (b) Schematischer Aufbau eines Spektroradiometers. Mithilfe einer Feldlinse wird ein Messfeld definiert und der Strahlungsfluss in eine optische Faser eingekoppelt. Das Faserende wird über ein komplexes Gitter auf den ortsaufgelösten Detektor abgebildet. Der Pilotlaser dient zur Justage des Messfeldes.

- Spektrale Auflösung: 5 nm
- Gesichtsfeld: $1,8^\circ$
- Leuchtdichte Messbereich: 2 cd/m^2 bis $7 \cdot 10^4 \text{ cd/m}^2$
- Leuchtdichte Messgenauigkeit: 2 % (bei 1000 cd/m^2 für Normlichtart A (2856 K))
- Farbgenauigkeit (x, y): $\pm 0,002$ (für Normlichtart A (2856 K))

Für eine Messung des Spektrums wird die OLED auf einen Kühlkörper aufgebracht, um möglichst gleichmäßige Temperaturen während der Messung gewährleisten zu können. Ortsaufgelöste Messungen (Kapitel 3.2) haben gezeigt, dass eine inhomogene Temperaturverteilung sich direkt auf die laterale Leuchtdichteverteilung der OLED auswirkt. Über den Abstand der OLED zum Spektrometer wird die Größe des Messfeldes definiert. Beispielsweise wird für einen Messfeld-Durchmesser von 6,3 mm ein Abstand von 20 cm benötigt. Mithilfe des Pilotlasers und dessen Rückreflex an der Glasoberfläche der OLED kann überprüft werden, ob die Anordnung unter beispielsweise 0° justiert ist. Die elektrische Versorgung erfolgt über eine geregelte Konstantstromquelle (Kapitel 2.5).

Die Messergebnisse verschiedener weiß emittierender Proben sind in Abbildung 3.2, a gezeigt. Bei der Auftragung der Spektren ist das Integral über den sichtbaren Wellenlängenbereich (ohne $v(\lambda)$ Gewichtung) auf eins normiert, um die unterschiedlichen

spektralen Zusammensetzungen herauszuarbeiten. Entsprechend der Berechnungen aus Kapitel 2.2 lässt sich das Spektrum zu einem Farbort (CIE x, y) reduzieren und diesen in die Normfarbtafel eintragen (Abbildung 3.2, b). Des Weiteren ist die Berechnung der correlated color temperature (CCT) nötig, um die Farbwiedergabeeigenschaften des Spektrums zu berechnen. Alle wichtigen lichttechnischen Merkmale sind für die vier Muster in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

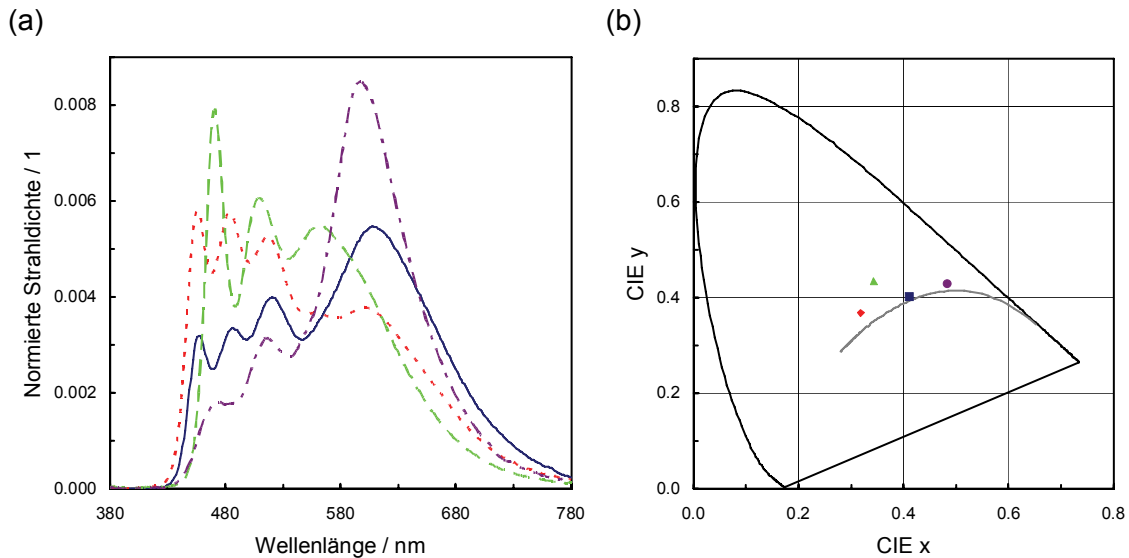


Abbildung 3.2: (a) Messung von verschiedenen OLED Spektren. Zur Verdeutlichung der Ungleichheiten der weißen Spektren ist das Integral der wellenlängenabhängigen Strahllichtdichte auf 1 normiert. Es wurden gemessen Merck LEP1 (Volllinie), Merck LEP2 (Punktlinie), Merck LEP3 (Strichlinie) sowie OSRAM ORBEOS (Strichpunktlinie). (b) Auftragung der CIE x, y Farbkoordinaten der verschiedenen OLED Spektren aus (a) in die Normfarbtafel mit Planckzug (Volllinie). Verwendet wurden: Merck LEP1 (Quadrat), Merck LEP2 (Raute), Merck LEP3 (Dreieck) sowie OSRAM ORBEOS (Kreis).

Tabelle 3.1: Ergebnisse der Berechnung einiger lichttechnischen Kenngrößen, durchgeführt für die gemessenen Spektren aus Abbildung 3.2.

Polymer Typ	CIE x	CIE y	CCT / K	$R_a(CCT)/1$
Merck LEP1	0,410	0,404	3503	90
Merck LEP2	0,319	0,368	6045	87
Merck LEP3	0,343	0,435	5246	68
OSRAM ORBEOS	0,483	0,431	2559	75

3.2 Ortsaufgelöste Lichtmesstechnik

Entsprechend der zuvor geschilderten spektralen Messmethode ist auch bei diesem Verfahren das Ziel, die Leuchtdichte der OLED unter einem definierten Winkel (beispielsweise 0°) zu bestimmen. Jedoch wird bei dieser Messung die Leuchtdichte nicht über ein $1,8^\circ$ begrenztes Messfeld gemittelt, sondern aufgrund einer optischen Abbildung wird die laterale Verteilung der OLED auf einen Flächensensor übertragen. Folglich steht jeder Bildpunkt für einen kleinen Messbereich auf der OLED. Mithilfe einer Leuchtdichtekamera des Typs LMK 98-4 color der Firma TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Ilmenau (Abbildung 3.3, a) sind die Messungen der lateralen Leuchtdichteverteilung der OLED Proben durchgeführt worden.

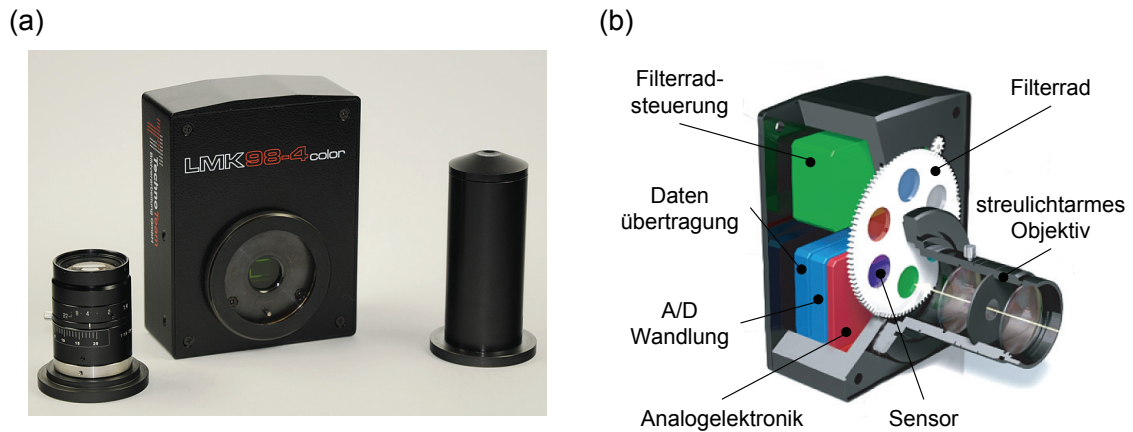


Abbildung 3.3: (a) Leuchtdichtekamera LMK 98-4 color der Firma TechnoTeam. Für die lateralen Messungen der Leuchtdichte wird ein kalibriertes Objektiv mit der Brennweite $f'=25$ mm verwendet (links). Eine winkelabhängige Messung erfolgt durch den Gebrauch des Konoskops (rechts). (b) Darstellung des schematischen Aufbaus einer Leuchtdichtekamera, mit der Möglichkeit den Farbort (CIE x, y) zu bestimmen. Quelle [64]

Um eine absolute Messung der Leuchtdichte durchführen zu können, muss das Messsystem die gleiche spektrale Hellempfindlichkeit wie das menschliche Auge aufweisen (Abbildung 2.4, a (Strichlinie)). Dies ist hingegen bei CCD bzw. CMOS Sensoren nicht gegeben. Bei spektral sensitiven Methoden erfolgt aus diesem Grund die Gewichtung mit $\bar{y}(\lambda)$ innerhalb der Software. Jedoch steht bei der ortsaufgelösten Kameramesstechnik die spektrale Information nicht zur Verfügung, sodass die Gewichtung über speziell angepasste Transmissionsfilter realisiert werden muss. Für eine Messung des Farborts (CIE x, y) wird eine Anpassung an das Farbpfinden des Auges über weitere Transmissionsfilter entsprechend der Funktionen $\bar{z}(\lambda)$ sowie

$\bar{x}(\lambda)$ benötigt.

Die für die Filterung benötigte Signaltrennung in \bar{z} , \bar{y} sowie \bar{x} erfolgt bei der Leuchtdichtekamera LMK 98-4 color zeitlich über ein Filtrerrad. Bei der Auswertung werden die verschiedenen gefilterten Bilder zu einem Bild basierend auf den X, Y, Z Farbwerten zusammengefasst. Alternative Methoden sind die örtliche Signaltrennung in Form von speziellen Bayer Filtern oder die optische Signaltrennung mithilfe von Strahlteilern. In Abbildung 3.3, b ist der schematische Aufbau der Kamera mit Filtrerrad visualisiert.

Gemäß dem Datenblatt des Herstellers lassen sich folgende technische Daten erzielen [64].

- laterale Auflösung: 1380 (H) x 1030 (V); Chipgröße: 10,2 mm x 8,3 mm
- Dynamikbereich: 1:10000000 (≈ 140 dB)
- Leuchtdichte Messgenauigkeit: 3 % (für Normlichtart A (2856 K))
- Farbgenauigkeit (x,y): $\pm 0,002$ (für Normlichtart A (2856 K))

Für eine Messung der lateralen Leuchtdichteverteilung der OLED muss die Probe, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, mit konstanten Betriebsparametern (Strom sowie Temperatur) betrieben werden. Die Leuchtdichtekamera wird unter einem definierten Winkel zur Probe justiert, wobei sich der Abstand nach dem benötigten Abbildungsmaßstab sowie der Brennweite des Objektivs richtet.

Das Ergebnis einer ortsaufgelösten Messung mit hohem Dynamikbereich am Beispiel der OSRAM ORBEOS OLED ($\varnothing = 79$ mm) ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Der Betriebsstrom ist auf 186 mA geregelt. Über eine statistische Erhebung der Messdaten können charakteristische Merkmale wie die mittlere Helligkeit (Mittelwert), Homogenität (Standardabweichung) sowie minimale und maximale Leuchtdichte berechnet werden. Das Ergebnis der statistischen Auswertung für die ORBEOS OLED ist in Tabelle 3.2 zusammengefasst.

Tabelle 3.2: Zusammenfassung der statistischen Auswertung von der lateralen Leuchtdichtevermessung der ORBEOS OLED.

Probe	$L_{min}/ \text{cd/m}^2$	$L_{max}/ \text{cd/m}^2$	$\bar{L}_{arithm}/ \text{cd/m}^2$	$L_{\sigma}/ \text{cd/m}^2$
OSRAM ORBEOS	812	1067	957	38

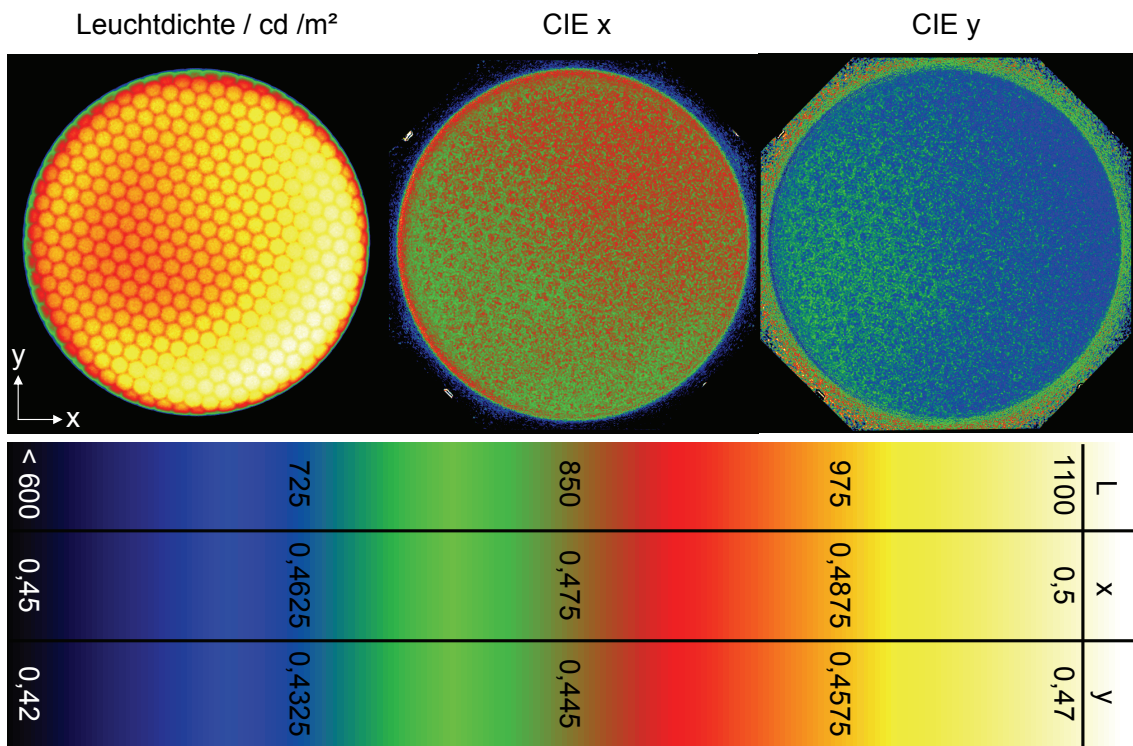


Abbildung 3.4: Eine Messung der lateralen Verteilung (x, y) von Leuchtdichte sowie Farbort CIE x, y der OSRAM ORBEOS OLED. Die Darstellung der drei Messungen erfolgt zur Verdeutlichung der Verläufe in Falschfarben. Die OLED ist mit einem Strom von 186 mA betrieben.

3.3 Winkelselektive Messtechnik

Die zuvor beschriebenen Messmethoden dienen zur Bestimmung der lateralen Leuchtdichteverteilung (Kapitel 3.2) sowie der Zusammensetzung der OLED Spektren (Kapitel 3.1). Dies erfolgte jedoch zunächst nur unter einem Beobachtungswinkel von 0° . Für die Simulation von Primär- und Sekundäroptiken ist hingegen die Kenntnis über die Winkelverteilung der Messgröße nötig. Diese kann im einfachsten Fall über eine Messanordnung aus Detektor (in einem Abstand r zur OLED) und einem Goniometer (Dreheinheit) bestimmt werden. Mittels des Goniometers werden sequentiell die Abstrahlwinkel eingestellt und die korrespondierende Beleuchtungsstärke \propto Lichtstärke der OLED gemessen. Unterteilt werden diese Messanordnungen in Nahfeldgoniometer sowie Fernfeldgoniometer. Bei Nahfeldgoniometern befindet man sich innerhalb der photometrischen Grenzfernung $r < r_p$ und bestimmt den

Entstehungsort sowie die Richtung der emittierten Strahlen. Die photometrische Grenzentfernung beispielsweise für eine lambertstrahlende Kreisscheibe wird über ihren Radius h bestimmt ($r_p = 10 \cdot h$) [65]. In Abhängigkeit der Strahlformoptik und der daraus resultierenden Lichtstärkeverteilung kann dieser Zusammenhang jedoch unzulässig werden, sodass in der Praxis Entfernungen gewählt werden, die das zehnfache des maximalen Durchmessers des Strahlers betragen [65]. Eine Messung von Nahfelddaten ist beispielsweise durch die Kombination von Goniometer und Leuchtdichtekamera möglich. Die Visualisierung eines solchen Strahlensatzes ist in Abbildung 3.5 am Beispiel einer Luxeon K1 LED gezeigt [66].

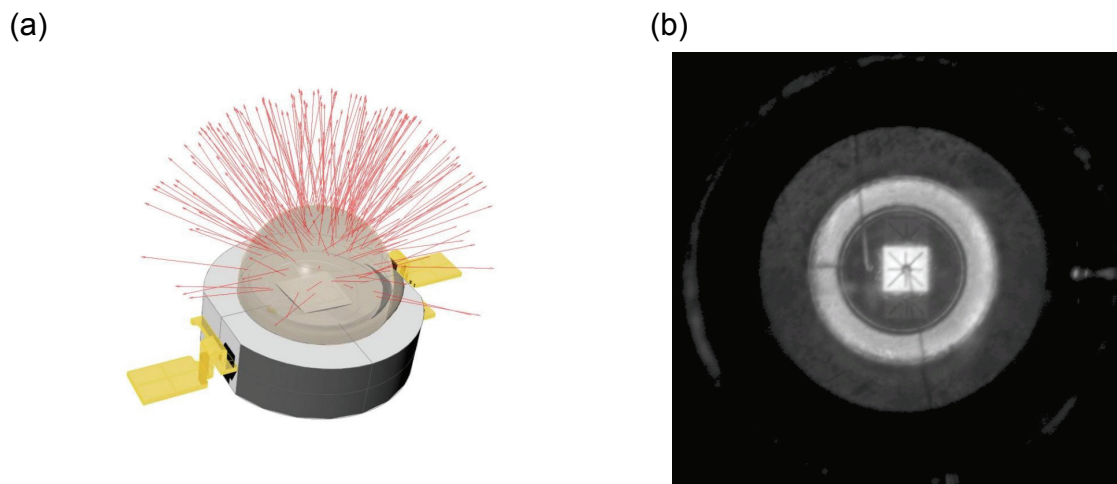


Abbildung 3.5: (a) Visualisierung eines Strahlendatensatzes der LED Luxeon K1, bestimmt durch eine Nahfeldgoniometermessung [66]. (b) Reduzierung der Strahlendaten auf den Entstehungsort der Strahlen unter 0° [49]. Bei den hellen Regionen verlassen mehr Strahlen die LED als bei den dunklen Bereichen.

Bei Fernfeldgoniometern befindet man sich außerhalb der photometrischen Grenzentfernung $r > r_p$ und betrachtet folglich die Lichtquelle als Punktlichtquelle, bei der die Lichtstärke nur eine Funktion des Emissionswinkels ist. Eine mögliche Messanordnung ist die Verwendung eines Goniometers in Verbindung mit dem Spektrometer (Kapitel 3.1). Aufgrund des großen Abstands zur Lichtquelle ist die Messung der Leuchtdichte mit diesem Spektrometer nicht mehr möglich (Größe der Lichtquelle $< 1,8^\circ$ begrenztes Messfeld des Spektrometers), sodass der Beleuchtungsstärkeaufsatz (Abbildung 3.1, a) verwendet werden muss. Die Lichtstärke I_v berechnet sich nun aus der mit dem Spektrometer gemessenen Beleuchtungsstärke E_v sowie dem Abstand r

zwischen Leuchte und Detektor.

$$I_v = E_v \cdot r^2 \quad (3.1)$$

Der systematische Messfehler der Lichtstärke beträgt bei dieser Anordnung ca. 1 % [65]. Im Gegensatz zu der beschriebenen sequentiellen Methode ist auch eine simultane Messung der Winkelverteilung möglich. Hierfür wird ein Spezialobjektiv (Konoskop) in Verbindung mit der Leuchtdichtekamera verwendet (Abbildung 3.3, a). Bei dieser Methode wirkt das Konoskop wie eine einfache Linse, bei der sich die Punktlichtquelle in der objektseitigen Brennebene befindet. Die emittierten Strahlen werden durch die Linse kollimiert und treffen in der bildseitigen Brennebene auf den Flächensensor. Mittels dieser Anordnung charakterisiert jedes Pixel auf dem Sensor einen definierten Abstrahlwinkel (Raumwinkel) der Lichtquelle. Für den eindimensionalen Fall gilt der Zusammenhang zwischen dem Abstrahlwinkel θ , der Brennweite der Linse f' sowie der Pixelkoordinate $p_x = \tan \theta \cdot f'$ (Abbildung 3.6, a).

Unabhängig von den verwendeten Methoden ist es nötig, ein Koordinatensystem für die Lichtstärkeverteilung $I_v(\theta, \phi)$ in Bezug auf die Geometrie der Leuchte (OLED) zu definieren [67].

Zweckmäßig ist die Verwendung eines Kugelkoordinatensystems zur Beschreibung der Lichtstärkeverteilung. Die Definition der Achsen relativ zur Leuchte erfolgt im Allgemeinen durch den Hersteller bzw. das lichttechnische Messlabor. Entsprechend der Norm sollte jedoch die erste Leuchtenachse durch den Lichtschwerpunkt verlaufen und senkrecht auf der Lichtaustrittsfläche stehen (Abbildung 3.6, b). Die beiden weiteren Leuchtenachsen stehen jeweils senkrecht aufeinander und spannen das Koordinatensystem auf. Von der Vielzahl der möglichen Anordnungen haben sich zwei Systeme, das C-Ebenensystem sowie das B-Ebenensystem, etabliert. Das C-Ebenensystem (Abbildung 3.7) ist das zu bevorzugende Standardsystem, jedoch wird bei der Vermessung von Scheinwerfern das B-Ebenensystem (Abbildung 3.8) favorisiert.

Bei dem C-Ebenensystem steht, wie bereits erwähnt, die erste Achse senkrecht zur Hauptlichtaustrittsfläche und ist gleichzeitig die Schnittgerade der Ebenenbüschel (Polarachse). Die einzelnen Ebenen werden mit den Winkeln C_x bezeichnet und verlaufen von $0^\circ \leq C_x < 360^\circ$ (Abbildung 3.7). Innerhalb einer Ebene werden die Winkel durch γ von $0^\circ \leq \gamma < 180^\circ$ beschrieben. Emittiert eine Leuchte (OLED) nur in den vorderen Halbraum, verläuft γ von $0^\circ \leq \gamma < 90^\circ$. Für langgestreckte Leuchten wird die dritte Achse entsprechend der Lampenachse (geometrische Achse) ausgewählt. Fallen jedoch Lampenachse und erste Achse aufeinander, muss das Koordinatensystem derart definiert werden, dass die maximale Lichtstärke I_{max} in der C_0

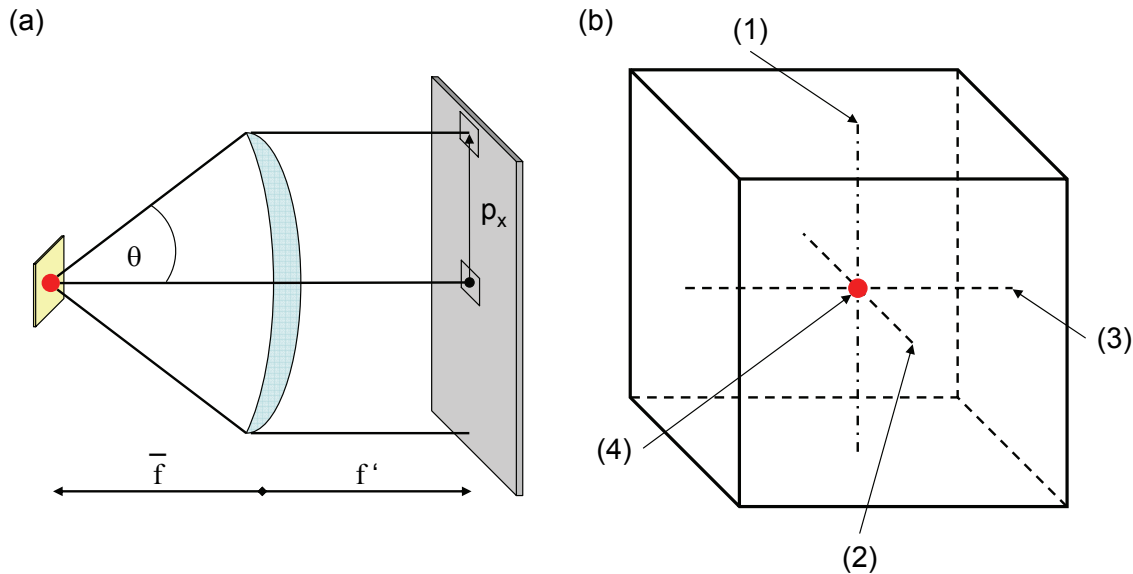


Abbildung 3.6: (a) Skizze des Funktionsprinzips eines einfachen Konoskops. (b) Definition des Koordinatensystems einer Leuchte. Gemäß der DIN [67] sollte die erste Achse (1) senkrecht auf der Lichtaustrittsfläche stehen und durch den Lichtschwerpunkt (4) verlaufen. Die beiden weiteren Achsen (2 und 3) stehen jeweils senkrecht zueinander (linear unabhängig).

Ebene liegt. Des Weiteren gilt, dass die C_0 sowie C_{180} Ebene die Lichtstärkeverteilung mit der höchsten Symmetrie aufweist.

Für das B-Ebenensystem hingegen ist die Schnittgerade der Ebenen (Polarachse) gleich der zweiten Leuchtenachse und nicht wie bei dem C-Ebenensystem die erste Achse. Die einzelnen Ebenen werden mit B_x von $-180^\circ \leq B_x < +180^\circ$ bezeichnet. Der Winkel innerhalb einer Ebene wird mit β von $-90^\circ \leq \beta < +90^\circ$ beschrieben (Abbildung 3.8). Für die in den Halbraum emittierende OLED verläuft B_x nur von $-90^\circ \leq B_x < +90^\circ$. Definitionsgemäß liegt die erste Achse in der B_0 Ebene, und deutet in Richtung $\beta = 0^\circ$. Analog zu dem C-Ebenensystem verläuft die maximale Lichtstärke in der B_0 Ebene und die größte Symmetrie besitzen die $B_0/B_{\pm 180}$ Ebenen.

Mittels der entsprechenden Koordinatentransformation ist eine Umrechnung von dem C-Ebenensystem in das B-Ebenensystem sowie umgekehrt möglich. Die Abbildungsvorschriften sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst.

Für die vollständige lichttechnische Charakterisierung der OLED ist zusätzlich zu der Lichtstärkeverteilungskurve (LVK) die Kenntnis über den Wirkungsgrad des Leuchtmittels nötig. Diese gibt an, wie effizient die elektrische Leistung $P_{el} = U \cdot I$ in, für das menschliche Auge nutzbare, optische Leistung umgewandelt wird.

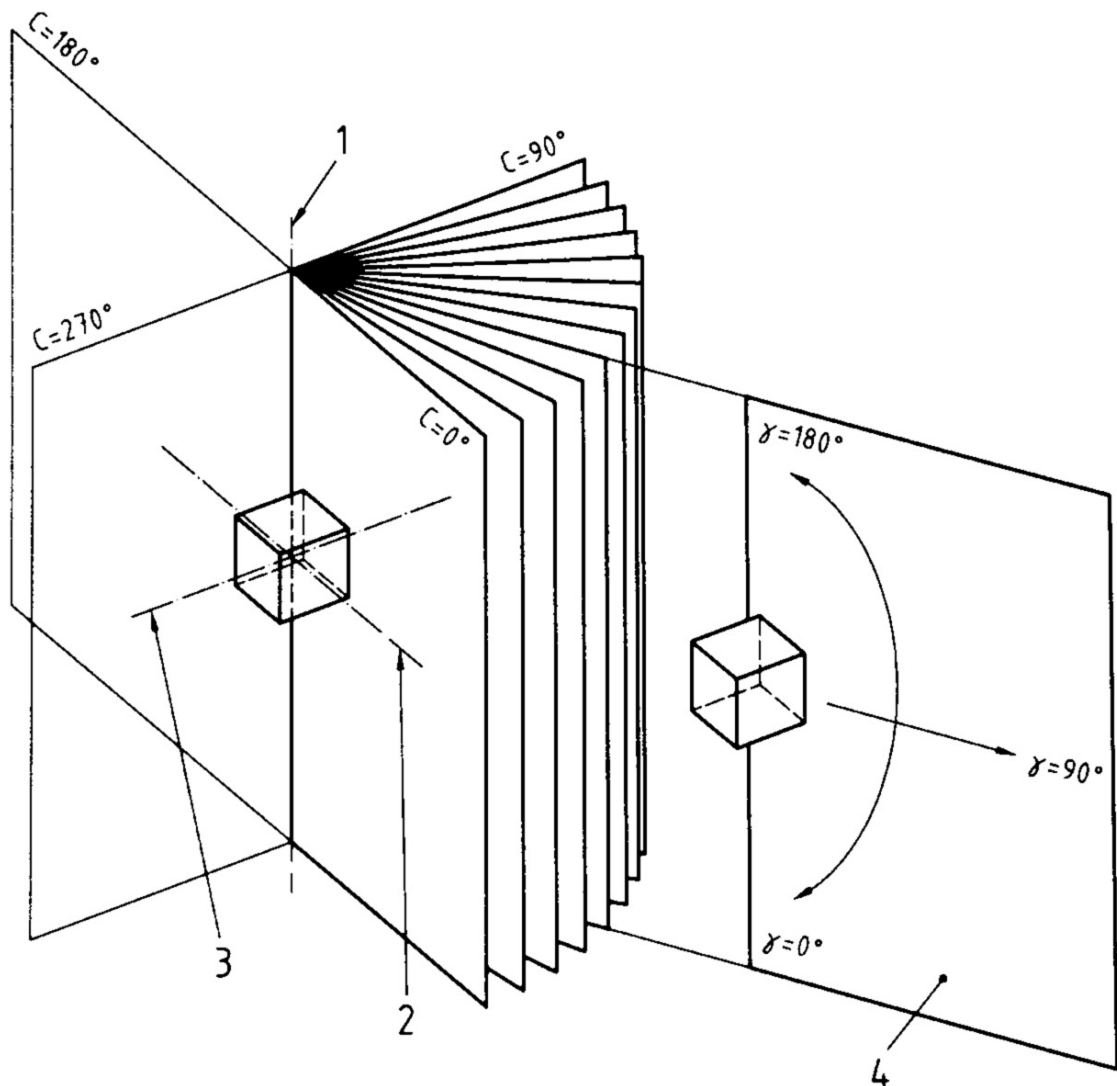


Abbildung 3.7: Visualisierung der Leuchtenorientierung für das C-Ebenensystem. Dargestellt ist die Polarachse (1), zweite Achse (2) sowie dritte Achse (3). Eine einzelne C-Ebene verdeutlicht (4). Quelle: [67]

Charakteristisch für diese optische Leistung ist die über alle Raumwinkel integrierte Lichtstärke, folglich der Lichtstrom Φ_v (Abbildung 2.3). Dementsprechend kann die Lichtausbeute η der OLED definiert werden als: $\eta_{OLED} = \Phi_v / P_{el}$. Die Bestimmung des Lichtstroms erfolgt durch Aufsummierung der gemessenen diskreten Lichtstärken.

Tabelle 3.3: Gleichungen für die Umrechnung der Koordinaten vom B- in das C-Ebenensystem sowie entgegengesetzt.

Ebenen		Umrechnung	
gegeben	benötigt	für Ebenen	für Winkel
B, β	C, γ	$\tan C = \sin B / \tan \beta$	$\cos \gamma = \cos B \cdot \cos \beta$
C, γ	B, β	$\tan B = \sin C \cdot \tan \gamma$	$\sin \beta = \sin C \cdot \sin \gamma$

Für das C-Ebenensystem (Abbildung 3.7) gilt [68]:

$$\bar{I}_v(C_j, \gamma_i) = 1/4 \cdot [I_v(C_j, \gamma_i) + I_v(C_{j+1}, \gamma_i) + I_v(C_j, \gamma_{i+1}) + I_v(C_{j+1}, \gamma_{i+1})] \quad (3.2)$$

$$\Phi_v = \sum_{j=0^\circ}^{360^\circ} \sum_{i=0^\circ}^{90^\circ} \bar{I}_v(C_j, \gamma_i) \cdot (\cos \gamma_i - \cos \gamma_{i+1}) \cdot \Delta C_j \quad (3.3)$$

Entsprechend gilt für das B-Ebenensystem (Abbildung 3.8) [68]:

$$\bar{I}_v(B_j, \beta_i) = 1/4 \cdot [I_v(B_j, \beta_i) + I_v(B_{j+1}, \beta_i) + I_v(B_j, \beta_{i+1}) + I_v(B_{j+1}, \beta_{i+1})] \quad (3.4)$$

$$\Phi_v = \sum_{j=-90^\circ}^{+90^\circ} \sum_{i=-90^\circ}^{+90^\circ} \bar{I}_v(B_j, \beta_i) \cdot (\sin \beta_i - \sin \beta_{i+1}) \cdot \Delta B_j \quad (3.5)$$

Wie bereits geschildert, handelt es sich bei der OLED um eine Lichtquelle, welche nur in einen Halbraum emittiert. Aus diesem Grund erfolgt die Summation über γ im C-Ebenensystem ausschließlich von 0° bis 90° . Analog hierzu wird im B-Ebenensystem B im Bereich zwischen -90° sowie $+90^\circ$ summiert.

Wird bei der Fernfeldanordnung statt der Beleuchtungsstärke direkt die Leuchtdichte gemessen (Spektrometer ohne Aufsatz), lässt sich für das C-Ebenensystem der Lichtstrom direkt bestimmen durch:

$$\Phi_v = \sum_{j=0^\circ}^{360^\circ} \sum_{i=0^\circ}^{90^\circ} L_v(C_j, \gamma_i) \cdot \sin \gamma_i \cdot \cos \gamma_i \cdot A_{OLED} \cdot \Delta \gamma \cdot \Delta C \quad (3.6)$$

Handelt es sich bei der Winkelverteilung um eine stark rotationssymmetrische Lichtstärkeverteilung um die Polarachse, kann für eine erste Näherung der Lichtstrom

Φ_v bestimmt werden, indem nur der Schnitt $C = 0^\circ$ jeweils für $\gamma = 0^\circ$ bis $\gamma = 90^\circ$ gemessen wird. Die Berechnung des Lichtstroms vereinfacht sich zu:

$$\Phi_v = 2\pi \sum_{i=0^\circ}^{90^\circ} I_v(\gamma_i) \cdot \sin \gamma_i \cdot \Delta\gamma = \pi \sum_{i=0^\circ}^{90^\circ} L_v(\gamma_i) \cdot A_{OLED} \cdot \Delta\gamma \quad (3.7)$$

Ein einfacher Aufbau eines OLED Goniometers zur Vermessung der Lichtstärke im C-Ebenensystem für $C = 0^\circ$ sowie $C = 180^\circ$ jeweils von $\gamma = 0^\circ$ bis $\gamma = 90^\circ$ ist in Abbildung 3.9 dargestellt.

Die Ergebnisse einer exemplarischen Messung der OSRAM ORBEOS OLED (bei 95 mA) mit dem Goniometeraufbau aus Abbildung 3.9 sowie der Verwendung der Leuchtdichtekamera mit Konoskop sind in Abbildung 3.10 dargestellt.

Ein Vergleich der beiden Messmethoden zeigt, dass die Bestimmung der Winkelverteilung der OLED im Rahmen der Messgenauigkeit von $\pm 2\%$ möglich ist. Charakteristisch für die Messung mit dem Konoskop ist das stärkere Rauschen der Messdaten sowie die Einschränkung des Messintervalls auf $\gamma < 60^\circ$.

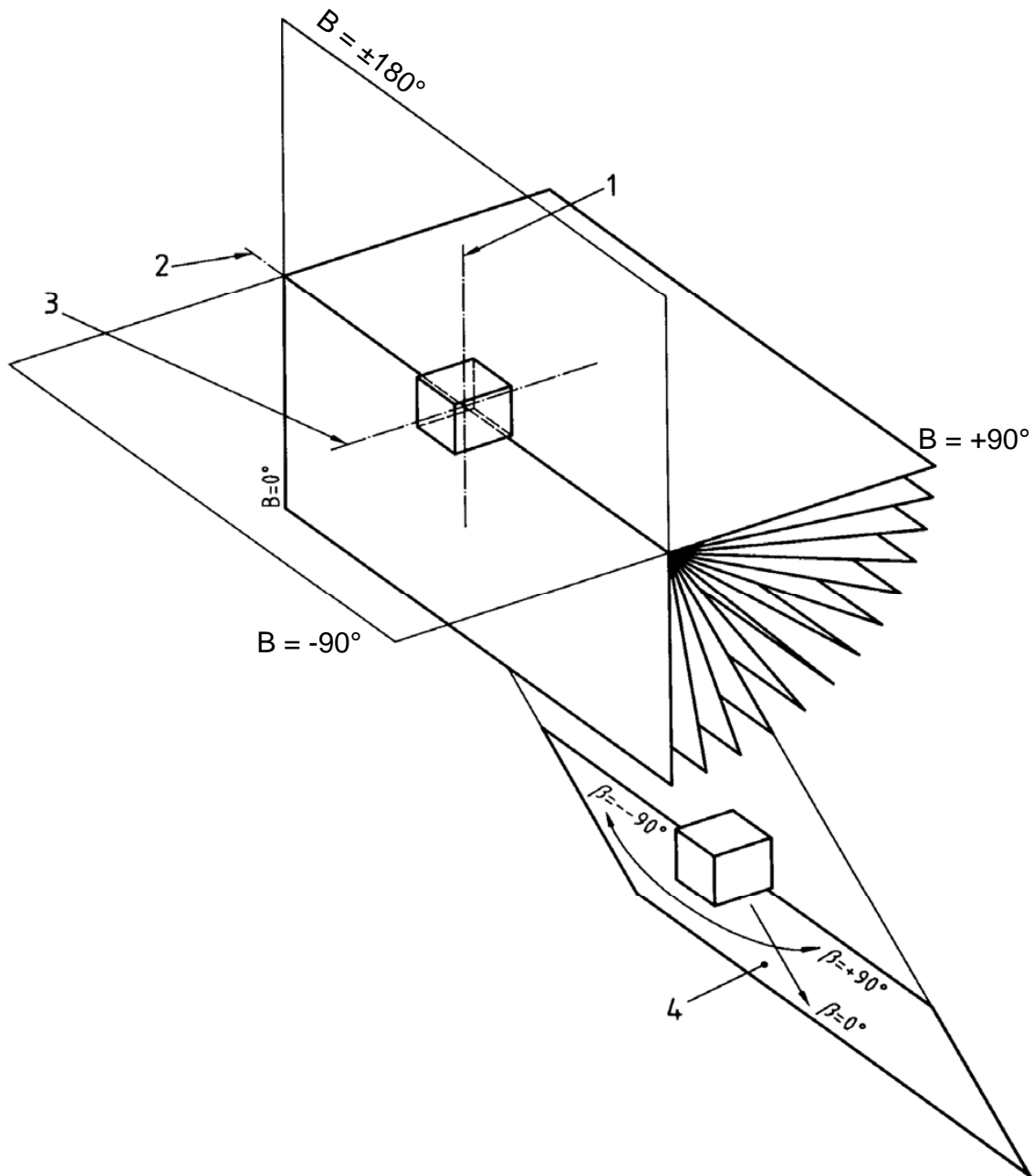


Abbildung 3.8: Visualisierung der Leuchtenanordnung für das B-Ebenensystem. Dargestellt ist die erste Leuchtenachse (1), Polarachse (2) sowie dritte Achse (3). Eine einzelne B-Ebene verdeutlicht (4). Quelle: [67]

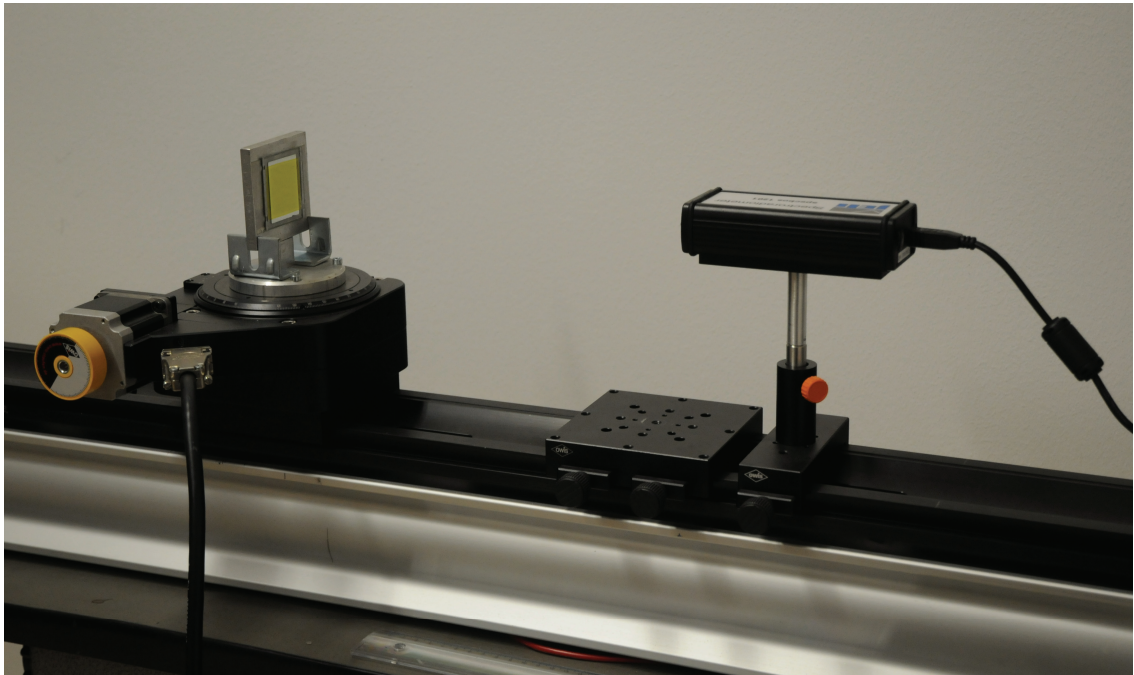


Abbildung 3.9: Foto eines einfachen Goniometeraufbaus mit Verwendung eines Spektrometers als Detektor. Gemessen wird die Leuchtdichte beispielsweise in der Ebene $C = 0^\circ$ sowie $C = 180^\circ$ jeweils von $\gamma = 0^\circ$ bis $\gamma = 90^\circ$. Die elektrische Kontaktierung ist zur Verdeutlichung des Aufbaus entfernt.

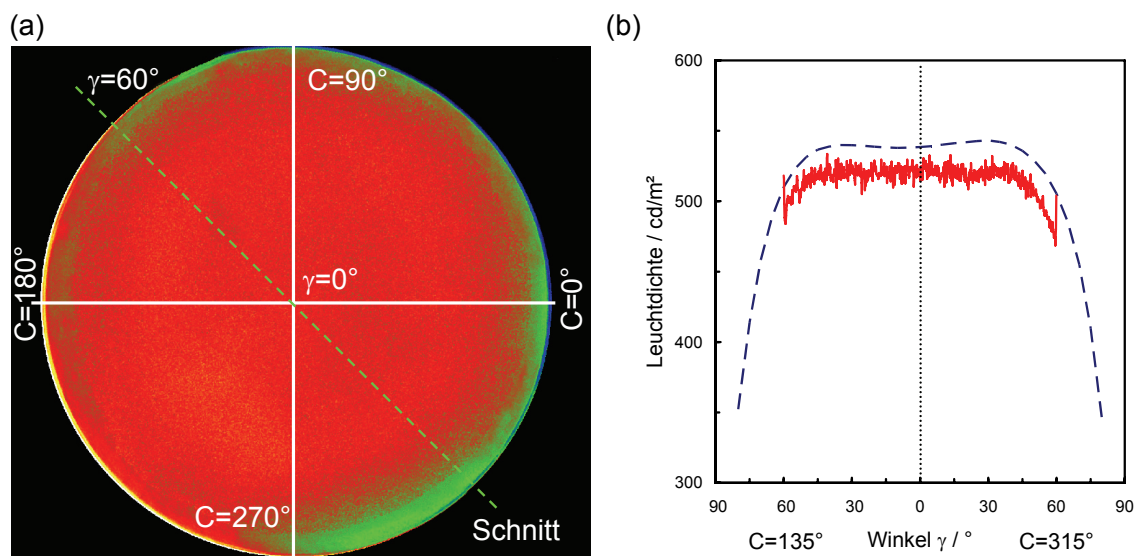


Abbildung 3.10: (a) Eine exemplarische Messung der OSRAM ORBEOS OLED durch Verwendung der Leuchtdichtekamera und des Konoskops. (b) Messung der winkelabhängigen Leuchtdichteverteilung in der Ebene $C = 135^\circ$ sowie $C = 315^\circ$ durch Verwendung des Aufbaus aus Abbildung 3.9 (Strichlinie) sowie einem Leuchtdichteschnitt aus der Konoskopmessung (Volllinie).

3.4 Messung des Streuverhaltens an Oberflächen

Entsprechend der Schilderungen in Kapitel 2.1 lässt sich die Effizienz der OLED erhöhen, indem der Grenzübergang von Glas zur Luft derart strukturiert ist, dass die Totalreflexion bestmöglich unterdrückt wird. Im Folgenden wird geschildert, mit welchen Messmethoden die Streuwirkung der Glasstrukturierung bestimmt werden kann, um anschließend Rückschlüsse auf die Güte der Auskoppelstruktur ziehen zu können.

Wie bereits in Kapitel 2.3.3 dargelegt, teilt sich das Licht beim Auftreffen auf eine diffuse Oberfläche in mehrere Pfade (Abbildung 2.11). Dieses Verhalten ist abhängig von dem Einfallswinkel des Strahls. Folglich muss für jeden Einfallswinkel θ_0 der prozentuale Strahlungsfluss in Reflexion R und Transmission T gemessen werden. Des Weiteren wird zwischen den diffusen sowie spekularen Anteilen differenziert. Dabei folgen die winkelabhängigen spekularen Anteile (R_s , T_s) den Fresnelgleichungen (Gleichung 2.22 - Gleichung 2.25) und müssen nicht zusätzlich gemessen werden. Die diffusen Anteile (R_d , T_d) in Abhängigkeit von θ_0 und θ sind abhängig von der Beschaffenheit der Oberfläche und müssen explizit gemessen werden. Mittels eines Lasers ist es möglich, definiert den Winkel θ_0 zu variieren, und durch ein Goniometer wird sequentiell der Strahlungsfluss als Funktion von θ gemessen. Aufgrund der Wellenlängenabhängigkeit der Streuung ist es erforderlich, die Messungen für verschiedene Wellenlängen durchzuführen. Folglich wird die Probe mit drei Laserstrahlquellen der Wellenlänge $\lambda_r = 660$ nm, $\lambda_g = 532$ nm sowie $\lambda_b = 473$ nm beleuchtet. Jeder Laser weist eine Leistung von 20 mW sowie ein Strahlprofil von $M^2 < 1,2$ auf. Die Leistungsstabilisierung wird mit einer Genauigkeit von 5 % spezifiziert.

Um den Einfluss der ersten Grenzfläche auf den Strahlungsfluss zu unterdrücken, wird die Streuprobe mittels Immersionsflüssigkeit auf eine Halbkreis-Zylinderlinse aufgebracht. Mit dieser Anordnung trifft der Laserstrahl immer unter 0° auf die Grenzfläche der Linse, und eine einfache Kompensation der 4 % Reflexionsverluste ist bei der Auswertung möglich. Dies gewährleistet auch eine Untersuchung der Probe unter hohen Einkoppelwinkeln. In Abbildung 3.11 ist der prinzipielle Messaufbau für die Transmissions- sowie Reflexionsmessung dargestellt.

Durch dieses Prinzip wird für jeden Einkoppelwinkel die gesamte Streulichtverteilung sequentiell gemessen. Allerdings wird für eine ausreichende Winkelauflösung ein Abstand zwischen Probe und Detektor von ca. 70 cm benötigt. Folglich ist es zweckmäßig, den Detektor ortsfest auf die optische Achse zu positionieren und nur die Probe und den Laser zu verstellen. Dies ist mit einer Anordnung der Winkelverstelleinheiten aufeinander sowie übereinander liegender Rotationsachsen möglich (Abbildung 3.12). Wird nur die erste Drehachse angesteuert, rotiert ausschließlich die

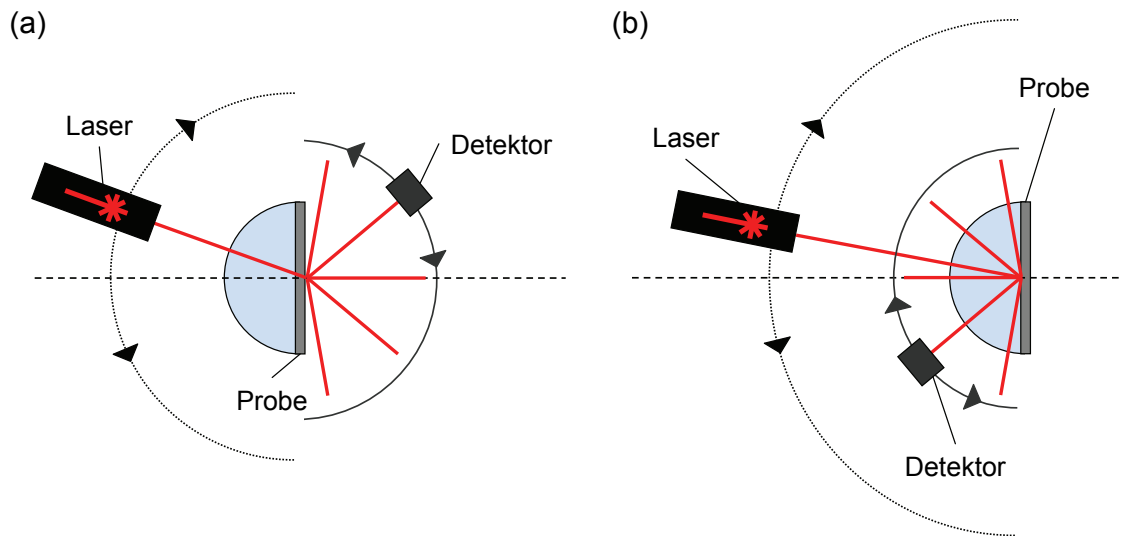


Abbildung 3.11: (a) Messprinzip der Streumessung mittels eines Goniometers in Transmission. Durch Verwendung einer Halbkreis-Zylinderlinse und Immersionsflüssigkeit wird die Brechung der ersten Grenzfläche der Probe aufgehoben. Für jeden Einkoppelwinkel wird mit dem Detektor die Streuverteilung gemessen. (b) Messprinzip der Streumessung mithilfe eines Goniometers in Reflexion.

Probe, was die Änderung des Einkoppelwinkels bewirkt, aufgrund der Montage des Lasers an die zweite Achse. Allerdings bewirkt dies auch gleichzeitig eine Rotation der Probe zum Detektor, was durch ein entgegengesetztes Verfahren der zweiten Achse kompensiert wird. Die alleinige Ansteuerung der zweiten Achse lässt den gesamten Aufbau relativ zum Detektor rotieren und die Vermessung des Strahlungsflusses in Abhängigkeit von θ erfolgt. In Abbildung 3.12 ist der Streulichtmessplatz mit ortsfestem Detektor gezeigt, jedoch sind zur Veranschaulichung die Streulichtblenden zwischen dem Detektor und der Probe entfernt worden.

Mit den ermittelten Messdaten können die Parameter b_0 , s und l für Transmission und Reflexion entsprechend Gleichung 2.40 bestimmt werden. Allerdings ist es nicht möglich, anhand dieser Messwerte den erforderlichen TIS-Parameter zu ermitteln (Gleichung 2.38, Gleichung 2.37). Hierfür wird die Vermessung des gesamten Halbraumes benötigt, um die Integration über θ und ϕ durchführen zu können. Ein Aufbau hierfür mittels Goniometer ist prinzipiell möglich; aufgrund der langen Messdauer ist ein solches Verfahren allerdings nicht wirtschaftlich.

Eine Alternative ist die Verwendung einer Ulbricht-Kugel, mit der die Messung des gesamten Strahlungsflusses in Transmission sowie Reflexion möglich ist und eine Berechnung des TIS-Wertes erfolgen kann (Gleichung 2.39). Gemäß den Prinzip-

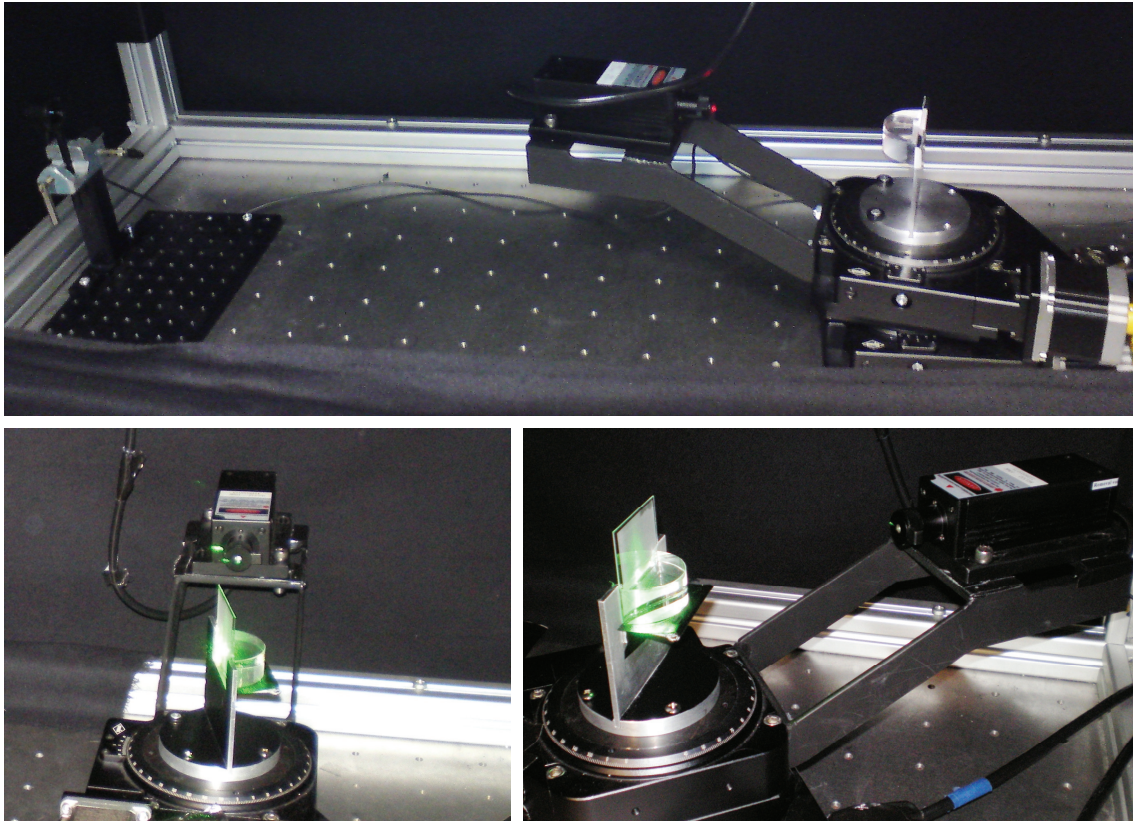


Abbildung 3.12: Streulichtgoniometer bei der Vermessung der diffusen Winkelverteilung in Transmission und Reflexion. Zur Veranschaulichung des Aufbaus, wurden die Streulichtblenden zwischen der Probe und dem Detektor entfernt.

skizzen aus Abbildung 3.13 wird die Probe mit Halbkreis-Zylinderlinse in die Öffnung der Ulbricht-Kugel gebracht und mit den gleichen Laserquellen beleuchtet. Sowohl der diffuse Anteil als auch der spekulare Anteil werden gleichzeitig von dem Messmittel aufgefangen. Der Einkoppelwinkel in Reflexion (Abbildung 3.13, b) beträgt ca. 5° ; dies garantiert die Messung beider Strahlungsanteile.

Die diffus-weiß beschichtete Kugel durchmischt die Strahlungsanteile (spekular und diffus) durch Vielfachreflexion, welches zu einer homogenen Bestrahlungsstärke auf der Kugellinnenseite führt. Der Strahlungsfluss innerhalb der Kugel ist proportional zu der gemessenen Bestrahlungsstärke auf der Oberfläche, wenn keine direkte Strahlung der Probe auf den Detektor fällt. Durch eine Referenzmessung, bei der nur die Halbkreis-Zylinderlinse in den Strahlengang gebracht wird, können die Einflüsse der Linse korrigiert werden. Folglich ergibt sich der Anteil in Transmission T aus der

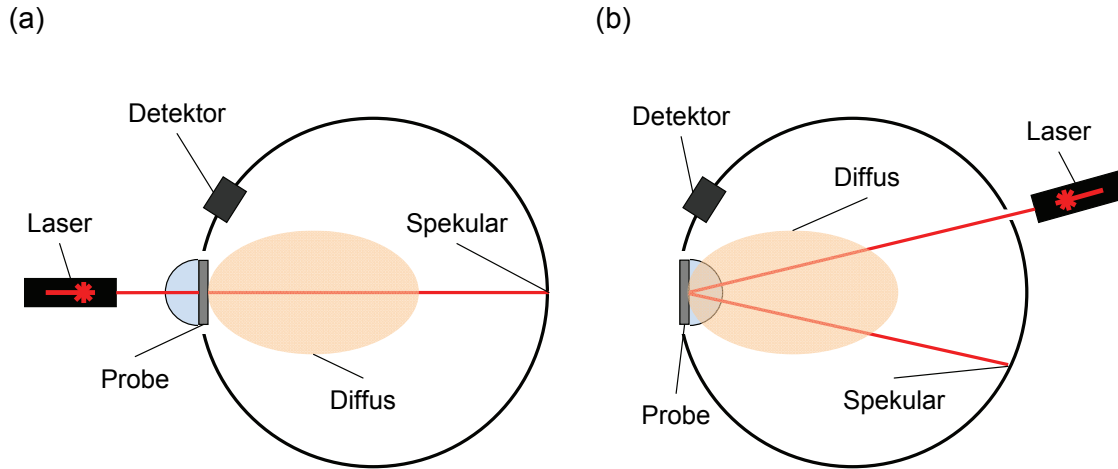


Abbildung 3.13: (a) Messprinzip der Streumessung (TIS_t) mittels einer Ulbricht-Kugel in Transmission. Die diffus-weiß beschichtete Kugel mittelt über den spekularen und diffusen Strahlungsfluss. Der Detektor misst die homogene Bestrahlungsstärke auf der Oberfläche der Kugel. (b) Messprinzip der Streumessung (TIS_r) mithilfe einer Ulbricht-Kugel in Reflexion.

Referenzmessung $\phi_{e,0}$ sowie der Messung mit Streuprobe $\phi_{e,T}$ gemäß Gleichung 3.8.

$$T = \frac{\phi_{e,T}}{\phi_{e,0}} \quad (3.8)$$

Für die Referenzierung der Reflexionsmessung wird anstelle der Probe ein weiß beschichteter Deckel vor die Kugelöffnung gebracht und, wie in Abbildung 3.13, b gezeigt, der Laserstrahl in die Ulbricht-Kugel eingekoppelt. Dieser Messwert ist proportional zur Leistung des Lasers $\phi_{e,L}$. Nun wird die Probe mit Halbkreis-Zylinderlinse vor der Kugel justiert und der reflektierte Anteil der Streuprobe gemessen $\phi_{e,R}$. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass der erste Fresnelreflex (4%) an der Halbkreis-Zylinderlinse vom Messwert abgezogen werden muss. Gemäß Gleichung 3.9 lässt sich der reflektierte Anteil R berechnen. Zur Veranschaulichung der Messmethode ist in Abbildung 3.14 ein Foto der Ulbricht-Kugel mit Detektor sowie Laserquelle gezeigt.

$$R = \frac{\phi_{e,R} - 0,04 \cdot \phi_{e,L}}{\phi_{e,L}} \quad (3.9)$$

Mit den bisher geschilderten Messmitteln ist es möglich, die diffuse Lichtverteilung

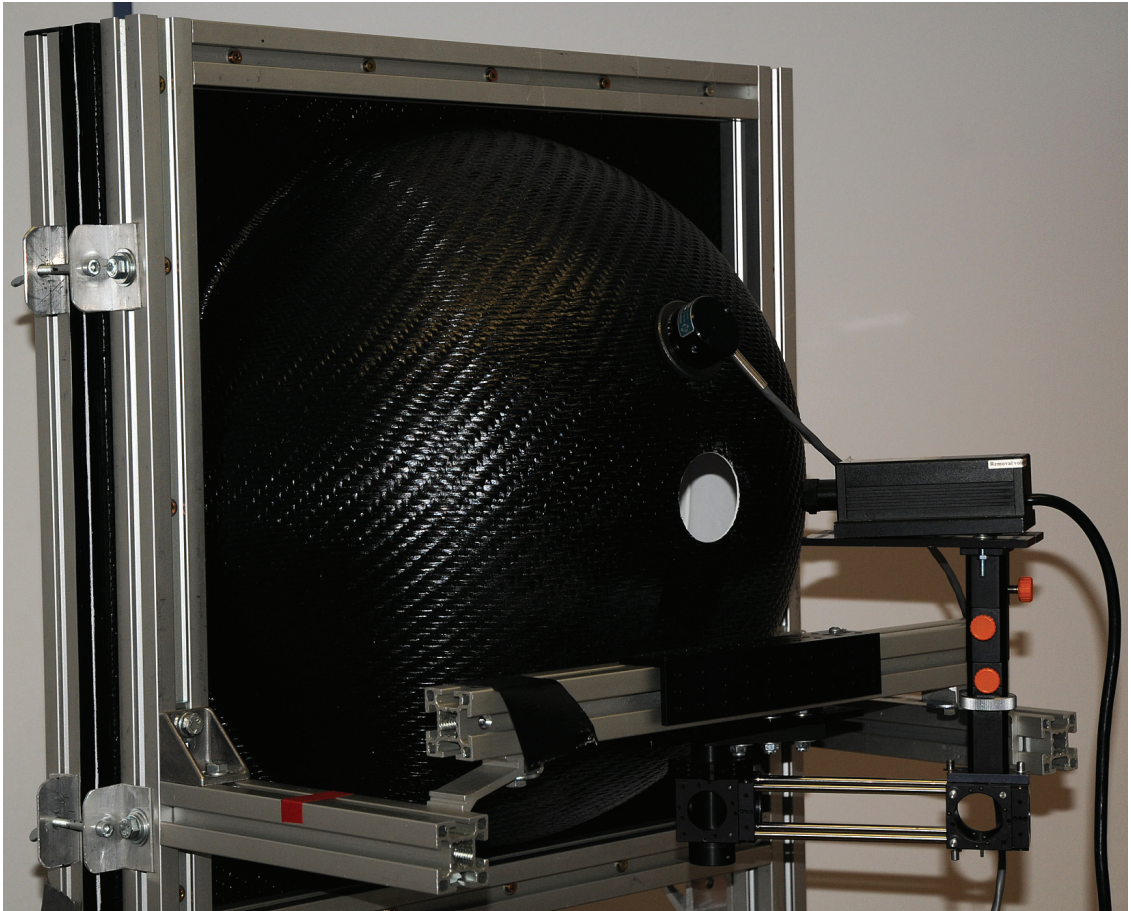


Abbildung 3.14: Frontansicht der Ulbricht-Kugel zur Vermessung des TIS-Wertes der Streuproben. Bei der Abbildung ist zur Vereinfachung keine Probe in der Öffnung justiert.

als Funktion des Auskoppelwinkels θ , θ' in Reflexion und Transmission zu messen (Goniometer). Des Weiteren ist gezeigt worden, wie mithilfe einer Ulbricht-Kugel der gesamte Anteil der Reflexion R und Transmission T bestimmt werden kann. Für die Berechnung des TIS-Wertes (Gleichung 2.39) muss nun noch das Verhältnis zwischen der spekularen sowie diffusen Transmission und Reflexion bestimmt werden. Wie bereits zuvor geschildert, ist dies prinzipiell durch eine zweidimensionale Integration der Strahlstärke möglich, jeweils getrennt für die spekulare sowie diffuse Verteilung (Goniometermessung). Die Messdaten eines Schnittes durch die Verteilung reichen jedoch hierfür nicht aus. Folglich wird ein dritter Messaufbau verwendet, um den spekularen Anteil zu messen.

Für die Transmissionsmessung (Abbildung 3.15, a) wird der Laser, die Probe mit Halbkreis-Zylinderlinse sowie der Detektor hintereinander und entlang der optischen Achse ausgerichtet. Aufgrund des großen Abstands zwischen Probe und Detektor (ca. 4 m) fällt ausschließlich der spekulare Anteil auf den Sensor. Eine zusätzliche Blende im Strahlengang schirmt den Detektor vor weiterem Streulicht ab. Als Referenzwert dient der Strahlungsfluss $\phi_{e,0}$ des Lasers ohne Halbkreis-Zylinderlinse. Der spekulare Anteil in Transmission T_s berechnet sich aus dem Referenzwert, korrigiert mit den Verlusten an der ersten Grenzfläche (96%) und dem gemessenen Strahlungsfluss mit Probe ϕ_{e,T_s} .

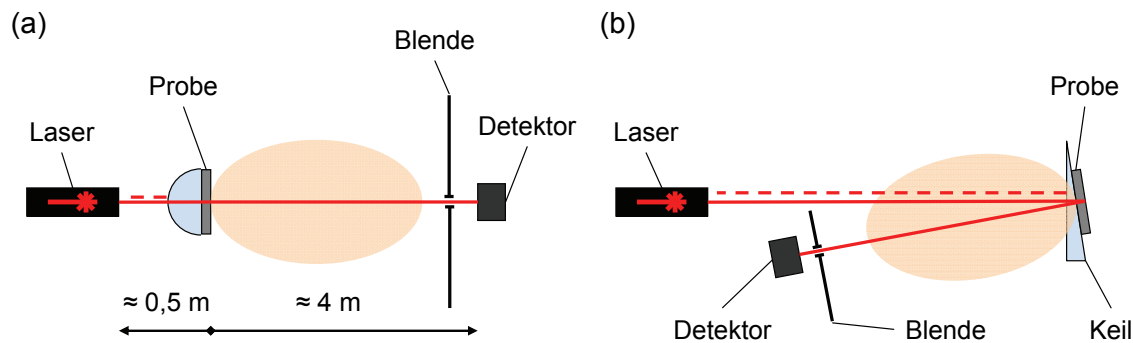


Abbildung 3.15: (a) Schematischer Aufbau für die Messung des spekularen Anteils in Transmission. Durch Verwendung einer Blende und die große Entfernung trifft kein Streulicht auf den Detektor. (b) Schematischer Aufbau für die Messung des spekularen Anteils in Reflexion. Aufgrund des Glaskeils trifft nur der spekulare Anteil der Probe auf den Detektor, der direkte Reflex der ersten Grenzfläche läuft in Richtung des Lasers.

$$T_s = \frac{\phi_{e,T_s}}{\phi_{e,0} \cdot 0,96} \quad (3.10)$$

Bei der Reflexionsmessung muss zunächst eine optische Trennung zwischen dem Reflex der ersten Grenzfläche und dem der zweiten Grenzfläche (Probe) erfolgen (Abbildung 3.15, b). Aus diesem Grund wird nicht die Halbkreis-Zylinderlinse verwendet sondern ein Glaskeil. Folglich fällt der erste Reflex in Richtung des Lasers. Der zu vermessende Reflex erfährt eine Ablenkung von ca. 5° und trifft auf den Detektor. Analog zur Transmissionsmessung sorgt die Kombination aus Blende und großem Abstand (ca. 4 m) für eine Unterdrückung des Streulichts sowie der diffusen Anteile. Als Referenzwert dient erneut der Strahlungsfluss $\phi_{e,0}$, der von dem Laser emittiert wird. Der spekulare Anteil in Reflexion R_s ergibt sich aus dem

Referenzwert, korrigiert mit den Fresnelverlusten an der ersten Grenzfläche des Glaskeils (96%) und dem gemessenen Strahlungsfluss mit Probe und Keil ϕ_{e,R_s} .

$$R_s = \frac{\phi_{e,R_s}}{\phi_{e,0} \cdot 0,96} \quad (3.11)$$

Anhand dieser Spekularmessung sowie der Messung des gesamten Strahlungsflusses durch die Ulbricht-Kugel lassen sich die diffusen Anteile für Reflexion R_d sowie Transmission T_d berechnen.

$$R_d = R - R_s \quad (3.12)$$

$$T_d = T - T_s \quad (3.13)$$

Folglich ist es möglich, die Absorption der Probe P_{abs} zu berechnen (Gleichung 3.14).

$$P_{abs} = 1 - T_s - T_d - R_s - R_d \quad (3.14)$$

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Energiebilanz (Tabelle 3.4) sowie Winkelverteilung (Abbildung 3.16) einer exemplarischen Streuprobe (DT142, genauere Details zu den verwendeten Streuproben befinden sich in Kapitel 4.3) in Abhängigkeit der Wellenlänge dargestellt.

Tabelle 3.4: Ergebnis einer exemplarischen Streuprobenmessung. Energieverteilung der Probe unter 0° .

Art	$\lambda = 473 \text{ nm}$	$\lambda = 532 \text{ nm}$	$\lambda = 660 \text{ nm}$
Absorption P_{abs}	0,5 %	1,7 %	0,7 %
Spekulare Reflexion R_s	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Diffuse Reflexion R_d	12,7 %	10,3 %	10,9 %
TIS_r	0,992	0,990	0,991
Spekulare Transmission T_s	9,8 %	12,5 %	15,0 %
Diffuse Transmission T_d	76,9 %	75,4 %	73,3 %
TIS_t	0,887	0,858	0,830

3.4 Messung des Streuverhaltens an Oberflächen

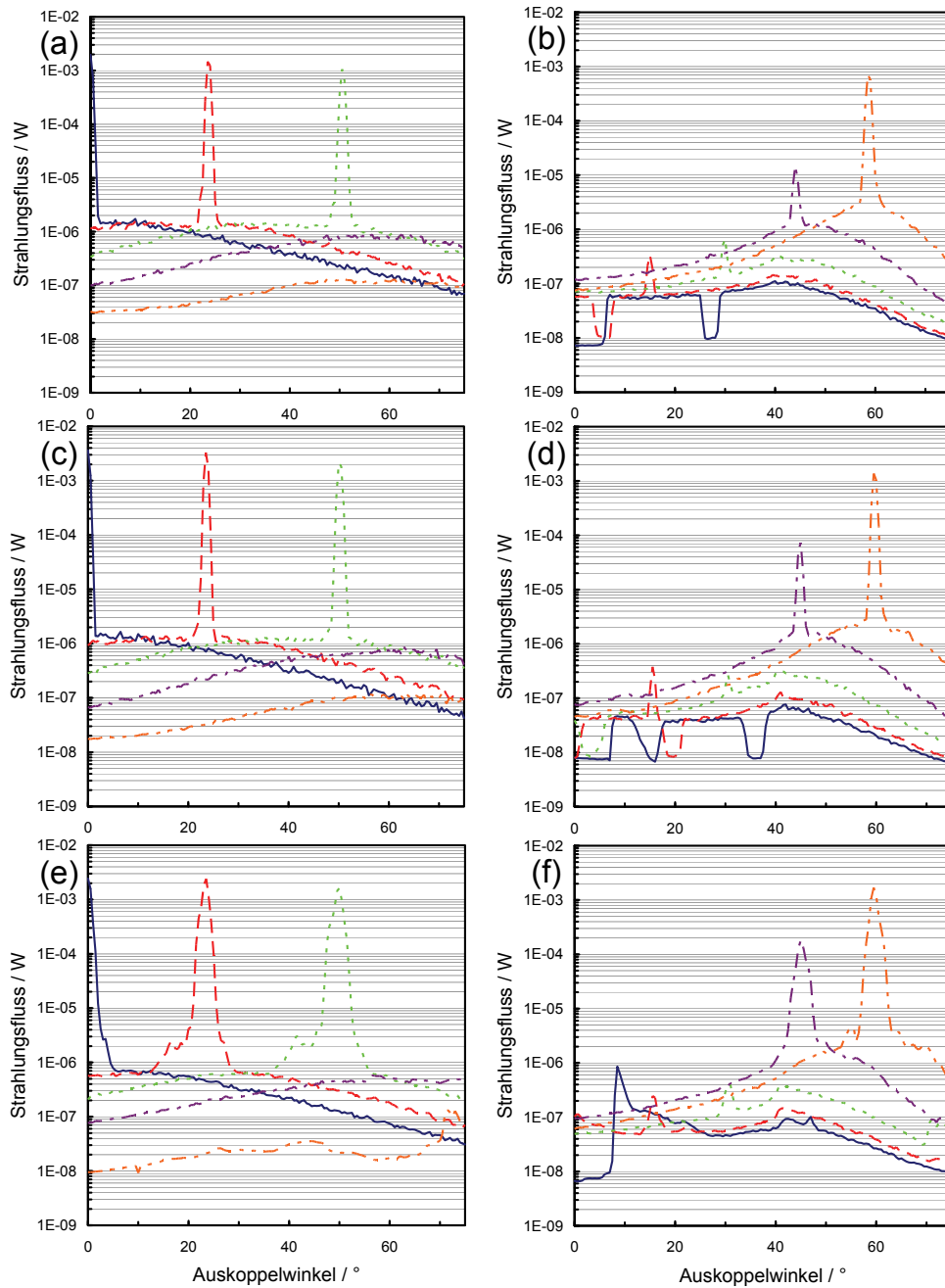


Abbildung 3.16: Winkelverteilung einer exemplarischen Streuprobe messung in Transmission (a, c, e) und Reflexion (b, d, f) mit Variation des Einkoppelwinkels von 0° (Volllinie), 15° (Strichlinie), 30° (Punktlinie), 45° (Strichpunktlinie) und 60° (Strichzweipunktlinie). In Abhängigkeit der Wellenlänge $\lambda = 473$ nm (a, b), $\lambda = 532$ nm (c, d) und $\lambda = 660$ nm (e, f).

3.5 Lichttechnischer Ringversuch

Im Rahmen dieser Arbeit ist ein lichttechnischer Ringversuch bei unterschiedlichen Lichtlaboren durchgeführt worden. Als Messgröße dient die Leuchtdichte sowie der CIE Farbort der OLED in Abhängigkeit der Stromstärke. Jedoch soll dieser Ringversuch nicht als klassische Methode der externen Qualitätssicherung für Messverfahren fungieren, vielmehr soll die lichttechnische Stabilität und die unproblematische Handhabung der OLED Labormuster (Abbildung 3.18, a) für Beleuchtungszwecke nachgewiesen werden. Das erste weiss emittierende OLED Muster besteht aus nur einem Pixel mit einer leuchtenden Fläche von $33 \times 34,8 \text{ mm}^2$ (Flächenstrahler). Zusätzlich soll ein zweites Versuchsmuster, bestehend aus 6 Pixel mit jeweils einer leuchtenden Fläche von $10 \times 10 \text{ mm}^2$ (Pixelstrahler), vermessen werden. Für aussagekräftige Ergebnisse erfolgt in jedem Lichtlabor die Kontaktierung sowie Stromversorgung mit dem jeweils vorhandenen Equipment. Dabei wird der Flächenstrahler mit den Strömen 50 mA, 100 mA, 150 mA und 200 mA betrieben. Die einzelnen Pixel des Pixelstrahlers werden mit Strömen von 5 mA, 10 mA, 15 mA und 20 mA betrieben. Zur Verfügung stehen bei diesem Ringversuch vier unabhängige Lichtlabore, welche mit unterschiedlichem Equipment ausgestattet sind. Im Folgenden ist die verwendete Messtechnik aufgeführt (Abbildung 3.17). Die detaillierten technischen Daten der Systeme sind in den entsprechenden Produktbeschreibungen der Firmen einzusehen [69]-[72].

- Labor 1: Spektrometer, Instrument Systems, CAS140B.
- Labor 2: Goniometer, Optronik, SMS 10c sowie Leuchtdichtekamera, TechnoTeam, LMK98-3
- Labor 3: Goniometer, TechnoTeam, Rigo 801 sowie Leuchtdichtekamera, TechnoTeam, LMK98-3 color
- Labor 4: Goniometer, Autronic-Melchers, DMS-501

Für einen Vergleich der Messungen von den einzelnen Messmitteln beschränkt sich die Auswertung der Daten nur auf die Leuchtdichte L_v sowie den Farbort (x, y) unter 0° und jeweils über die OLED Fläche gemittelt. Eine Zusammenfassung der Leuchtdichtemessung des Flächenstrahlers ist in Abbildung 3.18, b gezeigt. Die Ergebnisse für die Leuchtdichte des Pixelstrahlers sind in Abbildung 3.19 aufgeführt. Abbildung 3.20 sowie Abbildung 3.21 visualisieren hingegen die zusammengefassten Messergebnisse des CIE-Farborts für den Pixelstrahler.

Dieser Ringversuch hat gezeigt, dass die beiden OLED Muster (Flächenstrahler sowie Pixelstrahler) ohne nennenswerte Probleme bei den Lichtlaboren vollständig

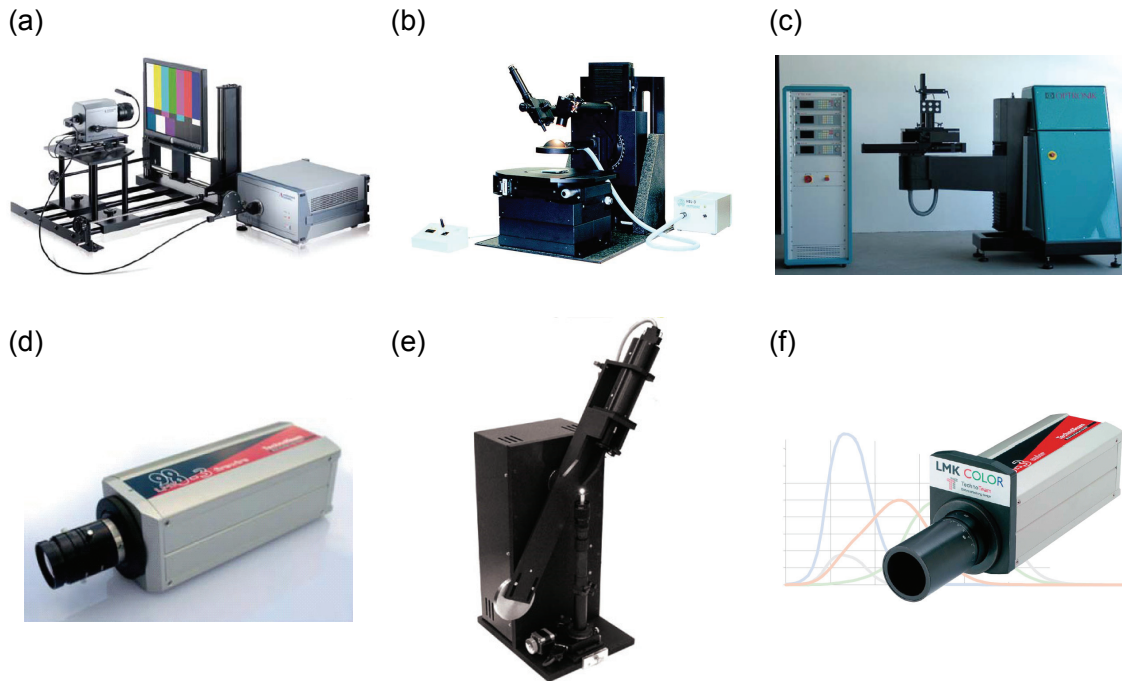


Abbildung 3.17: Verwendete Messmittel während des Ringversuchs. (a) Spektrometer: CAS140B, Instrument Systems [69]. (b) Goniometer: DMS-501, Autronic-Melchers [71]. (c) Goniometer: SMS 10c, Optronik [70]. (d) Leuchtdichtekamera: LMK98-3, TechnoTeam [64]. (e) Goniometer: Rigo 801, TechnoTeam [72]. (f) Leuchtdichtekamera: LMK98-3 color, TechnoTeam [64].

lichttechnisch charakterisiert werden können. Eine Analyse der Messwerte hinsichtlich der Konstanz der Leuchtdichte sowie des Farbortes zeigt, dass über den Zeitraum des Ringversuchs (≈ 4 Monate) keine Alterungseffekte zu verzeichnen sind. Die statistische Streuung der Daten lässt Rückschlüsse über einen gesamten Messfehler ziehen. Unter variierenden Betriebsbedingungen (Art des Netzteils, elektrische Kontaktierung sowie Betriebstemperatur) lässt sich bei beiden Labormustern ein Fehler der Leuchtdichte von $\approx 4\%$ ermitteln. Im Vergleich zu den Messfehlern gemäß den Herstellerangaben (z. B. Spektrometer Specbos 1201 2% für Normlichtart A) ist diese geringe Streuung ein sehr gutes Ergebnis. Die Streuung der Messwerte für den Farbort liegt bei $\approx 0,002$, dies ist sogar im Bereich der Messgenauigkeit der Geräte.

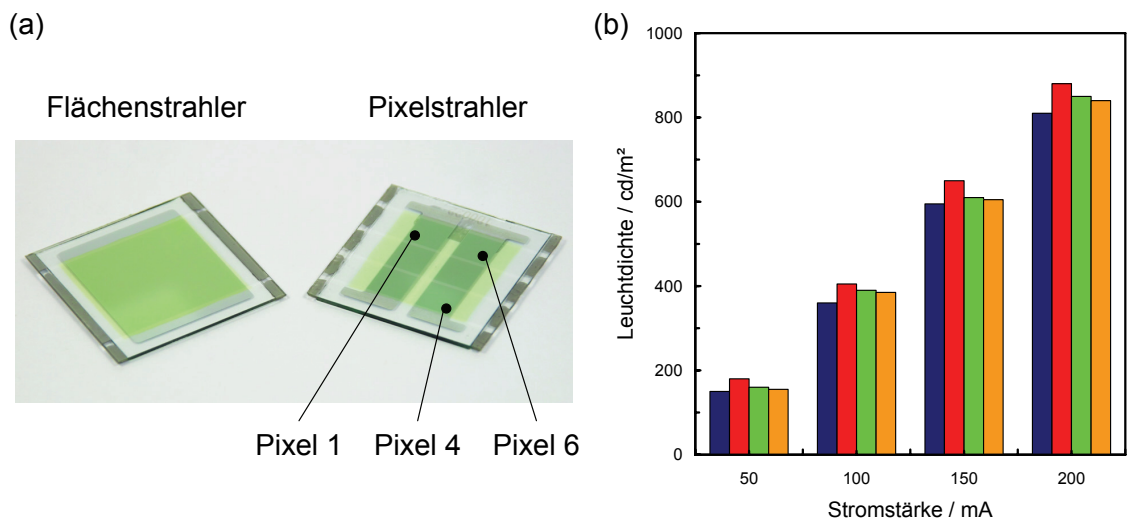


Abbildung 3.18: (a) OLED Proben, die während des Ringversuchs charakterisiert worden sind. (b) Zusammenfassung der Messergebnisse für die Leuchtdichte des Flächenstrahlers in Abhängigkeit der Stromstärke. Gezeigt sind die Werte von Labor 1 (blau), 2 (rot), 3 (grün) sowie 4 (orange).

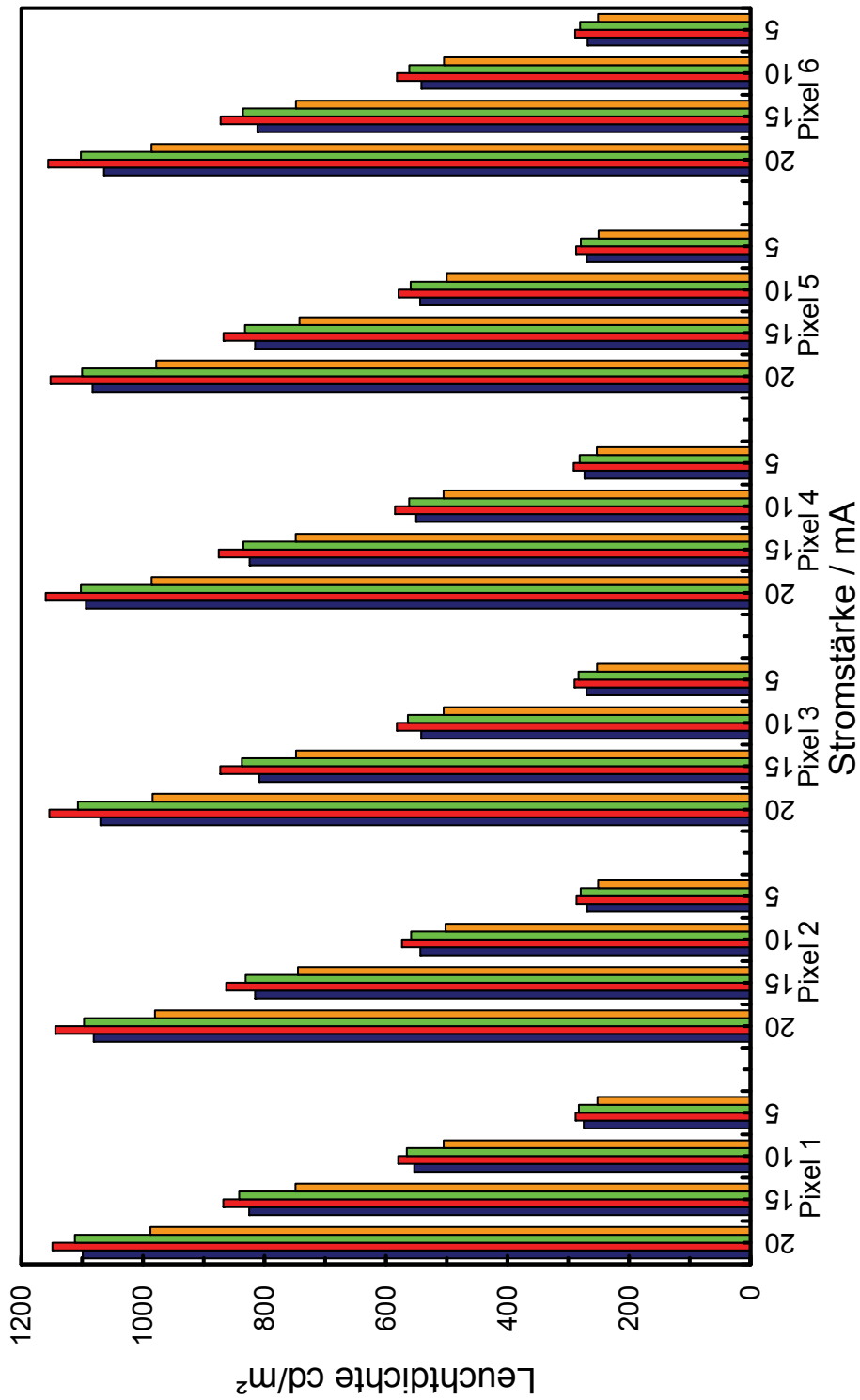


Abbildung 3.19: Zusammenfassung der Messergebnisse für die Leuchtdichtemessungen des Pixelstrahlers in Abhängigkeit der Stromstärke. Gezeigt sind die Werte von Labor 1 (blau), 2 (rot), 3 (grün) sowie 4 (orange).

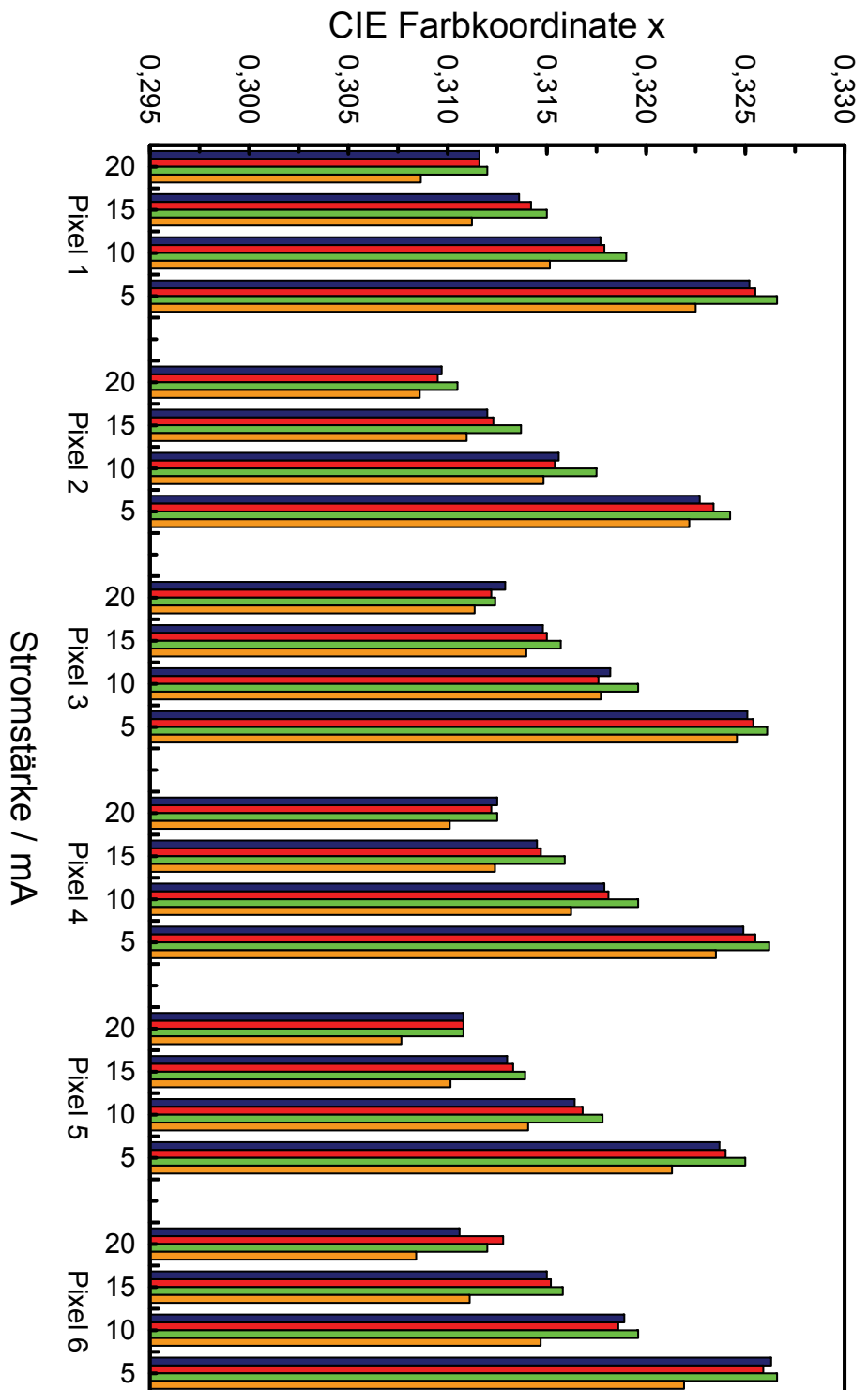


Abbildung 3.20: Zusammenfassung der Messergebnisse für die Messung der CIE Farbkoordinaten x des Pixelstrahlers in Abhängigkeit der Stromstärke. Gezeigt sind die Werte von Labor 1 (blau), 2 (rot), 3 (grün) sowie 4 (orange).

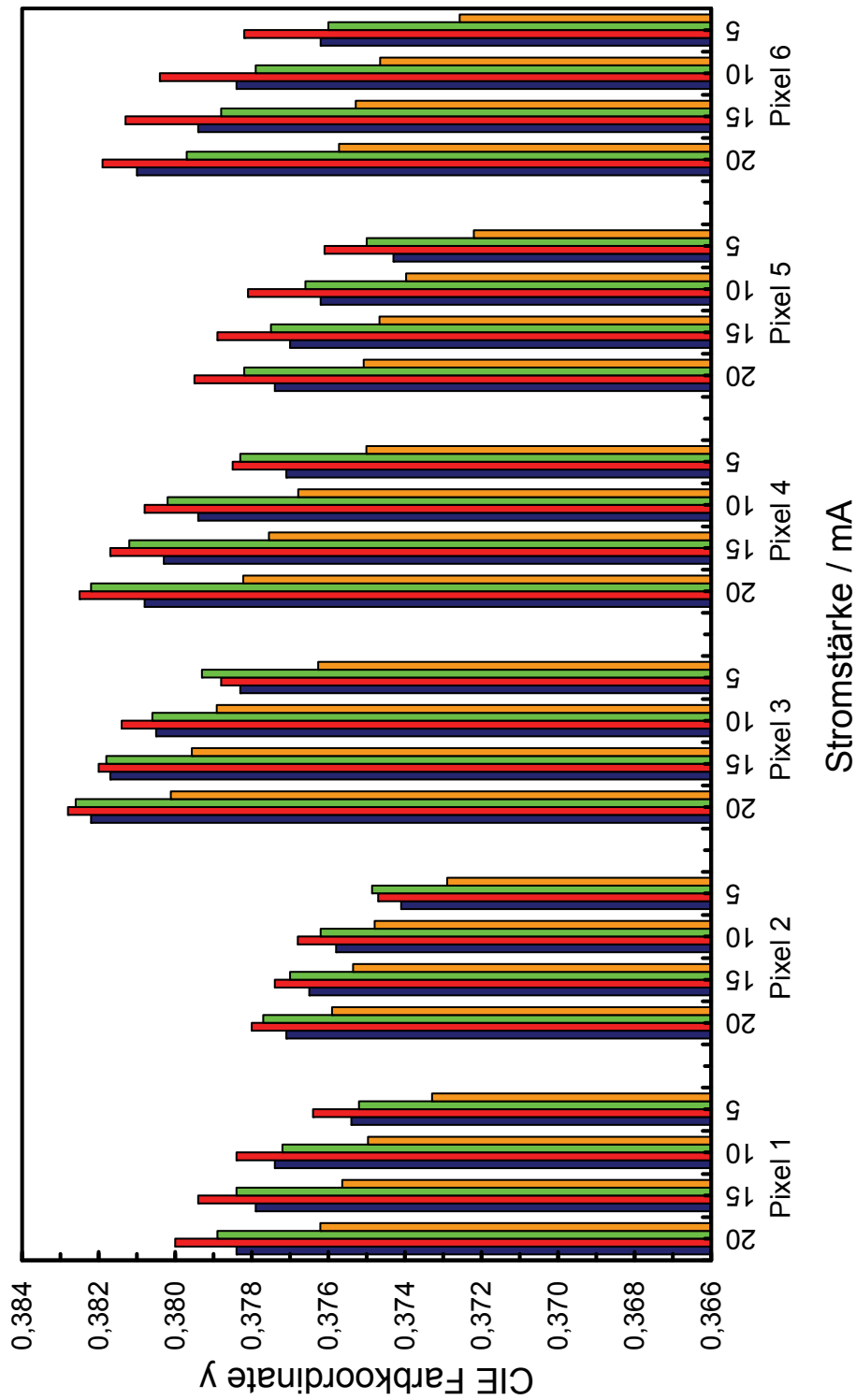


Abbildung 3.21: Zusammenfassung der Messergebnisse für die Messung der CIE Farbkoordinaten y des Pixelstrahlers in Abhängigkeit der Stromstärke. Gezeigt sind die Werte von Labor 1 (blau), 2 (rot), 3 (grün) sowie 4 (orange).

4 Ergebnisse und Diskussion

Basierend auf den geschilderten Grundlagen und der dargelegten Messtechnik erfolgt die Beschreibung der durchgeführten Messungen sowie Simulationen zur lichttechnischen und elektrooptischen Optimierung der OLED für die Bereiche Automobil, Display sowie Raumbeleuchtung. Im Folgenden wird unterschieden zwischen den Optimierungen des reinen Bauteils (Kapitel 4.1 und Kapitel 4.2) und der OLED in Verbindung mit Primäroptiken (Kapitel 4.3) sowie Sekundäroptiken (Kapitel 4.4). Die Reihenfolge der Optimierungen erfolgt entlang des Propagationsweges des Photons. Bei den jeweiligen Simulationen erfolgen verschiedene Parameterstudien, bei denen die Auswirkungen auf das Emissionsspektrum, folglich der Farbwiedergabe, sowie der Winkelverteilung erörtert werden. Zur Überprüfung der durchgeführten Berechnungen erfolgt jeweils der Vergleich zu den korrespondierenden Messungen. Abschließend wird in Kapitel 4.5 die Realisierung des OLED Treibers geschildert und anhand von Messungen das Potential zur Farbstabilisierung demonstriert.

4.1 Simulation des OLED Schichtsystems

Die folgende Simulationsstudie beschäftigt sich mit der Berechnung der Winkelverteilung sowie des Emissionsspektrums von breitbandigen OLEDs in Abhängigkeit der Schichtdickenkonfiguration sowie unterschiedlichen Schichtmaterialien für die Anode und die PEDOT Schicht.

Wie bereits in Kapitel 2.3.1 beschrieben ist es möglich, basierend auf komplexen Transfermatrizen die Lichtpropagation durch das OLED Dünnschichtsystem zu berechnen. Dieser Formalismus stellt eine Vereinfachung der Maxwellgleichungen dar, welcher den Wellencharakter des Lichtes berücksichtigt. Es ist mit diesem Modell jedoch nicht möglich, den Einfluss von Nahfeld-Effekten wie beispielsweise der Bildung von Plasmonenmoden zu berücksichtigen wie es in [31] erfolgt. Entsprechend der Zielsetzung möglichst auf bestehende Softwarelösungen zurückzugreifen, wird für die Aufstellung sowie Berechnung der komplexen Matrizen die Software ETFOS [46] der Firma Fluxim in Version 1.2 verwendet. Über die Benutzeroberfläche wird das Schichtsystem bestehend aus den Materialien sowie entsprechenden Dicken definiert. Nach Spezifizierung der Emissionsschicht (LEP) erfolgt die Berechnung

des OLED Spektrums sowie die winkelabhängige Leuchtdichte des Bauteils. Anhand von Schichtdicken-Parameterstudien kann eine optische Optimierung der OLED durchgeführt werden.

Zunächst werden die sechs Schichten des konventionellen OLED Systems (Abbildung 2.1) mit den entsprechenden Schichtdicken angelegt. Für jede Schicht werden die wellenlängenabhängigen komplexen Brechzahlen der entsprechenden Materialien (Abbildung 4.1) in Form von Tabellen verknüpft. Diese Materialdaten können beispielsweise mithilfe der Ellipsometrie [73] gewonnen werden. Alternativ können die in der Software vorliegenden Daten für gebräuchliche Materialien wie beispielsweise Aluminium verwendet werden. Die für die Simulation verwendeten Materialdaten sind in Abbildung 4.1 zusammengefasst.

Als Nächstes muss die Licht emittierende Schicht in Form des Elektrolumineszenzspektrums (ELS) spezifiziert werden. Die Messung dieser Daten stellt eine große Herausforderung dar, da viele Faktoren einen Einfluss auf das Spektrum haben. Wie bereits in Kapitel 3.5 evaluiert wurde, hat beispielsweise die Stromdichte einen großen Einfluss auf das ELS. Des Weiteren beeinflussen die Interferenzeffekte des Schichtsystems die Messung des eigentlichen ELS des LEP. Aus diesem Grund wird eine pragmatische Methode gewählt, um ein Spektrum zu erzeugen mit dessen Hilfe die Simulationen des Schichtsystems erfolgen kann. Für eine Stromdichte von $J = 13,1 \text{ mA/cm}^2$ wird das Spektrum der OLED für die unterschiedlichen LEPs gemessen (Kapitel 3.1). Für die zu untersuchenden Labormuster, mit einer Licht emittierenden Fläche von $33 \times 34,8 \text{ mm}^2$, ergibt sich bei dieser Stromdichte der angestrebte Nennstrom von 150 mA. Aus diesem Grund werden die Simulationen ausschließlich für diese Betriebsparameter durchgeführt. Exemplarisch sind die Messungen (Volllinien) der Spektren für das LEP1 und LEP2 in Abbildung 4.2 gezeigt.

Diese Spektren werden nun als ELS in der Software implementiert. Zusätzlich erfolgen noch Annahmen über die statistische Verteilung der Rekombinationszone der Elektronen und Defektelektronen (Verhältnis von 2a zu 2b siehe Abbildung 2.7, a). Aufgrund der Ungewissheit der realen Verteilung im Bauteil, bei dieser Stromdichte, wird eine Normalverteilung mit einem Erwartungswert von 40 nm (Mitte der Schicht) und einer Standardabweichung von 10 nm festgelegt. Ebenfalls wird die Dipolorientierung als gleichverteilt angenommen. Mittels dieser eingestellten Parameter kann die Berechnung der Systemmatrix (Gleichung 2.26) erfolgen und die Simulation der Lichtpropagation durchgeführt werden (Gleichung 2.27). Es resultiert ein durch die Interferenzeffekte sowie Absorption verändertes Spektrum, welches für das LEP1 und LEP2 in Abbildung 4.2 gezeigt (Strichlinie) ist. Mit diesen Änderungen wird das ursprünglich gemessene Spektrum (Volllinie) vorkompensiert (Punktlinie). Dieses pragmatisch generierte ELS kann nun für die Schichtsystemoptimierungen verwen-

4.1 Simulation des OLED Schichtsystems

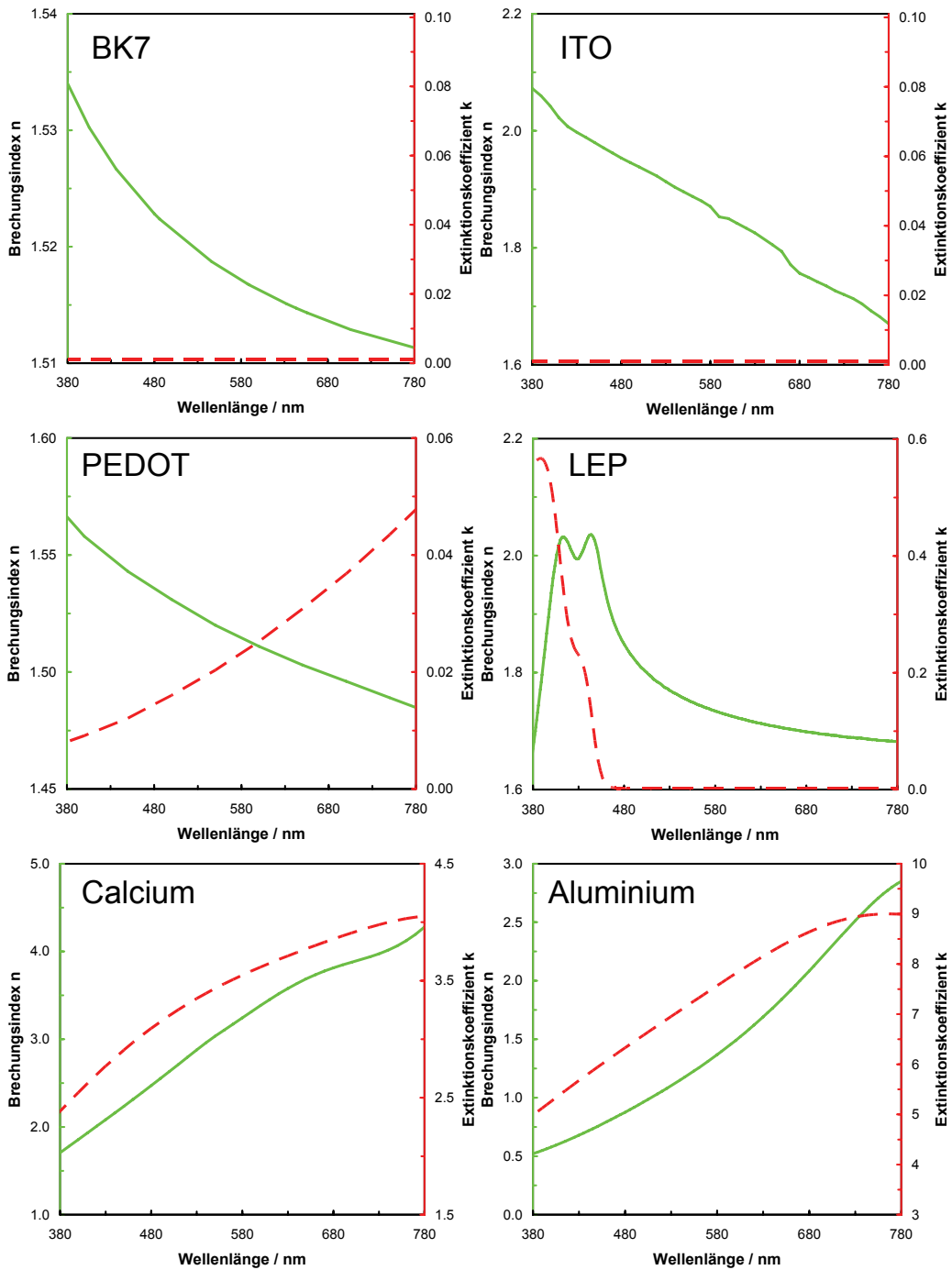


Abbildung 4.1: Wellenlängenabhängige komplexe Brechzahl der OLED Materialien, bestehend aus dem Brechungsindex n (Volllinie) und dem Extinktionskoeffizienten k (Strichlinie).

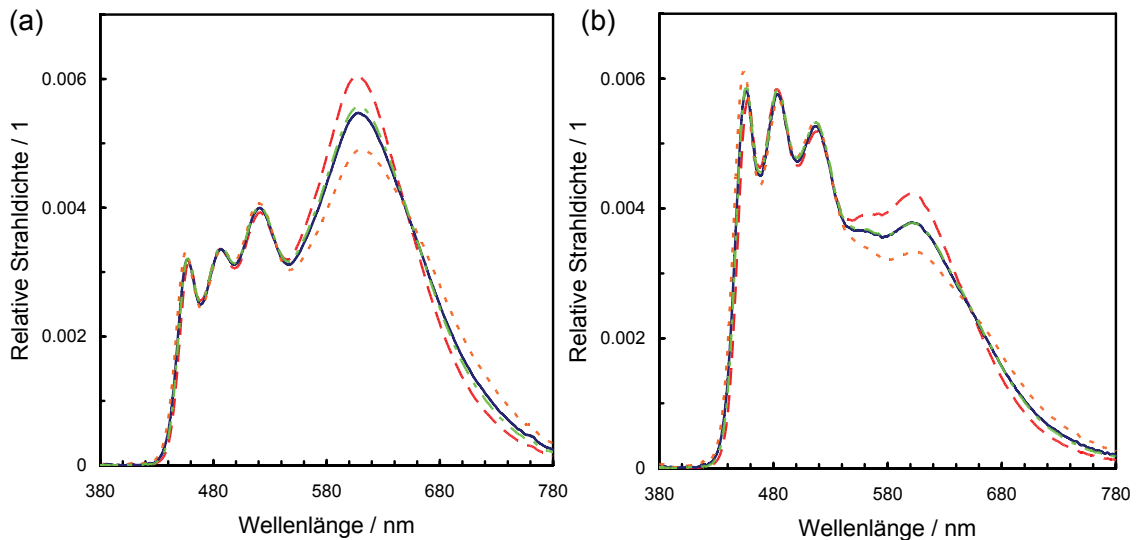


Abbildung 4.2: (a) Visualisierung der pragmatischen Methode zur Erzeugung der breitbandigen Elektrolumineszenzspektren (ELS) für LEP1. Das gemessene ELS (Volllinie) wird durch das Schichtsystem propagiert (Strichlinie) und die Einflüsse des Interferenzsystems vorkompensiert (Punktlinie). Die Berechnung mit dem vorkompensierten Spektrum ergibt eine gute Näherung (Strichpunktlinie) zu dem gemessenen Spektrum. (b) Generierung des Elektrolumineszenzspektrums für das Polymer LEP2.

det werden, weil das Ergebnis der erneuten Propagation durch das Schichtsystem (Strichpunktlinie) eine hohe Korrelation mit der ursprünglichen Messung (Volllinie) aufweist.

Ergänzend zu dem OLED Spektrum ist es auch möglich, die winkelabhängige Leuchtdichte sowie den winkelabhängigen Farbort des Schichtsystems zu berechnen. Die Ergebnisse aus Kapitel 3.5 haben jedoch gezeigt, dass bei den Labormustern keine signifikanten Farbortverschiebungen als Funktion des Emissionswinkel auftreten und daher nicht weiter betrachtet werden. Eine Simulation der winkelabhängigen Leuchtdichte erfolgt getrennt für s- sowie p-polarisiertes Licht, welches gemäß der Vorgaben der Emitterschicht gleichverteilt ist. Entsprechend der Erörterung aus Kapitel 3.3 wird die winkelabhängige Leuchtdichte des realen Bauteils, exemplarisch mit LEP1, bei der entsprechenden Stromdichte von $J = 13,1 \text{ mA/cm}^2$ gemessen. Das Messergebnis ist in Abbildung 4.3, a als Punktlinie gezeigt. Durch eine Gewichtung der Winkelverteilungen für die beiden Polarisationsrichtungen ist es möglich, eine hohe Korrelation zwischen der gemessenen Leuchtdichteverteilung und der simulierten Verteilung zu erzielen. Die optimale Übereinstimmung (Strichpunktlinie) erfolgt mit

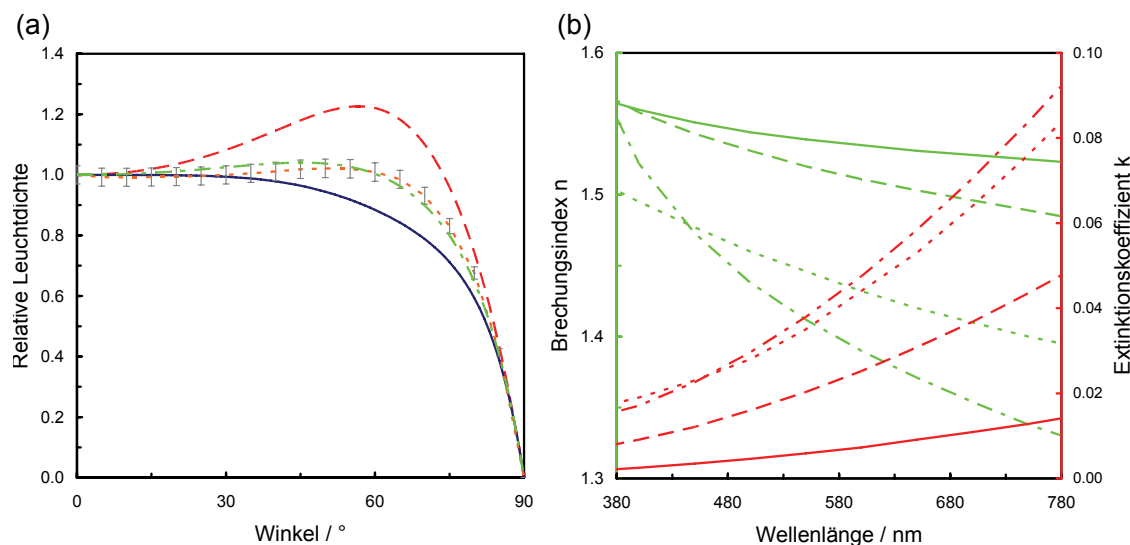


Abbildung 4.3: (a) Simulation der winkelabhängigen Leuchtdichte in der C0-Ebene, mit $\gamma = 0^\circ$ bis $\gamma = 90^\circ$. Die Diagramme stehen für: Simulation, s-polarisiert (Volllinie); Simulation, p-polarisiert (Strichlinie); Messung, unpolarisiert (Punktlinie mit 4 % Messfehler) sowie Simulation, 0,65 s-polarisiert, 0,35 p-polarisiert (Strichpunktlinie). (b) Wellenlängenabhängige komplexe Brechzahl verschiedener Lochleiter, bestehend aus dem Brechungsindex n (grün) und dem Extinktionskoeffizienten k (rot). Gezeigt sind: PEDOT CH8000 (Volllinie), PEDOT4083 (Strichlinie), PEDOT P (Punktlinie) sowie PEDOT PHCV4 (Strichpunktlinie).

einer Gewichtung von 0,65 für die s-Polarisierung und 0,35 für die p-Polarisierung. Diese Faktoren werden für eine Korrektur der Spezifikation der Licht emittierenden Schicht verwendet. Aufgrund dieser beiden Anpassungen der Simulation in Form des Elektrolumineszenzspektrums sowie der winkelabhängigen Leuchtdichte ist es möglich, Simulationen mit hohem Realitätsbezug zu erstellen und umfangreiche Probenserien einzusparen.

Für die erste Schichtsystemoptimierung wird der optische Einfluss der PEDOT Schicht evaluiert. Sie dient einerseits zur effizienten Injektion der Defektelektronen in die LEP Schicht [74] und andererseits glättet sie die raue Oberflächenbeschaffenheit der aufgedampften ITO Schicht, um Kurzschlüsse zwischen der Anode und der Kathode zu verhindern [75]. In Abhängigkeit der chemischen Struktur des PEDOTs ist es möglich, verschiedene Brechungsindizes zu realisieren. Dabei ändert sich sowohl der Brechungsindex n sowie der Extinktionskoeffizient k in Abhängigkeit der Wellenlänge. Die optischen Materialeigenschaften der vier zur Verfügung stehenden PEDOT Arten sind in Abbildung 4.3, b zusammengestellt. Diese werden ebenfalls

in ETFOS integriert, um den Einfluss auf die Leuchtdichte simulieren zu können. In mehreren Parameterstudien wird für jede PEDOT Art die optimale Schichtdickenkonfiguration, bezüglich der Leuchtdichte berechnet und die maximale Leuchtdichte ermittelt. Die Ergebnisse dieser Simulation sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Ergebnis der Parameterstudie bei Variation der PEDOT Materialien und Schichtdicken von ITO sowie PEDOT.

Lochleiter Material	Optimale Dicke PEDOT / nm	Optimale Dicke ITO / nm	Relative Leuchtdichte / 1
PEDOT CH8000	70	90	0,958
PEDOT 4083	70	90	0,957
PEDOT P	70	90	0,983
PEDOT PHCV4	70	90	1

Eine Analyse der Ergebnisse zeigt, dass trotz der stark unterschiedlichen Materialeigenschaften der Einfluss der PEDOT Schicht auf die rein optische Simulation sehr gering ist. Die Änderung der Leuchtdichte von Minimum zum Maximum beträgt nur $\approx 5\%$. Welche Einflüsse die Änderung der PEDOT Art auf die elektrischen sowie herstellungstechnischen Eigenschaften hat, wird aufgrund dieser Ergebnisse nicht weiter erörtert. Des Weiteren zeigen diese Simulationen, dass die Absorption der PEDOT Materialien für die resultierende Leuchtdichte zweitrangig ist ($k_{PHCV4} = \max.$ und $L_{PHCV4} = \max.$). Vielmehr ist es für die Steigerung der Leuchtdichte entscheidend, den Brechungsindex des Materials zu minimieren ($n_{PHCV4} = \min.$). Die unterschiedlichen optischen Materialeigenschaften des PEDOTs haben keinen Einfluss auf die optimalen Schichtdicken des OLED Systems, da für alle Arten die gleichen Schichtdicken berechnet werden.

In weiteren Simulationen soll nun der Einfluss der Schichtdicken der Defekt-elektronen-Injektionsschicht, der LEP Schicht sowie der Elektronen-Injektionsschicht auf das Emissionsspektrum evaluiert werden. Um einen direkten Vergleich zwischen Simulation und realen Bauteilen ziehen zu können, werden neun diskrete Schichtdickenkombinationen festgelegt, die als Muster hergestellt werden. Die PEDOT Schicht wird in den Abstufungen $d_{PEDOT} = 50; 80; 110$ nm ausgelegt. Für die LEP Schicht werden Schichtdicken mit $d_{LEP} = 60; 80; 100$ nm verwendet und die Calciumschicht wird mit $d_{Ca} = 2; 4$ nm variiert. Die genaue Probenbezeichnung sowie die korrespondierenden Schichtdicken sind in Tabelle 4.2 aufgelistet.

Für jede Probe wird mittels ETFOS das Emissionsspektrum simuliert und entsprechend Gleichung 2.8 und Gleichung 2.9 die CIE Normfarbwertanteile x, y berechnet. Zusätzlich wird gemäß Gleichung 2.10-2.19 der Farbwiedergabeindex bezogen auf die correlated color temperature (CCT) berechnet. Die Messung des Emissionsspektrums

Tabelle 4.2: Auflistung der Schichtdickenkonfigurationen der Parameterstudie mit LEP1.

Proben Nummer	Schichtdicke PEDOT / nm	Schichtdicke LEP1 / nm	Schichtdicke Calcium / nm
ref	50	80	4
1	80	80	4
2	80	60	2
3	80	100	2
4	50	60	4
5	50	100	4
6	50	80	2
7	110	80	2
8	110	60	4
9	110	100	4

der realen Bauteile erfolgt wie in Kapitel 3.1 beschrieben. Exemplarisch sind für die Proben 1, 2 und 5 die simulierten sowie gemessenen Spektren in Abbildung 4.4, a dargestellt. Die grafische Auswertung der CIE Normfarbwertanteile für die Proben 1 bis 9 ist in Abbildung 4.4, b gezeigt. Zusammenfassend sind die lichttechnischen Kennzahlen der Proben in Tabelle 4.3 aufgelistet.

Tabelle 4.3: Simulierte lichttechnische Ergebnisse der Schichtdicken-Parameterstudie mit LEP1.

Proben Nummer	CIE x	CIE y	CCT / K	$R_a(CCT)$ / 1
1	0,413	0,413	3515	87,5
2	0,384	0,400	4065	88,5
3	0,440	0,433	3175	89,2
4	0,386	0,400	4017	89,9
5	0,444	0,420	3014	89,3
6	0,409	0,404	3532	88,9
7	0,411	0,428	3654	87,3
8	0,378	0,385	4127	87,7
9	0,438	0,444	3282	89,1

Die Analyse der Emissionsspektren (Abbildung 4.4, a) zeigt eine hohe Korrelation zwischen den Messungen und der Simulation. Jedoch durch Berechnung der Normfarbwertanteile wird deutlich, dass die Anpassungen der Simulation in Form des

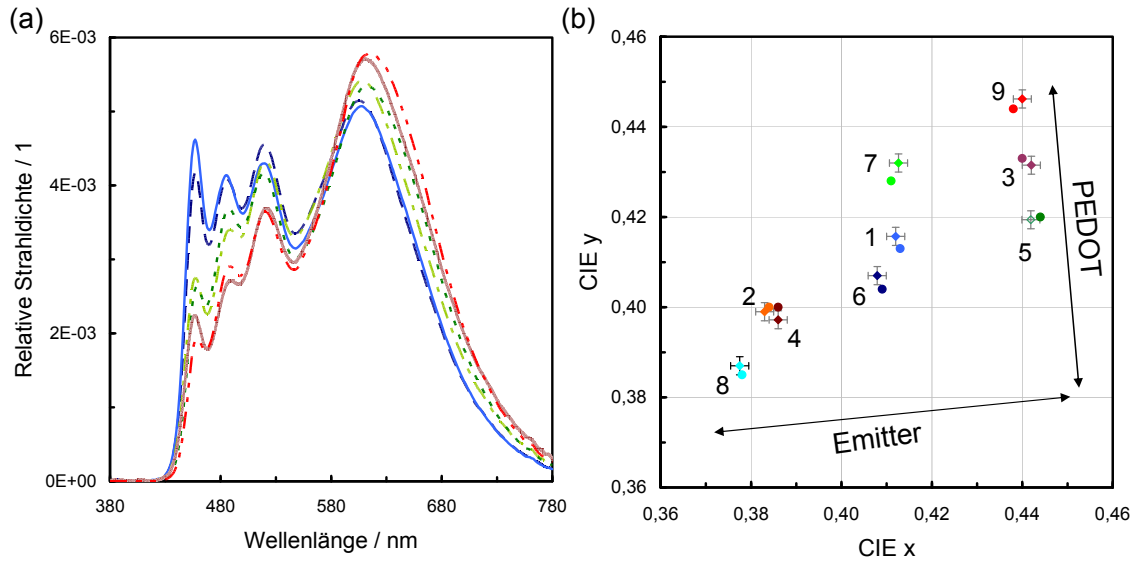


Abbildung 4.4: (a) Simulation der Emissionsspektren für LEP1 bei Variation der Schichtdickenkonfiguration. Exemplarisch sind folgende Proben gezeigt: 2, Simulation (Volllinie), 2, Messung (Strichlinie), 1, Simulation (Punktlinie), 1, Messung (Strichpunktlinie), 5, Simulation (Strichzweipunktlinie) sowie 5, Messung (Volllinie schraffiert). (b) Berechnung der CIE x,y Farbkoordinaten der gemessenen Spektren (Rauten) sowie der simulierten Spektren (Kreis) bei Variation der Schichtdicken. Der Messfehler beträgt $\pm 0,002$ (siehe Kapitel 3.5).

EL-Spektrums sowie Dipolverteilung bei beispielsweise Probe 7 ($d_{PEDOT} = 110$ nm, $d_{LEP} = 80$ nm und $d_{Ca} = 2$ nm) an Ihre Grenzen stoßen. Eine Tendenz, dass die Dicke der Emitterschicht einen starken Einfluss auf die Farbverschiebung in CIE x Richtung besitzt, lässt sich dennoch ablesen. Entsprechend sorgt die Dicke der PEDOT Schicht für eine Farbverschiebung in CIE y Richtung. Durch Anpassung der Schichtdicken ist es folglich möglich, eine Farbverschiebung von $\Delta x \approx 0,06$ sowie $\Delta y \approx 0,05$ zu realisieren ohne das eigentliche Polymer chemisch zu verändern. Ebenfalls lässt sich darüber die Farbtemperatur der OLED in einen Bereich $\Delta T \approx 1000$ K einstellen.

Nachdem die Auswirkungen der Variation der einzelnen Schichtdicken auf das Emissionsspektrum sowie die Farbwiedergabe evaluiert sind und durch entsprechende Messungen verifiziert sind, kann eine Optimierung des gesamten Schichtsystems mit beispielsweise LEP1 erfolgen. Als Gütemerkmal wird die Leuchtdichte der OLED herangezogen. Ausgehend von dem konventionellen Schichtdickensystem ($d_{ITO} = 140$ nm, $d_{PEDOT} = 50$ nm, $d_{LEP} = 80$ nm, $d_{Ca} = 5$ nm und $d_{Al} = 200$ nm) werden die

einzelnen Schichten separat und in gegenseitiger Abhängigkeit zueinander variiert. Die Parameterstudien führen zu einem optimierten System mit den Schichtdicken $d_{ITO} = 83$ nm, $d_{PEDOT} = 59$ nm, $d_{LEP} = 90$ nm, $d_{Ca} = 7$ nm und $d_{Al} = 151$ nm. In Abbildung 4.5, a ist das Spektrum des nicht optimierten Systems (Volllinie) sowie des auf die Leuchtdichte optimierten Systems (Strichlinie) gezeigt.

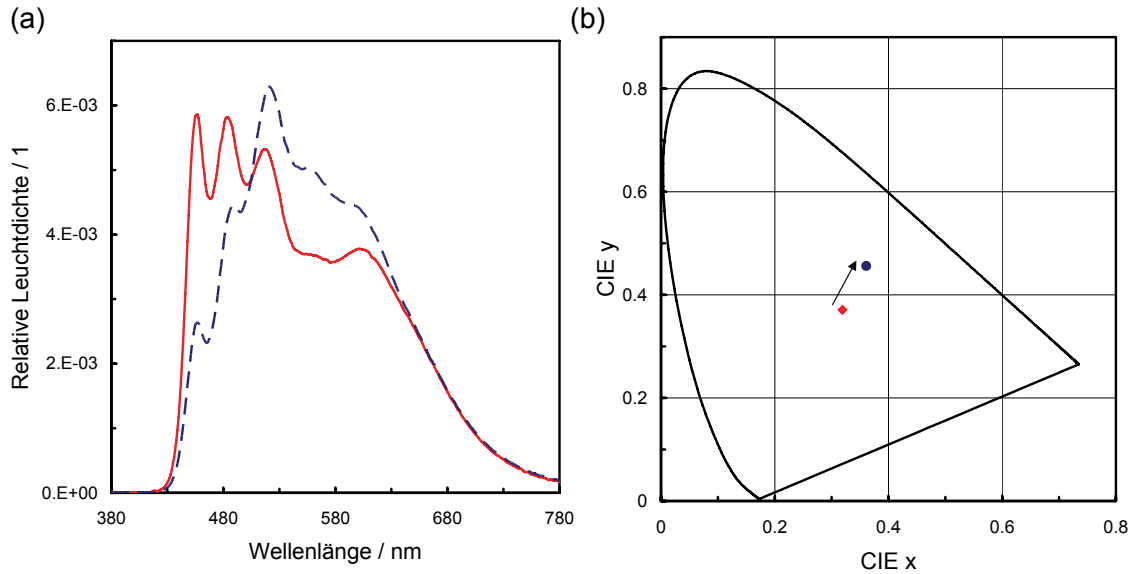


Abbildung 4.5: (a) Visualisierung der Änderung des Emissionsspektrums nach Durchführung einer Schichtdickenoptimierung. Gezeigt ist das unoptimierte Schichtsystem (Volllinie) sowie das optimierte Schichtsystem (Strichlinie). (b) Berechnung der CIE Farbkoordinaten der simulierten Emissionsspektren aus (a). Die Optimierung führt zu einer deutlichen Verschiebung Richtung gelb (Raute: ohne Optimierung, Kreis: nach Optimierung).

Dabei wird deutlich, dass die Änderung der Schichtdicken zu einer Umgewichtung der einzelnen lokalen Maxima im Spektrum führt. Durch Berechnung der Normfarbwertanteile wird die Verschiebung von $\Delta x = 0,043$ sowie $\Delta y = 0,085$ (von $x_1 = 0,319$, $y_1 = 0,371$ auf $x_2 = 0,362$, $y_2 = 0,456$) ersichtlich (Abbildung 4.5, b). Die Änderung des Spektrums wirkt sich auch auf die Farbwiedergabeeigenschaften der OLED aus, welche sich von $R_{a,1} = 86,5$ auf $R_{a,2} = 73,9$ reduzieren. Folglich ist es möglich, durch Schichtdickenoptimierung die Leuchtdichte von $L_{v,1} = 829$ cd/m² auf $L_{v,2} = 1018$ cd/m² zu steigern (Faktor 1,23). Dies wird jedoch zum größten Teil durch die Umgewichtung des Spektrums in Richtung der maximalen Empfindlichkeit des menschlichen Auges erzielt ($\bar{y}(\lambda)$ in Abbildung 2.4, a). Aus diesem Grund muss bei der Schichtdickenoptimierung sowohl die Leuchtdichte als auch der

Farbwiedergabeindex als Gütekriterium verwendet werden.

Ein weiterer Optimierungsbedarf des Schichtsystems besteht für Bauteile, bei denen das hochleitfähige Polymer Clevios PH500 [33] als Anodenmaterial verwendet wird. Aufgrund der unterschiedlichen komplexen Brechzahl von ITO und PH500 ist eine Anpassung der Schichtdicken nötig, um effiziente Bauteile zu realisieren. Ausgehend von den konventionellen Schichtdicken für ITO-Bauteile mit $d_{ITO} = 140$ nm und $d_{PEDOT} = 50$ nm (Probe A) berechnet sich eine Leuchtdichte von $L_{v,A} = 1939$ cd/m² für eine Stromstärke von $I_{OLED} = 300$ mA bei einer Spannung von $U_{OLED} = 7,6$ V. Die Parameterstudie mit Variation der Dicke von PEDOT und ITO (Abbildung 4.6) zeigt, dass die Leuchtdichte für die Konfiguration $d_{ITO} = 90$ nm und $d_{PEDOT} = 70$ nm (Probe B) auf $L_{v,B} = 2014$ cd/m² gesteigert werden kann. Die Leuchtdichte der Probe B repräsentiert die maximale Leuchtdichte für die weiteren Simulationen und dient zur Normierung der weiteren simulierten Werte (Gleichung 4.1).

$$L_{rel} = L/L_B \tag{4.1}$$

Folglich berechnen sich die Leuchtdichten für die bisherigen Simulationen zu $L_{rel,A} = 0,96$ sowie $L_{rel,B} = 1$. Die Simulation der Leuchtdichte für ein Bauteil mit PH500 Anode und den konventionellen Schichtdicken $d_{PH500} = 140$ nm sowie $d_{PEDOT} = 50$ nm (Probe C) ergibt $L_{v,C} = 1529$ cd/m² folglich $L_{rel,C} = 0,76$. Eine Parameterstudie mit Variation der Dicke von PEDOT und PH500 ergibt eine optimale Schichtdickenkonfiguration von $d_{PEDOT} = 10$ nm und $d_{PH500} = 70$ nm (Probe D) mit einer resultierenden Leuchtdichte $L_{v,D} = 1855$ cd/m² folglich $L_{rel,D} = 0,92$ (Abbildung 4.6). Eine weitere Reduzierung der Schichtdicke der PEDOT Schicht ist aus Sicht der Herstellbarkeit und Funktionalität des Bauteils nicht angestrebt. Die Ergebnisse dieser Simulation sind in Tabelle 4.4 zusammengefasst.

Diese rein optischen Simulationen machen deutlich, dass es mit einer Anpassung der Schichtdicken möglich ist, OLEDs mit Polymeranode zu realisieren, welche eine gleichwertige Performance verglichen mit ITO-Bauteilen aufweisen. Jedoch wird bei dieser Simulation nur der Einfluss der komplexen Brechzahl berücksichtigt. Die elektrischen Eigenschaften (Leitfähigkeit) der Materialien werden dabei unterschlagen. Folglich muss das Ergebnis mit den ohmschen Verlusten in der Anode korrigiert werden. Dies erfolgt im Kapitel 4.2.

In diesem Kapitel sind die Randbedingungen für die Simulation der optischen Effekte bei weißen OLEDs erörtert worden, welche nachweislich zu Simulationsergebnissen mit hohem Realitätsbezug führen. Somit wurde gezeigt, dass der Einfluss der unterschiedlichen PEDOT Arten (Variation der komplexen Brechzahl) auf die

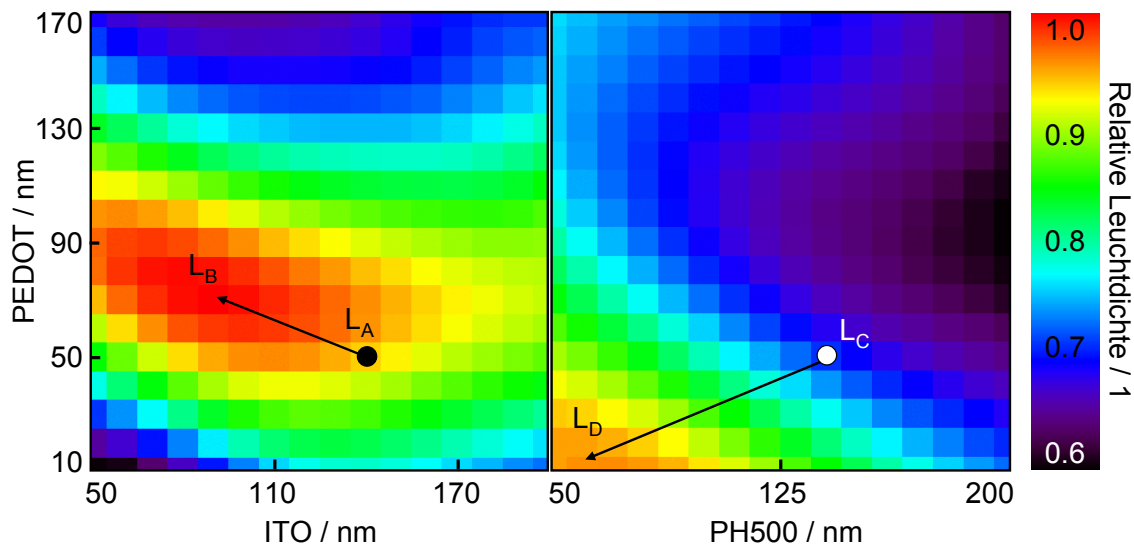


Abbildung 4.6: Optische Simulation der OLED Leuchtdichte in Abhängigkeit der Schichtdicke. Die PEDOT Dicke ist zwischen 10 und 170 nm variiert worden und die Anodendicken (für ITO und PH500) variieren zwischen 50 und 200 nm.

resultierende Leuchtdichte vernachlässigbar ist. Eine Optimierung des Schichtaufbaus führt zu OLED Mustern, welche eine um Faktor 1,23 gesteigerte Leuchtdichte aufweisen. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass die Farbwiedergabeeigenschaften nicht zu stark reduziert werden und folglich die Verschiebung der Farbkoordinaten nur innerhalb eines spezifizierenden Bereichs erfolgt.

4.2 Homogenisierung der lateralen Leuchtdichteverteilung

Die folgende Simulationsstudie beschäftigt sich mit der Frage, welchen Einfluss die elektrische Leitfähigkeit der Anode auf die in ETFOS berechnete optimale Schichtdicke aufweist, und wie die ohmschen Verluste der Anode durch eine geeignete Strukturierung mit metallischen Leiterbahnen reduziert werden können.

Entsprechend den hergeleiteten physikalischen Grundlagen in Kapitel 2.4 gilt es nun die Differentialgleichung 2.44 für das konventionelle OLED Layout (Kapitel 3.5) zu lösen. Dies erfolgt numerisch durch Anwendung der Finite-Elemente-Methode [76] (FEM) mithilfe der Software FlexPDE [77]. Sie ist in der Lage, lineare und nichtlineare partielle Differentialgleichungen für statische sowie zeitabhängige Modelle in 2D

sowie 3D zu lösen. Dabei erfolgt die Eingabe des Modells und der Randbedingungen über eine textbasierte Makrosprache. Größter Vorteil der Software ist der hohe Grad der Automatisierung, weil sie selbstständig eine Vernetzung des Modells durchführt, diese mittels Fehleranalyse überprüft und gegebenenfalls das Netz weiter verfeinert. Die Ausgabe der Berechnungen erfolgt nach Abschluss des Iterationsprozesses in konfigurierbaren Diagrammen. Für einen ersten Test der Software und des physikalischen Modells (Kapitel 2.4) wird das Ergebnis von Neyts et al. [78] berechnet. Inhalt der Veröffentlichung ist die Berechnung der zweidimensionalen Potentialverteilung in einer quadratischen OLED (Größe: $15 \times 15 \text{ mm}^2$). Als Anodenmaterial wird bei diesem Muster das hochleitfähige Polymer Clevios PH500 [33] verwendet.

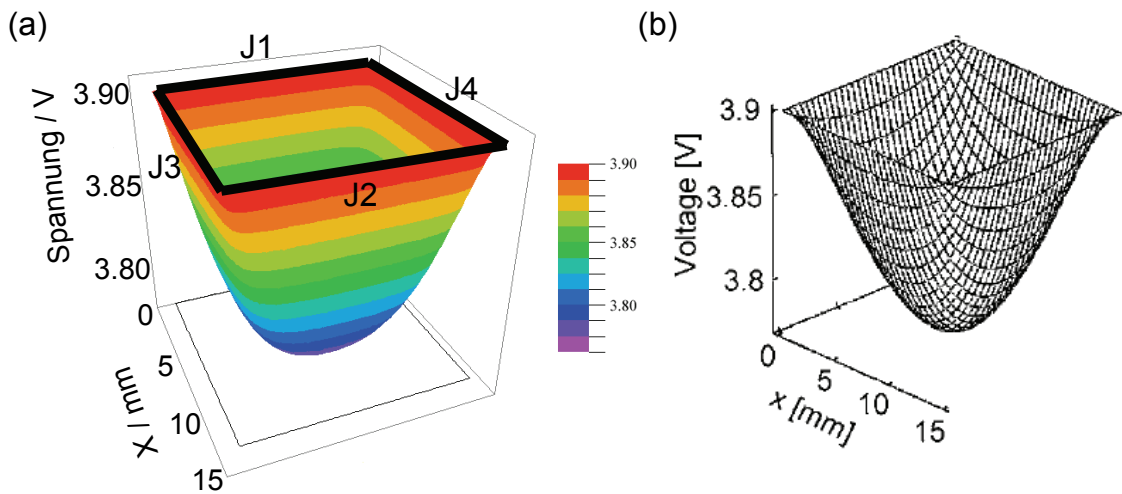


Abbildung 4.7: Simulation der Potentialverteilung in der PH500-Anode bei Kontaktierung von J1 bis J4. (a) Simulation gemäß Gleichung 2.44. (b) Simulationsergebnis aus [78]. Die Größe der OLED beträgt $15 \times 15 \text{ mm}^2$.

Als Randbedingung für diese Simulation wird die Leitfähigkeit der Anode mit $\sigma_{PH500} \approx 5 \cdot 10^4 \text{ S/m}$ definiert. Zum Vergleich beträgt die Leitfähigkeit von ITO $\sigma_{ITO} \approx 6 \cdot 10^5 \text{ S/m}$ [79]. Die elektrische Kontaktierung erfolgt an allen vier Seiten der OLED (J1-J4) mit einem Potential von $U_0 = 3,9 \text{ V}$. Das Ergebnis der Simulation mit FlexPDE ist in Abbildung 4.7, a dargestellt und weist lediglich eine Abweichung von 5 % bezüglich des Minimums der Potentialverteilung in der Mitte der OLED, mit dem Ergebnis der Veröffentlichung (Abbildung 4.7, b) auf. Darauf basierend werden die Größe der OLED ($33 \times 34,8 \text{ mm}^2$), die Anodendicke $d_{Anode} = 140 \text{ nm}$ und der elektrische Widerstand $R_{OLED} = 24 \Omega$ als Randbedingungen an das konventionelle OLED Layout angepasst. Entsprechend der Probe werden nur die Kontaktierungen J3 und J4 mit dem Randpotential $U_0 = 7,6 \text{ V}$ verbunden. Die Simulation zeigt eine

4.2 Homogenisierung der lateralen Leuchtdichteverteilung

Potentialverteilung in der Anode, welche nur noch einen Spannungsabfall entlang der y -Richtung aufweist (Abbildung 4.8, a). Eine Analyse des Ergebnisses zeigt, dass die geringe Leitfähigkeit der Polymeranode zu einem deutlichen Spannungsabfall (ca. 40 %) zur Mitte der OLED hin führt. Unter der Voraussetzung, dass die Leuchtdichte der OLED sich linear zur Spannung in der Anode verhält, würde dies zu einer sichtbar inhomogen leuchtenden Fläche führen. Dabei wird das Diodenverhalten der OLED (Abbildung 2.15, b) zur Vereinfachung nicht berücksichtigt.

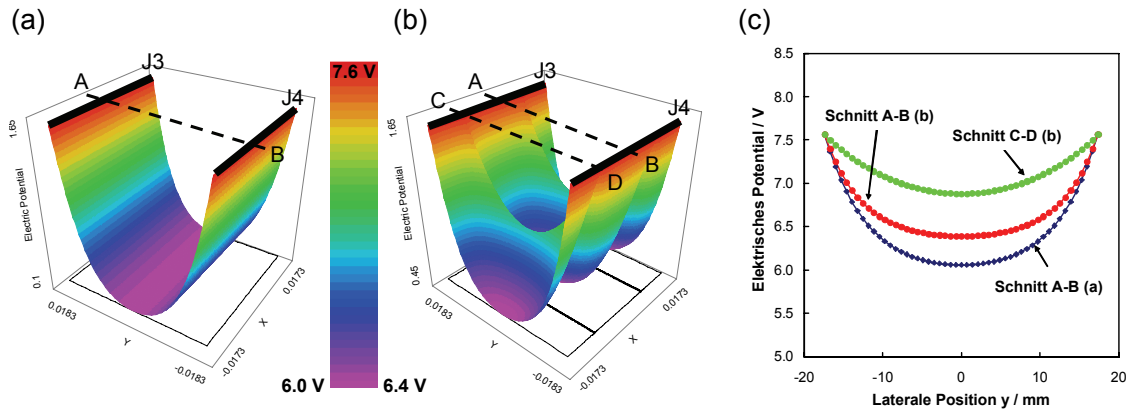


Abbildung 4.8: Berechnete Potentialverteilung in einer PH500 Anode für folgende Situationen: (a) OLED ohne Busbars, (b) OLED mit 2 Busbars aus Gold (Kontaktierung von J3 und J4). Die OLED Parameter sind: $A_{OLED} = 3,3 \text{ cm} \times 3,4 \text{ cm}$, $R_{OLED} = 24 \Omega$, $\sigma_{Busbar} \approx 9 \cdot 10^6 \text{ S/m}$, $\sigma_{PH500} \approx 5 \cdot 10^4 \text{ S/m}$, $d_{Anode} = d_{Busbar} = 100 \text{ nm}$. (c) Schnitte durch die Potentialverteilung, Schnitt A-B (a) zeigt die Potentialverteilung ohne Busbars, Schnitt A-B (b) in der Mitte der OLED ($x = 0 \text{ mm}$) mit Busbars und Schnitt C-D (b) an der Position eines Busbars ($x = 8,6 \text{ mm}$).

Eine gängige Methode, die ohmschen Verluste zu reduzieren, ist die Verwendung dünner hochleitfähiger metallischer Strukturen (Busbars) in der Anode [80]. Aufgrund der deutlich höheren Leitfähigkeit des Metalls, beispielsweise $\sigma_{Gold} \approx 9 \cdot 10^6 \text{ S/m}$, fließt der Strom vorzugsweise durch die Busbars und kann somit das Potential zur Mitte der OLED hin anheben. Jedoch sind die Strukturen nicht transparent, sodass die Verwendung vieler Busbars zu einer Reduzierung der Licht emittierenden Fläche folglich auch des gesamten Lichtstroms ϕ_v führt. Das Wirkungsprinzip von beispielsweise zwei goldenen Busbars mit einer Dicke von $d_{Busbars} = 100 \text{ nm}$ und einer Breite von $b_{Busbars} = 75 \mu\text{m}$ ist in Abbildung 4.8, b visualisiert. Anhand von Potentialschnitten (Abbildung 4.8, c) lässt sich zeigen, dass das Potential in der Mitte der OLED mit Polymeranode sowie ohne Busbars auf $\approx 40 \%$ einbricht, wobei mit Busbars nur ein Einbruch auf $\approx 70 \%$ erfolgt. Berücksichtigt ist hierbei die Schwellenspannung

$U_S \approx 5$ V der Diode (Abbildung 2.15). Es wird deutlich, dass die Verwendung von Busbar-Strukturen ein großes Potential zur Leuchtdichtehomogenisierung bei OLEDs mit Polymeranode bzw. großen Flächen aufweist.

Die Herausforderung besteht nun darin, optimale Parameter für folgende Freiheitsgrade zu berechnen: Geometrie der Busbar-Struktur, Busbar-Material, Dicke der Anode d_{Anode} , Dicke der Busbars d_{Busbar} sowie Breite der Busbars b_{Busbar} . Aufgrund des Herstellungsprozesses der OLED Muster wird als Busbar-Material Gold festgelegt und die Randbedingung eingeführt, dass $d_{Anode} = d_{Busbar}$ ist. Die Busbar-Breite darf nicht kleiner als $75 \mu\text{m}$ sein, weil die Strukturen bei der Herstellung mittels Schattenmasken auf das Glassubstrat aufgedampft werden und dies fertigungstechnisch die Grenze darstellt. Durch diese ersten fertigungsbedingten Randbedingungen reduziert sich der Parameterraum auf die Geometrie der Strukturierung (Morphologie) und die Dicke der Anode, welches es nun zu optimieren gilt.

Ein gutes OLED Schichtsystem zeichnet sich durch geringe ohmsche Verluste aus, folglich ist es zweckmäßig, dies als Gütekriterium für die Optimierung zu verwenden. Mittels des Faktors μ (Gleichung 4.2) ist eine Charakterisierung diesbezüglich möglich, wobei U_0 das Randpotential und A_{OLED} die Fläche der OLED ist.

$$\mu = \frac{\iint_{A_{OLED, ohne\ bb}} U_{Anode}(x,y) dx dy}{A_{OLED} \cdot U_0} \quad (4.2)$$

Zur Berechnung von μ wird das Integral über das elektrische Potential U_{Anode} in der Anodenfläche berechnet. Dies erfolgt jedoch nur in den transparenten Bereichen, in denen Licht emittiert wird. Die Bereiche, welche mit metallischen Busbars belegt sind, werden nicht berücksichtigt. Somit ist sichergestellt, dass eine Optimierung des Lichtstroms erfolgt. Würde die Integration über den gesamten Bereich der Anode durchgeführt werden, ist das Ergebnis der Optimierung, eine Anode ausschließlich mit Busbars besetzt, weil hierfür die ohmschen Verluste am geringsten sind. Jedoch würde kein Licht das Bauteil mehr verlassen. Eine Normierung von μ erfolgt durch die Division des maximal möglichen Wertes ohne ohmsche Verluste $A_{OLED} \cdot U_0$. Folglich gilt: $\mu \rightarrow 0$ bei OLED Systemen mit hohen ohmschen Verlusten und $\mu = 1$, wenn keine elektrischen Verluste auftreten.

Für die OLED Systeme mit konventionellen Schichtdicken ($d_{Anode} = 140$ nm, $d_{PEDOT} = 50$ nm) mit ITO Anode (Probe A) ergibt dies einen Faktor $\mu_A = 0,85$; für das System mit Polymeranode (Probe C) ist $\mu_C = 0,36$. Diese Ergebnisse sind in Tabelle 4.4 zusammengefasst. Wird die Potentialverteilung in der Anode für die Schichtdickenkonfiguration der optischen Optimierung (Kapitel 4.1) berechnet, ergibt dies $\mu_B = 0,79$ für das ITO System (Probe B) mit $d_{ITO} = 90$ nm, $d_{PEDOT} =$

4.2 Homogenisierung der lateralen Leuchtdichteverteilung

70 nm sowie $\mu_D = 0,26$ für das PH500 System (Probe D) mit $d_{PH500} = 70$ nm, $d_{PEDOT} = 10$ nm. Die optische Simulation zeigt, dass für beide Anodenmaterialien die Effizienz gesteigert werden kann, wenn dünnere Anodenschichten verwendet werden (Abbildung 4.6). Dies liegt an der optischen Absorption der Materialien. Die elektrische Simulation hingegen macht deutlich, dass die ohmschen Verluste μ bei dünneren Schichten aufgrund der Reduzierung des Leitungsquerschnittes zunehmen. Folglich würde eine elektrische Optimierung der Anodendicke zu dicken Schichten führen. Somit sind die Auswirkungen der Effekte Absorption und ohmsche Verluste gegenläufig und müssen für eine globale Optimierung kombiniert werden. Dies ist möglich durch Verwendung des Gütewertes \bar{L}_{rel} für den Optimierungsprozess. \bar{L}_{rel} resultiert aus der Multiplikation des optischen Gütewertes L_{rel} (Kapitel 4.1) und dem elektrischen Gütewert μ (Gleichung 4.3).

$$\bar{L}_{rel} = \mu \cdot L_{rel} \quad (4.3)$$

Für die Simulationen der ITO-OLED Systeme ohne Busbar-Strukturen resultieren die elektro-optischen Gütewerte $\bar{L}_{rel,A} = 0,82$ und $\bar{L}_{rel,B} = 0,79$. Die Gütewerte für die PH500-OLED Systeme sind $\bar{L}_{rel,C} = 0,27$ und $\bar{L}_{rel,D} = 0,24$. Diese niedrigen Effizienzen der OLED mit Polymeranode machen deutlich, dass eine Optimierung mit Busbar-Strukturen erfolgen muss. Wie bereits geschildert, gilt es die optimalen Parameter für die Morphologie der Busbars sowie Anodendicke zu bestimmen. Dies soll für den Kontaktierungsfall (J3, J4) erfolgen.

Tabelle 4.4: Auflistung der in der Optimierung verwendeten OLED Proben. Die Anzahl der Busbars beziehen sich auf das Busbar-Layout 6 (BBL6) (Abbildung 4.9) mit einer Breite von $75 \mu\text{m}$.

Probe	Anodenmaterial	Anzahl Busbars	Anschluss	d_{Anode}	d_{PEDOT}	L_{rel}	μ	\bar{L}_{rel}
A	ITO	-	J3, J4	140 nm	50 nm	0,96	0,85	0,82
B	ITO	-	J3, J4	90 nm	70 nm	1,00	0,79	0,79
C	PH500	-	J3, J4	140 nm	50 nm	0,76	0,36	0,27
D	PH500	-	J3, J4	70 nm	10 nm	0,92	0,26	0,24
E	PH500	22	J3, J4	140 nm	50 nm	0,76	0,90	0,68
F	PH500	33	J3, J4	70 nm	10 nm	0,92	0,82	0,75
G	PH500	30	J3, J4	90 nm	30 nm	0,87	0,87	0,76

Zunächst wird der Gütewert μ für verschiedene Busbar-Geometrien (Abbildung 4.9) berechnet. Potentiell mögliche Geometrien (Busbar-Layouts - BBL) sind: ein- sowie

zweidimensionale Gitter (BBL2, BBL3, BBL6), sternförmige Strukturen (BBL1) sowie kammartige Layouts (BBL4, BBL5), welche auch bei anorganischen Leuchtdioden zum Einsatz kommen. Anhand des Wertes μ ist jedoch deutlich zu sehen, dass alle Strukturen, welche viele Busbars parallel zur x-Achse (Abbildung 4.8) aufweisen, eine geringere Effizienz besitzen. Diese Strukturen dienen nicht zur Potentialanhebung sondern reduzieren ausschließlich die leuchtende Fläche der OLED. Folglich weist das BBL6 die größte Effizienz mit $\mu_{BBL6} = 0,87$ auf. Die weiteren Gütewerte betragen: $\mu_{BBL1} = 0,71$, $\mu_{BBL2} = 0,83$, $\mu_{BBL3} = 0,84$, $\mu_{BBL4} = 0,85$ sowie $\mu_{BBL5} = 0,85$. Mit der optimalen Struktur (BBL6) kann nun die Optimierung der Anodendicke erfolgen. Jedoch muss für jede Schichtdicke die optimale Anzahl der Busbars erneut berechnet werden. Für die Konfiguration Probe C ($d_{PH500} = 140$ nm, $d_{PEDOT} = 50$ nm) ergibt sich eine Anzahl der Busbars $n_{bb} = 22$. Die Probe D der optischen Optimierung ($d_{PH500} = 70$ nm, $d_{PEDOT} = 10$ nm) benötigt $n_{bb} = 33$, um die höheren ohmschen Verluste zu kompensieren. Diese beiden Layouts (E und F) mit Busbars erreichen einen elektro-optischen Gütewert von $\bar{L}_{rel,E} = 0,68$ sowie $\bar{L}_{rel,F} = 0,75$. Entscheidend dabei ist, dass optisch betrachtet $L_{rel,E} < L_{rel,F}$ und elektrisch betrachtet $\mu_E > \mu_F$ ist (Tabelle 4.4). Diese elektro-optische Parameterstudie führt zu einem optimalen System (Probe G) mit $\bar{L}_{rel,G} = 0,76$, den Schichtdicken ($d_{PH500} = 90$ nm, $d_{PEDOT} = 30$ nm) und der optimalen Anzahl an Busbars von $n_{bb} = 30$.

Mit dieser elektro-optischen Busbar-Optimierung ist es möglich, OLED Bauteile mit Polymeranode in einer Größe von $33 \times 34,8$ mm² zu realisieren, welche im Vergleich zu einem nicht optimierten PH500 System eine um Faktor 3 ($\bar{L}_{rel,G}/\bar{L}_{rel,D}$) bessere Effizienz aufweisen. Die schlechteren Materialeigenschaften von PH500 (Absorption sowie Leitfähigkeit) im Vergleich zu ITO können mittels Busbars annähernd kompensiert werden, aufgrund der ähnlichen Effizienzen von Probe A und G ($\bar{L}_{rel,A} \sim \bar{L}_{rel,G}$).

Für einen Vergleich der Simulationen mit realen Bauteilen werden verschiedene OLED Muster mit Polymeranode hergestellt, entsprechend der genannten Herstellungsrandbedingungen. Exemplarisch für diese Studie ist der Vergleich für das Busbar-Layout 4 durchgeführt. Mithilfe der Leuchtdichtekamera (Kapitel 3.2) wird die laterale Leuchtdichteverteilung für die Kontaktierung J3, J4 (Abbildung 4.10, a) sowie ausschließlich J3 (Abbildung 4.10, b) gemessen. Der Vergleich des Potentialverlaufs bzw. Leuchtdichteverlaufs entlang eines Schnittes zwischen zwei Busbars weist eine hohe Korrelation auf; siehe Abbildung 4.10, c.

In diesem Kapitel ist gezeigt worden, wie mithilfe der FEM die Differentialgleichung zur Berechnung der Potentialverteilung in der OLED Anode gelöst wird. Somit konnte eine Optimierung der Busbar-Strukturierung durchgeführt werden. Dies führt zu OLED Muster basierend auf Polymeranoden, welche eine um Faktor 2,4

4.2 Homogenisierung der lateralen Leuchtdichteverteilung

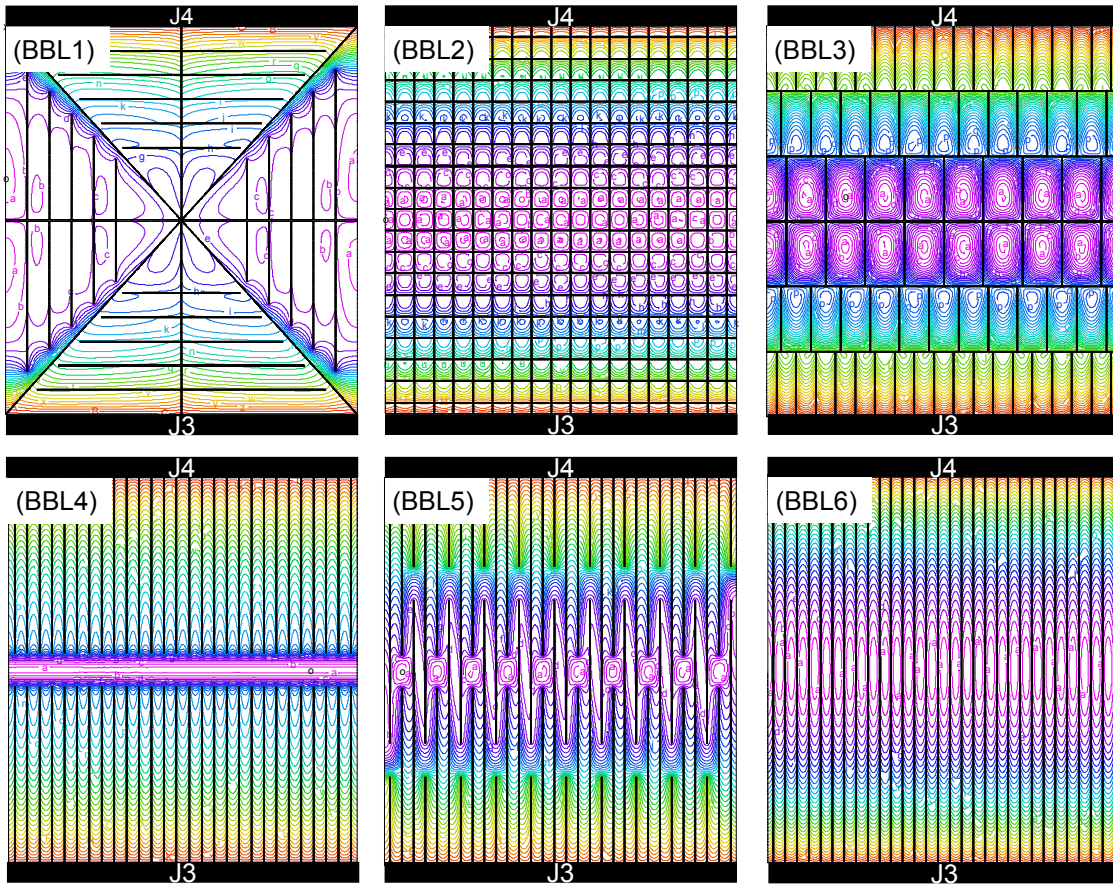


Abbildung 4.9: Simulation der elektrischen Potentialverteilung in der PH500 Anode mit verschiedenen OLED Busbar-Morphologien (BBL1-BBL6). Die Kontaktierung erfolgt über J3 und J4. Die Optimierung erfolgte für den maximalen Lichtstrom der OLED Proben. Die Korrekturfaktoren sind: $\mu_{BBL1} = 0,71$, $\mu_{BBL2} = 0,83$, $\mu_{BBL3} = 0,84$, $\mu_{BBL4} = 0,85$, $\mu_{BBL5} = 0,85$ und $\mu_{BBL6} = 0,87$.

höhere Homogenität aufweisen. Durch die simultane Berücksichtigung der optischen Interferenzeffekte sowie der spezifischen Leitfähigkeit der Anode konnte die optimale Polymeranodendicke bezüglich der Homogenität in Verbindung mit der Busbar-Strukturierung ermittelt werden ($d_{PH500,alt} = 140 \text{ nm}$, $d_{PH500,neu} = 90 \text{ nm}$).

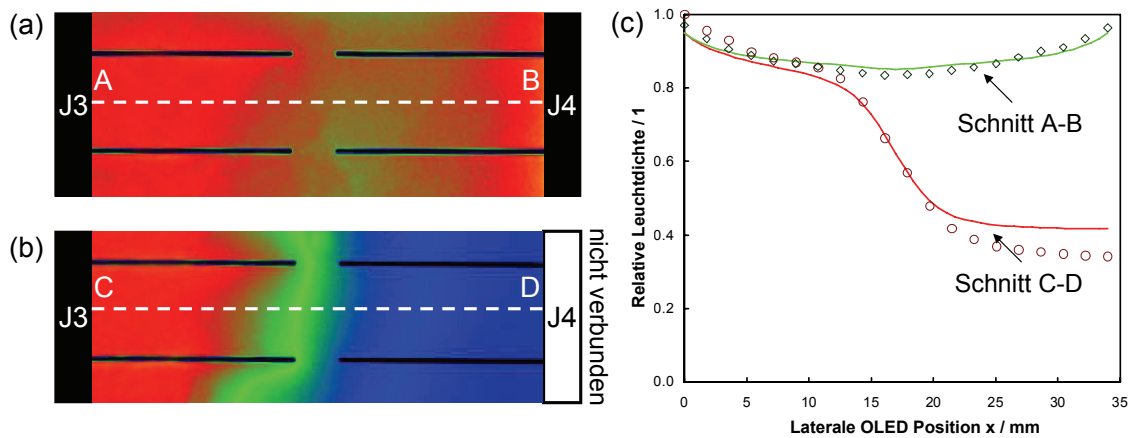


Abbildung 4.10: Vergleich zwischen der berechneten Leuchtdichteverteilung und der realen Leuchtdichteverteilung der entsprechenden Probe mit Busbars. (a) Kontaktierung J3 und J4 sind verbunden. (b) Nur Kontaktierung J3 ist verbunden. (c) Darstellung der horizontalen Leuchtdichteschritte zwischen den Busbars. Die Volllinien zeigen die simulierten Werte und die Punktlinien repräsentieren die gemessenen Leuchtdichtewerte.

4.3 Simulation diffuser Auskoppelstrukturen

Die folgende Simulationsstudie beschäftigt sich mit der Frage, wie die Glasoberfläche (Grenzübergang zur Luft) des OLED Substrats (Abbildung 2.1) strukturiert sein muss, um effizient die Totalreflexion zu vermeiden, um mehr Photonen aus dem Schichtsystem auskoppeln zu können. Für die Strukturierung werden in dieser Arbeit ausschließlich diffuse Oberflächen untersucht.

Wie bereits in Kapitel 2.1 geschildert, sorgt die glatte Glasoberfläche für Fresnelverluste und Substratmodenbildung. Dies soll durch eine geeignete Strukturierung der Oberfläche unterdrückt werden, um den emittierten Lichtstrom zu maximieren. In wissenschaftlichen Veröffentlichungen sind hierfür bereits verschiedene effiziente Ansätze wie beispielsweise Mikrolinsenarrays oder nano-poröse Strukturen publiziert [81]-[85]. Nachteilig bei diesen Lösungen sind die hohen Herstellungskosten sowie derzeitige Größenbeschränkungen in der Produktion. Ungeordnete Oberflächendiffusoren mit Glas weisen diese Nachteile jedoch nicht auf. Mittels Laserablation ist es möglich, reproduzierbar raue Oberflächen herzustellen [86, 87]. An der Technischen Universität Kaiserslautern, Fachbereich Physik besteht hierfür die Möglichkeit Borosilikatglas der Schott AG (D263T) mittels reaktivem Ionenätzen (RIE) zu strukturieren. Dabei wird der Effekt der Selbstorganisation [88, 89] genutzt, um in Abhängigkeit der Betriebsparameter, wie beispielsweise das Ätzgasgemisch,

Gasdruck oder die Substrattemperatur, kugelhähnliche oder prismaähnliche Strukturen zu erzeugen. Für die Herstellung der folgenden Proben wurde eine MicroSys Anlage der Firma Roth & Rau mit einem Elektron-Zyklotron-Resonanz (ECR) Plasmagenerator verwendet. Als Ätzgas dient Tetrafluormethan (CF_4/Ar) in Verbindung mit Argon (Ar) als Plasmagas [90]. Mit diesem Aufbau werden 29 Proben mit unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten produziert und anschließend zur Analyse mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) vermessen. Die Auswertung der REM Aufnahmen liefert für einen kleinen Probenausschnitt das Höhenprofil und die mittlere Rauheit R_m der Oberfläche. Exemplarisch sind die Aufnahmen der REM Messung für die Proben DT3 (kugelartig), DT7 (prismenartig) und DT13 (glatt) in Abbildung 4.11 dargestellt. Die Berechnung der mittleren Rauheit ergibt $R_{m,DT3} = 459$ nm, $R_{m,DT7} = 313$ nm und $R_{m,DT13} = 57$ nm für die drei ausgewählten charakteristischen Proben.

Grundsätzlich ist es möglich, mit diesen gewonnenen Daten eine Simulation durchzuführen, wie die Lichtwelle aus der OLED durch den Diffusor propagiert und welche Fernfeldverteilung zu erwarten ist. Aufgrund der kleinen Strukturgrößen muss, wie bei den Schichtsystemsimulationen (Kapitel 4.1), der Wellencharakter des Lichtes in Form der Maxwellgleichungen berücksichtigt werden. Diese Anforderung erfüllen Softwaretools wie z. B. VirtualLab [91] der Firma LightTrans, welche beispielsweise zur Optimierung von diffraktiven optischen Elementen [92] (DOE) verwendet wird. Der Nachteil dieser Vorgehensweise ist einerseits der hohe Rechenaufwand. Andererseits ist die Messung der Oberfläche nur in einem kleinen Bereich gültig und stellt nicht sicher, ob das optische Verhalten auch auf eine größere Fläche übertragbar ist. Aus diesem Grund wird die Oberfläche phänomenologisch betrachtet und gemäß Kapitel 3.4 optisch charakterisiert. Durch diese Messungen werden die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen für die diffusen und spekularen Anteile jeweils in Reflexion und Transmission bestimmt. Dies vereinfacht die optischen Simulationen, weil nur noch Vektoren für die Berechnung benötigt werden und keine komplexwertigen Matrizen benutzt werden. Die Messergebnisse der optischen Charakterisierung für die drei ausgewählten charakteristischen Proben in Transmission sind in Tabelle 4.5 zusammengefasst. Korrespondierend zu den Transmissionsmessungen sind die Ergebnisse für die Reflexion in Tabelle 4.6 aufgelistet. Bei der Auswahl der drei Proben wurde darauf geachtet, dass sowohl die Morphologie der Oberfläche als auch das Streuverhalten der Proben große Abweichungen aufweisen.

Ein Vergleich zwischen den REM-Messungen und den Streumessungen zeigt, dass die Probe DT13 den höchsten Anteil in spekularer Transmission (T_s) aufweist und folglich die geringste mittlere Rauheit besitzt. Entsprechend hierzu weist die Probe DT3 die größte mittlere Rauheit auf, welches auch durch die Streumessungen mit dem geringsten Anteil T_s bestätigt wird. Wie es bei prismatischen Strukturen zu

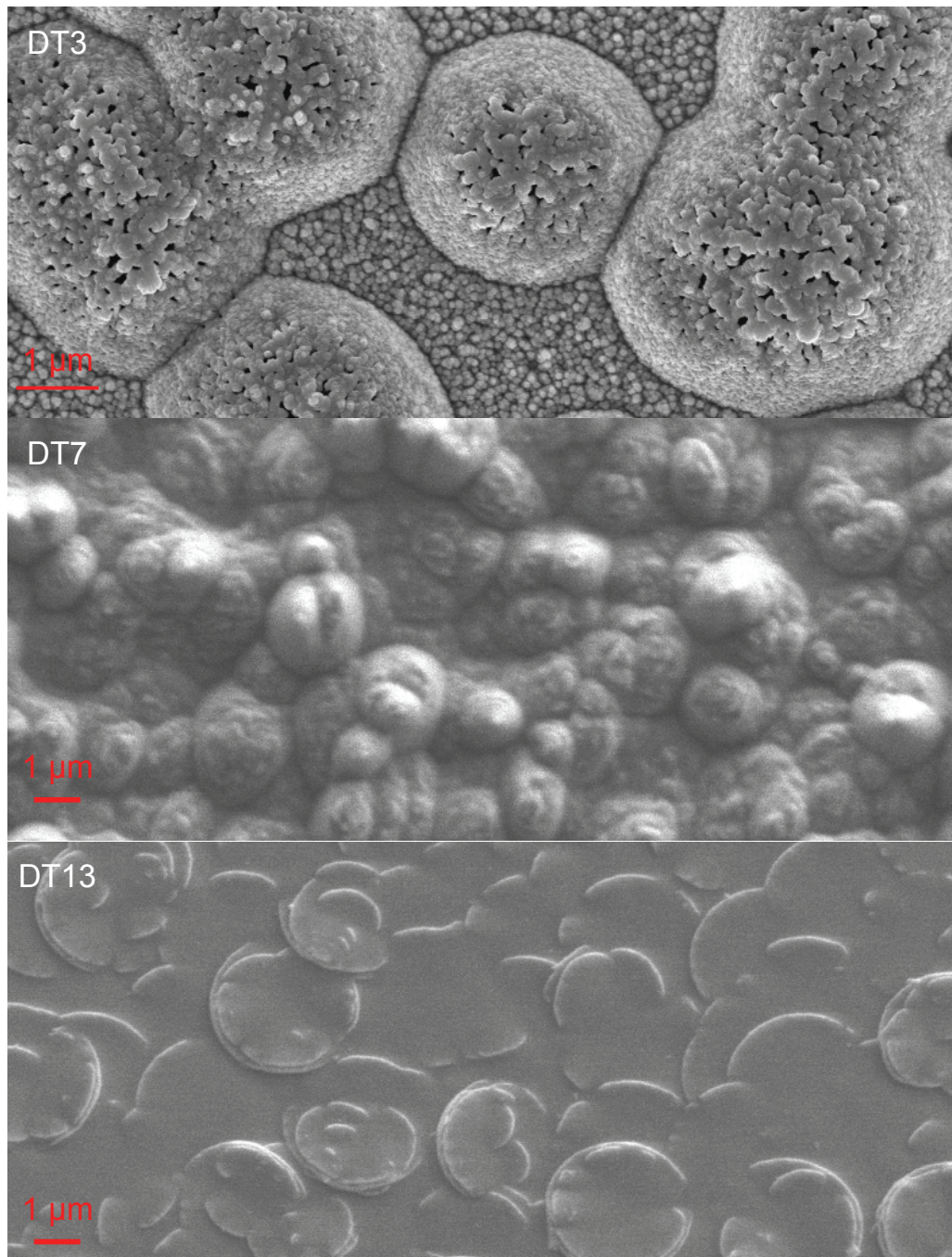


Abbildung 4.11: Aufnahmen der Streuprobe mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM). Der Name der Probe sowie der Maßstab ist in der jeweiligen Messung angegeben. Quelle: [90]

Tabelle 4.5: Aus den Transmissionsmessungen bestimmte Harvey-Parameter für die Streuproben DT3, DT7 und DT13.

Probe	b_0	s	l	$T/ \%$	$T_s/ \%$	$T_d/ \%$	$Abs/ \%$
DT3	7,2	-3,27	0,17	90,2	6,2	84,0	3,3
DT7	8,8	-3,86	0,13	86,5	20,0	66,5	0,7
DT13	1,3	-2,09	0,09	91,4	80,2	11,2	3,6

Tabelle 4.6: Aus den Reflexionsmessungen bestimmte Harvey-Parameter für die Streuproben DT3, DT7 und DT13.

Probe	b_0	s	l	$R/ \%$	$R_s/ \%$	$R_d/ \%$	$Abs/ \%$
DT3	6,8	-4,91	0,23	6,5	0,1	6,4	3,3
DT7	3,6	-3,16	0,19	12,8	0,1	12,7	0,7
DT13	5,0	-5,18	0,24	5,0	1,1	3,9	3,6

erwarten ist, weist die Probe DT7 den größten Anteil in Reflexion auf.

Die expliziten Winkelverteilungen der Streumessungen jeweils für Reflexion und Transmission in Abhängigkeit des Einfallswinkels sind für die drei Proben in Abbildung 4.12 gezeigt. Entsprechend der Erläuterungen in Kapitel 2.3.3 werden die Messergebnisse in die Harvey-Auftragung überführt, um die Parameter b_0 , s und l ablesen zu können. Die Harvey-Auftragung der Messungen ist in Abbildung 4.13 jeweils für Transmission und Reflexion visualisiert.

Eine Analyse der Winkelverteilungen macht deutlich, dass es sich bei der Probe DT13 um einen glatten Diffusor handelt, aufgrund des stark ausgeprägten Spekularpeaks in den Messergebnissen. Ein weiteres Merkmal für diese Beschaffenheit ist der deutliche Verlauf des spekularen Anteils gemäß der Fresnelgleichungen. Bei der Reflexionsmessung der Probe DT13 mit einem Einkoppelwinkel von 0° (Volllinie) tritt ein weiterer Peak bei 35° auf. Dies ist ein Messfehler aufgrund von Vielfachreflexionen im Aufbau und stellt keine Eigenschaft der Probe dar. Die Implementierung von Blendenelementen im Strahlengang zeigte eine Unterdrückung dieses Messfehlers. Der starke Einbruch der Leistung ab 70° in Transmission resultiert durch die Abschattung der Probenhalterung. Ebenfalls lässt sich der Einbruch in Reflexion unter kleinen Winkeln bei einem Einkoppelwinkel von 0° (Volllinie) durch die Abschattung des Lasergehäuses erklären. Entsprechend den Messungen aus Tabelle 4.6 weisen die Proben DT3 und DT7 kaum einen spekularen Anteil in Reflexion auf. Dieses Verhalten spiegelt sich auch in den Winkelverteilungen wieder. Ein interessantes Verhalten weist die Probe DT3 (Abbildung 4.12, oben) auf. Im Gegensatz zu den beiden anderen Proben befindet sich der diffuse Peak in Transmission bei dem nicht

4 Ergebnisse und Diskussion

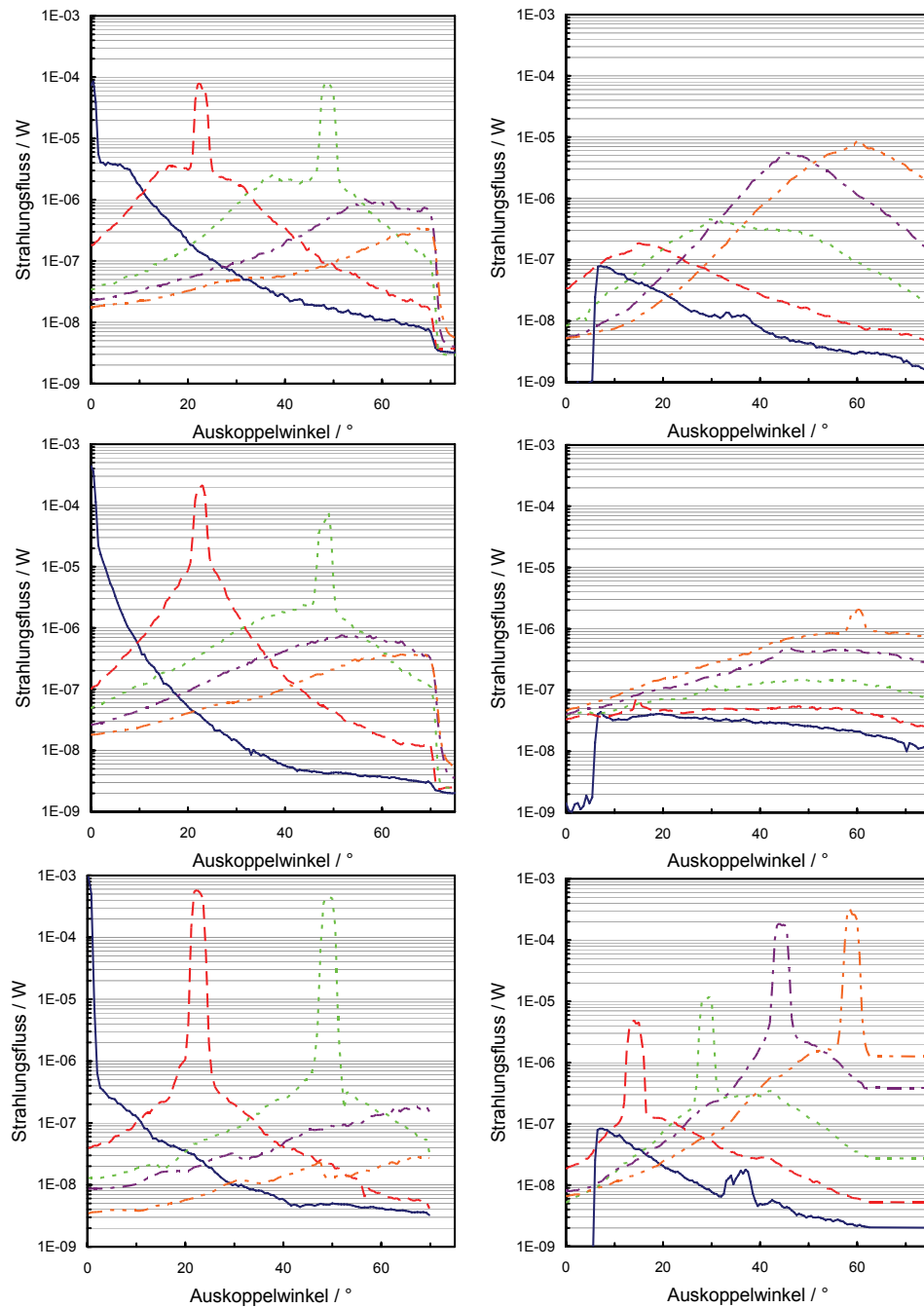


Abbildung 4.12: Messung der Winkelverteilung der Streuproben DT3 (oben), DT7 (mitte) sowie DT13 (unten) in Transmission (links) und Reflexion (rechts). Der Einkoppelwinkel wird variiert mit 0° (Volllinie), 15° (Strichlinie), 30° (Punktlinie), 45° (Strichpunktlinie) und 60° (Strichzweipunktlinie). Die Messwellenlänge beträgt $\lambda = 660$ nm.

4.3 Simulation diffuser Auskoppelstrukturen

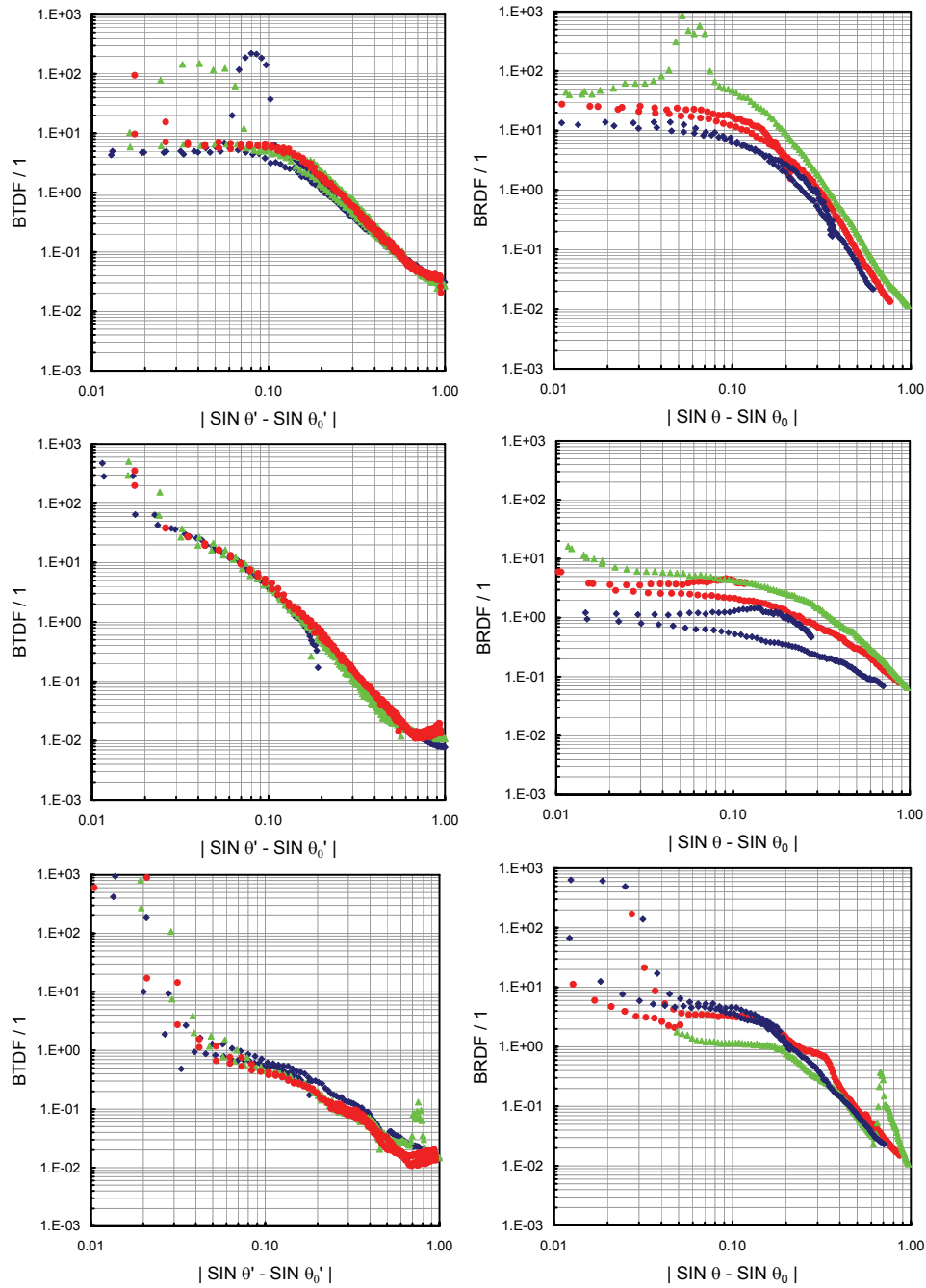


Abbildung 4.13: Auftragung der Streumessungen aus Abbildung 4.12 in der Harvey-Auftragung für die Proben DT3 (oben), DT7 (mitte) sowie DT13 (unten) in Transmission (links) und Reflexion (rechts). Dargestellt sind die Einkoppelwinkel 30° (Punkt), 45° (Dreieck) und 60° (Raute). Die Messwellenlänge beträgt $\lambda = 660 \text{ nm}$.

gebrochenen Winkel, folglich gleich dem Einfallswinkel. Somit verteilt sich der diffuse Anteil nicht um den spekularen Anteil und muss bei den späteren Simulationen berücksichtigt werden. Dieses Verhalten sorgt ebenfalls für die Peaks in der Harvey-Auftragung (Abbildung 4.13, oben), bei der die Zentrierung in Abhängigkeit des Einfallswinkels um die diffuse Verteilung erfolgt.

Wie aus den Messungen zu erkennen ist besitzt das Harvey-Modell für die Streuung in Transmission seine Gültigkeit, weil alle Messungen aufeinander fallen. Jedoch in Reflexion scheint das Modell an seine Grenzen zu stoßen, da anscheinend die Streuung in Reflexion vom Einfallswinkel abhängig ist. Dennoch ist es möglich, charakteristische Parameter für die Steigung s und den Schulterparameter l zu bestimmen. Die folgenden Simulationen werden zeigen, dass sich diese Ungenauigkeit jedoch kaum auf die Simulationsergebnisse auswirkt. In Tabelle 4.6 sind die Ergebnisse (b_0 , s und l) der Ausgleichsrechnung mit Gleichung 2.40 für Reflexion zusammengefasst. Analog hierzu befinden sich die Werte für Transmission in Tabelle 4.5.

Nach der optischen Charakterisierung der Diffusoren erfolgt nun die Analyse, wie sich die Strukturen in Verbindung mit der OLED als Auskoppeloptik (Primäroptik) eignen. Für die Simulation dieser Aufgabenstellung stehen kommerzielle Softwarelösungen wie beispielsweise ASAP [51] oder ZEMAX [49] zur Verfügung. Beide Programme unterstützen unterschiedliche Streumodelle wie auch das Harvey-Modell. Jedoch ist bei der Simulation der winkelabhängigen Leuchtdichte der OLED eine exakte Berücksichtigung der Energieverteilungen zwischen dem spekularen und diffusen Anteil jeweils in Reflexion und Transmission existenziell. Des Weiteren haben die Streumessungen gezeigt, dass eine zusätzliche Spezifizierung erfolgen muss, um welchen Winkel (gebrochen oder ungebrochen) sich die diffuse Verteilung zentriert. Diese beiden Merkmale des Streumodells werden jedoch nicht in den kommerziellen Softwarelösungen unterstützt.

Da es sich bei der OLED um ein planparalleles optisches System handelt, ist es dienlich eine eigene Softwarelösung zu entwickeln, welche die Simulation der Winkelverteilung der OLED mit Primäroptik durchführt. Im Folgenden wird das Funktionsprinzip sowie der Programmablauf entlang eines Lichtstrahls erläutert.

Beginnend wird ein Strahl in der Glasschicht Richtung Luft propagiert und trifft auf die raue Oberfläche. Ein Teil der Energie dieses Strahls wird spekulär transmittiert T_s , ein weiterer Anteil wird spekulär reflektiert R_s . Die prozentuale Gewichtung des spekularen Anteils gegenüber dem diffusen Anteil erfolgt gemäß den Messergebnissen der optischen Charakterisierung der Oberfläche (Tabelle 4.5 und Tabelle 4.6). In Abhängigkeit des Einfallswinkels θ erfolgt die weitere Gewichtung gemäß den vereinfachten Fresnelgleichungen [94] für $k = 0$ (Gleichung 4.4).

Simulation der Winkelverteilung einer OLED mit Auskoppeloptik

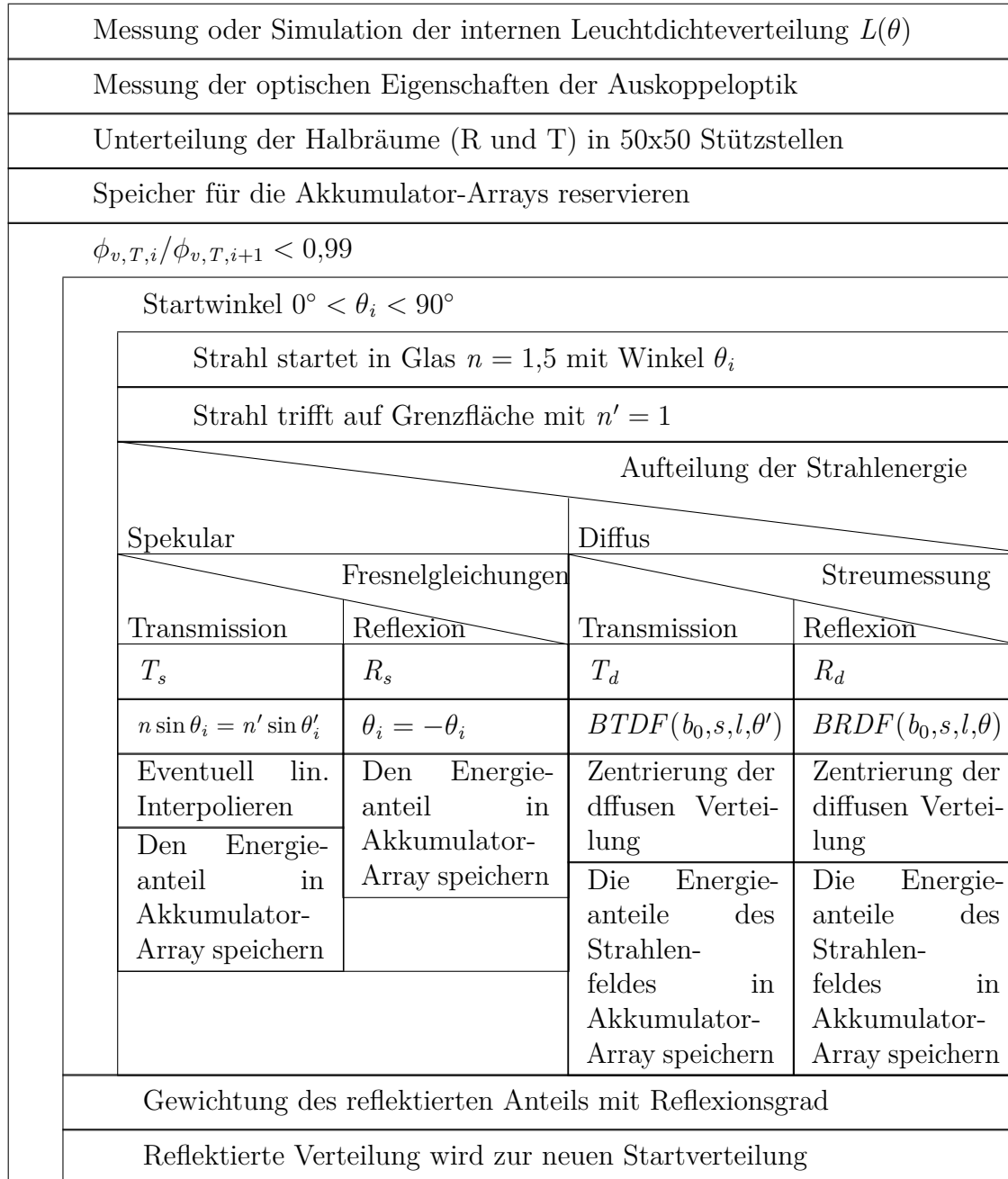


Abbildung 4.14: Struktogramm nach Nassi-Shneiderman [93] zur Verdeutlichung des Simulationsablaufs für die Berechnung der Winkelverteilung einer OLED mit Auskoppeloptik.

$$\begin{aligned}
 r_s &= \frac{\cos \theta - \sqrt{\tilde{n}^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\tilde{n}^2 - \sin^2 \theta}}; & R &= r^2 \\
 r_p &= \frac{\tilde{n}^2 \cos \theta - \sqrt{\tilde{n}^2 - \sin^2 \theta}}{\tilde{n}^2 \cos \theta + \sqrt{\tilde{n}^2 - \sin^2 \theta}} \\
 t_s &= \frac{2 \cos \theta}{\cos \theta + \sqrt{\tilde{n}^2 - \sin^2 \theta}}; & T &= \tilde{n} \cos \theta' / \cos \theta \cdot t^2 \\
 t_p &= \frac{2 \tilde{n} \cos \theta}{\tilde{n}^2 \cos \theta + \sqrt{\tilde{n}^2 - \sin^2 \theta}}
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

In den Gleichungen repräsentiert \tilde{n} das Brechzahlverhältnis $\tilde{n} = n'/n$. Dem spekulär transmittierten Teil widerfährt eine Winkeländerung entsprechend dem Brechungsgesetz $n \sin \theta = n' \sin \theta'$, der Winkel des reflektierten Anteils bleibt erhalten. Gewichtet mit den diffusen Anteilen (Tabelle 4.5 und Tabelle 4.6) wird die konkrete Winkelverteilung für diffus reflektiert R_d sowie diffus transmittiert T_d entsprechend Gleichung 2.40 berechnet. Der reflektierte Anteil propagiert ohne Winkeländerung durch das Schichtsystem, wird an der Kathode reflektiert und trifft nun in erster Näherung wieder mit der gleichen Verteilung auf die raue Oberfläche. Zur Verdeutlichung: die Energie eines Strahls verteilt sich auf ein Strahlenfeld, welches den gesamten Halbraum in Transmission sowie Reflexion abdeckt. Anhand der Messung der internen Lichtstärkeverteilung ist die Energie des Initialstrahls bestimmbar.

Für die numerische Berechnung wird der jeweilige Halbraum in Transmission und Reflexion in 50×50 diskrete Stützstellen als Akkumulator-Arrays eingeteilt. Beginnend mit der Lichtstärkeverteilung im Glas werden für jeden diskreten Winkel im Array die Energieanteile T_s , T_d , R_s und R_d wie zuvor geschildert berechnet und die einzelnen Beiträge in dem Akkumulator-Array gespeichert. Für die diffuse Verteilung $BRDF$ und $BTDF$ kann der exakte Wert für die diskrete Stützstelle berechnet werden. Dies ist beim spekulären Anteil aufgrund des Brechungsgesetzes nicht möglich. Fällt ein Strahl zwischen die diskreten Stützstellen, wird die Energie im Sinne der Vierer-Nachbarschaft abstandsgewichtet aufgeteilt. Nach dieser ersten Iteration wird der reflektierte Anteil mit einem konstanten Faktor von 0,75 (Messung des Reflexionsgrades der OLED) gewichtet und für eine zweite Iteration als Startverteilung verwendet. Alle transmittierten Energieanteile werden auf die Einträge der ersten Iteration summiert. Nach ca. fünf Iterationen ist die Änderung des transmittierten Lichtstroms kleiner als 1 % und die Simulation wird abgebrochen. Zur weiteren Verdeutlichung des Ablaufs dieser Simulation ist in Abbildung 4.14 ein

Struktogramm nach Nassi-Shneiderman [93] aufgeführt.

Die Daten für die Simulation in Form der optischen Eigenschaften der Oberfläche werden aus den Streumessungen (Kapitel 3.4) gewonnen. Eine Bestimmung der Lichtstärkeverteilung im Glassubstrat erfolgt durch die Simulationen aus Kapitel 4.1. Alternativ hierzu ist auch eine Messung der Verteilung möglich, indem die Halbkreis-Zylinderlinse (siehe Kapitel 3.4) mittels Immersionsflüssigkeit auf eine OLED aufgebracht wird. Mit den gewonnenen Daten kann nun eine Simulation der Winkelverteilung der OLED mit Auskoppeloptik erfolgen. In Abbildung 4.15 ist das Ergebnis der Simulation exemplarisch für die Probe DT7, sowie die interne und externe Leuchtdichteverteilung gezeigt. Der Vergleich zwischen der Simulation und der Messung der Winkelverteilung der OLED mit DT7 ist in Abbildung 4.15, b dargestellt.

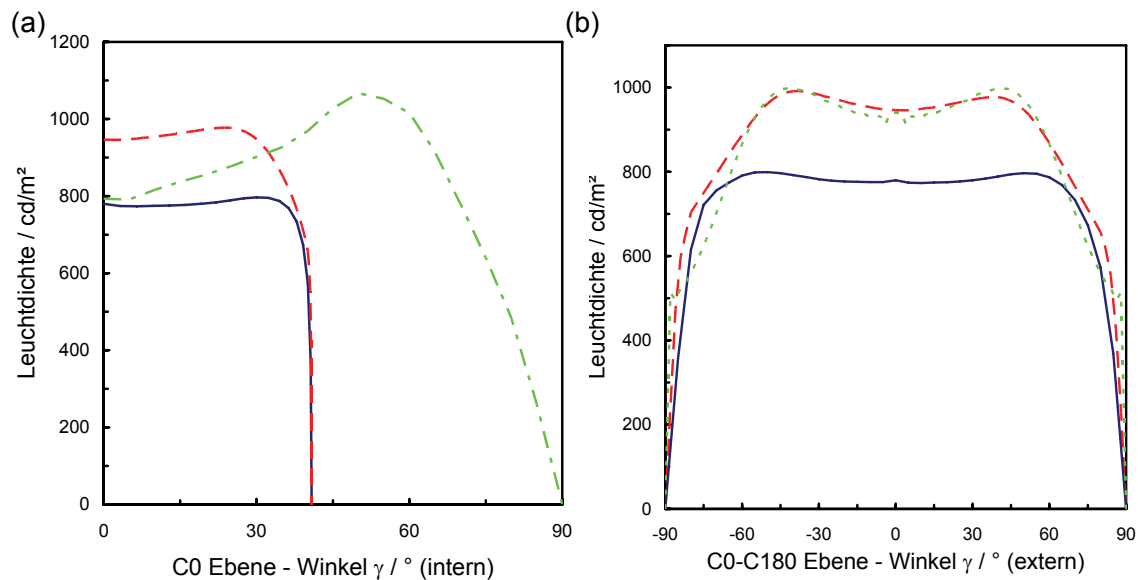


Abbildung 4.15: (a) Messung der winkelabhängigen internen Leuchtdichteverteilung der OLED (Volllinie), der OLED mit Auskoppeloptik (Strichlinie) sowie der Leuchtdichteverteilung im OLED Substrat (Strichpunktlinie). Zu beachten ist, dass auf der Abszissenachse der Winkel im Substrat aufgetragen ist. (b) Vergleich zwischen der simulierten Leuchtdichteverteilung (Punktlinie) und der gemessenen Leuchtdichteverteilung (Strichlinie) der OLED mit Auskoppeloptik. Als Referenz ist die Leuchtdichteverteilung der reinen OLED gezeigt (Volllinie).

Als Bestätigung, dass die Simulationen und die Messungen korrekt sind, weisen die Winkelverteilungen zueinander eine hohe Korrelation auf. Des Weiteren wird deutlich, dass es aufgrund der Auskoppelstruktur (Probe DT7) möglich ist, die Totalreflexion

zu verringern um mehr Licht aus den Substratmoden ins Fernfeld zu transferieren. Die Leuchtdichte unter 0° kann hierdurch um den Faktor 1,21 gesteigert werden. Berechnet man den emittierten Lichtstrom Φ_v gemäß Gleichung 3.7, lässt sich eine Steigerung dieses Wertes um den Faktor 1,18 feststellen. Eine Vermessung aller Proben sowie deren Simulationen zeigen, dass diese Effizienzsteigerung mit Probe DT7 das Maximum darstellt.

Anhand der Simulationen kann nun der Frage nachgegangen werden, wie sich die Eigenschaften der Diffusoren auf die winkelabhängige Leuchtdichte der OLED auswirken. Für eine erste Parameterstudie werden nur die Harvey-Parameter des Diffusors (DT7) variiert, jedoch nicht die Energiebilanz für T_s , T_d , R_s sowie R_d . Würde bei den Simulationen dieser Freiheitsgrad auch variiert werden, hätte dies eine erhebliche Expansion der benötigten Simulationen zur Folge, und eine Konvergenz zu realitätsfremden Oberflächen wäre zu befürchten (Optimal: $T \rightarrow 100\%$ und $R \rightarrow 0\%$).

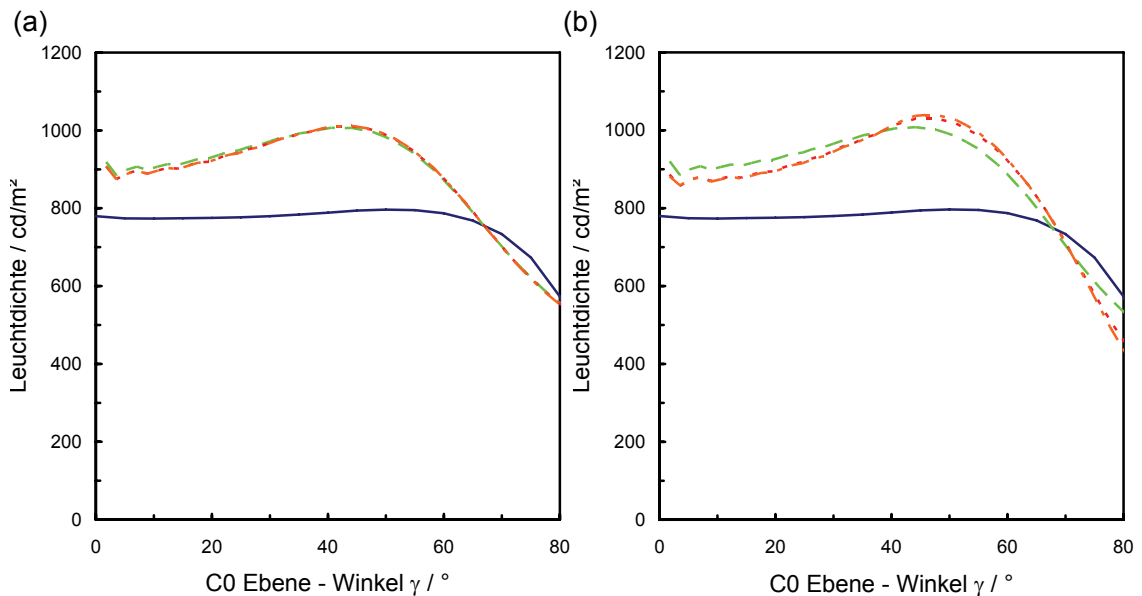


Abbildung 4.16: Simulation der winkelabhängigen Leuchtdichte der OLED (Volllinie) in Verbindung mit idealisierten Streuproben. Dargestellt sind die Ergebnisse der Parameterstudien mit Änderung der Werte für Reflexion (a) sowie Transmission (b). Variiert ist der Harvey-Parameter s mit den Werten: $s = -3$ (Strichlinie), $s = -6$ (Punktlinie) und $s = -9$ (Strichpunktlinie).

Die Parameterstudien des Harvey-Parameters s in Transmission und Reflexion sind in Abbildung 4.16 gezeigt. Hierbei ist s in dem geschlossenen Intervall $[-3; -9]$ variiert worden. Es wird deutlich, dass der Einfluss dieses Parameters auf die

Winkelverteilung sehr gering ist. Ebenfalls scheint die Streuverteilung in Reflexion kaum einen Beitrag an der Leuchtdichteverteilung der OLED zu leisten.

Die Ergebnisse der Parameterstudie des Harvey-Wertes l im Intervall $[0,0001; 0,9999]$, welche die Extremalwerte darstellen, ist in Abbildung 4.17 visualisiert.

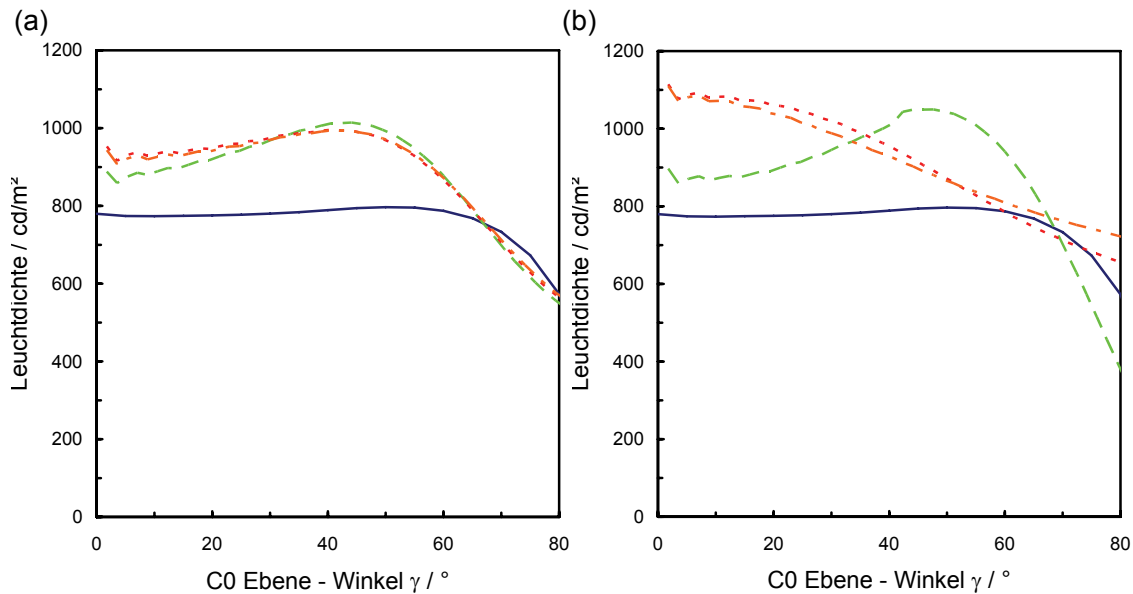


Abbildung 4.17: Simulation der winkelabhängigen Leuchtdichte der OLED (Volllinie) in Verbindung mit idealisierten Streuproben. Dargestellt sind die Ergebnisse der Parameterstudien mit Änderung der Werte für Reflexion (a) sowie Transmission (b). Variiert ist der Harvey-Parameter l mit den Werten: $l = 0,0001$ (Strichlinie), $l = 0,5$ (Punktlinie) und $l = 0,9999$ (Strichpunktlinie).

Auch bei dieser Simulation wird deutlich, dass der Einfluss der Streuverteilung in Reflexion auf die resultierende Leuchtdichteverteilung der OLED sehr gering ist. Mit Variation des Schulterparameters in Transmission von $l \rightarrow \min.$ zu $l \rightarrow \max.$ ist eine Variation der Leuchtdichteverteilung von eher lambertsch hin zu einer vorwärts gerichteten Verteilung möglich. Die Herausforderung besteht nun darin, reale Oberflächen mit diesem Streuverhalten herzustellen. Jedoch gehört dies nicht mehr zum Inhalt dieser Arbeit. Allerdings wird im folgenden Kapitel der Einfluss dieser Leuchtdichteveränderung auf die Sekundäroptik erörtert.

In diesem Kapitel ist gezeigt worden, wie mithilfe eines einfachen Programms die Auskoppel-Performance von diffusen Oberflächen auf Basis des Harvey-Modells simuliert werden kann. Somit konnte eine Primäroptik bestimmt werden, die mehr Licht aus dem Schichtsystem auskoppelt und dadurch die Leuchtdichte der OLED um den Faktor 1,21 erhöht. In weiterführenden Simulationsstudien ist gezeigt worden,

dass die Streueigenschaften in Reflexion kaum einen Einfluss auf die Leuchtdichteverteilung haben. Mit dem Harvey-Parameter l in Transmission lässt sich die Winkelverteilung der OLED zwischen vorwärts gerichtet und lambertsch variieren.

4.4 Optimierung effizienter Sekundäroptiken

Wie in Kapitel 4.3 gezeigt ist es möglich, mithilfe der Primäroptik (Auskoppeloptik) die Effizienz der OLED zu steigern, sowie die Leuchtdichte als Funktion des Emissionswinkels von einer lambertschen zu einer gerichteten Verteilung zu variieren. Die folgenden Simulationsstudien beschäftigen sich mit der Fragestellung, wie in Abhängigkeit des Anwendungsgebietes eine geeignete Sekundäroptik in Kombination mit der Primäroptik beschaffen sein muss, um die Anforderungen der jeweiligen Applikation zu erfüllen.

Als erstes Anwendungsfeld werden zwei Leuchtentypen aus dem Automobilbereich ausgesucht. Mit der aktuell realisierbaren Leuchtdichte von OLEDs eignen sich hierfür die Typen Seitenmarkierungsleuchte sowie ambiante Innenbeleuchtung. Eine Designstudie der Firma Hella KGaA Hueck & Co. illustriert, wie ein späteres Produkt basierend auf den OLED Mustern (Kapitel 3.5) aussehen könnte (Abbildung 4.18).

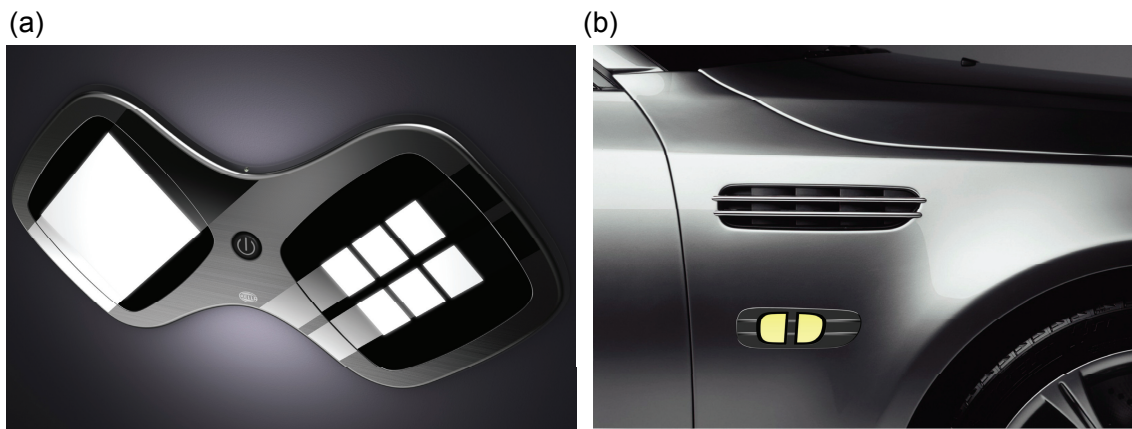


Abbildung 4.18: Designstudie der Firma Hella KGaA Hueck & Co. für den Einsatz der OLED im Automobilbereich [95]. Als Beispiele dienen eine Innenleuchte (a) sowie eine Seitenmarkierungsleuchte (b).

Eine Besonderheit der OLED Innenleuchte ist ihre Multifunktionalität. Folglich stellt der Flächenstrahler eine ambiante Beleuchtung mit geringer Beleuchtungsstärke des vorderen Fahrzeuginnenraums sicher, und der Pixelstrahler dient als Leseleuchte für den Beifahrer sowie als akzentuale Beleuchtung. Mit der OLED

typischen lambertschen Abstrahlverteilung eignet sich der Flächenstrahler ideal für eine breite ambiente Beleuchtung und benötigt folglich nur eine Primäroptik mit einer breiten Abstrahlcharakteristik (Probe DT7). Eine Simulation mit ZEMAX [49] zeigt, dass hiermit eine mittlere Beleuchtungsstärke von $E_v \approx 2,5$ lx im Bereich der vorderen Sitzplätze realisierbar ist. Jedoch für die gerichtete Abstrahlverteilung der Leseleuchte wird sowohl eine stark unter 0° emittierende Primäroptik ($l \rightarrow \max.$) wie auch eine Kollimations-Sekundäroptik benötigt, um höhere Beleuchtungsstärken realisieren zu können.

Eine einfache Möglichkeit einer Kollimationslinse stellt die Fresnel-Stufenlinse dar, die entweder einzeln (pro Pixel) oder als Arrays (alle sechs Pixel) ausgelegt werden kann. Der Abstand zwischen der Linse und der OLED wird derart gewählt, dass die OLED sich innerhalb der Brennweite nahe der Brennebene befindet. Dies führt zu einer virtuell vergrößerten Abbildung des jeweiligen Pixels. Unter Einhaltung der Helmholtz-Lagrange-Invariante für endliche Öffnungswinkel $y \cdot n \cdot \sin \theta = y' \cdot n' \cdot \sin \theta'$ reduziert dies den Emissionswinkel θ der OLED und erhöht folglich die Lichtstärke. Der Nachteil dieses Lösungsansatzes ist die benötigte Vergrößerung der Bautiefe aufgrund der Brennweite der Fresnel-Stufenlinse ($f' = 30$ mm). Eine Optimierung der Fresnellinse erfolgt mit der Software ZEMAX [49]. Um die exakte Winkelverteilung der OLED mit Primäroptik zu berücksichtigen, wird die Lichtquelle in ZEMAX als Dynamic Link Library (DLL) ausgelegt. Dies ermöglicht eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion entsprechend der Leuchtdichtevertelung der OLED zu generieren. Mittels Zufallszahlen [96] berechnet die DLL bei jedem Aufruf einen Lichtstrahl, definiert durch seine Startkoordinaten (x, y, z) (Abbildung 2.8) sowie die Startrichtung (l, m, n) [97]. Die laterale Leuchtdichtevertelung (Kapitel 3.2) wird in erster Näherung als konstant angesehen, folglich sind die Startkoordinaten gleichverteilt. Generell lässt sich die benötigte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Leuchtdichte über die Berechnung der Umkehrfunktion bestimmen. Jedoch wird in diesem Fall für eine genaue Nachbildung der Winkelverteilung bei der Ausgleichsrechnung ein Polynom höherer Ordnung ($n = 6$) benötigt. Die Berechnung der Umkehrfunktion ist hierfür aber nicht möglich. Aus diesem Grund werden zwei gleichverteilte Zufallsvariablen L_z und γ_z in dem benötigten Intervall ($L_z \in [0, 1200]$, $\gamma_z \in [0, 90]$) generiert. Für den Fall das $L_z < L(\gamma_z)$ ist, wird γ_z als Winkel verwendet. Anderenfalls werden zwei neue Zufallsvariablen generiert und erneut verglichen. Da es sich bei der Winkelverteilung um eine rotationssymmetrische Verteilung handelt, genügt es für C_z (Abbildung 3.7) einen gleichverteilten Zufallswert zu verwenden.

Mit diesem Lichtquellenmodell ist es möglich, eine gute Optimierung der Fresnellinse durchzuführen. Die mittlere Beleuchtungsstärke der Nutzebene auf der Beifahrerseite lässt sich somit auf $E_v \approx 85$ lx erhöhen. Eine Visualisierung der geometrischen Anordnung sowie der simulierten Beleuchtungsstärkeverteilung ist in

Abbildung 4.19 zeigt.

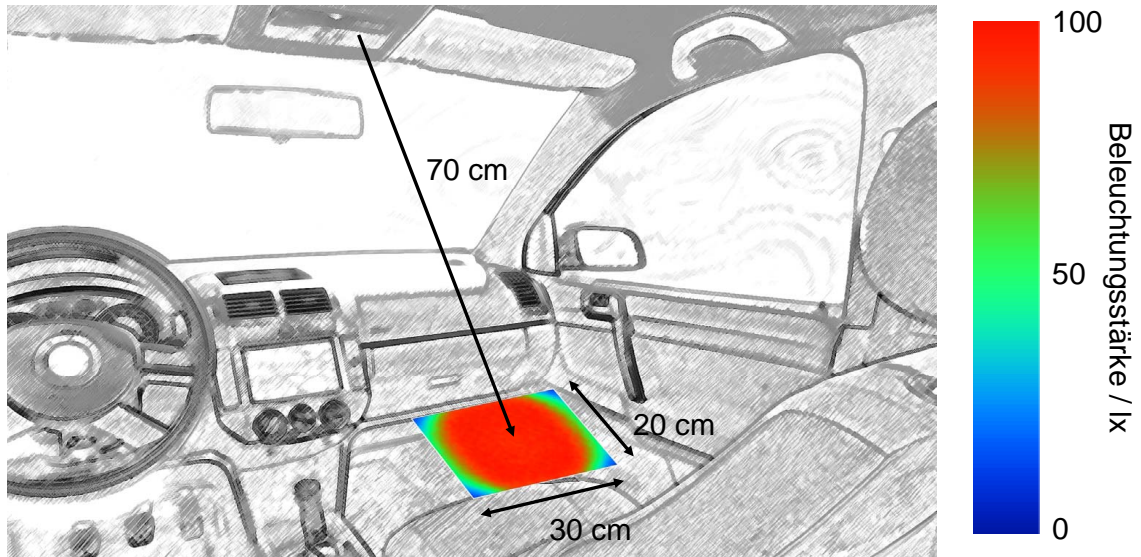


Abbildung 4.19: Visualisierung der geometrischen Verhältnisse im Automobil für die Simulation der Beleuchtungsstärkeverteilung bei Nutzung einer OLED mit optimierter Fresnellinse als Leseleuchte.

Durch eine laterale Verschiebung der Linse relativ zur OLED ist es möglich, den Ablenkwinkel Richtung Beifahrersitz zu justieren ohne die OLED verkippen zu müssen. Ein weiterer Vorteil dieser Anordnung ist, dass die ohmschen Verluste in der Anode reduziert werden, weil es möglich ist, die Anode zwischen den OLED Pixeln als metallische Schicht auszulegen. Aufgrund der virtuellen optischen Abbildung der OLED-Pixel durch die Linse erscheint dem Betrachter unter 0° dennoch nur eine leuchtende Fläche. Der simulierte Leuchtdichteindruck der OLED-Leuchte mit Fresnellinsenarray als Funktion des Betrachtungswinkels ist in Abbildung 4.20, a dargestellt. Es wird deutlich, dass die OLED unter höheren Winkeln inhomogener erscheint, weil nun der Betrachter auf die nicht leuchtenden Bereiche blickt.

In gleicher Weise wie bei der OLED-Leseleuchte ist eine breite lambertsche Abstrahlung für die Seitenmarkierungsleuchte ungeeignet. Gemäß den Vorgaben von Hella KGaA Hueck & Co für die Lichtstärke ist für diesen Leuchtentyp eine maximale Ausdehnung der Winkelverteilung in horizontaler Richtung von $\pm 30^\circ$ und in vertikaler Richtung von $\pm 10^\circ$ gestattet. Mittels gekreuzter Mikroprismenfolien (Abbildung 4.20, b) ist es möglich, die Winkelverteilung auf den geforderten Bereich einzuschränken ohne die Bautiefe zu vergrößern. Strahlen, die unter höheren Winkeln auf die Prismen treffen, werden reflektiert, aufgrund der Primäroptik durchmischert, an der Kathode reflektiert und haben eine erneute Möglichkeit durch die Prismen

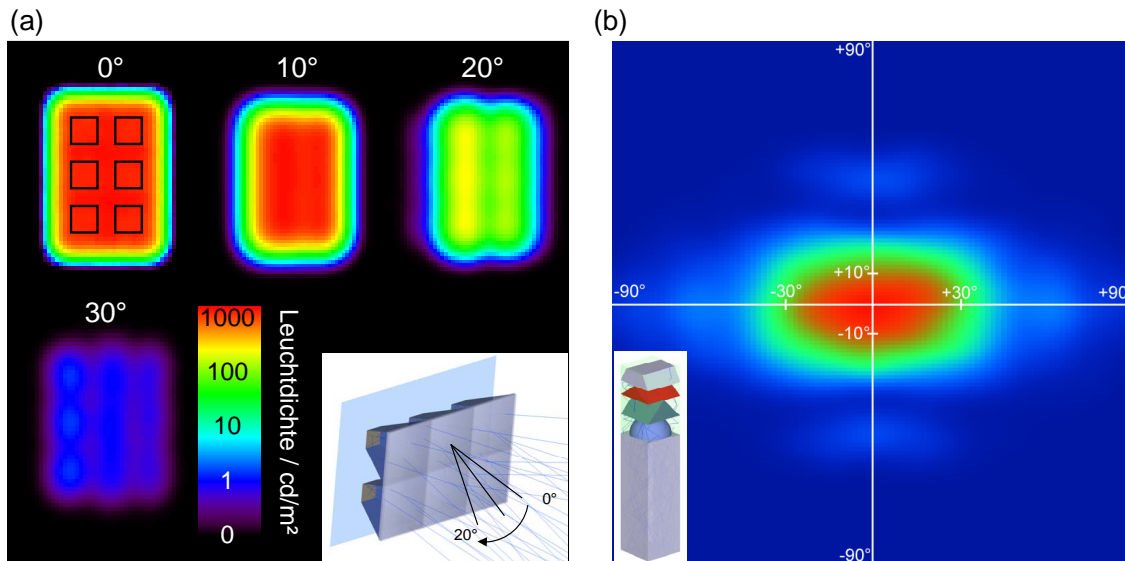


Abbildung 4.20: (a) Simulation der winkelabhängigen Leuchtdichte der Hella Innenleuchte mit Fresnel-Kollimationslinse. Dies ermöglicht einen blendfreien Aufbau. (b) Simulation der winkelabhängigen Lichtstärkeverteilung der Seitenmarkierungsleuchte mit Mikroprismenfolien.

ausgekoppelt zu werden [95]. Für die Simulation dieses Setups wird erneut die Winkelverteilung mit einer gerichteten Primäroptik ($l \rightarrow \max.$) in Form der eigenen DLL in ZEMAX integriert. Das Setup besteht nur aus einer Elementarzelle (ein Prisma) und ideal verspiegelten Seitenwänden (kleine Abbildung in Abbildung 4.20, b). Dies erzeugt eine virtuell periodische Ausdehnung der OLED und sorgt für eine Reduzierung der Rechenzeit. Das Ergebnis der Simulation der winkelabhängigen Leuchtdichte dieser Studie ist in Abbildung 4.20, b gezeigt. Die Analyse des Ergebnisses verdeutlicht, dass es möglich ist, die geforderte Winkelverteilung mithilfe der Mikroprismenfolien einzuhalten ohne die Bautiefe zu erhöhen. Ein Nachteil dieses Layouts ist die große Anfälligkeit bezüglich einer Dejustage der Prismen untereinander.

Das zweite Anwendungsfeld für OLED-Beleuchtung wird im Bereich der Displaytechnologie ausgewählt. Hierbei soll die OLED für eine großflächige, homogene Durchleuchtung der Flüssigkristallanzeige (liquid crystal display, LCD) dienen. Aufgrund fertigungstechnischer Grenzen ist eine kostengünstige Herstellung großer OLEDs ($120 \times 400 \text{ mm}^2$) derzeit noch nicht möglich. Eine Abhilfe stellt die Aneinanderreihung von mehreren kleineren OLEDs dar. Mit OLED Mustern der Größe $120 \times 40 \text{ mm}^2$ könnte die Fläche mit zehn Bauteilen nebeneinander abgedeckt werden

(Abbildung 4.21).

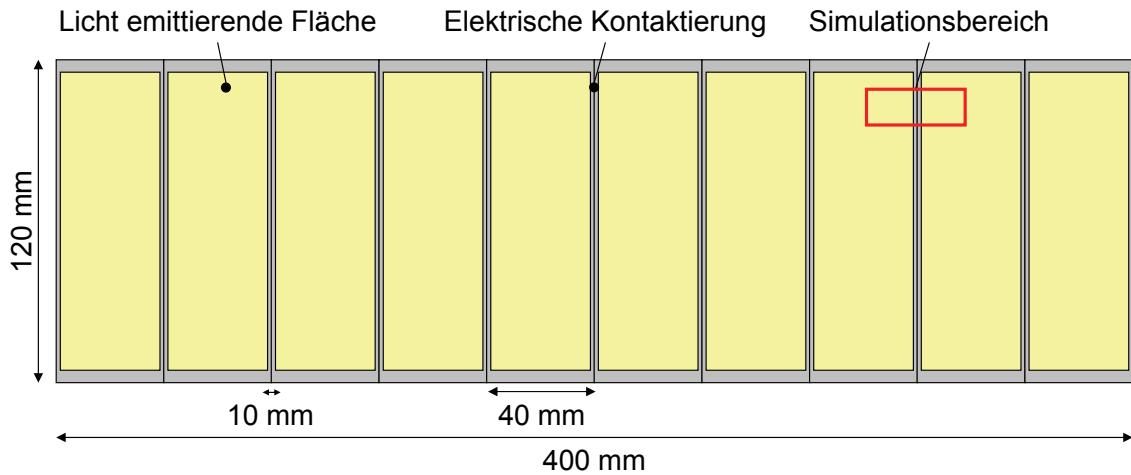
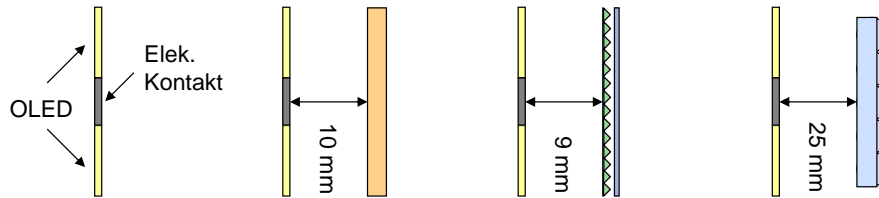


Abbildung 4.21: Prinzipskizze für die Aneinanderreihung der OLED Muster, um eine großflächige Lichtquelle für eine Displayhinterleuchtung zu realisieren. Die nicht emittierenden elektrischen Kontaktstellen müssen mittels Sekundäroptik überdeckt werden.

Jedoch müssen mittels einer Sekundäroptik die nicht leuchtenden Bereiche, die für die elektrische Kontaktierung zwischen den OLEDs benötigt werden (Breite ≈ 10 mm), überdeckt werden, um eine homogene leuchtende Fläche zu realisieren. Dabei besteht die Randbedingung, die Bautiefe mit Sekundäroptik so gering wie möglich zu halten. Um eine für den Menschen homogen wirkende leuchtende Fläche zu erzielen, darf bei einer Leuchtdichte von $L_v = 1000 \text{ cd/m}^2$ ein Leuchtdichteunterschied von $\approx 1 \%$ toleriert werden [98]. In einer Studie sollen drei optische Systeme konzipiert und ihre Homogenität miteinander verglichen werden. Die Prinzipskizzen der optischen Layouts sind in Abbildung 4.22 dargestellt.

Als erstes und einfachstes Layout soll lediglich ein starker Diffusor verwendet werden. Mittels ZEMAX wird evaluiert, bei welchem Abstand (OLED - Diffusor) bereits ein homogener Eindruck entsteht und wie stark der diffuse Anteil (T_d) hierfür sein muss. Bei dem zweiten Layout wird eine Kombination aus kommerziell erhältlichen Mikroprismenfolien [99] und einem leichten Diffusor verwendet. Die Mikroprismen sorgen für einen virtuell optischen Versatz der leuchtenden Flächen, und der Diffusor glättet die noch vorhandenen Leuchtdichteunterschiede. Ebenfalls gilt es zu evaluieren, welcher Abstand (OLED - Prismen) benötigt wird, um einen optimalen Versatz zu erzielen. Des Weiteren wird untersucht, wie groß der diffuse Anteil (T_d) der Sekundäroptik bei diesem Setup sein muss. Generell wird ein starker Diffusor eine höhere Homogenisierung erreichen, jedoch die absolute Leuchtdichte

Skizze des Aufbaus



Simulierte laterale Leuchtdichteverteilung

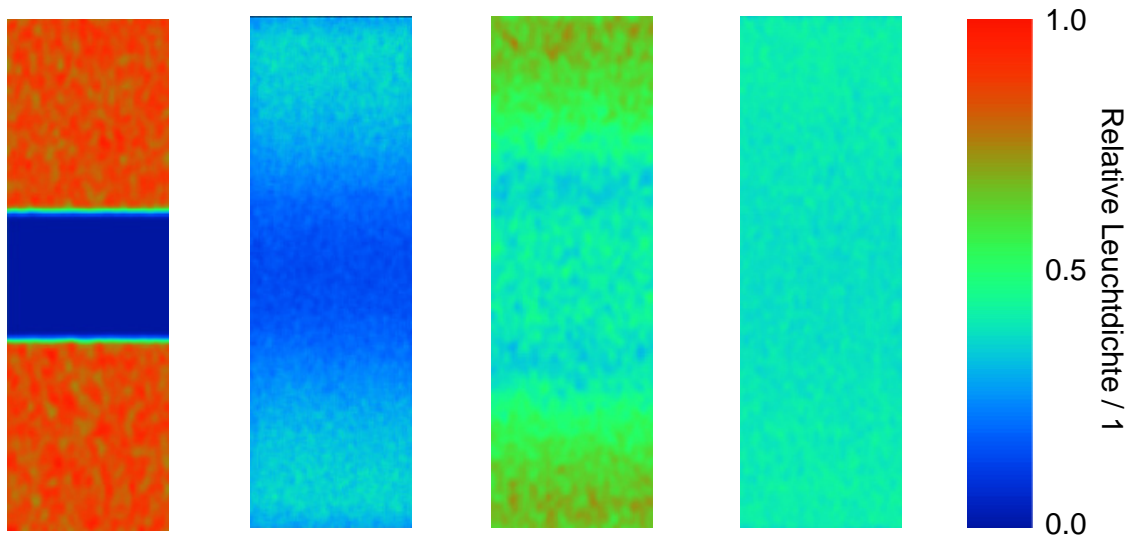


Abbildung 4.22: Simulation der relativen orts aufgelösten Leuchtdichte mit verschiedenen Homogenisierungsoptiken mittels ZEMAX. Gegenübergestellt werden folgende Systeme (von links nach rechts): Aufbau ohne Optik, Aufbau mit einem Volumendiffuser in 10 mm Abstand, Kombination aus Mikroprismen und Volumendiffuser in 9 mm Abstand sowie eine Lentikularfolie in 25 mm Abstand.

reduzieren. Als drittes Layout wird eine kommerzielle Lentikularfolie [100] verwendet, bei der ebenfalls der optimale Abstand für die Homogenisierung bestimmt werden muss.

Wie bereits bei der Simulation der Seitenmarkierungsleuchte wird auch bei dieser Berechnung das Setup zur Rechenzeitoptimierung vereinfacht. Der Ausschnitt beschränkt sich von der Mitte einer OLED über den nicht leuchtenden Rand bis hin zur Mitte der nächsten OLED (Abbildung 4.21). Die periodische Ausdehnung wird über ideale verspiegelte Seitenwände realisiert. Als Lichtquelle wird ebenfalls die speziell auf die Primäroptiken angepasste DLL verwendet. Durch empirische Parameterstudien können die optimalen Abstände zwischen OLED und Sekundäroptik

($a_1 = 10$ mm, $a_2 = 9$ mm und $a_3 = 25$ mm) sowie Stärke des Diffusors ($T_{d,1} = 74$ %, $T_{d,2} = 24$ %) für die drei Entwürfe bestimmt werden. Das Ergebnis der simulierten lateralen Leuchtdichtevertellung ist in Abbildung 4.22 gezeigt. Es wird deutlich, dass ein System mit einem starken Diffusor die geringste mittlere Leuchtdichte aufweist. Das System mit der Lentikularfolie weist die höchste Homogenität auf, benötigt jedoch auch die größte Bautiefe. Folglich bietet das Layout, bestehend aus Mikroprismenfolie und Diffusor, die beste mittlere Performance, weil es die geringste Bautiefe aufweist und gleichzeitig eine gute Homogenität realisiert, welche jedoch die Spezifikation noch nicht erfüllt. Eine weitere Reduzierung der Leuchtdichteunterschiede ist durch eine Kompensation bei der Ansteuerung der Flüssigkristallanzeige möglich [101].

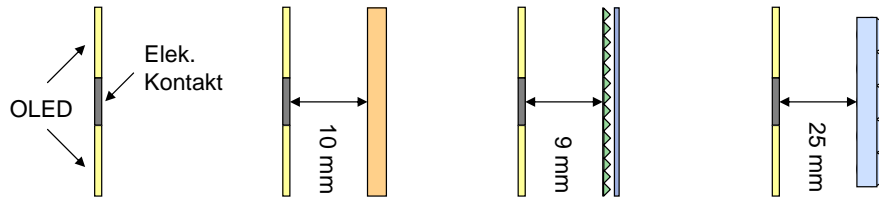
Zur Verifikation der Simulationsergebnisse werden die drei Layouts als Labormuster aufgebaut und vermessen. Aus der Datenbank der Diffusoren (Kapitel 4.3) weist die Probe DT34 den höchsten Übereinstimmungsgrad mit den aus der Simulation geforderten Parametern für den starken Diffusor auf. Für das zweite Layout mit dem leichten Diffusor wird die Probe DT24 verwendet. Mittels der Leuchtdichtekamera (Kapitel 3.2) kann die laterale Verteilung der Leuchtdichte für die drei Setups unter 0° bestimmt werden. Das Ergebnis der Messung ist in Abbildung 4.23 visualisiert.

Ein Vergleich der simulierten Werte mit den gemessenen Daten weist einen hohen Grad an Übereinstimmung auf. Lediglich die Inhomogenität der OLED selbst, aufgrund der ohmschen Verluste (Kapitel 4.2), wird bei der Simulation nicht berücksichtigt. Bei den Messungen der drei Aufbauten ist jedoch deutlich geworden, dass die laterale Leuchtdichtevertellung als Qualitätskriterium alleine nicht ausreicht. Ebenfalls ist die Leuchtdichte in Abhängigkeit des Betrachtungswinkels von Bedeutung. Gerade bei dem Prismenlayout reduziert sich die Homogenität unter höheren Betrachtungswinkeln. Um dies zu evaluieren, wird die winkelabhängige Leuchtdichte der drei Systeme mit den Modellen in ZEMAX simuliert. Die Ergebnisse dieser Simulationen sind in Abbildung 4.24 dargestellt.

Die Bewertung der Simulationsergebnisse zeigt, dass durch Verwendung eines reinen Diffusors die lambertsche Abstrahlcharakteristik erhalten bleibt. Mittels der Lentikularfolie und der Mikroprismenfolie kann eine gerichtete Verteilung erreicht werden. Auf Basis dieser Untersuchung ist ein Prototyp mit dem Prismenlayout aufgebaut worden, und es konnte gezeigt werden, dass es möglich ist mit mehreren kleinen OLED-Labormustern und geeigneter Sekundäroptik eine großflächige Display-Hinterleuchtung zu realisieren. Jedoch ist die Verwendung der OLED-Technologie als direkt leuchtendes rot, grün, blau Pixel effizienter, weil keine zusätzliche absorbierende Schicht (LCD) benötigt wird. Dies setzt hingegen voraus, dass die Degradation der Polymere unabhängig von der Farbe ist, um keine Farbortverschiebung zu erleiden.

Als drittes Anwendungsfeld wird der Bereich allgemeine Raumbeleuchtung ausge-

Skizze des Aufbaus



Gemessene laterale Leuchtdichteverteilung

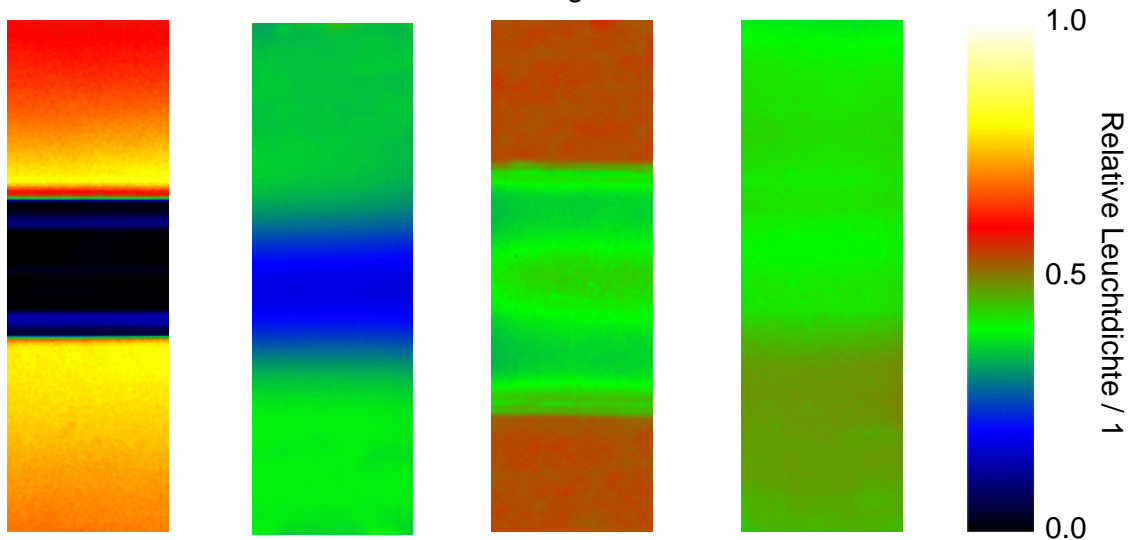


Abbildung 4.23: Messung der relativen orts aufgelösten Leuchtdichte mit verschiedenen Homogenisierungsoptiken mittels der LMK 98-4 Leuchtdichtekamera. Gegenübergestellt werden folgende Systeme (von links nach rechts): Aufbau ohne Optik, Aufbau mit einem Volumendiffusor in 10 mm Abstand, Kombination aus Mikroprismen und Volumendiffusor in 9 mm Abstand sowie eine Lentikularfolie in 25 mm Abstand.

wählt. Wie einleitend erwähnt, existieren bereits im Bereich Designleuchten erste Demonstratoren basierend auf OLED Bauteilen. In dieser Simulationsstudie soll der Fragestellung nachgegangen werden, wie viele Bauteile für eine gute Ausleuchtung beispielsweise eines Büroraumes ($5,4 \times 3,6 \text{ m}^2$) benötigt werden, und ob für diese Anwendung eher eine lambertsche Abstrahlcharakteristik (nur Primäroptik) oder eine gerichtete Verteilung (Primäroptik mit Kollimationslinse) von Vorteil ist. Gemäß der Norm (Tabelle 5.26, Ref. Nr. 5.26.2 [6]) wird für eine Bürobeleuchtung eine Beleuchtungsstärke auf dem Bereich der Sehaufgabe von $\overline{E}_m = 500 \text{ lx}$ gefordert. Hierbei ist zu beachten, dass der spezifizizierte Wert ein Wartungswert ist, folglich darf

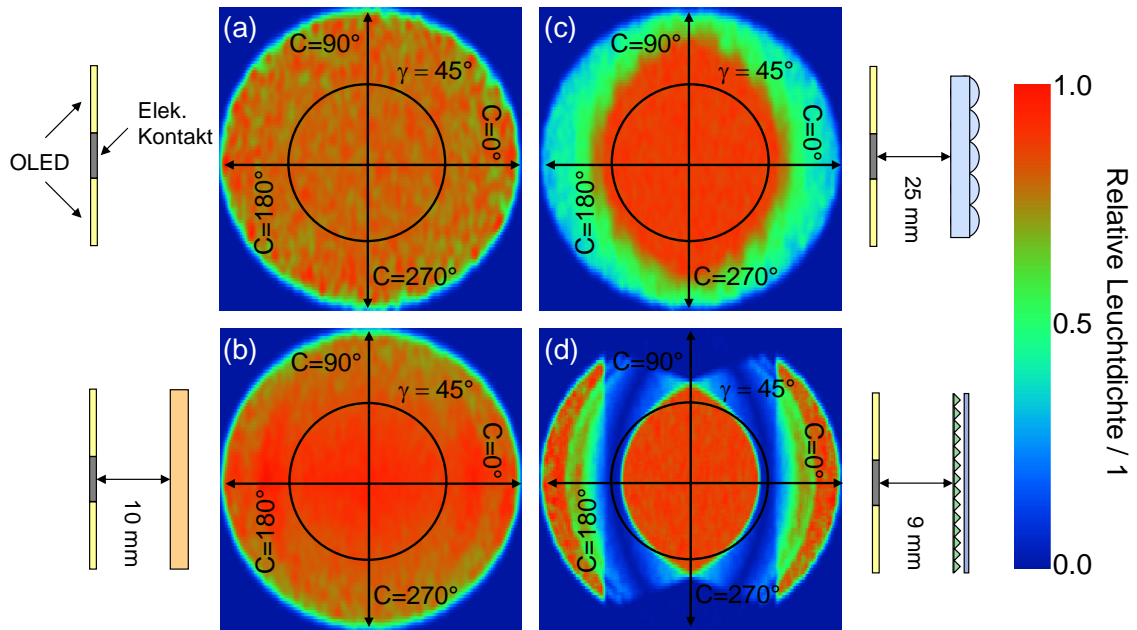


Abbildung 4.24: Simulation der winkelabhängigen Leuchtdichte mit verschiedenen Homogenisierungsoptiken. Gegenübergestellt werden folgende Systeme: Aufbau ohne Optik (a), Aufbau mit einem Volumendiffuser in 10 mm Abstand (b), eine Lentikularfolie in 25 mm Abstand (c) sowie Kombination aus Mikroprismen und Volumendiffuser in 9 mm Abstand (d).

die mittlere Beleuchtungsstärke, unabhängig vom Alter und Zustand der Beleuchtungsanlage diesen Wert nicht unterschreiten. Des Weiteren wird die Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke vorgeschrieben. Bei diesem Anwendungsbeispiel beträgt die Gleichmäßigkeit $U_0 = E_{min}/\bar{E}_m = 0,6$.

Zunächst wird mithilfe von ZEMAX eine Fresnel-Kollimationslinse in Verbindung mit der gerichteten Primäroptik ($l \rightarrow \max.$) optimiert und die Lichtstärkeverteilungskurve (LVK) berechnet. Die LVK für die lambertsche Verteilung (nur breit abstrahlende Primäroptik) wird aus der entsprechenden Simulation (Kapitel 4.3) gewonnen. Eine Simulation der Beleuchtungsstärkeverteilung in einem eingerichteten Raum, bei vorgegebener Anzahl sowie LVK der Leuchte, ist mit der Software DIALux [102] möglich.

Der Import einer LVK in DIALux erfolgt über das standardisierte Leuchtenformat EULUMDAT [103]. Die Spezifikation sowie die entsprechenden Werte für die OLED Leuchte mit lambertscher Abstrahlcharakteristik und der OLED mit optimierter Fresnellinse ist in Tabelle A.1 im Anhang aufgelistet.

Für die Simulation wird der Büroraum der Größe 5,4 m, 3,6 m und 2,8 m (L, B, H) angelegt und mit einem konventionellen Mobiliar versehen. Die OLED Leuchten werden in einer Montagehöhe von 2,4 m über den Raum gleichverteilt angebracht. Unter Vorgabe der gewünschten mittleren Beleuchtungsstärke berechnet die Software eine benötigte Stückzahl von $n_1 = 2.626$ für die OLED mit lambertscher Primäroptik. Bei einem emittierten Lichtstrom von $\Phi_v = 11$ lm pro OLED wird folglich für den Raum ein Gesamtlichtstrom $\Phi_{ges,1} = 28.886$ lm benötigt. Wird die OLED mit Primäroptik und Kollimationsoptik verwendet, berechnet sich eine benötigte Stückzahl von $n_2 = 1.899$. Dies ergibt einen Gesamtlichtstrom von $\Phi_{ges,2} = 20.889$ lm. Zum Vergleich: eine gebräuchliche Leuchtstofflampe mit G13 Sockel und einer elektrischen Anschlussleistung von 58 Watt weist einen Lichtstrom von $\Phi_v = 5.000$ lm auf [104]. Nach Positionierung der gesamten Leuchten kann mittels Raytracing die genaue Beleuchtungsstärkeverteilung im Raum berechnet werden. Das Ergebnis der Simulation von OLEDs mit einer lambertschen Abstrahlcharakteristik ist in Abbildung 4.25 in Falschfarbendarstellung visualisiert. Für das Setup, bei dem zusätzlich zur Primäroptik noch die Sekundäroptik verwendet wird, ist das Simulationsergebnis in Abbildung 4.26 gezeigt. Die Simulationen machen deutlich, dass es möglich ist, mit beiden Leuchtensystemen die geforderte Beleuchtungsstärke zu erreichen.

Ein Vergleich der beiden Simulationsergebnisse zeigt, dass die lambertsche LVK für eine homogenere Ausleuchtung des Raums sorgt. Im Bereich der Sehaufgabe erzielt das Setup mit einer lambertschen LVK folgende Beleuchtungsstärken (Mittelwert, Minimum, Maximum) $\bar{E}_m = 720$ lx, $\bar{E}_{min} = 629$ lx, $\bar{E}_{max} = 790$ lx sowie eine Gleichmäßigkeit von $U_0 = 0,874$. Korrespondierend hierzu ergibt die Auswertung des Setups (gerichtet) die folgenden Beleuchtungsstärken (Mittelwert, Minimum, Maximum) $\bar{E}_m = 745$ lx, $\bar{E}_{min} = 589$ lx, $\bar{E}_{max} = 844$ lx sowie eine Gleichmäßigkeit von $U_0 = 0,791$.

Aufgrund der Einsparung von 727 Bauteilen, welches einer Leistungseinsparung von ≈ 730 Watt entspricht, wird deutlich, dass die Verwendung einer Kollimationsoptik vor der OLED für diesen Anwendungsfall energiebewusster ist, da beide Setups die Anforderungen an das Beleuchtungsstärkeniveau erfüllen.

Gemäß den Anforderungen aus Kapitel 1 lässt sich zusammenfassen, dass es möglich ist, für einen Büroraum eine normgerechte Beleuchtung auf Basis der OLED Labormuster zu realisieren. Die Anforderungen an das Beleuchtungsniveau werden mit einer mittleren Beleuchtungsstärke von 745 lx erfüllt. Mit einem Farbwiedergabeindex von $R_a = 90$ erfüllt das OLED Spektrum alle Anforderungen bezüglich des Sehkomforts. Auch der Anspruch an das visuelle Ambiente ist mit einer Lichtfarbe von 3500 K (neutralweiß) erfüllt. Jedoch ist der derzeitige Einsatz der OLED für die Raumbeleuchtung mit den in dieser Arbeit erarbeiteten Eigenschaften sowie Stück-

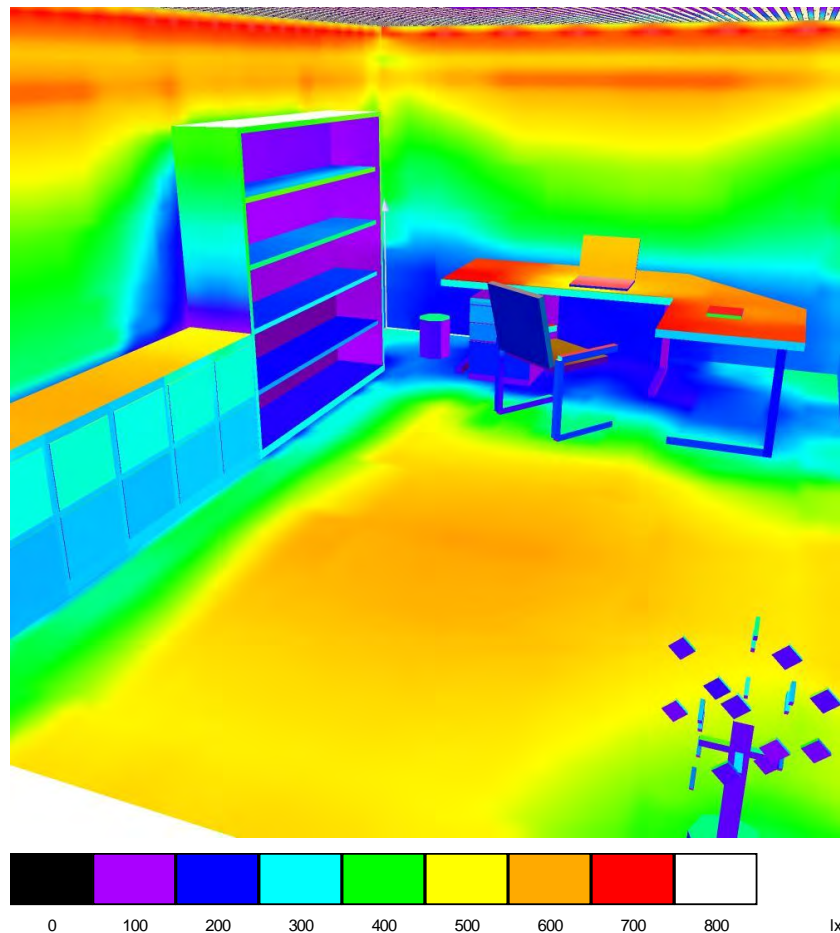


Abbildung 4.25: Simulation der Beleuchtungsstärkeverteilung in einem Büroraum. Als Leuchte wird eine OLED mit einem lambertschen Abstrahlverhalten und einer Größe von 110 mm x 36 mm verwendet. Der Lichtstrom pro OLED beträgt 11 lm.

preisen kein Ersatz für die verbreitete Raumbeleuchtung mittels Leuchtstofflampen. Abschließend ist in Abbildung 4.27 und Abbildung 4.28 das Simulationsergebnis der Beleuchtungsstärkeverteilung für die Nutzebene in der Draufsicht visualisiert.

In diesem Kapitel ist gezeigt worden, wie mithilfe spezieller Sekundäroptiken Anwendungen im Bereich Automotive-, Display- und General Lighting mit der aktuellen OLED Performance realisiert werden können. Mittels eines fresnelschen Stufenlinsenarrays erzielt eine OLED Leseleuchte im Fahrzeug eine mittlere Beleuchtungsstärke von $E_v \approx 85$ lx in der Nutzebene. Eine Kombination aus Mikroprismenfolien ermöglicht die Umformung der lambertschen Verteilung in die für

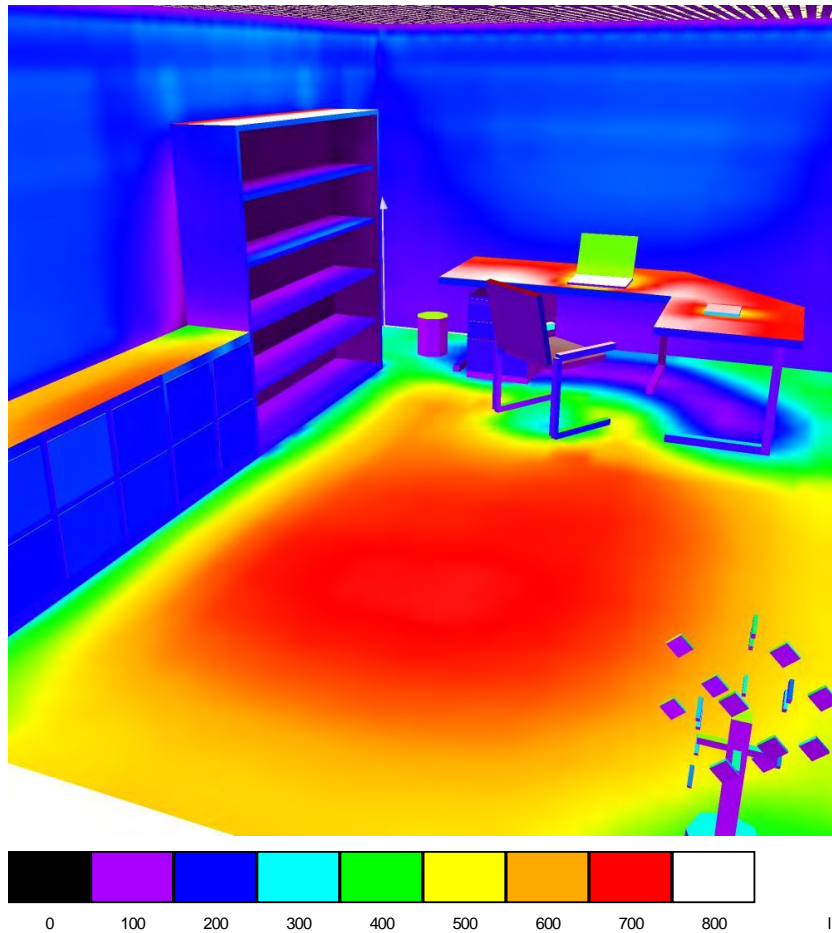


Abbildung 4.26: Simulation der Beleuchtungsstärkeverteilung in einem Büroraum. Als Leuchte wird eine OLED mit Kollimationslinse und einer Größe von 110 mm x 36 mm verwendet. Der Lichtstrom pro OLED beträgt 11 lm.

die Seitenmarkierungsleuchte geforderten $\pm 30^\circ$ (horizontal) und $\pm 10^\circ$ (vertikal). Mittels eines Diffusors und einer Mikroprismenfolie konnte eine große homogen leuchtende Fläche für ein Display-Backlight auf Basis mehrerer kleinerer OLEDs realisiert werden. Eine hochwertige Büroraumbeleuchtung hinsichtlich Sehleistung sowie Sehkomfort mit einer Nutzfläche von 19,4 m² ist mit einer OLED Fläche von 3,8 m² möglich.

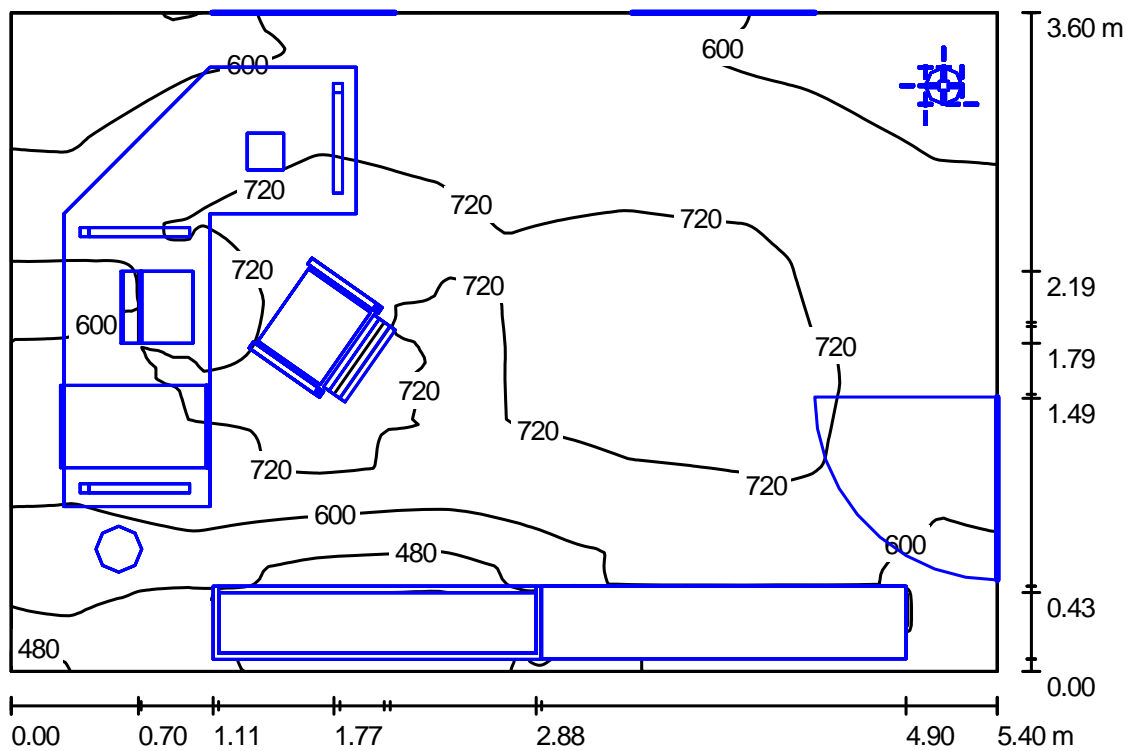


Abbildung 4.27: Visualisierung der Leuchtenanordnung und der Beleuchtungsstärkeverteilung in der Nutzebene. Die verwendeten OLEDs besitzen eine lambertsche Abstrahlcharakteristik.

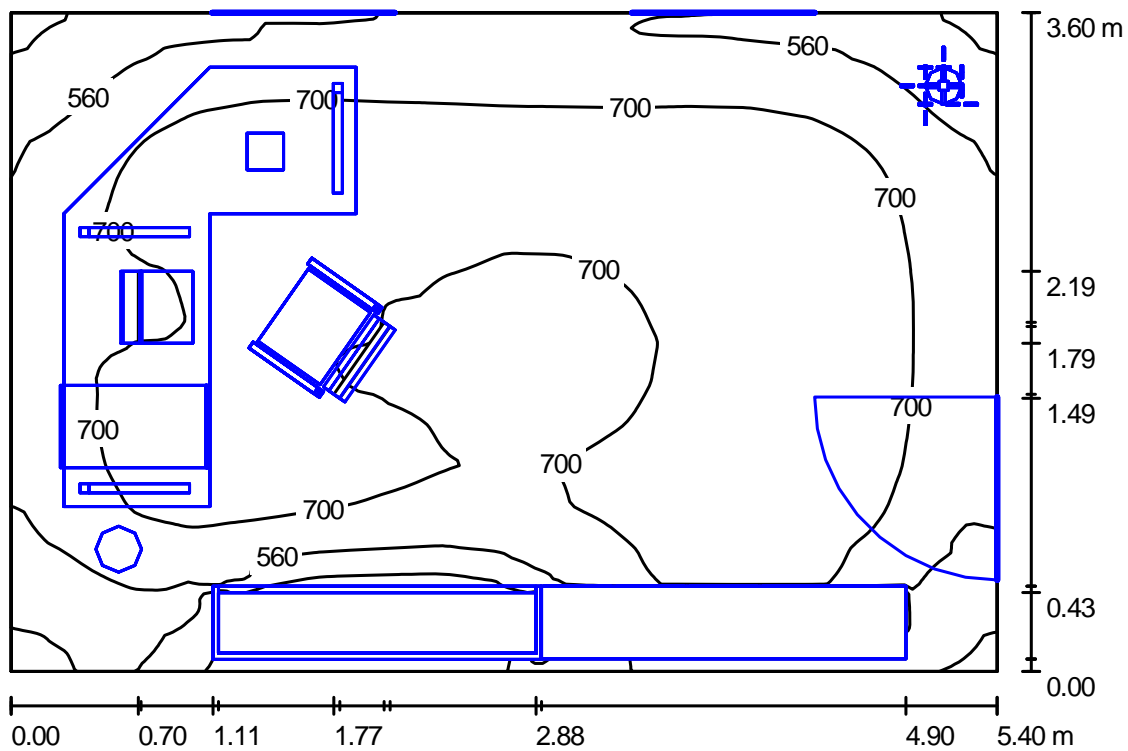


Abbildung 4.28: Visualisierung der Leuchtenanordnung und der Beleuchtungsstärkeverteilung in der Nutzebene. Aufgrund der Kollimationslinse weisen die OLEDs eine stark vorwärts gerichtete Abstrahlverteilung auf.

4.5 Entwicklung eines innovativen OLED Treibers

Wie bereits in Kapitel 2.5 geschildert handelt es sich vereinfacht bei der OLED um ein RC-Glied. Bevor jedoch ein Konzept erarbeitet werden kann, wie das PWM-Signal (Abbildung 2.16) und die Stromregelung der OLED (Abbildung 2.17) realisiert werden, muss zunächst eine Abschätzung der elektrotechnischen Kennzahlen für den Widerstand R_B sowie der Kapazität C_S erfolgen. Diese OLED spezifischen Werte haben einen direkten Einfluss auf die Grenzfrequenz f_c (Gleichung 2.47) des PWM-Signals und müssen ebenfalls bei der Dimensionierung der Komponenten berücksichtigt werden. Für diese Messung eignet sich die Verwendung eines LCR-Messgerätes, welches den Impedanzverlauf $\underline{Z} = |Z| \cdot e^{j\varphi}$ als Funktion der Frequenz f ermittelt. Der Frequenzmessbereich wird von 100 Hz bis 100 kHz festgelegt. Mittels eines Gleichspannungsanteils von max. 10 V kann die OLED mit ihren typischen Betriebsparametern angesteuert werden. Bei der Durchführung der Messung ist darauf zu achten, dass die Kontaktstellen an der OLED mit Silberleitlack versehen werden, um den Übergangswiderstand so gering wie möglich zu halten. Zunächst wird die OLED in Sperrichtung vermessen, welches die Kapazitätsberechnung der OLED ermöglicht (Gleichung 4.5). Die zweite Messung erfolgt im Durchlassbereich mit einem Gleichspannungsanteil entsprechend des späteren Arbeitspunktes. Der Widerstand der OLED kann durch Gleichung 4.6 aus den Messdaten berechnet werden.

$$C_S = \frac{1}{2\pi f \cdot \sin \varphi \cdot \underline{Z}} \quad (4.5)$$

$$R_B = \cos \varphi \cdot \underline{Z} \quad (4.6)$$

Für eine Abschätzung des Einflusses der Probengröße auf die Parameter R_B sowie C_S werden die zwei Probenlayouts des Ringversuchs vermessen. Zum einen der Flächenstrahler mit einer Licht emittierenden Fläche von 33 x 34,8 mm² und zum anderen der Pixelstrahler mit einer Fläche von 10 x 10 mm² (Abbildung 3.18, a). Das Ergebnis der Messung des Betrags $|\underline{Z}|$ als Funktion der Frequenz ist in Abbildung 4.29 dargestellt, das entsprechende Messergebnis der Phase φ zeigt Abbildung 4.30. Eine Auswertung der Daten führt zu den gesuchten RC-Werten der OLEDs sowie deren Grenzfrequenzen, die in Tabelle 4.7 zusammengefasst sind.

Die Analyse der Werte zeigt, dass der elektrische Widerstand der kleineren leuch-

Tabelle 4.7: Aus der frequenzabhängigen Impedanzmessung folgen die OLED Muster spezifischen Kennzahlen für R_B , C_S sowie f_c .

Parameter	Flächenstrahler	Pixelstrahler
R_B / Ω	24	112
C_S / nF	337	29
f_c / kHz	19,7	48,9

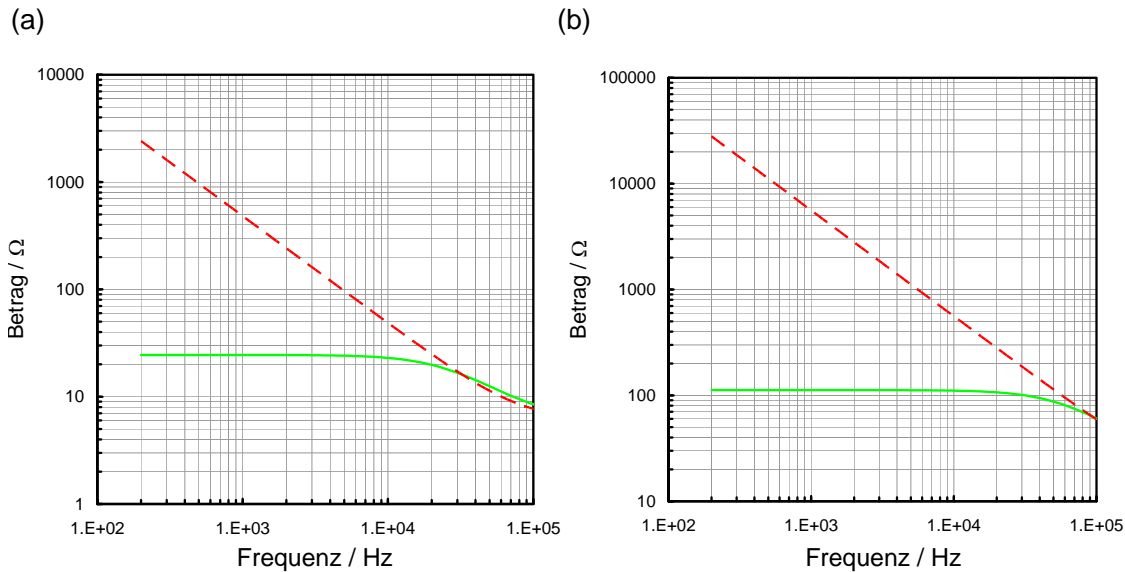


Abbildung 4.29: Messung des Frequenzverhaltens der Impedanz der OLED. Dargestellt ist der Betrag für den Betrieb in Sperrrichtung (Strichlinie) sowie Durchlassrichtung (Volllinie). Als Layout wird der Flächenstrahler (a) und Pixelstrahler (b) verwendet.

tenden Fläche größer ist als der des Flächenstrahlers. Jedoch ist die Kapazität des Pixelstrahlers kleiner als die des Flächenstrahlers. Basierend auf diesen Messungen und den Darlegungen aus Kapitel 2.4 verhält sich die Kapazität der OLED proportional zur Licht emittierenden Fläche. Der elektrische Widerstand hingegen ist invers proportional zur Kantenlänge der OLED. Eine Vergrößerung der OLED erhöht die Kantenlänge und gleichzeitig den Leitungsquerschnitt der Anode, welches den elektrischen Widerstand verringert. Mithilfe dieser beiden Werte und den abgeleiteten Zusammenhängen lässt sich die Grenzfrequenz f_c als Funktion der Kantenlänge ableiten. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.31 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Kapazität des Bauteils der begrenzende Parameter beim gepulsten Betrieb der

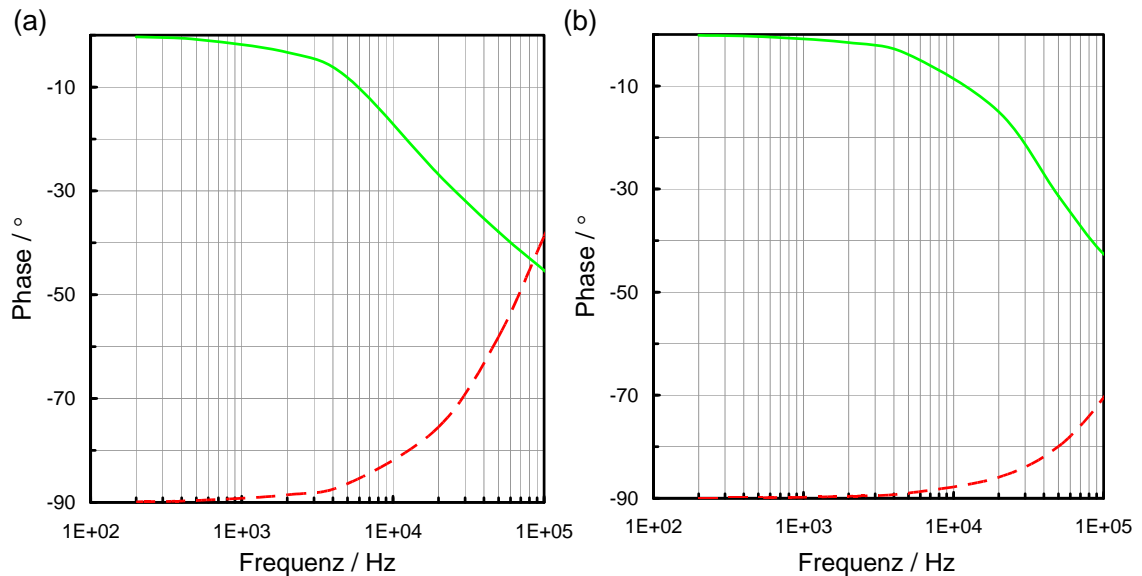


Abbildung 4.30: Messung des Frequenzverhaltens der Impedanz der OLED. Dargestellt ist die Phase für den Betrieb in Sperrrichtung (Strichlinie) sowie Durchlassrichtung (Volllinie). Als Layout wird der Flächenstrahler (a) und Pixelstrahler (b) verwendet.

OLED ist und der elektrische Widerstand nur einen geringeren Einfluss hat. Jedoch werden bei einem PWM-Treiber für die Lichttechnik lediglich Frequenzen bis ca. 1 kHz benötigt, um eine flimmerfreie Beleuchtung zu ermöglichen. Dies ist auch mit großen OLED-Leuchten realisierbar.

Basierend auf diesen Messungen wird die Betriebsfrequenz für den OLED Treiber auf 450 Hz festgelegt. Diese Frequenz ist ausreichend für einen flimmerfreien Eindruck beim Betrachten und stellt schaltungstechnisch keine zusätzlichen Herausforderungen dar. Des Weiteren soll der universelle Treiber es ermöglichen, die Stromstärke der OLED zwischen 0 mA und 200 mA sowie das Tastverhältnis (duty cycle - DC) zwischen 0 % und 100 % einzustellen. Da der Ringversuch gezeigt hat, dass das Emissionsspektrum und folglich auch der Farbort der OLED stark stromabhängig sind, ermöglicht die getrennte Einstellbarkeit den Betrieb mit konstantem Farbort (konstantem Strom). Die Dimmung erfolgt über die Variation des Tastverhältnisses. Eine Besonderheit des Treibers soll nun sein, eine stromabhängige Pulsweitenregelung zu realisieren. Dies bedeutet, dass bei Erhöhung der Stromstärke die Pulsweite automatisch reduziert wird (Gleichung 4.7). Somit ist es möglich, die Leuchtdichte

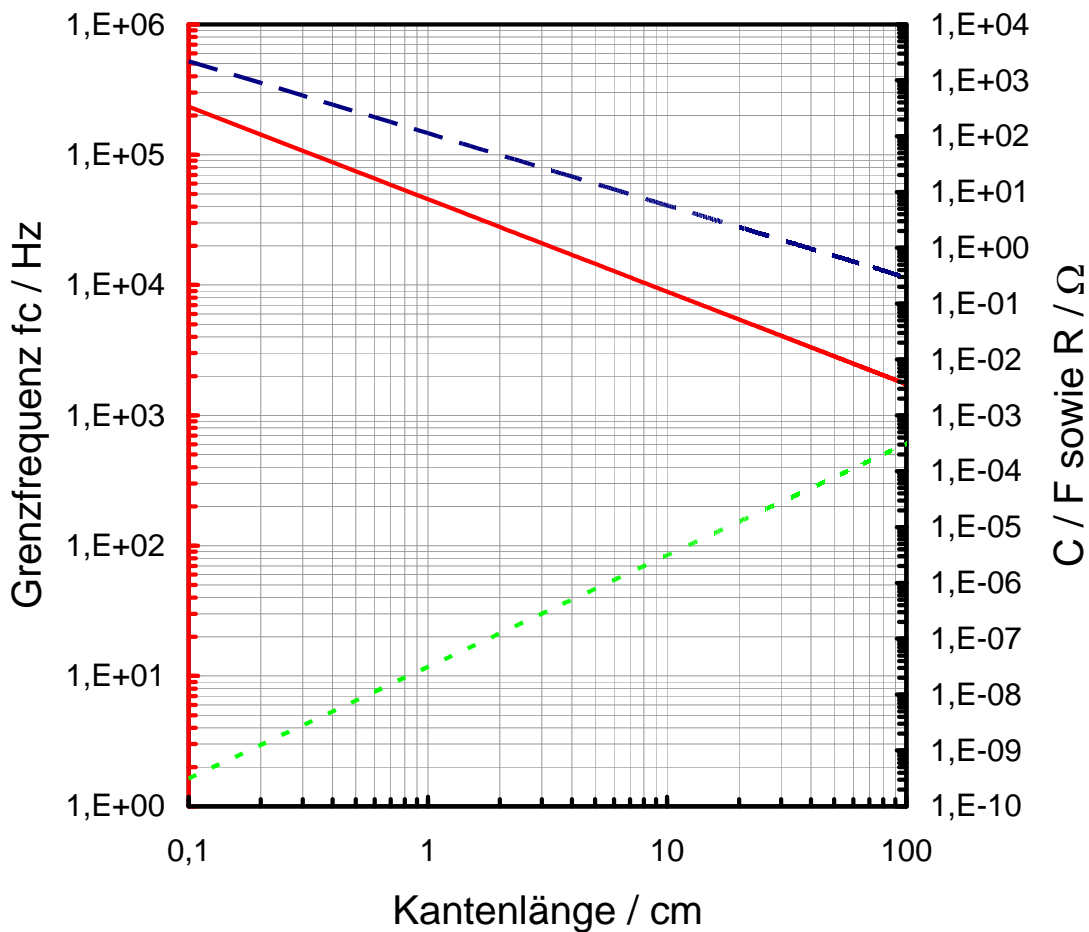


Abbildung 4.31: Berechnung des Widerstandes R (Strichlinie) sowie Kapazität C (Punktlinie) in Abhängigkeit der Kantenlänge der OLED. Daraus resultiert die Grenzfrequenz f_c (Vollinie), mit der die OLED betrieben werden kann.

der OLED konstant zu halten und nur den Farbort zu verändern.

$$L_v \sim konst. \cdot DC \cdot I \quad (4.7)$$

Wie bereits bei den Grundlagen geschildert, ist es ratsam, für die einzelnen Funktionskomponenten des OLED Treibers ausgereifte IC (integrated circuit) Lösungen zu verwenden. Für die PWM-Erzeugung wird der Baustein UC3843 verwendet. Dieser IC wird beispielsweise von Texas Instruments, ST Microchips, Analog Devices sowie Linear-Technologie in der Bauform PDIP-8 vertrieben. Der Baustein ist für

Ansteuerfrequenzen zwischen 100 Hz und 500 kHz dimensioniert. Die gewünschte Frequenz wird über eine RC-Kombination am Eingang R_T/C_T (Pin 4) des ICs eingestellt [105]. Für die Einstellung des Tastverhältnisses wird mithilfe eines Potentiometers die Referenzspannung am Eingang I_{Sense} (Pin 3) des ICs verändert [105].

Die Stromregelung der OLED wird über einen Hochleistungs-MOSFET realisiert. Um diesen Baustein fehlerfrei anzusteuern, wird zusätzlich ein MOSFET-Treiber SI9910 von Vishay Siliconix verwendet. Dieser steuert mit einem digitalen Signal den MOSFET an und lässt über seinen Eingang I_{Sense} (Pin 5) eine indirekte beeinflussbare Stromsteuerung zu. Der I_{Sense} überwacht die anliegende Spannung über einen $4\ \Omega$ Shunt und vergleicht diese intern. Liegt an dem Shunt eine Spannung über 0,8 V an, so hört der MOSFET-Treiber auf anzusteuern. Liegt jedoch die Spannung unterhalb der 0,8 V, so steuert er den MOSFET weiter aus. Somit kann der Stromfluss durch die OLED zwischen 0 mA und 200 mA begrenzt werden.

Die stromabhängige Pulsweitenregelung kann mit einem Proportionalregler [58] realisiert werden. Hierfür wird der I_{Sense} -Eingang des PWM-Controllers unterbrochen und die mittels invertierenden Verstärkers angepasste Spannung über den I_{Sense} des MOSFET-Treibers zurückgeführt.

Für die Grundspannungsversorgung wird ein Ringkern Transformator mit $2 \cdot 15\text{ V}$ und einem Maximalstrom von 500 mA der Firma Talema electronics verwendet. Der gesamte Schaltplan des OLED Treibers ist in Abbildung 4.33 dargestellt. Eine Ansicht des aufgebauten Demonstrators sowie der Bestückungsplan der Platine sind in Abbildung 4.34 und Abbildung 4.32 gezeigt.

Für die Demonstration der beiden Betriebsmodi des finalen Treibers:

- Konstanter Farbort, Variation Leuchtdichte (Änderung des Tastverhältnisses)
- Konstante Leuchtdichte, Variation Farbort (Änderung von Tastverhältnis und Stromstärke)

werden OLEDs verwendet, welche einen großen Farbshift in Abhängigkeit des Stromes aufweisen. Mit einer Licht emittierenden Fläche von $A_{OLED} = 7\text{ mm}^2$ weisen diese Muster eine Schwellenspannung $U_S \approx 3,5\text{ V}$ auf. Dabei erreichen sie eine Effizienz von $\eta = 3,3\text{ cd/A}$. In dem ersten Betriebsmodus wird die OLED mit einer Stromstärke von $I_{OLED} = 1,78\text{ mA}$ (Stromdichte $J_{OLED} = 25,4\text{ mA/cm}^2$) und einem konstanten Signal ($DC = 100\%$) betrieben. Die Messung des Emissionsspektrums zeigt eine Leuchtdichte von $L_v = 838\text{ cd/m}^2$ sowie einen Farbort mit den CIE-Koordinaten $x = 0,421$ und $y = 0,399$. Eine Veränderung des Tastverhältnisses zwischen 20 % und 80 % führt zu einer Leuchtdichte von $L_{20\%} = 174\text{ cd/m}^2$ sowie

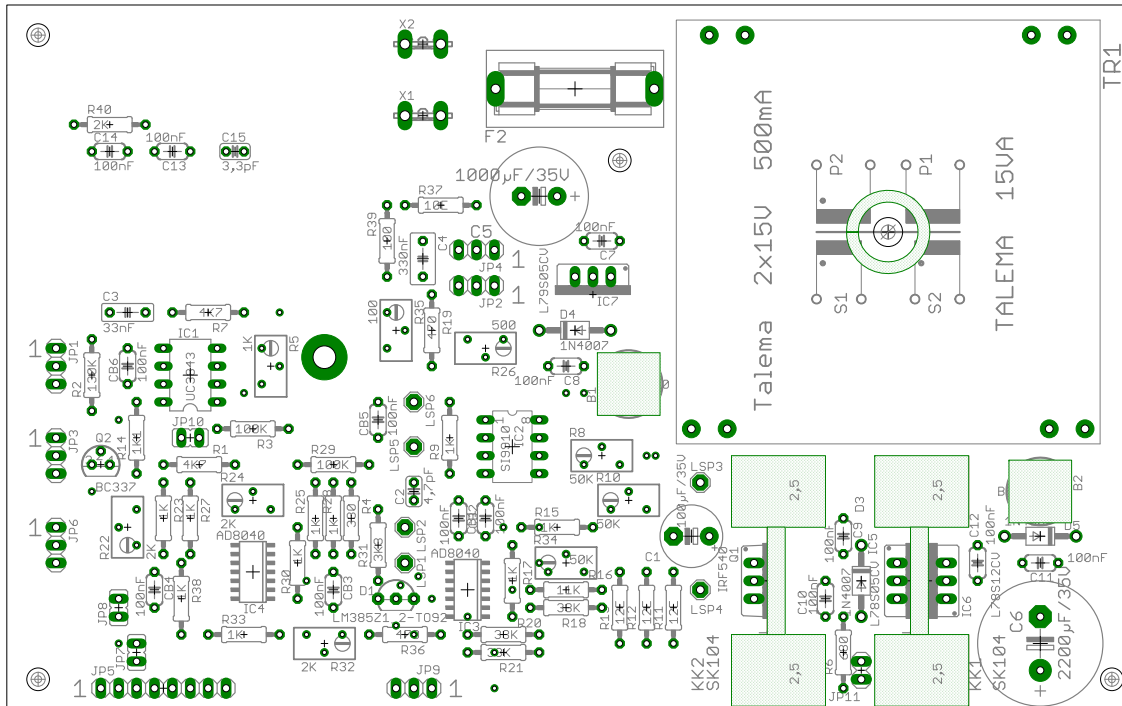


Abbildung 4.32: Bestückungsplan der OLED Treiber Platine mit Ringkerntransformator, PWM-Erzeugung sowie Stromregelung.

$L_{80\%} = 564 \text{ cd/m}^2$. Die genauen Werte für das Tastverhältnis sowie die Stromstärke werden über ein Oszilloskop Typ Wavesurfer 454 der Firma Le Croy an dem Messausgang des OLED Treibers (Abbildung 4.34, a) gemessen. Die Analyse der Messergebnisse (Abbildung 4.35) zeigt, dass die Leuchtdichte linear zum Tastverhältnis verläuft. Der Farbort der OLED verändert sich im Rahmen der Messgenauigkeit (Kapitel 3.5) jedoch nicht.

Für den zweiten Betriebsmodus wird das Tastverhältnis auf $DC = 100 \%$ und eine Stromstärke $I_{OLED} = 0,4 \text{ mA}$ (Stromdichte $J_{OLED} = 5,1 \text{ mA/cm}^2$) eingestellt. Wird nun die stromabhängige Pulsweitenregelung eingeschaltet (Abbildung 4.34, a) und die Stromstärke über das Potentiometer erhöht, reduziert sich das Tastverhältnis. Eine erste Messung zeigt jedoch, dass diese einfache Regelung nur in einem kleinen Bereich richtige Ergebnisse liefert, weil sich bei der Messung sowohl Farbort als auch Leuchtdichte ändern. Dies liegt an dem nicht angepassten Regelverhalten des Proportionalreglers in der Schaltung. Für eine erste Lösung werden die Wertepaare für I sowie DC manuell am OLED Treiber gemäß Gleichung 4.7 eingestellt (Abbildung 4.36). Exemplarisch werden fünf Kennlinien durchfahren, jeweils mit

4 Ergebnisse und Diskussion

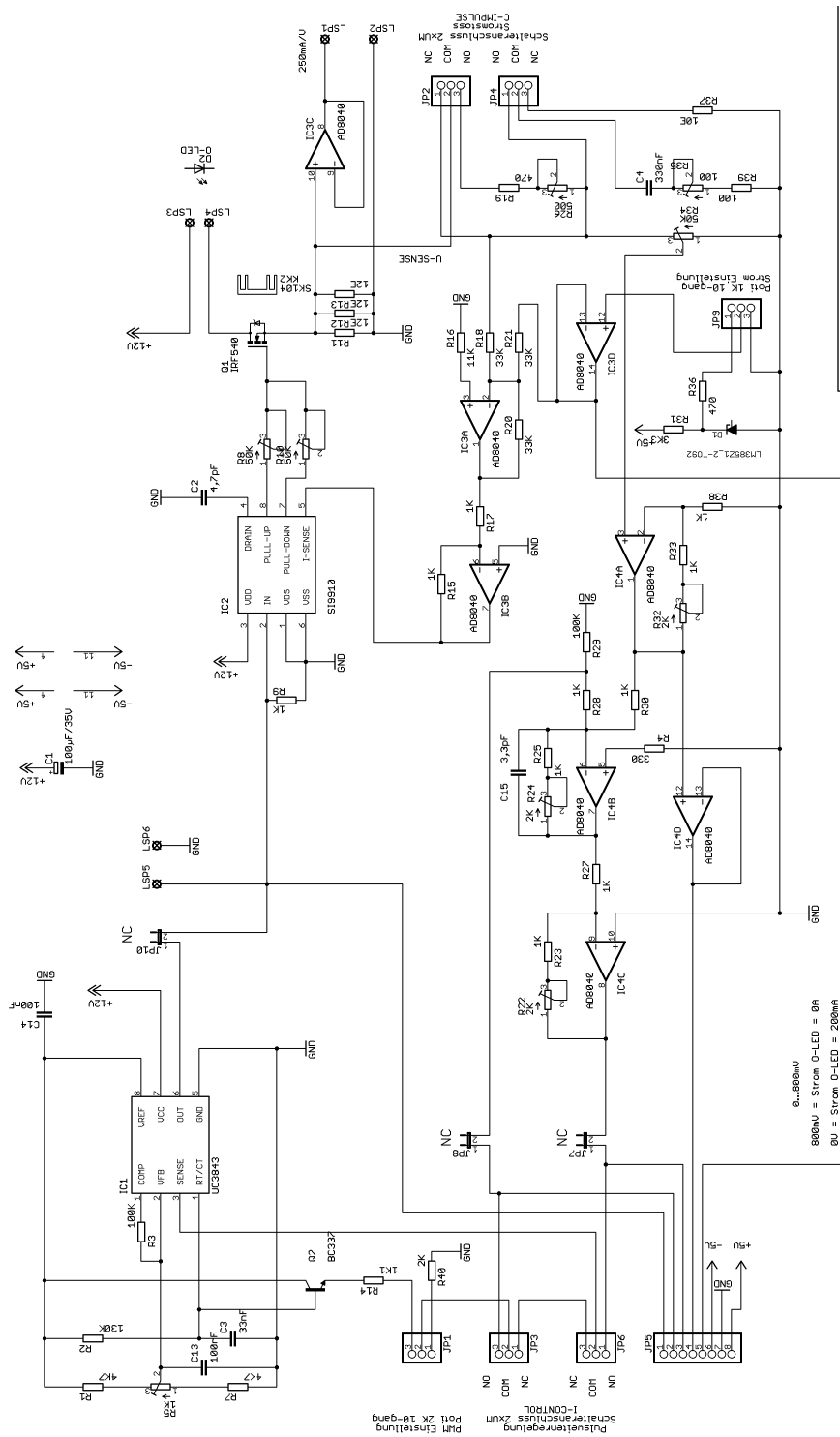


Abbildung 4.33: Schaltplan des OLED Treibers, ohne Spannungsversorgung.

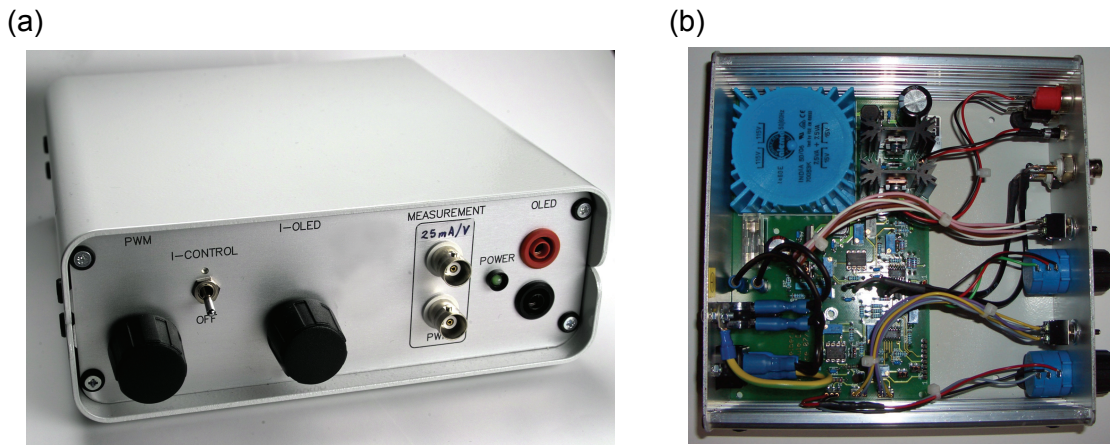


Abbildung 4.34: Demonstrator des OLED Treibers, mit der Eigenschaft das Tastverhältnis sowie den Strom separat einzustellen. Des Weiteren kann die Regelung aktiviert werden, womit die Leuchtdichte sowie der Farbeindruck unabhängig voneinander eingestellt werden kann. (a) Frontansicht (b) Innenansicht

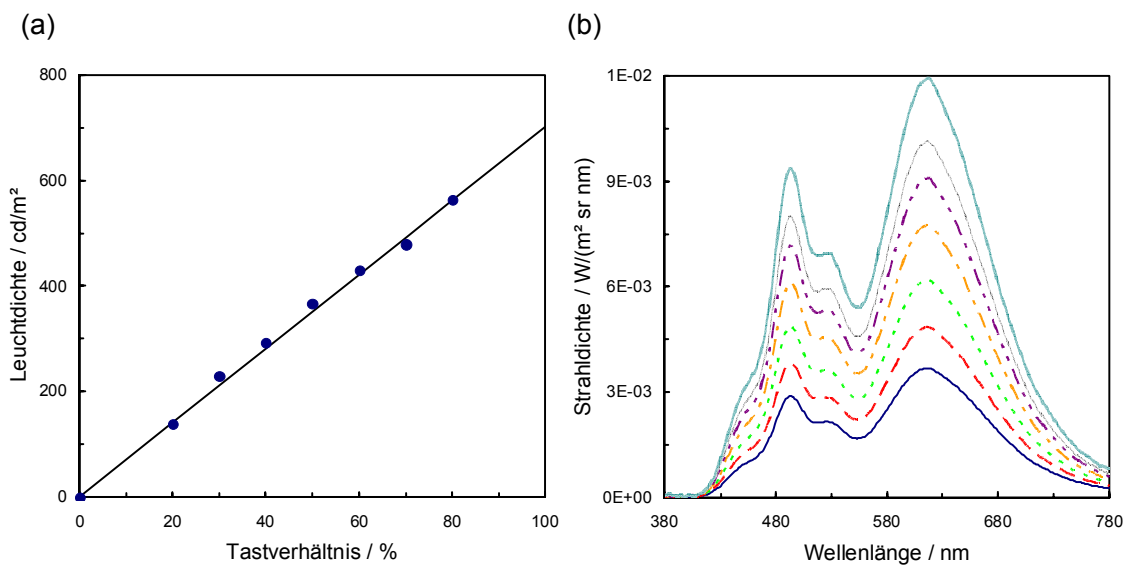


Abbildung 4.35: (a) Abhängigkeit zwischen dem Tastverhältnis und der Leuchtdichte der OLED. Im Bereich zwischen 20 % und 80 % lässt sich ein lineares Regelverhalten erzielen. Der Farbort bleibt dabei konstant. (b) Die korrespondierenden Emissionsspektren im Regelbereich zwischen 20 % und 80 %. Das gleichartig bleibende Spektrum verdeutlicht den konstant bleibenden Farbort.

steigender Leuchtdichte von 145 cd/m^2 bis zu 500 cd/m^2 und das Emissionsspektrum vermessen. Die größte Änderung des Spektrums sowie des Farborts wird mit der kleinsten Leuchtdichte erreicht, weil in diesem Fall der Regelbereich des Stroms am größten ist. In diesem Betrieb wird eine maximale Farbortverschiebung ($\Delta x = 0,063$; $\Delta y = 0,004$) von $x_1 = 0,457$; $y_1 = 0,396$ (bei $5,1 \text{ mA/cm}^2$) auf $x_2 = 0,394$; $y_2 = 0,400$ (bei $139,8 \text{ mA/cm}^2$) erreicht. Der Farbwiedergabeindex ändert sich von $R_{a,1} = 82$ auf $R_{a,2} = 84$. Das detaillierte Messergebnis ist in Abbildung 4.37 dargestellt.

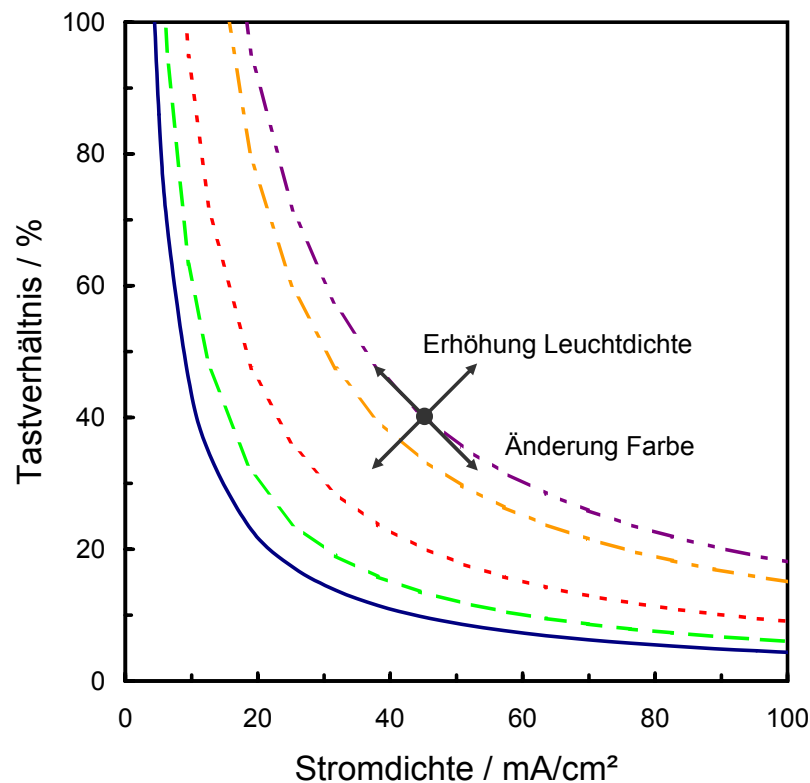


Abbildung 4.36: Abhängigkeit zwischen der Stromdichte und dem benötigten Tastverhältnis, um den Farbeindruck zu variieren, jedoch die Leuchtdichte konstant zu halten bei Werten von 145 cd/m^2 (Volllinie), 200 cd/m^2 (Strichlinie), 300 cd/m^2 (Punktlinie), 400 cd/m^2 (Strichpunktlinie) und 500 cd/m^2 (Strichzweipunktlinie).

Diese Messungen haben gezeigt, dass es möglich ist, mit diesem innovativen Treiber OLEDs derart anzusteuern, um sowohl Leuchtdichte als auch den Farbort für eine hochwertige Beleuchtung getrennt voneinander einstellen zu können. Beachtlich dabei ist die gewöhnliche Kontaktierung der OLED, welche nur eine weiße Emitterschicht aufweist. Es konnte gezeigt werden, dass ein Aufbau mit reiner analoger Schaltungstechnik möglich ist, dieser jedoch bei der stromabhängigen Pulsweitenregelung nur

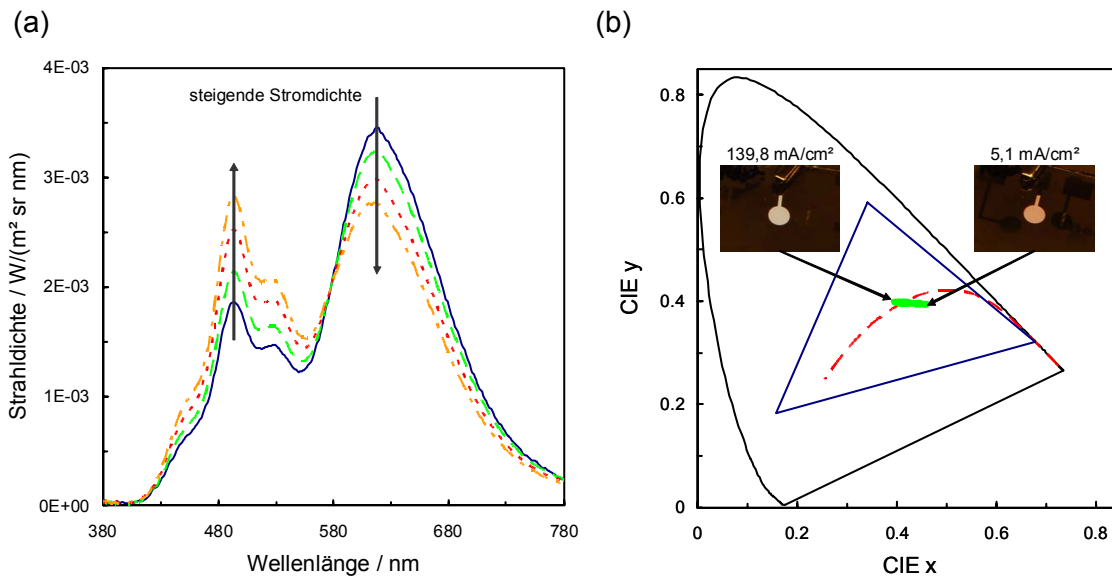


Abbildung 4.37: (a) Elektrolumineszenzspektren der OLED bei konstanter Leuchtdichte und variierender Stromdichte von $5,1 \text{ mA/cm}^2$ (Volllinie), $12,7 \text{ mA/cm}^2$ (Strichlinie), $44,5 \text{ mA/cm}^2$ (Punktlinie) und $139,8 \text{ mA/cm}^2$ (Strichpunktlinie). (b) Zu den Elektrolumineszenzspektren berechnete CIE Farbkoordinaten. Die Volllinie definiert den Gamut basierend auf den R, G, B Grundpolymeren, die Strichlinie repräsentiert die Farbkoordinaten des Schwarzkörperstrahlers. Die erreichte Farbortverschiebung bei konstanter Leuchtdichte verdeutlicht die Punktlinie sowie die Fotos bei $139,8 \text{ mA/cm}^2$ (links) und $5,1 \text{ mA/cm}^2$ (rechts).

in Grenzen verwendbar ist. Eine genauere Regelung ist realisierbar durch Austausch des PWM-ICs durch einen Mikrocontroller, bei dem die benötigten Wertepaare für I und DC (entsprechend Abbildung 4.36) in "look-up"Tabellen hinterlegt sind [106].

5 Abschließende Betrachtungen

Diese Arbeit behandelt die lichttechnische sowie elektrooptische Optimierung von weißen, organischen Leuchtdioden auf Basis löslicher Polymere. Aufbauend auf den physikalischen Funktionsprinzipien der OLED und den Qualitätsmerkmalen für Beleuchtung sind die Optimierungspotentiale im Bereich der Substratmodenreduzierung, Verringerung der ohmschen Verluste in der Anode, anwendungsspezifische Auskoppeloptiken sowie Strahlformungsoptiken und die effiziente elektrische Ansteuerung evaluiert und bearbeitet worden. Zusätzlich wurden die eingesetzten Messmethoden dargestellt.

Mittels angepasster optischer Schichtsystemsimulationen (Elektrolumineszenzspektren sowie Dipolorientierung) können weiß emittierende OLEDs simuliert und der Einfluss der Schichtdicken auf die winkelabhängige Leuchtdichte, Farbort sowie Farbwiedergabe bestimmt werden. Wie Eingangs erwähnt, ist hierfür eine Referenzmessung eines bestehenden Musters notwendig, um auf Basis dieses Bauteils Änderungen zu simulieren. Die direkte Simulation der z.B. absoluten Lichtausbeute ist mit diesem Modell nicht möglich. Somit ist jedoch gewährleistet, dass dieses Verfahren nach Referenzierung auch auf andere OLED-Systeme übertragbar ist. Bei dieser Studie ist festzustellen, dass in dem untersuchten OLED-System die optischen Materialeigenschaften der unterschiedlichen PEDOT-Arten einen geringen Einfluss auf die resultierende Leuchtdichte aufweisen. Anhand einer Schichtdickenoptimierung mit der Maximierung der Leuchtdichte wird gezeigt, dass dies zu einer deutlichen Verschiebung des Farbortes und zu einer Reduzierung der Farbwiedergabe führt. Aus diesem Grund ist es für hochwertige OLEDs nötig, bei der Optimierung den Farbwiedergabeindex mit als Kriterium zu berücksichtigen.

Durch Lösen der hergeleiteten Laplace-Gleichung mit der Finite-Elemente-Methode ist die Berechnung der Potentialverteilung in der OLED Anode (ITO sowie PH500) durchgeführt worden. Das Modell ermöglicht ebenfalls eine Simulation der Potentialverteilung mit Verwendung hochleitfähiger Busbar-Strukturen. Eine Optimierung dieser Strukturen führt zu OLED Bauteilen mit Polymeranode und einer Größe von $33 \times 34 \text{ mm}^2$, welche eine vergleichbare Leuchtdichte zu dem ITO Muster aufweisen. Die höheren ohmschen Verluste des Polymers können durch die besondere Anordnung der Busbars ausgeglichen werden. Dies führt zu einer Erhöhung des Lichtstroms um den Faktor 3. Zugleich haben die Ergebnisse gezeigt, dass es unerlässlich ist,

die elektrischen Eigenschaften (spezifische Leitfähigkeit) sowie optischen Effekte (Absorption und Interferenz) bei der Berechnung der optimalen Anodendicke zu berücksichtigen. Durch die Bestimmung des OLED-spezifischen elektrischen Widerstandes R_{OLED} ist mit diesem Verfahren die Simulation der Potentialverteilung auch für abweichenden OLED-Systemen möglich.

Eine geeignete Strukturierung der Glasoberfläche minimiert die Bildung der Substratmoden. Durch Verwendung spezifischer Oberflächendiffusoren ist eine Leuchtdichtesteigerung unter 0° um den Faktor 1,21 erzielt worden. Dieses entspricht einer Steigerung des ausgekoppelten Lichtstroms um 1,18. Anhand einer vollständigen optischen Charakterisierung des Diffusors ist es möglich, die winkelabhängige Leuchtdichte mit Auskoppeloptik in Abhängigkeit der Schichtdickenkonfiguration zu simulieren. Zusätzlich kann durch diese Simulation Eigenschaften des Diffusors abgeleitet werden, um die Winkelverteilung der OLED zwischen einer gerichteten und einer lambertschen Abstrahlcharakteristik zu variieren.

Unter Berücksichtigung der Winkelverteilung mit Auskoppeloptik sind die Einsatzmöglichkeiten der OLED Muster im Bereich der Beleuchtungstechnik evaluiert worden. Für Kraftfahrzeuge eignen sie sich für Innenleuchten sowie Seitenmarkierungsleuchten. Die Verwendung einer optimierten Kollimationsoptik ermöglicht es, mit der aktuellen OLED Performance eine mittlere Beleuchtungsstärke von $E_v \approx 85$ lx (in der Nutzebene) für eine Leseleuchte zu realisieren. Die Umformung der lambertschen Strahlverteilung in die gerichtete Verteilung für die Seitenmarkierungsleuchte von $\pm 30^\circ$ horizontal und $\pm 10^\circ$ in vertikaler Richtung ist mithilfe von drei aufeinander folgenden Mikroprismenfolien erfolgt.

Für den Bereich der Displaytechnologie sind drei Konzepte für eine Sekundäroptik zur Hinterleuchtung erarbeitet und verglichen worden. Die Aufgabe der Optik besteht in der Überdeckung der nicht leuchtenden Bereiche (elektrische Kontaktierung). Somit ist es möglich, eine große homogen leuchtende Fläche auf Basis nebeneinander gesetzter kleinerer OLEDs zu realisieren, um ein LCD gleichmäßig auszuleuchten.

Als drittes Anwendungsfeld ist der Einsatz der OLEDs für eine hochwertige Raumbeleuchtung untersucht worden. Durch Verwendung einer leuchtenden OLED Fläche von $A_{OLED} = 5,9$ m², bestehend aus mehreren OLEDs, kann eine mittlere Beleuchtungsstärke von $\bar{E}_m = 745$ lx im Sehbereich eines Büroraums (19,4 m²) erreicht werden. Dabei werden alle aus der Norm spezifizierten Ansprüche bezüglich Sehleistung, Sehkombfort sowie visuelles Ambiente erfüllt.

Im Rahmen der Arbeit ist ein innovativer sowie effizienter OLED Treiber realisiert worden, bei dem die Leuchtdichte und der Farbort der OLED getrennt einstellbar sind. Dies erfolgt ausschließlich über die elektrische Ansteuerung. Die OLED selbst besitzt nur eine weiße Emitterschicht; nicht drei getrennt ansteuerbare Polymere. Anhand eines OLED Musters mit großer Farbverschiebung ist eine Farbabstimmung

im Bereich $\Delta x = 0,063$; $\Delta y = 0,004$ (von $x_1 = 0,457$; $y_1 = 0,396$ auf $x_2 = 0,394$; $y_2 = 0,400$) bei einer konstanten Leuchtdichte von $L_v = 145 \text{ cd/m}^2$ realisiert worden. Mit Variation des Tastverhältnisses wird eine Einstellung der Leuchtdichte ohne Farbortveränderung erreicht. Für OLED-Systeme, welche eine größerer Abhängigkeit des Farbortes als Funktion des Stroms aufweisen, ist ein größerer Einstellbereich zu erwarten.

In thematisch weiterführenden Arbeiten ist die Entwicklung einer eigenen Software zielführend, mit der die OLED in ihrer Gesamtheit einschließlich der elektrischen und optischen Eigenschaften simuliert wird. Dies ermöglicht eine Optimierung des Schichtsystems unter Einbeziehung der Auskoppeloptik und der Strahlformungs-optik. In Ergänzung kann die Strukturierung der Kathode zu einer Reduzierung der Bildung von Plasmonenmoden eingesetzt werden. Eine Untersuchung der Auskoppelwirkung von diffraktiven optischen Elementen mit diffusorähnlichem Verhalten lassen effizientere Primäroptiken erwarten.

Die OLED als Leuchtmittel bietet das Potential auf einfache und kosteneffiziente Weise variable spektrale Zusammensetzungen von weißem Licht zu liefern, welche mit derzeitig verfügbaren Lichtquellen nicht realisierbar sind. Aus diesem Grund ist die anwendungsorientierte Forschung von OLED-Beleuchtungssystemen einschließlich ihrer physio- sowie psychologischen Wirkungen von OLED-Lichtfarben für die zukünftige Marktakzeptanz von nennenswertem Interesse und bietet ein interessantes Themenfeld für weitere wissenschaftliche Untersuchungen.

Literaturverzeichnis

- [1] KALLMANN, H. ; POPE, M.: Positive Hole Injection into Organic Crystals. In: *The Journal of Chemical Physics* 32 (1960), Nr. 1
- [2] POPE, M. ; KALLMANN, H. P. ; MAGNANTE, P.: Electroluminescence in Organic Crystals. In: *The Journal of Chemical Physics* 38 (1963), Nr. 8, S. 2042–2043
- [3] HELFRICH, W. ; SCHNEIDER, W. G.: Recombination Radiation in Anthracene Crystals. In: *Phys. Rev. Lett.* 14 (1965), Feb, Nr. 7, S. 229–231
- [4] PARTRIDGE, R.H.: Electroluminescence from polyvinylcarbazole films: 1. Carbazole cations. In: *Polymer* 24 (1983), Nr. 6. – ISSN 0032–3861
- [5] TANG, C. W. ; VANSLYKE, S. A.: Organic electroluminescent diodes. In: *Applied Physics Letters* 51 (1987), Nr. 12, S. 913–915
- [6] Norm DIN EN 12464 – 1 2011. *Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Arbeitsstätten in Innenräumen.* – Deutsches Institut für Normung
- [7] GUSTAFSSON, G. ; CAO, Y. ; TREACY, G. M. ; KLAVETTER, F. ; COLANERI, N. ; HEEGER, A. J.: Flexible light-emitting diodes made from soluble conducting polymers. In: *Nature* (1992)
- [8] GU, G. ; BURROWS, P. E. ; VENKATESH, S. ; FORREST, S. R. ; THOMPSON, M. E.: Vacuum-deposited, nonpolymeric flexible organic light-emitting devices. In: *Opt. Lett.* 22 (1997), Feb, Nr. 3
- [9] LEWIS, J.S. ; WEAVER, M.S.: Thin-film permeation-barrier technology for flexible organic light-emitting devices. In: *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of* 10 (2004), Nr. 1, S. 45 – 57
- [10] CHWANG, Anna B. ; ROTHMAN, Mark A. ; MAO, Sokhanno Y. ; HEWITT, Richard H. ; WEAVER, Michael S. ; SILVERNAIL, Jeff A. ; RAJAN, Kamala

- ; HACK, Michael ; BROWN, Julie J. ; CHU, Xi ; MORO, Lorenza ; KRAJEWSKI, Todd ; RUTHERFORD, Nicole: Thin film encapsulated flexible organic electroluminescent displays. In: *Applied Physics Letters* 83 (2003), Nr. 3, S. 413–415
- [11] LEE, Sang M. ; CHOI, Bo H. ; PARK, Jae S. ; KIM, Tae H. ; KWONBAE, Heung ; PARK, Lee S.: Effect of ITO/Ag/ITO Multilayer Electrode Deposited onto Glass and PET Substrate on the Performance of Organic Light-Emitting Diodes. In: *Molecular Crystals and Liquid Crystals* 530 (2010)
- [12] LIU, Kou-Chen ; CHENG, Hsiang-Ling ; TSAI, Jung-Ruey ; CHIANG, Yi-Lin ; HSIEH, Yu-Chen ; JAN, Der-Jun: Investigation of SiOxCy film as the encapsulation layer for full transparent OLED using hollow cathode discharge plasma at room temperature. In: *Thin Solid Films* 518 (2010), Nr. 22, S. 6195 – 6198. – Proceedings of the 2nd International Conference on Microelectronics and Plasma Technology - ICMAP 2009
- [13] LIU, Kou-Chen ; TENG, Chao-Wen ; LU, Yen-Hsun ; TSAI, Yao-Chou ; CHOU, Shih-Hsien: Experimental study on transparent polymer light emitting diodes using LiF/Ag/Indium tin oxide cathode. In: *Japanese Journal of Applied Physics Part 1* 46 (2007), Nr. 4B, S. 2704–2708
- [14] GEELHAAR, Thomas (Hrsg.): *Für Grüne Elektronik aus Deutschland*. 1. Auflage. VDI Technologiezentrum GmbH, 2009
- [15] <http://www.oled.at/>. – Zugriffsdatum: 31. Juli. 2012
- [16] HEIL, Holger: *Injektion, Transport und Elektrolumineszenz in organischen Halbleiterbauelementen*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2004
- [17] FLEISSNER, Arne: *Ladungstransport und elektrische Ermüdung in organischen Leuchtdioden*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2008
- [18] FÁBER, René: *Neue Polymere für organische LEDs auf der Basis von Fluorenyliden-verknüpften Oligo(p-phenylen)en*, Technische Universität München, Diss., 2001
- [19] LICHNEROVA, Eva: *Neue vernetzbare Polymere für die OLED Technologie*, Technische Universität München, Diss., 2005
- [20] ROTHMANN, Michael: *Designing Novel Host Materials For Blue Phosphorescent Organic Light-Emitting Diodes*, Universität Bayreuth, Diss., 2009

- [21] HETTEL, Sonja: *Design und Synthese von elektronenleitenden Materialien*, Universität zu Köln, Diss., 2009
- [22] HILL, Duncan: *The Optical Outcoupling of Organic Light Emitting Diodes*, Technische Universität Dresden, Diss., 2008
- [23] YIN, Yongming ; PIAO, Xuecheng ; LI, Yang ; WANG, Yan ; LIU, Jian ; XU, Kai ; XIE, Wenfa: High-efficiency and low-efficiency-roll-off single-layer white organic light-emitting devices with a bipolar transport host. In: *Applied Physics Letters* 101 (2012)
- [24] QUIRINO, W.G. ; TEIXEIRA, K.C. ; LEGNANI, C. ; CALIL, V.L. ; MESSER, B. ; NETO, O.P. V. ; PACHECO, M.A.C. ; CREMONA, M.: Improved multilayer OLED architecture using evolutionary genetic algorithm. In: *Thin solid Films* 518 (2009)
- [25] KUMAR, Sudhir ; SHEN, Shih-Ming ; CHEN, Szu-Hao ; WANG, Ching-Chiun ; CHEN, Chien-Chih ; JOU, Jwo H.: High Efficiency Very Low Color Temperature Phosphorescent Organic Light Emitting Diodes. In: *International Proceedings of Computer Science and Information Technology, Volume 28*, 2012
- [26] MEYER, J. ; WINKLER, T. ; HAMWI, S. ; SCHMALE, S. ; JOHANNES, H.-H. ; WEIMANN, T. ; HINZE, P. ; KOWALSKY, W. ; RIEDL, T.: Transparent inverted organic light-emitting diodes with a tungsten oxide buffer layer. In: *Advanced Materials* 20 (2008)
- [27] HUNG, L. S. ; TANG, C. W. ; MASON, M. G. ; RAYCHAUDHURI, P. ; MADATHIL, J.: Application of an ultrathin LiF/Al bilayer in organic surface-emitting diodes. In: *Applied Physics Letters* 78 (2001)
- [28] MA, Jian ; PIAO, Xuecheng ; LIU, Jian ; ZHANG, Letian ; ZHANG, Tianyu ; LIU, Mo ; LI, Tong ; XIE, Wenfa ; CUI, Haining: Optical simulation and optimization of ITO-free top-emitting white organic light-emitting devices for lighting or display. In: *Organic Electronics* 12 (2011)
- [29] HSU, Shih-Feng ; LEE, Chung-Chun ; HWANG, Shiao-Wen ; CHEN, Chin H.: Highly efficient top-emitting white organic electroluminescent devices. In: *Applied Physics Letters* 86 (2005)
- [30] XIE, Guohua ; ZHANG, Zhensong ; XUE, Qin ; ZHANG, Shiming ; ZHAO, Li ; LUO, Yang ; CHEN, Ping ; QUAN, Baofu ; ZHAO, Yi ; LIU, Shiyong: Highly efficient top-emitting white organic light-emitting diodes with improved

- contrast and reduced angular dependence for active matrix displays. In: *Organic Electronics* 11 (2010)
- [31] NOWY, Stefan ; FRISCHEISEN, Jörg ; BRÜTTING, Wolfgang: Simulation based optimization of light-outcoupling in organic light-emitting diodes. In: *Proc. SPIE 7415, Organic Light Emitting Materials and Devices XIII*, 2009
- [32] BARNES, W. L.: Fluorescence near interfaces: the role of photonic mode density. In: *Journal of Modern Optics*, 45 (1998)
- [33] <http://www.clevios.com/>. – Zugriffsdatum: 31. Juli. 2012
- [34] SCHUBERT, Dirk W. ; DUNKEL, Thomas: Spin coating from a molecular point of view: its concentration regimes, influence of molar mass and distribution. In: *Materials Research Innovations* 7 (2003)
- [35] KIENEL, Gerhard (Hrsg.) ; RÖLL, Klaus (Hrsg.): *Vakuumbeschichtung* 4. 1. Auflage. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1993
- [36] ADAMOVICH, Vadim ; BROOKS, Jason ; TAMAYO, Arnold ; ALEXANDER, Alex M. ; DJUROVICH, Peter I. ; D'ANDRADE, Brian W. ; ADACHI, Chihaya ; FORREST, Stephen R. ; THOMPSON, Mark E.: High efficiency single dopant white electrophosphorescent light emitting diodes. In: *New Journal of Chemistry* 26 (2002)
- [37] WASEY, J. A. E. ; BARNES, W. L.: Efficiency of spontaneous emission from planar microcavities. In: *Journal of Modern Optics* (2000)
- [38] Norm DIN 5031 1982. *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik*. – Deutsches Institut für Normung
- [39] Norm DIN 5033 1992. *Farbmessung*. – Deutsches Institut für Normung
- [40] BERGMANN, L. ; NIEDRIG, H. ; EICHLER, H. ; SCHAEFER, C.: *Optik: Wellen- und Teilchenoptik*. 10. Auflage. de Gruyter, 2004 (Lehrbuch der Experimentalphysik)
- [41] Norm DIN 6169 1976. *Farbwiedergabe*. – Deutsches Institut für Normung
- [42] MCCAMY, C. S.: Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates. In: *Color Research & Application* 17 (1992), S. 142–144

-
- [43] NAUMANN, H. ; SCHRÖDER, G.: *Bauelemente der Optik*. 6. Auflage. Carl Hanser Verlag München Wien, 1992
- [44] JUDD, Deane B.: Standard Response Functions for Protanopic and Deuteranopic Vision. In: *Journal of the Optical Society of America* 39 (1949), S. 252–256
- [45] MACLEOD, Hugh A. (Hrsg.): *Thin-Film Optical Filters*. 3. Auflage. CRC Press, 2001
- [46] <http://www.fluxim.com/Emission-module.67.0.html>. – Zugriffsdatum: 31. Juli. 2012
- [47] GROSS, Herbert: *Handbook of Optical Systems*. 1. Auflage. Wiley-VCH, Berlin, 2005
- [48] FEY, Dietmar (Hrsg.): *Grid-Computing; Eine Basistechnologie für Computational Science*. 1. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010
- [49] <http://www.radiantzemax.com/en/zemax/>. – Zugriffsdatum: 31. Juli. 2012
- [50] <http://www.opticalres.com/>. – Zugriffsdatum: 31. Juli. 2012
- [51] <http://www.breault.com/>. – Zugriffsdatum: 31. Juli. 2012
- [52] <http://www.optis-world.com/index.html>. – Zugriffsdatum: 31. Juli. 2012
- [53] [http://de.wikipedia.org/wiki/Streuung_\(Physik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Streuung_(Physik)). – Zugriffsdatum: 31. Juli. 2012
- [54] VERNOLD, C. L. ; HARVEY, J. E.: Modified Beckmann-Kirchoff scattering theory for nonparaxial angles. In: *Scattering and Surface Roughness II, vol. 3426 of Proceedings of SPIE 2007* (1998)
- [55] STOVER, John C. (Hrsg.): *Optical Scattering: Measurement and Analysis*. 2. Auflage. SPIE Publications, 1995
- [56] BENNETT, Jean M. (Hrsg.) ; MATTSSON, Lars (Hrsg.): *Introduction to Surface Roughness and Scattering*. 2. Auflage. Optical Society of America, 1999
- [57] SCHRÖDER, Sven ; DUPARRÉ, Angela ; CORIAND, Luisa ; TÜNNERMANN, Andreas ; PENALVER, Dayana H. ; HARVEY, James E.: Modeling of light scattering in different regimes of surface roughness. In: *Optics Express* 19 (2011), Nr. 10

- [58] TIETZE, Ulrich ; SCHENK, Christoph: *Halbleiter-Schaltungstechnik*. 12. Auflage. Springer-Verlag GmbH, 2002
- [59] LEHNER, Günter (Hrsg.): *Elektromagnetische Feldtheorie*. 5. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006
- [60] HERING, Ekbert ; BRESSLER, Klaus ; GUTEKUNST, Jürgen: *Elektronik für Ingenieure*. 3. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998
- [61] STUMMER, Henning: *Automobiltaugliche Ansteuerungsschaltungen für Organische Leuchtdioden*, University of Applied Sciences Darmstadt, Diplomarbeit, 2007
- [62] ASHDOWN, Ian ; FERGUSON, Ian T. ; NARENDRAN, Nadarajah ; TAGUCHI, Tsunemasa: Extended Parallel Pulse Code Modulation of LEDs. In: *Sixth International Conference on Solid State Lighting* 6337
- [63] JETI TECHNISCHE INSTRUMENTE GMBH (Hrsg.): *Spectroradiometer specbos 1201 datasheet*. JETI Technische Instrumente GmbH
- [64] TECHNOTEAM BILDVERARBEITUNG GMBH (Hrsg.): *Video Photometer, Ortsaufgelöste Licht- und Farbmessstechnik*. TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH
- [65] HENTSCHEL, Hans-Jürgen: *Licht und Beleuchtung, Theorie und Praxis der Lichttechnik*. 4. Auflage. Huethig GmbH, 1993
- [66] <http://www.opsira.de/>. – Zugriffsdatum: 31. Juli. 2012
- [67] Norm DIN EN 13032 2004. *Licht und Beleuchtung - Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten*. – Deutsches Institut für Normung
- [68] Norm DIN 5032 – 1 1999. *Lichtmessung, Teil 1 – Photometrische Verfahren*. – Deutsches Institut für Normung
- [69] INSTRUMENT SYSTEMS OPTISCHE MESSTECHNIK GMBH (Hrsg.): *CAS 140CT Array Spektrometer*. Instrument Systems Optische Messtechnik GmbH
- [70] OPTRONIK BERLIN GMBH (Hrsg.): *Goniophotometer Systems*. Optronik Berlin GmbH

-
- [71] AUTRONIC-MELCHERS GMBH (Hrsg.): *Motorized Goniometer System For Comprehensive Display Characterization*. Autronic-Melchers GmbH
- [72] TECHNOTEAM BILDVERARBEITUNG GMBH (Hrsg.): *Nahfeld Goniometer*. TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH
- [73] TOMPKINS, Harland G. (Hrsg.) ; MCGAHAN, William A. (Hrsg.): *Spectroscopic Ellipsometry and Reflectometry: A User's Guide*. 1. Auflage. Wiley-Interscience, 1999
- [74] GUO, Jing ; KOCH, Norbert ; BERNASEK, Steven L. ; SCHWARTZ, Jeffrey: Enhanced hole injection in a polymer light emitting diode using a small molecule monolayer bound to the anode. In: *Chemical Physics Letters* 426 (2006)
- [75] WAKIZAKA, Daiki ; FUSHIMI, Toshiki ; OHKITA, Hideo ; ITO, Shinzaburo: Hole transport in conducting ultrathin films of PEDOT:PSS prepared by layer-by-layer deposition technique. In: *Polymer* 45 (2004)
- [76] KLEIN, Bernd: *FEM Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau*. 7. Auflage. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2007
- [77] <http://www.pdesolutions.com/>. – Zugriffsdatum: 31. Juli. 2012
- [78] NEYTS, K. ; MARESCAUX, M. ; NIETO, A. ; ELSCHNER, A. ; LOEVENICH, W. ; FEHSE, K. ; HUANG, Q. ; WALZER, K. ; LEO, K.: Inhomogeneous luminance in organic light emitting diodes related to electrode resistivity. In: *Journal of Applied Physics* 100 (2006), Nr. 11
- [79] ALI, HM ; MOHAMED, HA ; MOHAMED, SH: Enhancement of the optical and electrical properties of ITO thin films deposited by electron beam evaporation technique. In: *European Physical Journal-Applied Physics* 31 (2005), Nr. 2, S. 87–93
- [80] NEYTS, Kristiaan ; REAL, Alfonso ; MARESCAUX, Matthias ; MLADENOVSKI, Saso ; BEECKMAN, Jeroen: Conductor grid optimization for luminance loss reduction in organic light emitting diodes. In: *Journal Of Applied Physics* 103 (2008), Nr. 9
- [81] MOELLER, S. ; FORREST, S. R.: Improved light out-coupling in organic light emitting diodes employing ordered microlens arrays. In: *Journal of Applied Physics* (2002)

- [82] PENG, H. J. ; HO, Y. L. ; QIU, C. F. ; WONG, M. ; KWOK, H. S.: Coupling Efficiency Enhancement of Organic Light Emitting Devices with Refractive Microlens Array on High Index Glass Substrate. In: *SID International Symposium Digest of Technical Papers* (2004)
- [83] PENG, H. J. ; HO, Y. L. ; YU, X. J. ; KWOK, H. S.: Enhanced coupling of light from organic light emitting diodes using nanoporous films. In: *Journal of Applied Physics* (2004)
- [84] TSUTSUI, Tetsuo ; YAHIRO, Masayuki ; YOKOGAWA, Hiroshi ; KAWANO, Kenji ; YOKOYAMA, Masaru: Doubling Coupling-Out Efficiency in Organic Light-Emitting Devices Using a Thin Silica Aerogel Layer. In: *Advanced Materials* (2001)
- [85] WEI, Mao-Kuo ; SU, I-Lin: Method to evaluate the enhancement of luminance efficiency in planar OLED light emitting devices for microlens array. In: *Optics Express* (2004)
- [86] LOWNDES, D. H. ; FOWLKES, J. D. ; PEDRAZA, A. J.: Early stages of pulsed-laser growth of silicon microcolumns and microcones in air and SF₆. In: *Applied Surface Science* (2000)
- [87] GATTASS, R. R. ; CERAMI, L. R. ; MAZUR, E.: Micromachining of bulk glass with bursts of femtosecond laser pulses at variable repetition rates. In: *Optics Express* (2006)
- [88] FROST, F. ; B.ZIBERI ; HÖCHE, T. ; RAUSCHENBACH, B.: The shape and ordering of self-organized nanostructures by ion sputtering. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B* (2004)
- [89] FACSKO, S. ; BOBEK, T. ; STAHL, A. ; KURZ, H. ; DEKORSY, T.: Dissipative continuum model for self-organized pattern formation during ion-beam erosion. In: *Physical Review B* (2004)
- [90] JUSCHTSCHENKO, Willi: *Optische Charakterisierung von Diffusoren*, University of Applied Sciences Darmstadt, Diplomarbeit, 2009
- [91] <http://www.lighttrans.com>. – Zugriffsdatum: 31. Juli. 2012
- [92] HAGEMANN, Malte ; KLUGE, Michael ; PAWLOWSKI, Edgar ; REICHEL, Steffen ; BRINKMANN, Matthias: Design and Optimization Strategies for Diffractive Optical Elements. In: *proceeding of the EOS Topical Meeting on Diffractive Optics* (2010)

-
- [93] Norm DIN 66261 1985. *Sinnbilder für Struktogramme nach Nassi-Shneiderman*. – Deutsches Institut für Normung
- [94] PEDROTTI, F. (Hrsg.) ; PEDROTTI, L. (Hrsg.) ; BAUSCH, W. (Hrsg.) ; SCHMIDT, H. (Hrsg.): *Optik für Ingenieure*. 2. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002
- [95] HAGEMANN, Malte ; BRINKMANN, Matthias ; BONRAD, Klaus ; VOGES, Frank ; RUTHS, Torsten ; BLUHM, Maik ; MICHAELIS, Dirk ; WÄCHTER, Christoph ; KUDAEV, Sergey ; SINZINGER, Stefan: *OLEDs for Automotive Lighting*. In: *proceeding of International Symposium on Automotive Lighting* (2007)
- [96] PRESS, William H. (Hrsg.) ; TEUKOLSKY, Saul (Hrsg.) ; VETTERLING, William T. (Hrsg.) ; FLANNERY, Brian P. (Hrsg.): *Numerical Recipes in C. The Art of Scientific Computing*. 2. Auflage. Cambridge University Press, 1992
- [97] ZEMAX DEVELOPMENT CORPORATION (Hrsg.): *ZEMAX, Optical Design Program, User Manual*. ZEMAX Development Corporation
- [98] SCHRÖDER, Gottfried (Hrsg.) ; TREIBER, Hanskarl (Hrsg.): *Technische Optik*. 9. Auflage. Vogel Buchverlag, 2002
- [99] 3M DEUTSCHLAND GMBH, DISPLAY & GRAPHICS (Hrsg.): *3M Optical Lighting Film Typ 2301, Technical Guide*. 3M Deutschland GmbH, Display & Graphics
- [100] WEBER DRUCK + DISPLAY (Hrsg.): *Lentikulare und Mehr, Produktdatenblatt*. Weber Druck + Display
- [101] MATTHIJS, Paul: *White Paper: Grayscale resolution: How much is enough?* In: *Barco View*
- [102] <http://www.dial.de/DIAL/de/dialux.html>. – Zugriffsdatum: 31. Juli. 2012
- [103] <http://www.helios32.com/Eulumdat.htm>. – Zugriffsdatum: 31. Juli. 2012
- [104] OSRAM GMBH (Hrsg.): *Datenblatt OSRAM T8 LUMILUX L58/865, G13 Leuchtstofflampe*. OSRAM GmbH
- [105] TEXAS INSTRUMENTS (Hrsg.): *Current Mode PWM Controller, UC3843*. Texas Instruments
- [106] BAIER, Michael: *Digitale Ansteuerung von OLEDs*, University of Applied Sciences Darmstadt, Diplomarbeit, 2008

A Spezifikation

EULUMDAT-Format

Tabelle A.1: Spezifikation des EULUMDAT-Formats zum Importieren der Leuchtendaten in die Raytrace-Software DIALux. Als Beispiele sind die Simulationsergebnisse der OLED Muster mit lambertscher Primäroptik sowie mit zusätzlicher Kollimationslinse aufgelistet. Gemäß [53]

Pos.	Beschreibung	# Zeichen	ohne Linse	mit Linse
1	Firmennamen	max. 78	Muster	Muster
2	Lichtquellentyp: Punktlichtquelle = 1 Linienlichtquelle = 2	1	2	2
3	Symmetrie: keine = 0 Rotationssym. = 1 Sym. C_0 - C_{180} = 2 Sym. C_{90} - C_{270} = 3	1	1	1
4	Anzahl C-Ebenen, M_c	2	24	24
5	Winkel zwischen C-Ebenen	5	15	15
6	Messwerte γ pro Ebene, N_g	2	36	36
7	Winkelintervall für γ	5	2.5	2.5
8	Messprotokollnummer	max. 78	01	02
9	Leuchtenbezeichnung	max. 78	ohne Linse	mit Linse
10	Leuchtennummer	max. 78	01	02
11	Dateinamen	8	OLED01	OLED02
12	Datum - Benutzer	max. 78	20060815	20060815
13	Länge, Leuchte / mm	4	110	110
14	Breite, Leuchte / mm	4	36	36
15	Höhe, Leuchte / mm	4	2	50
16	Länge, leuchtende Fläche / mm	4	104	104

Fortsetzung: nächste Seite

Tabelle A.1 – Fortsetzung EULUMDAT

Pos.	Beschreibung	# Zeichen	ohne Linse	mit Linse
17	Breite, leuchtende Fläche / mm	4	30	30
18	Höhe, leuchtende Fläche, C_0 / mm	4	1	49
19	Höhe, leuchtende Fläche, C_{90} / mm	4	1	49
20	Höhe, leuchtende Fläche, C_{180} / mm	4	1	49
21	Höhe, leuchtende Fläche, C_{270} / mm	4	1	49
22	Lichtstrom nach unten / %	4	100	100
23	Leuchtenwirkungsgrad / %	4	100	92
24	Skalierungsfaktor	6	1	1
25	Neigung der Leuchte	6	0	0
26	Anzahl n Bestückung	4	1	1
26a	Anzahl der Lampen	$n \cdot 4$	1	1
26b	Typ der Lampen	$n \cdot 24$	OLED	OLED
26c	Gesamtlichtstrom, Lampen	$n \cdot 12$	11	11
26d	Farbtemperatur / K	$n \cdot 16$	3500	3500
26e	Farbwiedergabeindex / %	$n \cdot 6$	90	90
26f	Leistungsaufnahme / W	$n \cdot 8$	1.9	1.9
27	Raumwirkungsgrade η_R je Raumindex $k = 0,6 - 5$	$10 \cdot 7$	0	0
28	C-Ebene	6	0	0
28	C-Ebene	6	15	15
28	C-Ebene	6	30	30
28	C-Ebene	6	45	45
28	C-Ebene	6	60	60
28	C-Ebene	6	75	75
28	C-Ebene	6	90	90
28	C-Ebene	6	105	105
28	C-Ebene	6	120	120
28	C-Ebene	6	135	135
28	C-Ebene	6	150	150
28	C-Ebene	6	165	165
28	C-Ebene	6	180	180
28	C-Ebene	6	195	195
28	C-Ebene	6	210	210
28	C-Ebene	6	225	225
28	C-Ebene	6	240	240

Fortsetzung: nächste Seite

Tabelle A.1 – Fortsetzung EULUMDAT

Pos.	Beschreibung	# Zeichen	ohne Linse	mit Linse
28	C-Ebene	6	255	255
28	C-Ebene	6	270	270
28	C-Ebene	6	285	285
28	C-Ebene	6	300	300
28	C-Ebene	6	315	315
28	C-Ebene	6	330	330
28	C-Ebene	6	345	345
29	Winkel γ	6	0.0	0.0
29	Winkel γ	6	2.5	2.5
29	Winkel γ	6	5.0	5.0
29	Winkel γ	6	7.5	7.5
29	Winkel γ	6	10.0	10.0
29	Winkel γ	6	12.5	12.5
29	Winkel γ	6	15.0	15.0
29	Winkel γ	6	17.5	17.5
29	Winkel γ	6	20.0	20.0
29	Winkel γ	6	22.5	22.5
29	Winkel γ	6	25.0	25.0
29	Winkel γ	6	27.5	27.5
29	Winkel γ	6	30.0	30.0
29	Winkel γ	6	32.5	32.5
29	Winkel γ	6	35.0	35.0
29	Winkel γ	6	37.5	37.5
29	Winkel γ	6	40.0	40.0
29	Winkel γ	6	42.5	42.5
29	Winkel γ	6	45.0	45.0
29	Winkel γ	6	47.5	47.5
29	Winkel γ	6	50.0	50.0
29	Winkel γ	6	52.5	52.5
29	Winkel γ	6	55.0	55.0
29	Winkel γ	6	57.5	57.5
29	Winkel γ	6	60.0	60.0
29	Winkel γ	6	62.5	62.5
29	Winkel γ	6	65.0	65.0
29	Winkel γ	6	67.5	67.5

Fortsetzung: nächste Seite

Tabelle A.1 – Fortsetzung EULUMDAT

Pos.	Beschreibung	# Zeichen	ohne Linse	mit Linse
29	Winkel γ	6	70.0	70.0
29	Winkel γ	6	72.5	72.5
29	Winkel γ	6	75.0	75.0
29	Winkel γ	6	77.5	77.5
29	Winkel γ	6	80.0	80.0
29	Winkel γ	6	82.5	82.5
29	Winkel γ	6	85.0	85.0
29	Winkel γ	6	87.5	87.5
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	318.5	1115.3
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	318.2	1109.0
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	317.3	1090.1
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	315.8	1059.3
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	313.7	1017.4
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	311.0	965.8
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	307.7	905.9
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	303.8	839.3
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	299.3	767.9
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	294.3	693.6
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	288.7	618.1
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	282.5	543.2
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	275.8	470.5
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	268.6	401.4
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	260.9	337.0
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	252.7	278.1
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	244.0	225.4
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	234.8	179.1
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	225.2	139.4
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	215.2	106.0
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	204.7	78.7
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	193.9	56.8
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	182.7	39.7
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	171.1	26.8
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	159.3	17.4
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	147.1	10.8
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	134.6	6.4

Fortsetzung: nächste Seite

Tabelle A.1 – Fortsetzung EULUMDAT

Pos.	Beschreibung	# Zeichen	ohne Linse	mit Linse
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	121.9	3.5
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	108.9	1.8
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	95.8	0.8
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	82.4	0.3
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	68.9	0.1
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	55.3	0.0
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	41.6	0.0
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	27.8	0.0
30	Lichtstärke / cd/k lm	6	13.9	0.0

B Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Matthias Brinkmann, Hochschule Darmstadt sowie Herrn Prof. Dr. habil. Stefan Sinzinger, Fachgebietsleiter der Technischen Optik an der Technischen Universität Ilmenau, für die außerordentliche Betreuung und die stete Bereitschaft für einen wissenschaftlichen Gedankenaustausch. Ihre aktive Unterstützung und Förderung haben wesentlich dazu beigetragen diese Arbeit durchzuführen.

Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Christoph Schierz, Fachgebietsleiter der Lichttechnik an der Technischen Universität Ilmenau, für die Begutachtung dieser Arbeit.

Ferner möchte ich meinen Kollegen Frank Friehl, Udo Häberle sowie Kenneth Justice besonders für ihre wertvolle Unterstützung während dieser Arbeit danken.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie recht herzlich für die grenzenlose Unterstützung während dieser Zeit.

Für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeit und die praktischen Anregungen danke ich besonders den Industriepartnern Merck KGaA, Darmstadt sowie der SCHOTT AG, Mainz.

Zuletzt möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mit ihren vielen Einzelbeiträgen mit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

C Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge

- Henning Fouckhardt, Ingo Steingoetter, Matthias Brinkmann, Malte Hagemann, Helmut Zarschizky, Lin Zschiedrich; nm- and μm -Scale Surface Roughness on Glass with Specific Optical Scattering Characteristics on Demand; Advances in OptoElectronics; Volume 2007; doi:10.1155/2007/27316.
- Malte Hagemann, Matthias Brinkmann, Klaus Bonrad, Frank Voges, Torsten Ruths, Maik Bluhm, Dirk Michaelis, Christoph Wächter, Sergey Kudaev, Stefan Sinzinger; OLEDs for Automotive Lighting; proceeding of International Symposium on Automotive Lighting 2007.
- Matthias Brinkmann, Matthias Etzel, Malte Hagemann, Harald Klöß, Susanne Krause, Udo Rohlfing; Kompetenz Lichttechnik und Beleuchtungstechnik an der Hochschule Darmstadt; Querschnitt 21; vmk Verlag; 2007.
- Malte Hagemann, Anne Köhnen, Klaus Meerholz, Matthias Brinkmann, Stefan Sinzinger; Simultaneous color and luminance control of organic light-emitting diodes for mood-lighting applications; Applied Physics Letters 92; 2008; DOI: 10.1063/1.2837409.
- Matthias Brinkmann, Franz-Joseph Braun, Malte Hagemann, Erwin Jäger; Diffraktive Optische Elemente erobern den Markt; Optik & Photonik; 2009.
- Catharina Sauer, Willi Juschtschenko, Malte Hagemann, Matthias Brinkmann; Optical characterization of surface and volume diffusers for LED lighting applications; proceeding of International Symposium on Automotive Lighting 2009.
- Malte Hagemann, Matthias Brinkmann; Optical and Electronic Luminance Homogenization for OLED Devices; proceeding of International Symposium on Automotive Lighting 2009.

- Malte Hagemann, Michael Kluge, Edgar Pawlowski, Steffen Reichel, Matthias Brinkmann; Design and Optimization Strategies for Diffractive Optical Elements; proceeding of the EOS Topical Meeting on Diffractive Optics 2010.
- Marion Englert, Willi Juschtschenko, Malte Hagemann, Matthias Brinkmann; Analysis and Optimization of Volume Diffusers for Display and Lighting Applications; proceeding of DGaO Jahrestagung 2011.

C.1 Buchbeiträge

- Dietmar Fey; Grid-Computing, eine Basistechnologie für Computational Science; Springer Verlag Berlin Heidelberg 2010.
- Frank Träger; Springer Handbook of Laser and Optics, 2. Auflage; Springer Verlag Berlin Heidelberg 2010.

D Betreute Diplomarbeiten

- Thomas Plahusch, Ansteuerung von OLEDs mit Hilfe analoger Schaltungstechnik, 2007, Hochschule Darmstadt - Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik.
- Michael Baier, Digitale Ansteuerung von OLEDs, 2008, Hochschule Darmstadt - Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik.
- Tuba Güder, Simulation von Diffusoren, 2008, Hochschule Darmstadt - Fachbereich Mathematik und Naturwissenschaften.
- Willi Juschtschenko, Optische Charakterisierung von Diffusoren, 2009, Hochschule Darmstadt - Fachbereich Mathematik und Naturwissenschaften.

E Thesen der Dissertation

- Durch die in dieser Arbeit erzielten Optimierungen am Schichtaufbau von OLEDs auf Basis löslicher Polymere konnte die Leuchtdichte der Muster um den Faktor 1,23 erhöht werden.
- Bei der Optimierung des Schichtaufbaus muss der Farbwiedergabeindex als Nebenbedingung für ein hochwertiges Leuchtmittel mit berücksichtigt werden.
- Durch die in dieser Arbeit entwickelten Busbar-Strukturen für OLEDs mit organischen Anoden konnte die Homogenität um Faktor 2,4 gesteigert werden.
- Wichtig bei der Simulation ist die gleichzeitige Berücksichtigung der elektrischen sowie optischen Effekte.
- Anhand umfangreicher Studien zu Diffusoren konnte eine geeignete Auskopeloptik evaluiert werden und die Erhöhung der Leuchtdichte um den Faktor 1,21 gezeigt werden.
- Durch die in dieser Arbeit entwickelte innovative PWM-Ansteuerung konnte der Farbort einer weißen OLED, unabhängig von der Leuchtdichte, in einem Bereich von $\Delta x = 0,063$; $\Delta y = 0,004$ eingestellt werden.
- Mittels Designstudien zu OLED-Anwendungen konnten neue Applikationen im Bereich Display-, Automotive- sowie General-Lighting erschlossen werden.
- Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden am 03. November 2010 mit dem dritten Platz des Forschungspreises der Hessischen Hochschulen für Angewandte Wissenschaften prämiert.