

Technische Universität Dortmund
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften

Konzeption, Simulation und technische Umsetzung neuartiger,
mikrostrukturierter LED-Flächenstrahler auf der Basis von
Lichtleitern

Dipl.-Ing. Michael Jakubowsky

Dortmund, 2020

Veröffentlichung als Dissertation in der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Dortmund
Tag der mündlichen Prüfung: 21.09.2020
Referent: Prof. Dr.-Ing. Andreas Neyer
Korreferent: Prof. Dr. Per Magnus Kristiansen

Kurzfassung

Die Beleuchtung von Räumen ist in der Architektur und der Energiepolitik ein wichtiges Thema. Dies betrifft vor allem Konzepte, die neues Potential in der architektonischen Gestaltung eröffnen und den Energiebedarf von Gebäuden verbessern. Der Einsatz von mikrostrukturierten, durchsichtigen Flächenstrahlern zur Raumbelichtung eröffnet hier neue Möglichkeiten.

In dieser Arbeit wird eine solche Leuchte basierend auf dem Konzept lichtleitender Platten entwickelt und hergestellt. Hierzu wird ein Entwicklungsschema entworfen, zu dem Herstellungsverfahren identifiziert und angepasst werden. Die industriell gefertigten Muster werden erfolgreich in eine Fassade integriert, um einen Raum von dort aus indirekt über die Decke zu beleuchten. Für die Charakterisierung des Abstrahlverhaltens und der subjektiven Wahrnehmung der hergestellten mikrostrukturierten Flächenstrahler werden neue Simulations- und Messverfahren entwickelt, die das Optimierungspotential der entwickelten Systeme identifizierbar machen. Darauf aufbauend werden optimierte Flächenstrahler mit hinterschnittenen Mikrostrukturen entworfen und neue Verfahren zu deren Herstellung entwickelt. Eine sozioökologische Einordnung bringt Aufschluss über die Nachhaltigkeit der neuartigen Beleuchtung.

Abstract

Room illumination is an important topic in architecture and energy politics, regarding mainly concepts that introduce new possibilities in design and improvement in energy consumption of a building. Microstructured transparent large area surface emitters open up new potentials in this field.

In this work the development and manufacturing of such a luminaire based on the concept of light guiding plates are presented. For this purpose, a development scheme is formulated and feasible manufacturing methods are identified and adapted. The industrially manufactured samples are successfully integrated in a façade to light up the room's ceiling and thereby realize an indirect room illumination. The out-coupling and subjective perception of the manufactured microstructured surface emitters are characterized by simulations and novel measurement setups developed for this purpose and further to show potential for optimization. Based on findings by this characterization, optimized surface emitters with undercut microstructures and feasible manufacturing methods are invented. A socio-ecological classification gives an outlook on the sustainability of the novel lighting solution.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2015 bis 2020 am Arbeitsgebiet Mikrostrukturtechnik (heute Arbeitsgebiet Sensorik) der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik an der Technischen Universität Dortmund.

Für die Möglichkeit der Promotion zu diesem sehr interessanten Thema sowie der hervorragenden Betreuung und Unterstützung danke ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Neyer. Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. Per Magnus Kristiansen von der Fachhochschule Nordwestschweiz für die freundliche Übernahme des Korreferats.

Frau Dr.-Ing. Evelyn Drabiniok und Herrn Dr. Paul danke ich für die umfangreiche Korrektur meiner Arbeit sowie zahlreiche Anregungen, konstruktive Vorschläge und Diskussionen. Für die sehr gute Zusammenarbeit und das unvergleichlich gute Arbeitsklima danke ich vor allem den Mitarbeiter*innen des Arbeitsgebiets Mikrostrukturtechnik und des Lehrstuhls für intelligente Mikrosysteme. Besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Christian Filips und Herrn Dipl.-Ing. Ulrich Marggraf für die praktische Unterstützung an der IT und im Labor. Für die sehr gute Zusammenarbeit im praktischen Teil meiner Arbeit danke ich zudem Herrn Joachim Arnold, Herrn Dr.-Ing. Jan de Boer, Herrn Dipl.-Ing. Mike Bülters, Herrn Dr. Michael Hof, Frau Dr.-Ing. Carolin Hubschneider, Herrn Prof. Dr. Helmut Müller, Herrn Dr.-Ing. Christian Rytko und Herrn Jerome Werder, B.Sc.. Ein weiterer Dank geht an alle studentischen Hilfskräfte die mich während meiner Arbeit unterstützten sowie an alle Mitarbeiter*innen des Lehrstuhls für Hochfrequenztechnik für die sehr gute und kollegiale Zusammenarbeit. Weiter danke ich Herrn Thomas Jakubowsky, M.A., Herrn Patrick Oekenpöhler, Frau Petra Sauerland, Frau Dipl. Reha. Päd. Sarah Saulheimer und Frau Hanna Steppat, B.A. für das Korrigieren dieser Arbeit.

Ganz besonders danke ich meinen Eltern. Sie haben mir erst den Weg bis zur Promotion ermöglicht.

Abschließend möchte ich noch allen hier Unerwähnten danken, die irgendwie zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Dies schließt auch Freund*innen mit ein, die mich während den arbeitsintensiven Phasen meiner Arbeit ertragen haben.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Nomenklatur | 1 |
| Abkürzungen | 5 |
| 1 Einleitung | 7 |
| 1.1 Motivation der Arbeit | 9 |
| 1.2 Stand der Technik und Forschung | 11 |
| 1.3 Aufbau der Arbeit | 13 |
| 2 Funktion und Theorie mikrostrukturierter Flächenstrahler | 15 |
| 2.1 Grundlegende Funktionsweise mikrostrukturierter Flächenstrahler | 15 |
| 2.2 Einkopplung von LED-Licht in eine lichtleitende Platte | 17 |
| 2.3 Leitung von Licht in einer lichtleitenden Platte | 25 |
| 2.4 Modenkopplung durch Oberflächenrauheiten in einer lichtleitenden Platte | 28 |
| 2.5 Auskopplung von Licht aus einer lichtleitenden Platte | 37 |
| 2.5.1 Allgemeine Betrachtung | 38 |
| 2.5.2 Auskopplung an Mikrozyllindern | 43 |
| 2.5.3 Optimierte Auskopplung | 45 |
| 2.6 Zusammenfassung | 50 |
| 3 Simulation und Charakterisierung von mikrostrukturierten Flächenstrahlern | 53 |
| 3.1 Simulation mikrostrukturierter Flächenstrahler | 54 |
| 3.1.1 Lichtleitende Platte | 55 |
| 3.1.2 Lichtquelle | 56 |
| 3.1.3 Mikrostrukturen | 57 |
| 3.1.4 Detektoren | 58 |
| 3.1.5 Simulation langer Flächenstrahler | 59 |
| 3.2 Optische Kennwerte mikrostrukturierter Flächenstrahler | 61 |
| 3.2.1 Abstrahlcharakteristik | 62 |
| Lichtstärkeverteilungskurve und Auskoppelbereich | 62 |

| | |
|---|-----------|
| Leuchtenbetriebswirkungsgrad und einseitige Auskopplung | 66 |
| 3.2.2 Subjektive Durchsicht | 68 |
| 3.3 Zusammenfassung | 73 |
| 4 Technologien zur Herstellung mikrostrukturierter Flächenstrahler | 75 |
| 4.1 Entwicklungsschema für mikrostrukturierte optische Systeme | 77 |
| 4.2 Fertigungstechnologien zur Herstellung mikrostrukturierter Lichtleiterplatten | 78 |
| 4.2.1 Auswahl geeigneter Fertigungstechnologien und Materialien | 79 |
| 4.2.2 Fertigung des Formwerkzeugs für abformende Verfahren | 81 |
| Photolithographische Fertigung des Formwerkzeugs | 81 |
| Mikromechanische Fertigung des Formwerkzeugs | 82 |
| 4.2.3 Gießen mit Silikon | 84 |
| 4.2.4 Lithographische Strukturierung | 86 |
| 4.2.5 Variothermes Spritzprägen | 87 |
| 4.2.6 Heißprägen | 90 |
| 4.2.7 UV-Prägen | 91 |
| 4.3 Herstellung hinterschnittener Mikrostrukturen | 94 |
| 4.4 Fazit: Vergleich der Herstellungstechnologien | 96 |
| 5 Beispiele hergestellter mikrostrukturierter Flächenstrahler | 99 |
| 5.1 Durchsichtige Flächenstrahler für indirekte Raumbeleuchtung | 99 |
| 5.1.1 Mikrostruktur | 100 |
| 5.1.2 Prototyp | 102 |
| Photolithographische Fertigung | 102 |
| Fertigung durch Heißprägen | 105 |
| Zwischenfazit | 109 |
| 5.1.3 Industriell gefertigtes Muster | 110 |
| Fertigung durch Heißprägen | 110 |
| Fertigung durch UV-Prägen | 111 |
| Durchsicht der industriell gefertigten Muster | 118 |
| Zwischenfazit | 121 |
| 5.1.4 Integration der industriell gefertigten Muster in einen Scheiben- | |
| verbund | 121 |
| 5.1.5 Fazit der Entwicklung von durchsichtigen Flächenstrahlern für | |
| indirekte Raumbeleuchtung | 128 |
| 5.2 Modifizierung eines Flächenstrahlers für horizontale Lichtauskopplung . . | 129 |
| 5.2.1 Mikrostruktur | 129 |
| 5.2.2 Prototyp | 131 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.2.3 | Fazit der Modifizierung eines Flächenstrahlers für horizontale Lichtauskopplung | 135 |
| 5.3 | Optimierung des horizontal abstrahlenden Flächenstrahlers für indirekte Raumbelichtung | 136 |
| 5.3.1 | Ideale LVK zur indirekten Raumbelichtung | 136 |
| 5.3.2 | Mikrostruktur | 139 |
| 5.3.3 | Vergleichende Simulation der Raumbelichtung | 141 |
| 5.3.4 | Fazit der Optimierung des horizontal abstrahlenden Flächenstrahlers zur indirekten Raumbelichtung | 147 |
| 6 | Nachhaltigkeit und Ökobilanz mikrostrukturierter Flächenstrahler | 149 |
| 6.1 | Auswirkungen der Anwendung von fassadenintegrierten, mikrostrukturierten Flächenstrahlern zur Raumbelichtung | 150 |
| 6.1.1 | Energieverbrauch | 150 |
| 6.1.2 | Auswirkung auf den Menschen und die Gesellschaft | 151 |
| 6.1.3 | Auswirkung auf die Umwelt | 151 |
| 6.2 | Auswirkung der Herstellung von mikrostrukturierten Flächenstrahlern | 152 |
| 6.2.1 | Energieverbrauch | 152 |
| 6.2.2 | Auswirkung auf den Menschen und die Gesellschaft | 153 |
| 6.2.3 | Auswirkung auf die Umwelt | 156 |
| 6.3 | Auswirkung der Rohstoffgewinnung für die Herstellung von mikrostrukturierten Flächenstrahlern | 157 |
| 6.3.1 | Auswirkung auf den Menschen und die Gesellschaft | 157 |
| 6.3.2 | Auswirkung auf die Umwelt | 158 |
| 6.4 | Fazit | 159 |
| 7 | Fazit, Zusammenfassung und Ausblick | 161 |
| 7.1 | Zusammenfassung | 161 |
| 7.2 | Ausblick | 164 |
| A | TaLed-Projekt | 167 |
| B | Radiometrische und photometrische Größen | 169 |
| C | Definition der Beschichtungen für die Simulation von LEDs in Zemax OpticStudio | 170 |
| D | Gefahrenstoffkennzeichen | 171 |
| | Wissenschaftliche Veröffentlichungen im Rahmen der Promotion | 173 |

| | |
|------------------------------|------------|
| Literaturverzeichnis | 177 |
| Abbildungsverzeichnis | 195 |
| Tabellenverzeichnis | 211 |

Nomenklatur

| | |
|-------------------|---|
| A_u | Fläche der Messöffnung in der Ulbrichtkugel |
| A | Anfängliche Amplitude der Mode μ |
| α_r | Reflexionsverlust |
| α | Absorption |
| B | Anfängliche Amplitude der Mode ν |
| $\beta_{\mu,\nu}$ | Phasenausbreitungskonstante |
| β_x | Ausbreitungswinkel außerhalb der LGP in der x-z-Ebene |
| β_y | Ausbreitungswinkel außerhalb der LGP in der y-z-Ebene |
| β | Ausbreitungswinkel außerhalb der LGP |
| $c_{\mu,\nu}$ | Modenamplitude |
| d_K | Aufnahmeabstand der Kamera |
| d_{LED} | Höhe der LED |
| $d_{m,Boden}$ | Durchmesser/Breite des Bodens der Mikrostruktur |
| $d_{m,Decke}$ | Durchmesser/Breite der Decke der Mikrostruktur |
| d_m | Durchmesser/Breite der Mikrostruktur |
| d_s | Abstand zwischen Lichtquelle und beleuchteter Fläche |
| d | Höhe der LGP |
| Δd_{LED} | Abstand der LED von der Kante der LGP in x-Richtung |
| Δd | Abstand eines Punktes von der Kante der LGP in x-Richtung |

Nomenklatur

| | |
|-------------------------|--|
| δ_F | Relativer Fehler bzw. relative Abweichung |
| $\Delta\ell_y$ | Abstand eines Punktes von der Kante der LGP in y-Richtung |
| $\Delta\ell_{y,LED}$ | Abstand der LED von der Kante der LGP in y-Richtung |
| Δ_M | Abstand der Mittelpunkte zweier Mikrostrukturen auf einer LGP |
| δ | Abklingkonstante |
| E_v | Beleuchtungsstärke |
| $\overline{E}_{v,diff}$ | Mittlere, diffuse Beleuchtungsstärke |
| η_a | Auskoppelfaktor |
| η_D | Relative Auskopplung Richtung Raumdecke |
| η_{eA} | Einseitige Auskopplung |
| η_{ein} | Einkoppeleffizienz |
| $\eta_{ein,LED}$ | Einkoppeleffizienz für die gesamte strahlende Fläche einer LED |
| η_{eLOR} | Effektiver Leuchtenbetriebswirkungsgrad |
| η_g | Geometrische Einkoppeleffizienz |
| η_{LOR} | Leuchtenbetriebswirkungsgrad |
| η_r | Reflexive Einkoppeleffizienz |
| η_v | Lichtausbeute |
| η_w | Winkelabhängige Einkoppeleffizienz |
| f_O | Ortsfrequenz in lp/mm |
| h_M | Höhe der Mikrostruktur |
| H_{PH} | Höhe des gedruckten Bildes |
| I_{LED} | Strahlungsintensität der LED |
| $I_{LED,t}$ | Transmitierte Strahlungsintensität von der LED in die LGP |
| $I_{LED,P}$ | Strahlungsintensität eines Punktes auf der LED |

| | |
|------------------------------|---|
| I_{rel} | Relative Strahlungsintensität |
| $I_{v,\text{rel}}$ | Relative Lichtstärke |
| I_v | Lichtstärke |
| k | Wellenzahl |
| ℓ_{LED} | Abstand der LED zur LGP in z-Richtung |
| $\ell_{y,\text{LED}}$ | Breite der LED |
| L_v | Leuchtdichte |
| ℓ_y | Breite der LGP |
| ℓ_z | Länge der LGP |
| λ_s | Wellenlänge der Sinusstörung auf der LGP-Oberfläche |
| $\lambda, \lambda_{\mu,\nu}$ | Wellenlänge des Lichts |
| MTF | Modulationstransferfunktion |
| n_1 | Brechzahl des Mediums der LGP |
| n_2 | Brechzahl des äußeren Mediums |
| n_{PH} | Vertikale Pixelanzahl der Aufnahme |
| N_R | Rauheitsklasse |
| ν | Winkelfrequenz in $\text{lp}/^\circ$ |
| $\phi_{e,g}$ | Strahlungsleistung, die auf die einkoppelnde Stirnfläche einer LGP trifft |
| $\phi_{e,\text{ein}}$ | Eingekoppelte Strahlungsleistung |
| $\phi_{e,\text{LED}}$ | Strahlungsleistung der LED |
| $\phi_{e,\text{LED},P}$ | Strahlungsleistung eines Punktes auf der LED |
| φ_F | Flankenwinkel der Mikrostruktur |
| ϕ_v | Lichtstrom |
| $\phi_{v,a}$ | Ausgekoppelter Lichtstrom |

Nomenklatur

| | |
|--------------------|--|
| $\phi_{v,D}$ | Lichtstrom, der Richtung Raumdecke ausgekoppelt wird |
| $\phi_{v,s}$ | Lichtstrom ausgekoppelt aus der strukturierten LGP-Seite |
| $\phi_{v,us}$ | Lichtstrom ausgekoppelt aus der unstrukturierten LGP-Seite |
| R_a | Mittlere Linienrauheit |
| $\hat{R}_{\mu\nu}$ | Koppelkoeffizient |
| ρ | Reflexionsgrad |
| σ_v | Grenzwert der Lichtstärke eines simulierten Strahls relativ zu deren Anfangswert |
| SQF | Subjektiver Qualitätsfaktor |
| θ_c | Winkel der Totalreflexion |
| ϑ_c | Größtmöglicher Ausbreitungswinkel in einer LGP |
| θ_F | Winkel zur Flächennormalen |
| θ_{\max} | Akzeptanzwinkel |
| θ_s | Ortsfrequenz der Sinusstörung auf der LGP-Oberfläche |
| ϑ_x | Ausbreitungswinkel in der LGP in der x-z-Ebene |
| ϑ_y | Ausbreitungswinkel in der LGP in der y-z-Ebene |
| ϑ | Ausbreitungswinkel in der LGP |
| U_0 | Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke |

Abkürzungen

| | |
|----------------|--|
| AG MST | Arbeitsgebiet Mikrostrukturtechnik an der TU Dortmund |
| CAD | computergestützte Entwicklung (computer assisted design) |
| CLSM | konfokales Laser-Scanning-Mikroskop (confocal laser scanning microscope) |
| COC | Cycloolefin-Copolymer |
| CSF | Kontrastaufklärungsvermögen (contrast sensitivity function) |
| ESF | Kantenspreizfunktion (edge spread function) |
| FhG-IBP | Fraunhofer-Institut für Bauphysik |
| FHNW | Fachhochschule Nordwestschweiz |
| HMDS | Hexamethyldisilazan |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| IKT | Institut für Kunststofftechnik an der FHNW |
| INKA | Institut für Nanotechnische Kunststoffanwendungen an der FHNW |
| LED | Leuchtdiode (light-emitting diode) |
| LGP | lichtleitende Platte (light guiding plate) |
| LOR | Leuchtenbetriebswirkungsgrad (light output ratio) |
| LSF | Linienspreizfunktion |
| LVK | Lichtstärkeverteilungskurve |
| MMA | Methacrylsäuremethylester |
| MTF | Modulationstransferfunktion |
| OLED | organische Leuchtdiode (organic light-emitting diode) |
| PC | Polycarbonat |
| PDMS | Polydimethylsiloxan |
| PMMA | Polymethylmethacrylat |

Abkürzungen

| | |
|------------|---|
| REM | Rasterelektronenmikroskop |
| SMD | oberflächenmontiertes Bauelement (surface mounted device) |
| SQF | Subjektiver Qualitätsfaktor |
| UV | ultraviolett / ultraviolette Strahlung |
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure |

1 Einleitung

Licht ist seit jeher für das Überleben (nicht nur) der Menschen notwendig und dementsprechend auch ein wichtiger Gegenstand der Forschung. Die künstliche Erzeugung von sichtbarem Licht ist inzwischen nicht nur in Wissenschaft und Technik sondern auch in der Kunst und in den allermeisten Bereichen des alltäglichen Lebens präsent. In der vorliegenden Arbeit wird mit der Entwicklung eines durchsichtigen, mikrostrukturierten Flächenstrahlers eine neuartige Leuchte vorgestellt, die die Einsatzmöglichkeit künstlicher Beleuchtung auf eine neue Ebene hebt. Anwendung findet diese Entwicklung z.B. als innovatives Fenster mit integrierter Raumbelichtung in der Gebäudefassade.

Gebäude energieeffizient zu gestalten ist aktuell eine große wissenschaftliche Herausforderung, die angesichts der globalen Erwärmung sehr dringlich ist [1]. Gleichzeitig müssen Gebäude ästhetischen sowie funktionalen Ansprüchen entsprechen und dabei das menschliche Wohlbefinden gewährleisten. In allen Bereichen spielt die Raumbelichtung eine wichtige Rolle [2, 3, 4]. Durch die Verknüpfung von Mikrostrukturtechnik und Architektur werden in der vorliegenden Arbeit neue Ansätze und Möglichkeiten eröffnet, die einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung von Gebäuden leisten.

Das Thema der vorliegenden Arbeit wurde inspiriert von einer Problemstellung aus dem Gebäudebereich, für die keine befriedigende, konventionelle Lösung existierte. Ausgangspunkt war eine Diskussion zwischen Herrn Prof. Andreas Neyer¹ und Herrn Prof. Helmut Müller² über eine künstliche Innenraumbelichtung aus den bunten Außenfenstern der St. Kolumba Kapelle in Köln. Die Kirche ist von einem Museum überbaut und hat nur sehr eingeschränkten Zugang zu Tageslicht. Der Grundriss der überbauten Kapelle in Abbildung 1.1 verdeutlicht die baulichen Gegebenheiten. Die Verwendung herkömmlicher Leuchten in der Kapelle würde die sakrale Beleuchtungsatmosphäre stören. Die angebrachten Strahler auf dem Boden vor den Fenstern außerhalb der Kapelle durchstrahlen die Fenster der Kapelle nur unzureichend, da sie so angeordnet werden mussten, dass sie die Ästhetik der Außenfassade möglichst wenig stören. Die Lösung dieses Problems bedarf

¹Arbeitsgebiet Mikrostrukturtechnik an der TU Dortmund (AG MST)

²ehem. Lehrstuhl für klimagerechte Architektur an der Universität Dortmund

einer tageslichtähnlichen Beleuchtung durch die Kirchenfassade mit einer unauffälligen Lichtquelle. Die Integration von transparenten Leuchten in den Fenstern wäre eine perfekte Lösung.

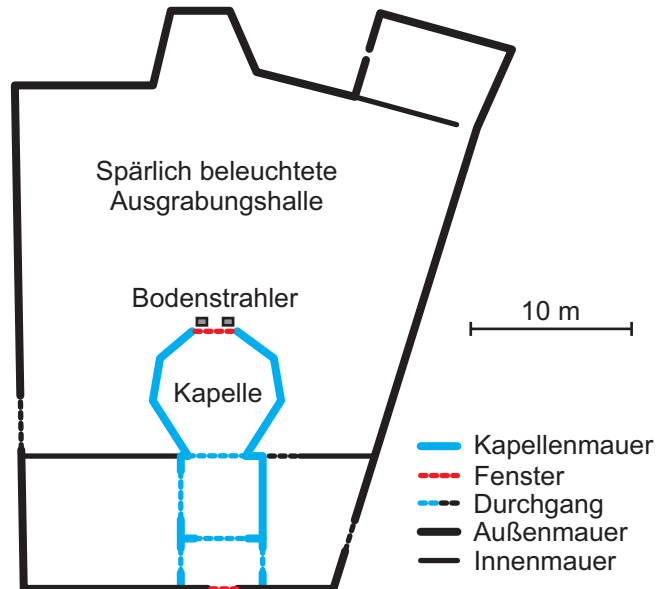


Abb. 1.1: Skizzierter Grundriss der überbauten St. Kolumba Kapelle in Köln. Basierend auf [5]. Das Fenster der Kapelle hat keinen Zugang zu Tageslicht und wird durch auf dem Boden stehende Strahler beleuchtet.

Die Erforschung und Umsetzung dieser Idee war einer der Ausgangspunkte für das BMWi-Forschungsprojekt „Energie- und kosteneffiziente, fassadenintegrierte Tageslicht- und LED-Beleuchtung mittels mikrooptischer Baukomponenten (TaLed)“ (vgl. Anhang A), in dessen Rahmen ein Großteil dieser Arbeit durchgeführt wurde. Die Aufgabe der vorliegenden Arbeit in diesem Projekt war zum einen der Entwurf und die numerische Simulation der optischen Funktion der angestrebten transparenten Flächenstrahler, die anschließend von den Unternehmen Karl Jungbecker GmbH & Co. KG, Olpe (im Folgenden *Jungbecker*) und temicon GmbH, Dortmund (im Folgenden *temicon*) und zum anderen in Kooperation mit der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) mit einer neuartigen Methode hergestellt wurden. Des Weiteren war es die Aufgabe dieser Arbeit, die von den Partnerinnen hergestellten Flächenstrahler geometrisch zu vermessen, ihr Abstrahlverhalten als Leuchte zu charakterisieren und die tatsächlich hergestellten Mikrostrukturen digital nachzubilden, um anhand von Simulationen eine genaue Analyse der realisierten Leuchten vorzunehmen und z.B. Auswirkungen herstellungsbedingter Geometrieabweichungen zu identifizieren. In Teilen wurde die Charakterisierung und Optimierung der Leuchten gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik (FhG-IBP) vorgenommen. Anwendungsszenarien wurden maßgeblich von der Green Building R&D GmbH, Düsseldorf eingebracht. Letzt-

endlich wird in der vorliegenden Arbeit ein neuartiger, mikrostrukturierter Flächenstrahler entwickelt und charakterisiert, der gleichzeitig als Fensterelement und als Leuchte eingesetzt werden kann, und schädliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt möglichst vermeidet.

Nach einer detaillierteren Vorstellung der Motivation der Arbeit wird im Folgenden der Stand der Technik und Forschung beschrieben und die Beiträge dieser Arbeit zu den verschiedenen Forschungsfeldern erläutert sowie eine Abgrenzung zu anderen Flächenleuchten vorgenommen. Abschließend wird eine Übersicht über den Aufbau der Arbeit gegeben.

1.1 Motivation der Arbeit

Die vorliegende Arbeit geht von der Idee einer durchsichtigen, flächig strahlenden, fassaden-integrierten Leuchte aus, die die Beleuchtungstechnik in Gebäuden durch ihren innovativen Ansatz revolutionieren kann indem sie beispielsweise als Fenster eingesetzt wird (vgl. Abbildung 1.2). Für die Realisierung einer solchen Leuchte werden mikrostrukturierte, lichtleitende Platten (light guiding plates, LGPs), die als Flächenstrahler in mehrfach verglaste Fassaden integriert werden können, entwickelt und untersucht. Die Funktionsweise von LGPs wird in Abbildung 1.3a dargestellt. Einkoppeltes Licht wird in der Platte durch Totalreflexion geführt und kann den Lichtleiter ohne Oberflächenmodifikation nur durch eine der Stirnflächen wieder verlassen.

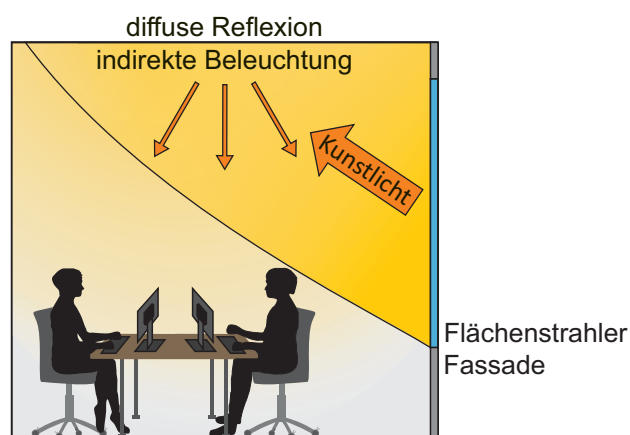


Abb. 1.2: Indirekte Beleuchtung durch einen transparenten Flächenstrahler integriert in die Gebäudefassade. Basierend auf [6].

In der Anzeigentechnologie finden mikrostrukturierte LGPs zur Lichtauskopplung schon lange in Kombination mit Reflektoren Anwendung [7] (vgl. Abbildung 1.3b). Sie sind

elementarer Bestandteil der Hintergrundbeleuchtung vieler Flachbildschirme, die keine organischen Leuchtdioden (organic light-emitting diodes, OLEDs) verwenden [8]. So sind die Erkenntnisse, die in dieser Arbeit über die Funktionsweise von mikrostrukturierten LGPs gewonnen werden, auch für die Bildschirmtechnik interessant.

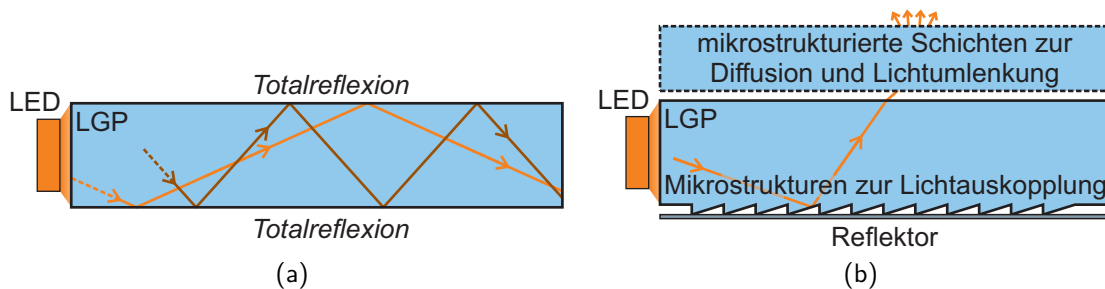


Abb. 1.3: (a) Funktionsprinzip einer lichtleitenden Platte. Das Licht der LED wird an einer Stirnseite in die LGP eingekoppelt und durch Totalreflexion geführt. (b) Typischer Aufbau einer Hintergrundbeleuchtung in der Anzeigentechnologie mit einer LGP. Basierend auf [9].

Für die Architektur sind neue Beleuchtungskonzepte und Leuchten sowohl aus künstlerisch-ästhetischen Gründen, als auch aus Gründen der Energieeinsparung hoch attraktiv. Mit der Einführung der Leuchtdiode (light-emitting diode, LED) als Teil energieeffizienter, erschwinglicher Lichtquellen in der Raumbelichtung wurden in diesem Bereich neue Möglichkeiten geschaffen [10]. Einen Schritt weiter geht nun diese Arbeit mit der Entwicklung von neuartigen mikrostrukturierten Flächenstrahlern. Diese bieten neben der Möglichkeit, eine konzentrierte, punktförmige Lichtquelle in eine Lichtquelle definierter flächiger Abstrahlung zu transformieren [11, 12, 13, 14], den Vorteil, dass sie für die betrachtende Person wie eine transparente Platte wirken [15, 16]. Hierzu wird die LGP mit Mikrozyklindern versehen. Diese weisen eine Deckelfläche parallel zur Plattenoberfläche auf und besitzen eine senkrechte Strukturflanke, die bei vertikaler Aufsicht nicht erkennbar ist. Dieses Prinzip des transparenten Flächenstrahlers bestehend aus einer mikrostrukturierten LGP mit Zylindern und einer LED-Lichtquelle ist in Abbildung 1.4 skizziert.

Diese Arbeit beschreibt die Phänomene und Funktionsweisen in einer solchen mikrostrukturierten LGP. Mit den daraus gewonnenen Erkenntnissen werden verschiedene autonom einsetzbare, einseitig leuchtende Flächenstrahler entworfen, welche vielfältig verwendbar sind – auch in Fassaden und Fenstern. Sowohl Flächenstrahler mit bereits erprobten als auch neuartigen Mikrostrukturen werden dabei entwickelt und hergestellt. Beim Design dieser Strukturen werden spezifische Anforderungen an geeignete Herstellungstechnologien wie z.B. das UV- oder Heißprägen berücksichtigt. Für hinterschnittene Strukturen wird ein neues Bonding-Verfahren entwickelt und eingesetzt.

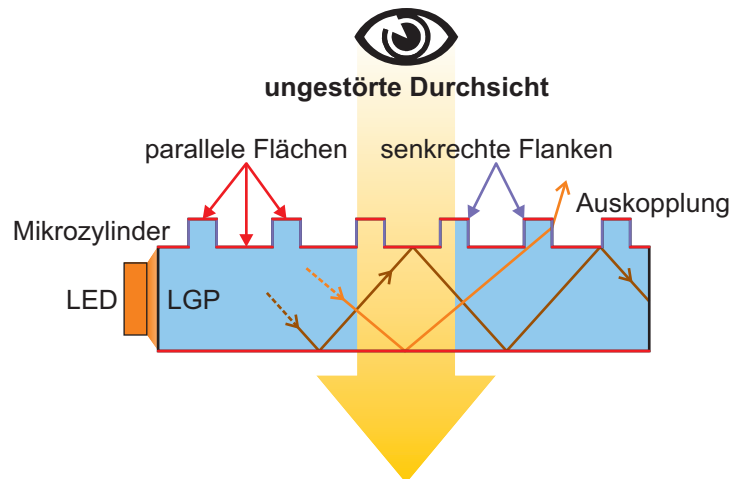


Abb. 1.4: Prinzip des transparenten Flächenstrahlers bestehend aus LED und mikrostrukturierter LGP. Das eingekoppelte Licht der LED (orange) wird an Mikrozylindern ausgekoppelt. Dadurch, dass die Deckelfläche der Zylinder parallel zur LGP-Oberfläche liegt (rot) und die Strukturflanken senkrecht auf dieser Oberfläche stehen (violett) ist trotzdem eine ungestörte Durchsicht möglich (gelb).

Die Anwendung dieser Leuchten in Fassaden ist ein sehr vielversprechendes Einsatzgebiet, denn auf diese Weise kommt die aktiv zuschaltbare LED-Beleuchtung aus dem gleichen architektonischen Element, wie die natürliche Beleuchtung durch die Sonne. Der aktiven Beleuchtung wird dadurch etwas von ihrer künstlich wahrgenommenen Charakteristik genommen.

1.2 Stand der Technik und Forschung

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den Stand der Technik und Forschung und beschreibt den Beitrag dieser Arbeit zu dem jeweiligen Feld.

LGP's finden zur flächenhaften Lichtauskopplung besonders in der Bildschirmindustrie Anwendung. Der Fokus solcher Anwendungen liegt auf einer möglichst gleichmäßigen und einseitigen Auskopplung des Lichts. Die Abstrahlwinkel müssen dabei eine gute Wahrnehmung des Bildschirminhalts ermöglichen [17]. Anders als bei den Entwicklungen in dieser Arbeit, ist ein solcher Flächenstrahler in einem (nicht transparenten) Gehäuse verbaut und kann um verschiedene Komponenten ergänzt werden, welche die gewünschten Eigenschaften optimieren. So wird in der Regel die einseitige Auskopplung nicht ausschließlich durch eine geschickte Mikrostrukturierung, sondern zusätzlich durch eine reflektierende Rücksicht erreicht. Für eine homogene Beleuchtung werden oft ergänzende Diffusoren eingesetzt. Eine gute Übersicht über den Aufbau solcher Systeme liefert Ishiwatari [18].

Als grundlegend für die Verwendung von LGPs in diesem Bereich können Erfindungen von Benoit und Gebauer [19], Mori [20] und Fandrich [21] angeführt werden. Sie beschreiben die einseitige Strukturierung von LGPs mit rechteckigen oder trapezförmigen Strukturen sowie Unebenheiten im Allgemeinen. Zweck der Strukturierung ist dabei das Auskoppeln von Licht aus der LGP (wie bereits in Abbildung 1.3b dargestellt).

Anders als bei der Beleuchtung von Bildschirmen oder Instrumenten werden in dieser Arbeit Flächenstrahler entwickelt, die eine einseitig stark gerichtete Lichtauskopplung z.B. für die Raumbelichtung ermöglichen. Eine Darstellung von Informationen ist dabei nicht Kernaufgabe. Dies unterscheidet die vorliegende Arbeit grundsätzlich von den oben genannten und greift eine Forschungslücke auf. Die angestrebten Abmessungen und Strahlungsleistungen sind kaum mit bisheriger Forschung vergleichbar, da sie deutlich größer sind. Darüber hinaus spielt die Transparenz bzw. Durchsichtigkeit eine große Rolle. Während herkömmliche Bildschirmbeleuchtungen völlig undurchsichtig sind, werden inzwischen mit transparenten OLEDs auch einseitig abstrahlende, durchsichtige Bildschirme realisiert, die ebenfalls als Flächenstrahler dienen können [22, 23]. Diese sind jedoch weiterhin nur für die Informationsdarstellung geeignet und weisen lediglich eine Lichtdurchlässigkeit bis ca. 76 % auf. Weder sind die eingeschalteten (leuchtenden) Bereiche dieser OLED-Bildschirme transparent noch sind sie in der Lage Lichtstärken groß genug für die Raumbelichtung zu emittieren. Zudem weisen sie über die einseitige Lichtemission hinaus keine bevorzugte Abstrahlrichtung auf, sondern einen sehr breiten Abstrahlbereich [24, 25]. Ihre Herstellung ist sehr aufwendig und kostenintensiv. Kommerziell werden sie bisher lediglich als Bildschirme bzw. Fernseher bis zu einer Größe von 55" eingesetzt [26, 27].

Nichtsdestotrotz sind einige Entwicklungen aus dem Bereich der Bildschirmbeleuchtung auch für die Optimierung der in dieser Arbeit entwickelten Flächenstrahler relevant. So beschreiben beispielsweise Kuiseko und Sato [28] sowie Lee et al. [29, 30] bzw. Yeon et al. [31] und Yang et al. [32] hinterschnittene Pyramiden, Kegelstümpfe und ähnliche streifenförmige Strukturen für eine einseitig gerichtete Lichtauskopplung. Ein System, welches Zylinder zur gerichteten Lichtauskopplung verwendet, wurde ebenfalls bereits hergestellt [16, 33]. Diese Quellen aus dem Bereich der Bildschirmtechnik spielen als Impulsgeberinnen für diese Arbeit eine wichtige Rolle.

Insbesondere die Herstellung hinterschnittener Strukturen durch Abformverfahren ist eine Herausforderung. Die referenzierten Arbeiten nutzen flexibles Silikon, welches auch bei Hinterschneidungen ohne Beschädigung aus der Form gezogen werden kann. Steife Materialien, so wie sie in dieser Arbeit verwendet werden, sind dazu ungeeignet und zerbrechen beim Abformprozess. In der vorliegenden Arbeit wird für das Problem der Herstellung hinterschnittener Strukturen aus steifen Materialien eine Lösung präsentiert,

die in der Massenproduktion anwendbar ist. Für die gefertigten Labormuster findet dabei das variotherme Spritzgießen nach dem Verfahren von Rytka et al. [34] in Kombination mit einer neuartigen Verbindungstechnik Anwendung. Diese Technik nutzt Erkenntnisse aus Arbeiten im Bereich der Mikrofluidik von Truckenmüller et al. [35], Tran et al. [36] sowie Neyer und Jöhnck [37]. Sie beschreiben die Verbindung von Kunststoffen unter Zuhilfenahme ultravioletter Strahlung (UV-Strahlung).

1.3 Aufbau der Arbeit

Nach der einleitenden Vorstellung der Arbeit werden in **Kapitel 2**, nach einer groben Einführung in die Funktionsweise von mikrostrukturierten Flächenstrahlern, die physikalischen Vorgänge an und in mikrostrukturierten lichtleitenden Platten theoretisch erfasst und beschrieben. Die Beschreibung dieser Vorgänge geschieht unterteilt in drei Bereiche: 1. die Einkopplung von Licht in die LGP; 2. die Führung von Licht in der LGP; 3. die Auskopplung von Licht aus der LGP an Mikrostrukturen. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen der Erklärung der beobachteten Lichtauskopplung aus LGPs und der Optimierung eben dieser.

Das Design der mikrostrukturierten Flächenstrahler geschieht mit Hilfe von Software für die numerische Simulationen optischer Strukturen. Der Aufbau und die Durchführung dieser Simulationen werden in **Kapitel 3** erläutert. Sowohl für die Simulationen als auch für die Herstellung von Flächenstrahlern werden charakteristische Kennwerte erarbeitet. Zur Bestimmung dieser Kennwerte, wie z.B. die Abstrahlcharakteristik des ausgekoppelten Lichts oder die subjektive Durchsicht durch Flächenstrahler, werden spezifische Messverfahren entwickelt und angewendet.

In **Kapitel 4** wird ein Entwicklungsschema zur Entwicklung von mikrostrukturierten optischen Systemen vorgestellt. Gemäß den Anforderungen werden passende Herstellungsverfahren samt optimaler Materialien für durchsichtige, mikrostrukturierte Flächenstrahler identifiziert und untersucht. Die Verfahren werden dann auf die konkrete Anwendung hin bewertet und teilweise angepasst. Insbesondere wird ein neues Fertigungsverfahren für die Herstellung hinterschnittener Mikrostrukturen in Acrylglas entwickelt.

Simulation, Herstellung und messtechnische Charakterisierung finden ihre Anwendung in der Entwicklung von speziellen Flächenstrahlern zur gerichteten Lichtauskopplung in **Kapitel 5**. Ergänzt wird dies durch ein Konzept für die Integration von Flächenstrahlern in Fassaden und dessen Umsetzung. Basierend auf den Erkenntnissen der fassadenintegrierten Flächenstrahler werden abschließend zwei weitere mikrostrukturierte Flächenstrahler entworfen: Einer zur horizontalen Lichtauskopplung, welcher auch hergestellt wurde, und

einer auf Grundlage lichtplanerischer Aspekte, dessen Funktion durch die Simulationen der resultierenden Raumbelichtung verifiziert wird.

Die vorgestellten fassadenintegrierten Flächenstrahler werden in **Kapitel 6** anschließend skizzenhaft einer sozioökologischen Betrachtung hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit und Ökobilanz unterzogen. Dabei werden die Anwendung der Flächenstrahler in der Fassade, die Herstellungsverfahren des für die Flächenstrahler verwendeten Polymethylmethacrylats (PMMA) und der LEDs sowie deren Bedarf an Rohstoffen betrachtet. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Fazit zusammen mit einem Ausblick auf mögliche Anknüpfungspunkte für zukünftige Arbeiten und Anwendungsfelder ab.

2 Funktion und Theorie

mikrostrukturierter Flächenstrahler

Das vorliegende Kapitel befasst sich mit der Erklärung und Beschreibung der physikalischen Phänomene in mikrostrukturierten LGPs, die mikrostrukturierten Flächenstrahlern zu Grunde liegen. Den Beginn des Kapitels stellt eine Erläuterung der grundlegenden Funktionsweise von LGPs dar. Anschließend wird in separaten Abschnitten die Licht-einkopplung aus einer LED in eine LGP, die Leitung von Licht in einer LGP und die Auskopplung von Licht an Mikrostrukturen auf einer LGP mathematisch beschrieben. Dabei besitzt der Effekt der Modenkopplung an Oberflächenrauheiten für die Lichtleitung eine besondere Bedeutung und wird entsprechend ausführlich behandelt. Die physikalischen Phänomene in diesen Bereichen werden erklärt und ihre Auswirkungen erläutert. Die Erkenntnisse über die Lichtauskopplung werden abschließend genutzt, um ein Modell für deren Optimierung zu entwickeln.

2.1 Grundlegende Funktionsweise mikrostrukturierter Flächenstrahler

Mikrostrukturierte Flächenstrahler basieren auf lichtleitenden Platten, die aus dielektrischem Material bestehen, das im Wellenlängenbereich der Lichtquelle hoch transparent ist. Die LGP besitzt eine Höhe, die deutlich kleiner als ihre Ausdehnung in der Fläche ist. Ihre Brechzahl n_1 ist größer als die des umgebenden Mediums n_2 . In LGPs wird Licht an einer oder mehreren Stirnseiten von einer Lichtquelle eingekoppelt. Als Lichtquelle kommen Kaltkathodenröhren oder LEDs zum Einsatz. Das Prinzip der Führung des Lichts ist in der Querschnittzeichnung in Abbildung 2.1 skizziert. Das Licht wird von der LED ausgesandt und an einer Stirnseite in die LGP eingekoppelt. Durch Totalreflexion an den Grenzflächen, wird das Licht in der LGP geführt, solange es sich mit einem Winkel größer als dem Grenzwinkel der Totalreflexion $\theta_c = \arcsin(n_2/n_1)$ ausbreitet.

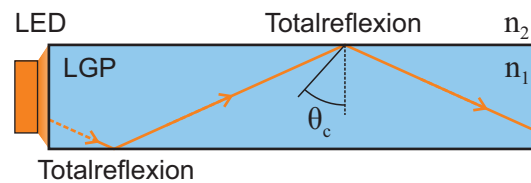


Abb. 2.1: Das LED-Licht wird an einer Stirnseite (hier links) in die LGP eingekoppelt. Dort wird es durch Totalreflexion an den Grenzflächen in der LGP geführt. Eingezeichnet ist der Grenzwinkel der Totalreflexion θ_c .

Für das gezielte Auskoppeln des Lichts aus der Platte finden verschiedene Modifikationen der Platte Anwendung, die in Abbildung 2.2 dargestellt sind. Entweder werden eine oder beide Seiten flächig modifiziert. Dies geschieht durch das Aufbringen reflektierendes Materials oder das Erzeugen von Mikrostrukturen auf den Seiten der Platte [38]. Die Strukturen werden auf der Vorder- oder Rückseite aufgebracht mit dem Zweck, das Licht mit einer gewünschten Lichtverteilung auszukoppeln [33, 39, 40, 41]. Es ist auch möglich, beidseitig Strukturen zu kombinieren. Entweder um eine beidseitige Auskopplung des Lichts zu erreichen oder eine einseitige Auskopplung zu realisieren [42]. Für eine solche einseitige Auskopplung wird auf einer Seite eine Struktur aufgebracht, die grundsätzlich dazu geeignet ist, Licht auf der gegenüberliegenden Seite auszukoppeln. Auf der Gegenseite befindet sich eine Struktur, welche die gewünschte Lichtverteilung erzeugt. Es ist zudem möglich Licht durch Beugung an optischen Gittern im Sub-Mikrometerbereich einseitig gerichtet auszukoppeln [43, 44, 45, 46]. Dies ist für ein breites Winkel- und Wellenlängenspektrum jedoch wenig effizient und wird daher nicht weiter betrachtet.

Ziel dieser Arbeit ist die Herstellung und Entwicklung möglichst durchsichtiger, mikrostrukturierter Flächenstrahler, welche einseitig Licht abstrahlen. Hierzu eignen sich vor allem LGPs mit Mikrostrukturen auf der auskoppelnden Seite wie in Abbildung 2.2b.

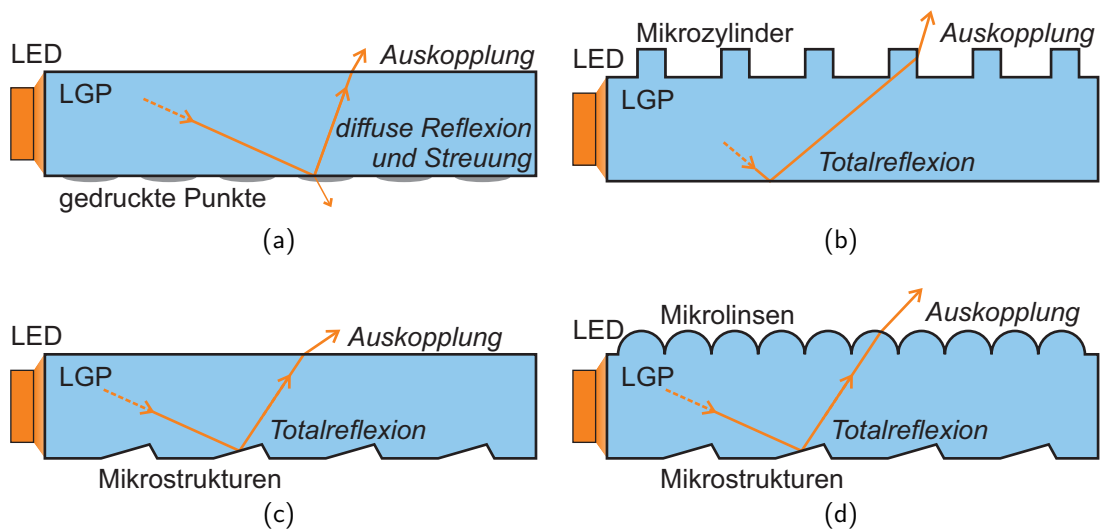


Abb. 2.2: Möglichkeiten der gezielten Lichtauskopplung aus lichtleitenden Platten:
 (a) Auskopplung durch Streuung an reflektierendem Material.
 (b) Auskopplung an Strukturen auf der Seite der gewünschten Auskopplung.
 (c) Umlenkung an Strukturen zur Auskopplung auf der Gegenseite.
 (d) Umlenkung und Auskopplung durch Strukturen auf beiden Seiten.

2.2 Einkopplung von LED-Licht in eine lichtleitende Platte

Die Einkopplung von Licht in lichtleitende Platten geschieht stirnseitig mittels einer Kaltkathodenröhre oder mehrerer LEDs. Diese Arbeit beschränkt sich auf die Verwendung von LEDs, denn sie bieten eine gut abstimmbare Lichtintensität und Farbtemperatur. Darüber hinaus sind sie im Betrieb effizienter (vgl. Abschnitt 6.1.1). Die LEDs werden in einem möglichst geringen Abstand ($\ell_{\text{LED}} \leq 200 \mu\text{m}$) zentriert vor einer Stirnfläche angebracht. Dieser Abstand ist von der konkreten Gestalt des kompletten Flächenstrahlers abhängig. So können LEDs in einer handlichen Schreibtischleuchte oder einem eBook-Reader deutlich präziser und näher an der LGP positioniert werden, als in einem fenstergroßen Mehrscheibenverbund. Abbildung 2.3 zeigt die Anordnung einer LED zur Lichteinkopplung im Abstand ℓ_{LED} vor einer LGP mit der Höhe d .

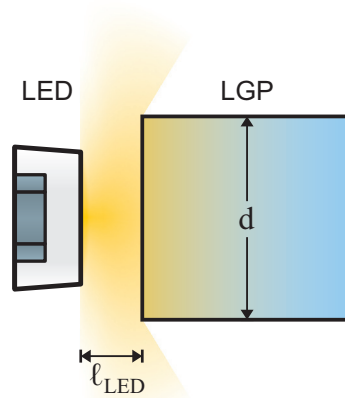


Abb. 2.3: Anordnung der LED zur Lichteinkopplung vor der Stirnseite einer LGP.

Die Berührung zwischen LED und LGP – also eine Stoßkopplung – ist besonders bei hoher LED-Leistung zu vermeiden, denn LEDs werden trotz ihrer hohen Effizienz heiß und ein Hitzestau verkürzt die Lebenszeit einer LED erheblich. Zudem können LEDs durch chemische Reaktion mit verschiedenen Materialien geschädigt werden [47].

Bei der Einkopplung von Licht in eine LGP entstehen verschiedene Verluste. Diese werden durch die Koppeffizienz

$$\eta_{\text{ein}} = \frac{\phi_{e,\text{ein}}}{\phi_{e,\text{LED}}} \quad (2.1)$$

ausgedrückt. $\phi_{e,\text{LED}}$ ist die Strahlungsleistung abgegeben von der LED und $\phi_{e,\text{ein}}$ ist die eingekoppelte Strahlungsleistung. Von Néron [48] wird vorgeschlagen, die Koppeffizienz von Lichtleitern in drei Faktoren zu zerlegen, die verschiedene Aspekte der Einkopplung repräsentieren. Die geometrische Koppeffizienz η_g beschreibt die Verluste bedingt durch die Abmessungen der Lichtquelle und des Lichtleiters sowie deren Anordnung zueinander. Die winkelabhängige Koppeffizienz η_w berücksichtigt die numerische Apertur des Lichtleiters. Die reflexive Koppeffizienz η_r berücksichtigt die Reflexionen an der Oberfläche der einkoppelnden Fläche des Lichtleiters. Die Koppeffizienz wird entsprechend als

$$\eta_{\text{ein}} = \eta_g \cdot \eta_w \cdot \eta_r \quad (2.2)$$

definiert. Basierend auf einer vorangegangenen Arbeit [16] wird zunächst die Koppeffizienz für eine beliebig vor einer LGP positionierten Punktlichtquelle bestimmt. Anschließend wird diese Koppeffizienz auf die leuchtende Fläche einer LED angewendet. Die einkoppelnde Stirnfläche der LGP wird als rechteckig angenommen.

Betrachtet wird also zunächst eine Punktlichtquelle, wie sie in Abbildung 2.4 skizziert ist. Um die Richtung eines emittierten Lichtstrahls zu beschreiben werden die Winkel β_x und β_y verwendet. Der Winkel eines Lichtstrahls zur Flächennormalen berechnet sich als

$$\beta = \arctan \left(\sqrt{\tan^2 \beta_x + \tan^2 \beta_y} \right). \quad (2.3)$$

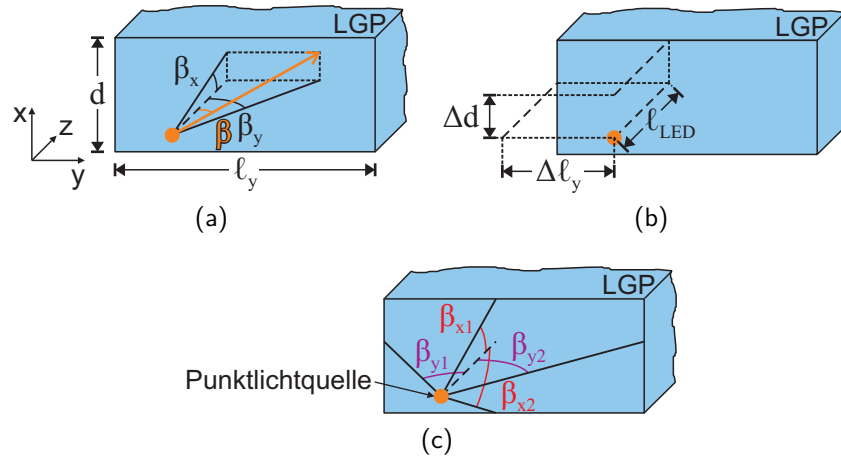


Abb. 2.4: Punktlichtquelle vor einer LGP mit Winkeln zur Beschreibung des Lichtstrahls (a), Parameter zur Beschreibung der Position des Punktes (b) und den Grenzwinkeln des Winkelbereichs, der auf die LGP trifft (c), angelehnt an [16].

Die Position der Punktlichtquelle wird relativ zur oberen linken Ecke der Stirnfläche der LGP mit den Parametern Δd und $\Delta \ell_y$ angegeben. Die Strahlungsintensität I_{LED} der Lichtquelle ist im Allgemeinen von β abhängig.

Die Bedeutung der geometrischen Koppelleffizienz ist in Abbildung 2.4c und 2.5 verdeutlicht. Nur Licht, das unter bestimmten Winkeln auf die Stirnseite der LGP trifft, wird eingekoppelt. Dieser Winkelbereich wird durch vier Grenzwinkel beschrieben:

$$\beta_{x1} = \arctan \left(\frac{\Delta d}{\ell_{LED}} \right) \quad (2.4)$$

$$\beta_{x2} = \arctan \left(\frac{d - \Delta d}{\ell_{LED}} \right) \quad (2.5)$$

$$\beta_{y1} = \arctan \left(\frac{\Delta \ell_y}{\ell_{LED}} \right) \quad (2.6)$$

$$\beta_{y2} = \arctan \left(\frac{\ell_y - \Delta \ell_y}{\ell_{LED}} \right) \quad (2.7)$$

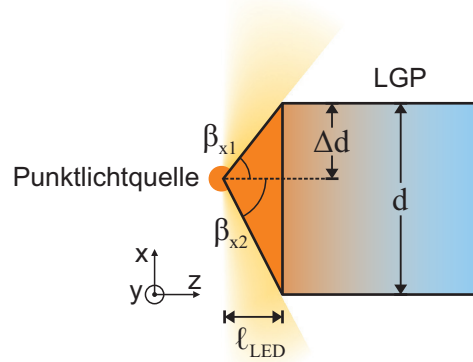


Abb. 2.5: Winkelbereich des Lichts, das ausgehend von einer Punktlichtquelle auf die LGP trifft (orange), dargestellt in zwei Dimensionen. Ein Teil des Lichts strahlt an der LGP vorbei (gelb).

Die Strahlungsleistung, die in diesem Winkelbereich auf die LGP trifft, ist

$$\phi_{e,g} = \int_{-\beta_{x2}}^{\beta_{x1}} \left(\int_{-\beta_{y2}}^{\beta_{y1}} I_{\text{LED}}(\beta) d\beta_y \right) d\beta_x. \quad (2.8)$$

Die geometrische Koppelleffizienz lässt sich dann berechnen als

$$\eta_g = \frac{\int_{-\beta_{x2}}^{\beta_{x1}} \left(\int_{-\beta_{y2}}^{\beta_{y1}} I_{\text{LED}}(\beta) d\beta_y \right) d\beta_x}{4 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{\text{LED}}(\beta) d\beta_y \right) d\beta_x}. \quad (2.9)$$

Ist die Breite der LGP ℓ_y deutlich größer als der Abstand der Punktlichtquelle vom Rand der LGP ($\frac{\ell_y}{2} \gg \Delta\ell_y$), kann vereinfachend angenommen werden, dass in der y-z-Ebene Licht unter jedem Winkel eingekoppelt wird. Die entsprechenden Grenzwinkel sind dann $\beta_{y1,2} = \pi/2$ und die geometrische Koppelleffizienz ist

$$\eta_g = \frac{\int_{-\beta_{x2}}^{\beta_{x1}} \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{\text{LED}}(\beta) d\beta_y \right) d\beta_x}{2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{\text{LED}}(\beta) d\beta_y \right) d\beta_x}. \quad (2.10)$$

Die gleiche Überlegung gilt in Bezug auf die Höhe d der LGP und die Grenzwinkel $\beta_{x1,2}$. Diese mögliche Vereinfachung ist praktische jedoch nicht relevant, weil für eine hohe Lichtauskopplung d möglichst klein gewählt werden muss [33].

Der Winkel der Totalreflexion θ_c bestimmt die winkelabhängige Koppelleffizienz. In Bezug auf die Einkopplung wird auch vom Akzeptanzwinkel

$$\theta_{\max} = \begin{cases} n_1^2 \leq 2n_2^2 : & \arcsin\left(\sqrt{\frac{n_1^2}{n_2^2} - 1}\right) \\ \text{sonst} : & \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (2.11)$$

gesprochen. Er ist die Projektion von θ_c vor die LGP. Beide sind abhängig vom Brechzahlunterschied des äußeren Mediums n_2 und des Mediums der LGP n_1 . Die Brechzahlen sind im Allgemeinen unterschiedlich bezüglich der Wellenlänge des gebrochenen Lichts. In Bezug auf die LGPs in dieser Arbeit, wird jedoch davon ausgegangen, dass n_1 für das eingesetzte Lichtspektrum konstant ist. Der einkoppelbare Winkelbereich wird durch θ_{\max} beschränkt. Dies ist in Abbildung 2.6 skizziert. Die Grenzen dieses Winkelbereichs sind

$$\gamma_{x1,2;y1,2} = \begin{cases} \beta_{x1,2;y1,2} < \theta_{\max} : & \beta_{x1,2;y1,2} \\ \text{sonst} : & \theta_{\max} \end{cases} \quad (2.12)$$

Die winkelabhängige Koppelleffizienz berechnet sich entsprechend als

$$\eta_w = \frac{\int_{-\gamma_{x2}}^{\gamma_{x1}} \left(\int_{-\gamma_{y2}}^{\gamma_{y1}} I_{\text{LED}}(\beta) d\beta_y \right) d\beta_x}{\int_{-\beta_{x2}}^{\beta_{x1}} \left(\int_{-\beta_{y2}}^{\beta_{y1}} I_{\text{LED}}(\beta) d\beta_y \right) d\beta_x} \quad (2.13)$$

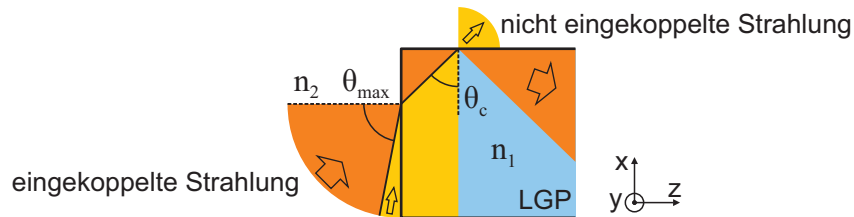


Abb. 2.6: Der Akzeptanzwinkel θ_{\max} leitet sich vom Winkel der Totalreflexion θ_c ab. Er bestimmt unter welchen Winkeln Licht in der LGP geführt wird (orange) oder wieder auskoppelt (gelb).

Ist der Akzeptanzwinkel groß genug bzw. der Winkelbereich, der auf die LGP trifft, klein genug, kann η_w vernachlässigt werden. Es gilt:

$$\text{Wenn } \theta_{\max} \geq \max(\beta_{x1}, \beta_{x2}, \beta_{y1}, \beta_{y2}), \text{ dann } \eta_w = 1. \quad (2.14)$$

Ein Teil der einkoppelbaren Strahlungsleistung wird an der Grenzfläche der LGP reflektiert. Die Reflexion kann durch die fresnelschen Formeln beschrieben werden und wird durch die Verwendung von η_r berücksichtigt. η_r wird mit dem umfassenden Transmissionskoeffizient T_u für unpolarisiertes Licht berechnet [16]. Unter der Annahme, dass es sich bei der LGP um ein nicht magnetisierbares Medium handelt, ist

$$T_u(\beta) = \frac{1}{2} \left(2 - |r_{\perp}(\beta)|^2 - |r_{\parallel}(\beta)|^2 \right) \quad (2.15)$$

mit den Polarisierungen \perp senkrecht, \parallel parallel und den Reflexionsfaktoren

$$r_{\perp} = \frac{\sin(\vartheta - \beta)}{\sin(\beta + \vartheta)} \quad (2.16)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan(\beta - \vartheta)}{\tan(\beta + \vartheta)} \quad (2.17)$$

mit dem Sonderfall

$$r_{\perp}(\beta = 0) = -r_{\parallel}(\beta = 0) = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}. \quad (2.18)$$

ϑ ist der Ausbreitungswinkel des gebrochenen, eingekoppelten Strahls:

$$\vartheta = \arcsin \left(\sin(\beta) \cdot \frac{n_2}{n_1} \right). \quad (2.19)$$

Die transmittierte Strahlungsintensität ist entsprechend

$$I_{\text{LED},t}(\beta) = I_{\text{LED}}(\beta) \cdot T_u(\beta) \quad (2.20)$$

und die reflexive Koppelleffizienz unter Berücksichtigung von Gleichung (2.12)

$$\eta_r = \frac{\int_{-\gamma_{x2}}^{\gamma_{x1}} \left(\int_{-\gamma_{y2}}^{\gamma_{y1}} I_{\text{LED},t}(\beta) d\beta_y \right) d\beta_x}{\int_{-\gamma_{x2}}^{\gamma_{x1}} \left(\int_{-\gamma_{y2}}^{\gamma_{y1}} I_{\text{LED}}(\beta) d\beta_y \right) d\beta_x}. \quad (2.21)$$

Ist nicht relevant, welchen Anteil welche der drei Komponenten auf die Koppelleffizienz η_{ein} hat, kann diese vereinfacht ausgedrückt werden als

$$\eta_{\text{ein}} = \frac{\int_{-\gamma_{x2}}^{\gamma_{x1}} \left(\int_{-\gamma_{y2}}^{\gamma_{y1}} I_{\text{LED},t}(\beta) d\beta_y \right) d\beta_x}{4 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{\text{LED}}(\beta) d\beta_y \right) d\beta_x}. \quad (2.22)$$

Es wird im Folgenden davon ausgegangen, dass eine LED eine gleichmäßig leuchtende rechteckige Fläche mit den Abmessungen d_{LED} und $\ell_{y,LED}$ aufweist. Die linke obere Ecke der leuchtenden Fläche ist im Abstand Δd_{LED} und $\Delta \ell_{y,LED}$ von der linken oberen Ecke der Stirnseite der LGP positioniert (vgl. Abbildung 2.7). Ein jeder Punkt auf dieser Fläche kann entsprechend der üblichen Abstrahlcharakteristik einer LED ohne Linse in guter Näherung als Lambert-Strahler betrachtet werden [49]. Die relative Strahlungsintensität I_{rel} eines Lambert-Strahlers ist in der Lichtstärkeverteilungskurve (LVK) in Abbildung 2.8 dargestellt. Die LVK stellt die Strahlungsintensität bzw. Lichtstärke (vgl. Anhang B) über den Winkel dar, in dessen Richtung diese Strahlungsintensität abgestrahlt wird. Sie berechnet sich für einen Punkt auf der leuchtenden Fläche der LED als

$$I_{LED,P}(\beta) = I \cdot \cos(\beta). \quad (2.23)$$

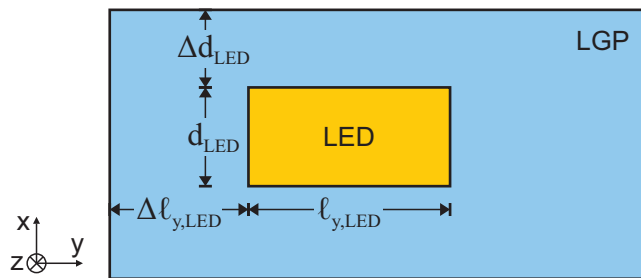


Abb. 2.7: Position der leuchtenden Fläche der LED (gelb) vor der Stirnseite der LGP (blau).

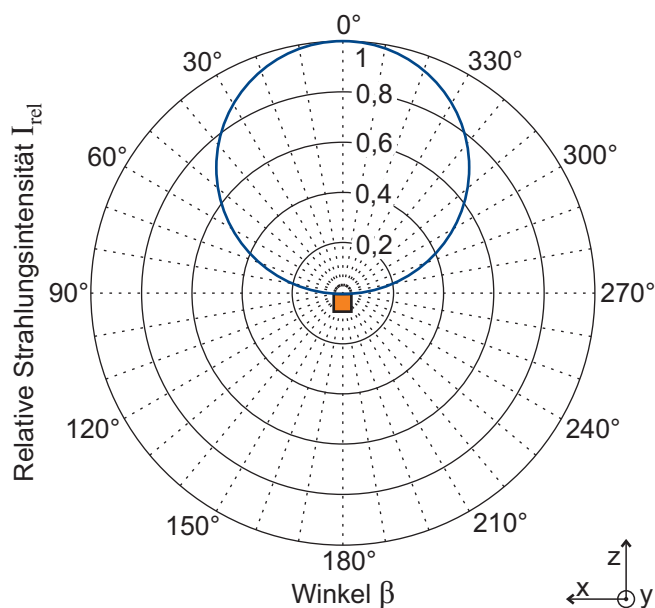


Abb. 2.8: Normierte LVK eines Lambert-Strahlers.

Die Einkoppeleffizienz für einen Punkt auf der Fläche ist abhängig von seiner Position vor der LGP. Die abgestrahlte Strahlungsleistung $\phi_{e,LED,P}$ ist in jedem Punkt gleich. Die Einkoppeleffizienz für die gesamte strahlende Fläche einer LED ist entsprechend

$$\begin{aligned} \eta_{\text{ein,LED}} &= \frac{\int_{\Delta\ell_{y,LED}}^{\Delta\ell_{y,LED}+\ell_{y,LED}} \left[\int_{\Delta d_{LED}}^{\Delta d_{LED}+d_{LED}} \eta_{\text{ein}}(\Delta\ell_y, \Delta d) \cdot \phi_{e,LED,P} d\Delta d \right] d\Delta\ell_y}{\int_{\Delta\ell_{y,LED}}^{\Delta\ell_{y,LED}+\ell_{y,LED}} \left(\int_{\Delta d_{LED}}^{\Delta d_{LED}+d_{LED}} \phi_{e,LED,P} d\Delta d \right) d\Delta\ell_y} \quad (2.24) \\ &= \frac{1}{d_{LED} \cdot \ell_{y,LED}} \int_{\Delta\ell_{y,LED}}^{\Delta\ell_{y,LED}+\ell_{y,LED}} \left[\int_{\Delta d_{LED}}^{\Delta d_{LED}+d_{LED}} \eta_{\text{ein}}(\Delta\ell_y, \Delta d) d\Delta d \right] d\Delta\ell_y. \end{aligned}$$

Die theoretische Koppeleffizienz wird im Folgenden beispielhaft für die LED TOPLED E3014 von der OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Regensburg (im Folgenden *Osram*) berechnet. Die LED besitzt eine etwa rechteckige, leuchtende Fläche mit den Maßen $d_{LED} = 1,1 \text{ mm}$ und $\ell_{y,LED} = 2,2 \text{ mm}$ [50]. Sie ist $\ell_{LED} = 100 \mu\text{m}$ vor der Stirnseite der LGP positioniert. Die Maße der LGP sind $d = 2 \text{ mm}$ und $l_y = 800 \text{ mm}$. Die LGP besteht aus PMMA ($n_1 = 1,49$ bei einer Wellenlänge von 589 nm [51]) und ist von Luft ($n_2 = 1$) umgeben. Für den beschriebenen Aufbau liefert die numerische Berechnung mit einem selbsterstellten Octave-Script $\eta_{\text{ein,LED}} = 89 \%$.

Die winkelabhängige Reflexion wirkt sich über die Einkoppeleffizienz hinaus aus. Auch das geführte Winkelspektrum in einer LGP wird von ihr beeinflusst. Strahlen mit einem großen Ausbreitungswinkel β werden bei der Einkopplung deutlich stärker reflektiert bzw. auf Grund des Akzeptanzwinkels erst gar nicht eingekoppelt. Durch die Brechung wird das ursprüngliche Winkelspektrum gestaucht. Dies führt zu einer höheren Strahlungsintensität bzw. Strahlungsleistung je Winkelbereich. Das theoretische Winkelspektrum in der x-z-Ebene für die zuvor beschriebene beispielhafte Anordnung ist in Abbildung 2.9 dargestellt. Es wurde basierend auf den Gleichungen (2.12), (2.15), (2.19) und (2.20) berechnet.

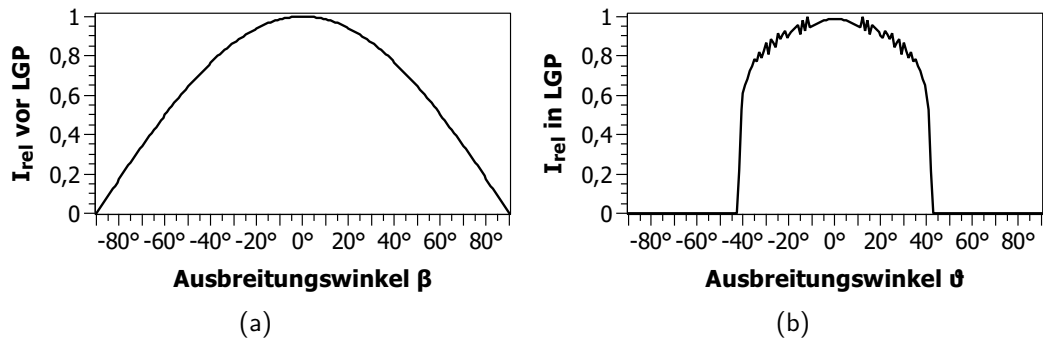


Abb. 2.9: Das Licht vor der LGP aus PMMA (a) wird bei der Einkopplung winkelnabhängig reflektiert und durch Brechung wird dessen Ausbreitungswinkel geändert (b). Das Winkelspektrum wird gestaucht und damit die Strahlungsleistung auf einen kleineren Winkelbereich verteilt. Die Zacken in (b) beruhen auf Ungenauigkeiten durch Rundung in der numerischen Berechnung der Kurve.

2.3 Leitung von Licht in einer lichtleitenden Platte

Licht kann durch Totalreflexion in einer lichtleitenden Platte geführt werden, wenn die Brechzahl der Platte n_1 größer als die der Umgebung n_2 ist. Ein Lichtstrahl, der sich in der LGP unter einem Winkel ϑ ausbreitet, welcher kleiner als der Winkel $\vartheta_c = 90^\circ - \theta_c$ ist, wird an den Grenzflächen der LGP reflektiert. Besitzt diese LGP perfekte Oberflächen, die genau parallel zueinander ausgerichtet sind, kann das Licht die LGP lediglich an den drei übrigen Stirnseiten verlassen. Werden Verluste im Material vernachlässigt, kann die Platte als idealer Lichtleiter betrachtet werden. Eine solche ideale LGP ist in Abbildung 2.10 im Querschnitt dargestellt.

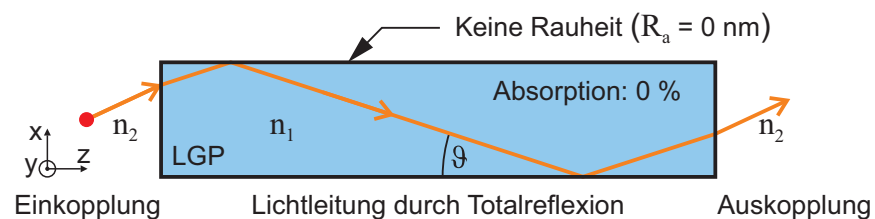


Abb. 2.10: Ideale lichtleitende Platte im Querschnitt. Das Licht wird von links eingekoppelt und ungestört unter dem Ausbreitungswinkel ϑ in der LGP geleitet bis es auskoppelt.

Sichtbares Licht kann als elektrisches Wechselfeld mit einer Wellenlänge λ zwischen 380 nm und 780 nm beschrieben werden [52]. Dieses Feld wechselwirkt mit der Materie, in der es sich ausbreitet. Diese Wechselwirkung ist abhängig von der Wellenlänge des Lichts

und dem Material. Sie besteht in Polarisierungseffekten im Material und Veränderung der quantenphysikalischen Energiezustände der Atome bzw. Elektronen und Moleküle, aus denen das Material zusammengesetzt ist. Sie äußert sich auf der makroskopischen Betrachtungsebene besonders als Absorption, aber auch als Streuung des Lichts [53]. Die Absorption wird durch Transmissionsmessungen am Material ermittelt, die für gewöhnlich die Reflexionsverluste für senkrecht einfallendes Licht ebenfalls beinhalten. In Abbildung 2.11 ist beispielhaft die Absorption in PMMA (PLEXIGLAS Optical 0Z024 von der Evonik Industries AG, Darmstadt, im Folgenden *Evonik*) dargestellt. Sie wurde an einer 8 mm dicken Probe mittels des Zweistrahl-Referenzphotospektrometers Cary 500 von der Varian, Inc., Palo Alto (heute Agilent Technologies, Inc., Santa Clara) gemessen. Für den größten Teil des sichtbaren Lichts (ab $\lambda = 400 \text{ nm}$) tritt in PMMA annähernd keine Absorption auf. Die durchschnittliche Absorption im Bereich $\lambda = [380 \text{ nm}, 780 \text{ nm}]$ ist $\alpha = 0,50 \text{ dB}$. Im Bereich $\lambda = [400 \text{ nm}, 780 \text{ nm}]$ ist sie mit $\alpha = 0,38 \text{ dB}$ deutlich geringer. Nach Gleichung (2.15) sind die Reflexionsverluste dabei $\alpha_r = 0,17 \text{ dB}$. Die Streuung ist vernachlässigbar gering.

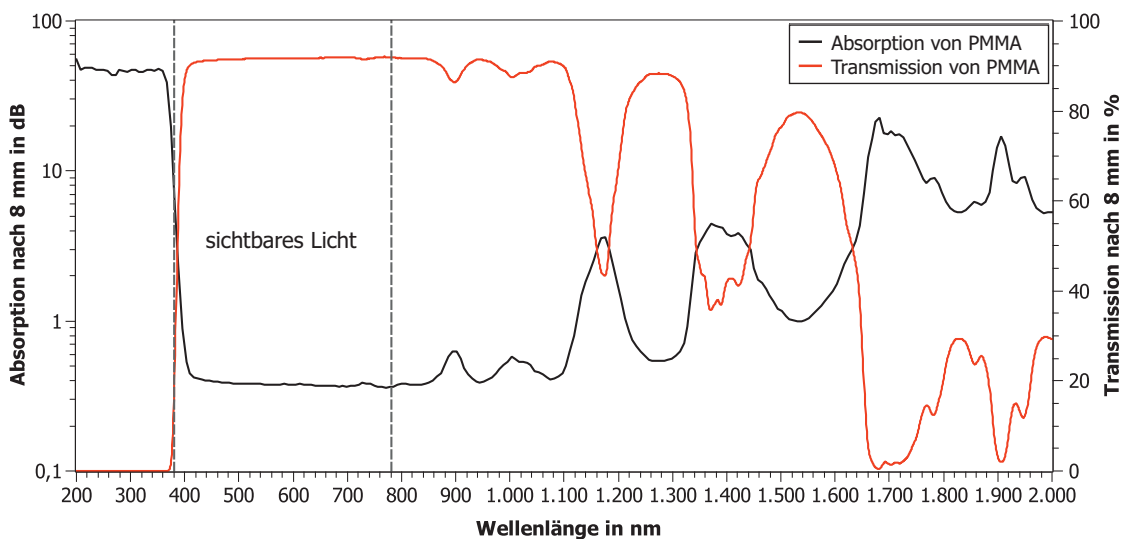


Abb. 2.11: Absorption (schwarz) und Transmission (rot) in einer 8 mm dicken Probe des PMMA PLEXIGLAS Optical 0Z024. Der Bereich des sichtbaren Lichts (380 nm bis 750 nm) ist durch gestrichelte Linien gekennzeichnet.

Licht, das sich in einer LGP durch Totalreflexion ausbreitet, kann durch Oberflächenmodifikationen ausgekoppelt werden. Durch die Form der Modifikation wird die Auskoppelrichtung und die Größenordnung der ausgekoppelten Strahlungsleistung bestimmt. Jede LGP wird in der Realität eine Oberflächenrauheit aufweisen. Diese kann gezielt erzeugt werden oder ist Folge des Herstellungsprozesses. Systeme in optischer Qualität sollten für die bestmögliche Genauigkeit in der Rauheitsklasse $N_R = 1$ (entspricht der

Oberflächenrauheit $R_a = 25 \text{ nm}$) liegen. In dieser Größenordnung ist eine Streuung von Licht nicht mehr oder nur schwer optisch messbar [54]. Menz und Bley [55] geben an, dass es für optische Anwendungen ausreicht, wenn die Oberflächenrauheit ca. zehnmal kleiner als die verwendete Wellenlänge ist (also hier $R_a \lesssim 40 \text{ nm}$). Diese Empfehlung wird in der vorliegenden Arbeit als Maßstab angesetzt.

An der rauen Oberfläche werden Lichtstrahlen in verschiedene Winkelbereiche gestreut [56]. Am konkreten Punkt, an dem ein Lichtstrahl auf eine raue Oberfläche trifft, ist der Winkel unterschiedlich zur idealen Oberfläche. Demnach wird der Strahl ausgekoppelt, sollte er dadurch in einem Winkel kleiner als ϑ_c auf die Grenzfläche treffen. Alternativ wird er weiterhin total reflektiert, aber der Ausbreitungswinkel kann sich so ändern, dass es zu einer Auskopplung an einer der anderen Grenzflächen der LGP kommt. Solche Fälle sind in Abbildung 2.12 beispielhaft skizziert.

Die ausgekoppelten Strahlen sind zumeist ungewollt und müssen als Verlust im Lichtleiter angesehen werden. Inhomogenitäten im Material können ebenfalls Licht ungewollt auskoppeln. Die Auskopplung an Rauheiten und anderen Inhomogenitäten ist in den betrachteten Systemen jedoch sehr gering und kann daher vernachlässigt werden.

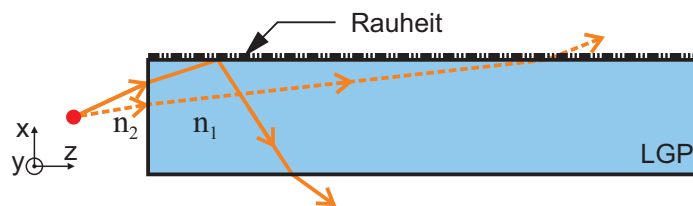


Abb. 2.12: An der rauen Oberfläche einer LGP können Lichtstrahlen ausgekoppelt werden (gestrichelt) oder so reflektiert werden, dass sie auf der gegenüberliegenden Seite auskoppeln (durchgezogen).

Die Rauheiten selbst dürfen dennoch in der Betrachtung der Lichtleitung einer LGP nicht unberücksichtigt bleiben, soll die Funktionsweise der Lichtleitung zur Gänze erschlossen werden. Denn ein weiterer Einfluss auf das geführte Licht ist die Änderung der Ausbreitungswinkel des Lichts in der Platte. In einer rauen bzw. inhomogenen LGP ändern sich die Ausbreitungswinkel der Lichtstrahlen ständig.

Durch auskoppelnde Mikrostrukturen auf der LGP wird Licht abhängig von seinem Ausbreitungswinkel und der Mikrostruktur ausgekoppelt. Dadurch verkleinert sich das Winkelspektrum des geführten Lichts. Abbildung 2.13 zeigt beispielhaft die simulierte Veränderung des Winkelspektrums in einer LGP aus PMMA mit Mikrozyklindern. Flache Strahlen werden kaum ausgekoppelt, während Strahlen mit einem großen Ausbreitungswinkel ϑ_x nach einer kurzen Strecke bereits vollständig die LGP verlassen haben. Durch Winkeländerungen der Lichtstrahlen an Oberflächenrauheiten kann dieser Effekt teilweise

kompensiert werden. Diese Änderungen können mit der Theorie gekoppelter Moden beschrieben werden. Diese wird im folgenden Abschnitt behandelt.

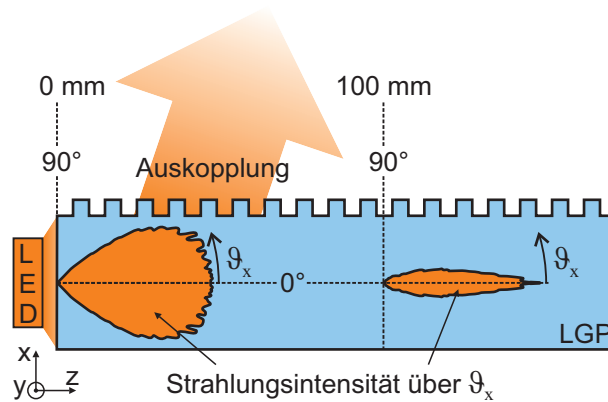


Abb. 2.13: Dargestellt ist die relative Strahlungsintensität (orange) in einer LGP aus PMMA mit Mikrozyklindern aufgetragen über den Ausbreitungswinkel ϑ_x direkt nach der Einkopplung (0 mm) und nach einer Strecke von 100 mm.

2.4 Modenkopplung durch Oberflächenrauheiten in einer lichtleitenden Platte

Wird das in einer LGP geführte Licht durch Mikrostrukturen ausgekoppelt, dann verkleinert sich das Winkelspektrum des geführten Lichts (vgl. Abbildung 2.14, Bereich II). Die so entstehende Verkleinerung des Winkelspektrums kann durch eine Manipulation der Ausbreitungswinkel der im Lichtleiter verbliebenen Lichtstrahlen wieder „aufgeweitet“ werden. Eine solche Manipulation der Ausbreitungswinkel wird durch Oberflächenrauheiten herbeigeführt. Diese Veränderung der Ausbreitungswinkel ist wichtig, um eine möglichst große Strahlungsleistung auszukoppeln und so eine hohe Effizienz von Flächenstrahlern zu erreichen.

Abbildung 2.14 verdeutlicht die Veränderung des geführten Winkelspektrums durch Mikrostrukturen und Oberflächenrauheiten. Das Winkelspektrum am Anfang der Platte wird gemäß Abbildung 2.13 dargestellt (Bereich I). Durch die gezielte Auskopplung von Lichtstrahlen an Mikrostrukturen (Bereich II) koppeln Lichtstrahlen unter bestimmten Ausbreitungswinkeln aus. Das Licht breitet sich nicht mehr unter dem ursprünglichen Winkelbereich in der LGP aus. Der ausgekoppelte Bereich ist weiß dargestellt. Durch Reflexion an der rauen Oberfläche ändert sich der Ausbreitungswinkel der verbliebenen Lichtstrahlen in der LGP, so dass sich wieder Lichtstrahlen unter dem bereits ausgekoppelten Winkelbereich in der LGP ausbreiten (Bereich III). So wird eine weitere Auskopplung

ermöglicht. Die Aufteilung von Abbildung 2.14 ist nicht räumlich zu verstehen. Sie stellt lediglich die Mechanismen getrennt voneinander dar. Diese wirken eigentlich am selben Ort und zur selben Zeit.

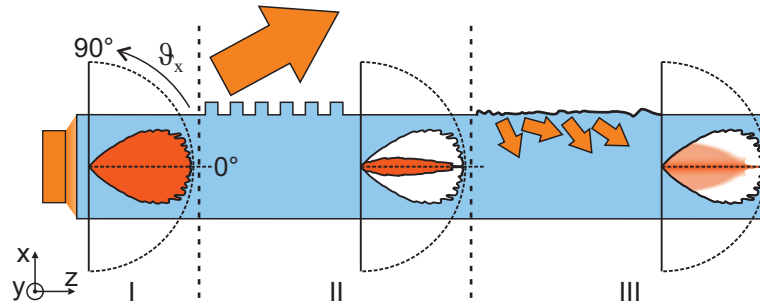


Abb. 2.14: Das Winkelspektrum (dargestellt als relative LVK in rot) des Lichts einer LED in der LGP (I) verkleinert sich durch die Auskopplung an Mikrostrukturen (II). Das Spektrum wird durch die Änderung der Ausbreitungswinkel an der rauhen Oberfläche teilweise wieder aufgeweitet (III). Die LVK in Bereich III stellt lediglich eine Prinzipskizze dar.

Für die Beschreibung der Winkeländerung an einer rauhen Oberfläche ist es vorteilhaft, von der Betrachtung des Lichts als Lichtstrahlen abzurücken und dieses als elektromagnetisches Feld zu beschreiben. Das Licht wird dabei als Welle verstanden, die sich entlang der Raumachsen ausbreitet. Nur Lichtwellen, die in x - und y -Richtung in ihren jeweiligen Komponenten stehende Wellen ausbilden, können in einer lichtleitenden Platte geführt werden. Welche stehenden Wellen sich ausbilden, hängt von der Wellenlänge des Lichts sowie den geometrischen und physikalischen Eigenschaften des Lichtleiters ab. Diese Wellen werden geführte Moden genannt. Ihre Anzahl ist endlich. Sie ist in einer LGP jedoch so groß, dass in guter Näherung von einem Kontinuum ausgegangen werden kann. In dieser Arbeit werden nur eindimensionale Moden betrachtet. Die Untersuchungen beziehen sich also auf die vereinfachte Betrachtung der LGP im Querschnitt, wie in Abbildung 2.14 dargestellt. Marcuse [57] beschreibt allgemein die Gesamtzahl geführter Moden in einem streifenförmigen Wellenleiter. Angewendet auf eine LGP, die im Unterschied zum betrachteten Wellenleiter bei Marcuse auf allen Seiten vom gleichen Medium (n_2) umgeben ist, berechnet sich die Anzahl geführter Moden als

$$N = \left[\frac{1}{\pi} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \cdot kd \right] \cdot 2 \quad (2.25)$$

mit der Höhe d der LGP und der Wellenzahl

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (2.26)$$

Diese Betrachtung gilt nur, wenn die Anzahl geführter, transversal-elektrischer und transversal-magnetischer Moden gleich ist. Dies ist für gewöhnlich der Fall (ebd.). Für die mittlere Wellenlänge eines typischen LED-Spektrums $\lambda = 565 \text{ nm}$ in einer $d = 2 \text{ mm}$ hohen LGP aus PMMA ($n_1 = 1,49$) in einer Dimension (x-Achse) ist

$$N \approx 2 \cdot \left[\frac{1}{\pi} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \cdot kd \right] = 15\,642. \quad (2.27)$$

Diese möglichen stehenden Wellen sind konkret beschreibbar. Das elektrische Feld, welches eine stehende Welle ausbildet, kann als Analogie zu einem Lichtstrahl verstanden werden, der sich unter einem bestimmten Winkel durch Totalreflexion in der LGP ausbreitet. Abbildung 2.15 veranschaulicht das Prinzip der stehenden Welle in einer LGP in x-Richtung an drei Zeitpunkten t_{1-3} .

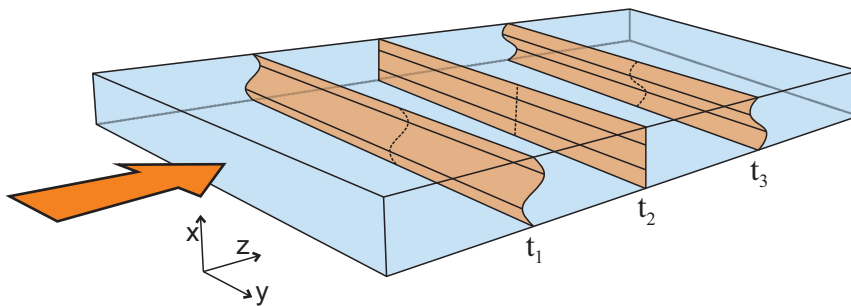


Abb. 2.15: Eine in x-Richtung stehende Welle mit der Ausbreitungsrichtung in z-Richtung in einer LGP zu drei verschiedenen Zeitpunkten t_{1-3} .

Die Winkeländerung an einer rauen Oberfläche entspricht also dem Übergang einer bestimmten Mode in eine andere bestimmte Mode. Dieser Mechanismus lässt sich mit der Theorie gekoppelter Moden beschreiben [58, 59, 60, 61]. Durch die zweidimensionale Vereinfachung des Systems wird auch die Oberflächenrauheit lediglich als Linienrauheit betrachtet. Jedes kontinuierliche Linienmuster lässt sich durch die Überlagerung von Sinusschwingungen beschreiben. Dies gilt auch für die Oberflächenrauheit. Für jede sinusförmige Störung lässt sich die entsprechende Modenkopplung berechnen [44, 62, 63]. Das gesamte Feld in der LGP kann dann durch Superposition der Teilfelder beschrieben werden. Für die Berechnung der Modenkopplung wird die Betrachtung eines Lichtleiters mit einseitiger, sinusförmiger Störung nach Marcuse [62] angewandt, welche nur für kleine Störungen gilt. Die Größenordnung der Oberflächenrauheiten optischer Systeme ist jedoch klein genug, um nur einen vernachlässigbaren Fehler erwarten zu lassen [64]. Denn hier geht es lediglich um die prinzipielle Beschreibung der Funktionsweise einer LGP. Für eine genauere Berechnung kann nach der verbesserten Analyse gekoppelter Moden in gewellten Wellenleitern von Yamamoto et al. (ebd., [65]) verfahren werden.

Eine Kopplung von Moden ist nur dann möglich, wenn die Differenz ihrer Phasenausbreitungskonstanten der Ortsfrequenz der Sinusstörung entspricht:

$$\beta_\nu - \beta_\mu = \pm\theta_s \quad (2.28)$$

mit

$$\beta_{\mu,\nu} = n_1 k_{\mu,\nu} \cos(\vartheta_{\mu,\nu}). \quad (2.29)$$

Die Indizes μ und ν bezeichnen die zwei verschiedenen Moden. Die Sinusstörung wird beschrieben als

$$f(z) = b \cdot \sin(\theta_s z), \quad (2.30)$$

wobei b die Amplitude und θ_s die Ortsfrequenz der Sinusstörung darstellt. Sie ist wie in Abbildung 2.16 dargestellt zu verstehen. Ihre Wellenlänge beträgt

$$\lambda_s = \left| \frac{2\pi}{\theta_s} \right|. \quad (2.31)$$

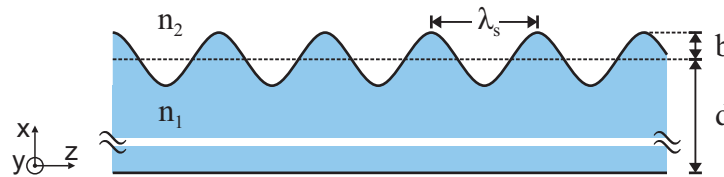


Abb. 2.16: Einseitige Sinusstörung der LGP. Basierend auf [62].

Das Prinzip der Modenkopplung an einer Sinusstörung ist in Abbildung 2.17 strahlenoptisch dargestellt. In welche Mode ν eine definierte Mode μ mit bekannter Störung $f(z)$ koppelt, lässt sich mit Gleichung (2.28) bestimmen. Die Amplitude b der Störung beeinflusst ausschließlich die Stärke der Kopplung. Moden werden mit $\beta_{\mu,\nu}$ durch die Wellenlänge λ und den Ausbreitungswinkel ϑ charakterisiert. Der Winkel ϑ_ν der Mode, in die gekoppelt wird, ist

$$\cos(\vartheta_\nu) = \pm\lambda_\nu \left(\frac{1}{2\pi n_1} \theta_s + \frac{1}{\lambda_\mu} \cos(\vartheta_\mu) \right). \quad (2.32)$$

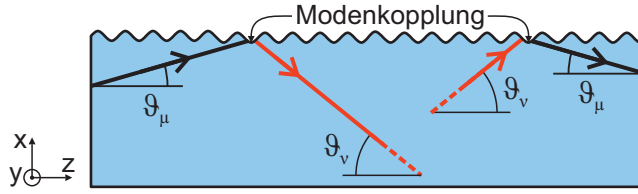


Abb. 2.17: Strahlenoptische Darstellung der Kopplung zweier Moden (schwarz und rot) an einer Sinusstörung.

Die Stärke der Kopplung zwischen zwei Moden μ und ν in einem streifenförmigen Wellenleiter wird nach [62] durch den Koppelkoeffizienten $\hat{R}_{\mu\nu}$ beschrieben. Angewendet auf eine LGP, umgeben von nur einem Medium, ist er:

$$\hat{R}_{\mu\nu} = -\frac{\pi b n_1}{\sqrt{|\cos(\vartheta_\mu) \cos(\vartheta_\nu)| \lambda_\mu \lambda_\nu \left(d + \frac{2}{\gamma_\mu}\right) \left(d + \frac{2}{\gamma_\nu}\right)}} \quad (2.33)$$

mit

$$\gamma_{\mu,\nu} = \sqrt{\frac{4\pi^2 (n_1^2 - n_2^2)}{\lambda_{\mu,\nu}^2} - \frac{2\pi n_1 \sin(\vartheta_{\mu,\nu})}{\lambda_{\mu,\nu}}}. \quad (2.34)$$

Mit Gleichung (2.32) lässt sich die Auswirkung einer vorhandenen Rauheit beschreiben. Sollen Moden gezielt gekoppelt werden, wird die Ortsfrequenz der notwendigen Störung analog berechnet als

$$\theta_s = \mp 2\pi n_1 \left(\frac{1}{\lambda_\nu} \cos(\vartheta_\nu) - \frac{1}{\lambda_\mu} \cos(\vartheta_\mu) \right). \quad (2.35)$$

Hieraus lässt sich erkennen, dass bei gleicher Wellenlänge ($\lambda_{\mu,\nu} = \lambda_\nu = \lambda_\mu$), die Ortsfrequenz θ_s umso höher ist (die Rauheit also umso feiner), umso geringer der Unterschied $\vartheta_\Delta = \vartheta_\nu - \vartheta_\mu$ zwischen den Ausbreitungswinkeln der Moden ist. Die Gleichung (2.35) lässt sich als

$$\theta_s(\vartheta_\Delta) = \frac{\mp 2\pi n_1}{\lambda_{\mu,\nu}} (\cos(\vartheta_\Delta + \vartheta_\mu) - \cos(\vartheta_\mu)) \quad (2.36)$$

schreiben und deren Ableitung ist

$$\frac{d\theta_s(\vartheta_\Delta)}{d\vartheta_\Delta} = -\sin(\vartheta_\Delta + \vartheta_\mu) < 0 \quad (2.37)$$

für den Bereich

$$0 < \vartheta_\Delta + \vartheta_\mu = \vartheta_\nu < 90^\circ \quad (2.38)$$

mit

$$0 \leq \vartheta_\mu < 90^\circ. \quad (2.39)$$

Dies beweist, dass die Ortsfrequenz θ_s über ϑ_Δ für Ausbreitungswinkel zwischen 0° und 90° streng monoton fallend ist und belegt die obige These.

Marcuse (ebd.) geht von Moden ohne Dämpfung aus und beschreibt die Wellengleichung der gekoppelten Moden μ und ν als

$$\frac{dc_\mu(z)}{dz} = \hat{R}_{\mu\nu}c_\nu(z) \quad (2.40)$$

$$\frac{dc_\nu(z)}{dz} = -\hat{R}_{\mu\nu}c_\mu(z) \quad (2.41)$$

mit der Lösung

$$c_\mu(z) = A \cos(\hat{R}_{\mu\nu}z) + B \sin(\hat{R}_{\mu\nu}z) \quad (2.42)$$

$$c_\nu(z) = -A \sin(\hat{R}_{\mu\nu}z) + B \cos(\hat{R}_{\mu\nu}z). \quad (2.43)$$

A und B beschreiben die anfängliche Amplitude der Moden μ und ν . Der Austausch der Leistung zwischen den Moden geschieht periodisch. Der erste vollständige Leistungstransfer von μ nach ν ist in einem ungedämpften System nach einer Strecke mit der Länge $\left| \pi \left(2\hat{R}_{\mu\nu} \right)^{-1} \right|$ abgeschlossen (ebd.).

Zur Anschauung wird eine beispielhafte Modenkopplung betrachtet. Die LGP besitzt die Höhe $d = 2 \text{ mm}$ und die Brechzahl $n_1 = 1,49$. Die koppelnden Moden besitzen die gleiche Wellenlänge $\lambda_{\mu,\nu} = 550 \text{ nm}$ und die Ausbreitungswinkel $\vartheta_\mu = 16^\circ, \vartheta_\nu = 39^\circ$. Die Wellenlänge der Störung ist $\lambda_s = 2,004866763 \text{ }\mu\text{m}$ mit der Amplitude $b = 20 \text{ nm}$. Als Eingangsamplituden werden $A = 100$ und $B = 0$ gewählt. Es wird also lediglich die Mode μ angeregt. Die Parameter sind in Abbildung 2.18 modellhaft dargestellt. Die relative Leistung der gekoppelten Moden in einer solchen LGP ist in Abbildung 2.19 dargestellt. Die durchschnittliche Moden-Leistung berechnet sich nach [66] als

$$P_{\mu,\nu}(z) = c_{\mu,\nu}(z) \cdot c_{\mu,\nu}^*(z). \quad (2.44)$$

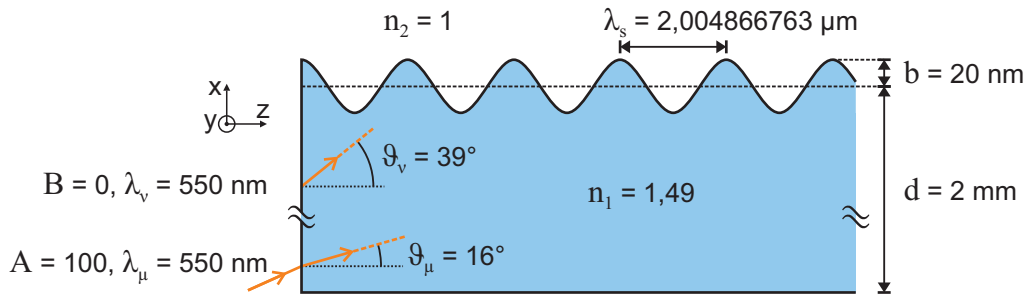


Abb. 2.18: Parameter des gewellten Wellenleiters und der beiden Moden μ und ν , für die die Modenkopplung berechnet wird.

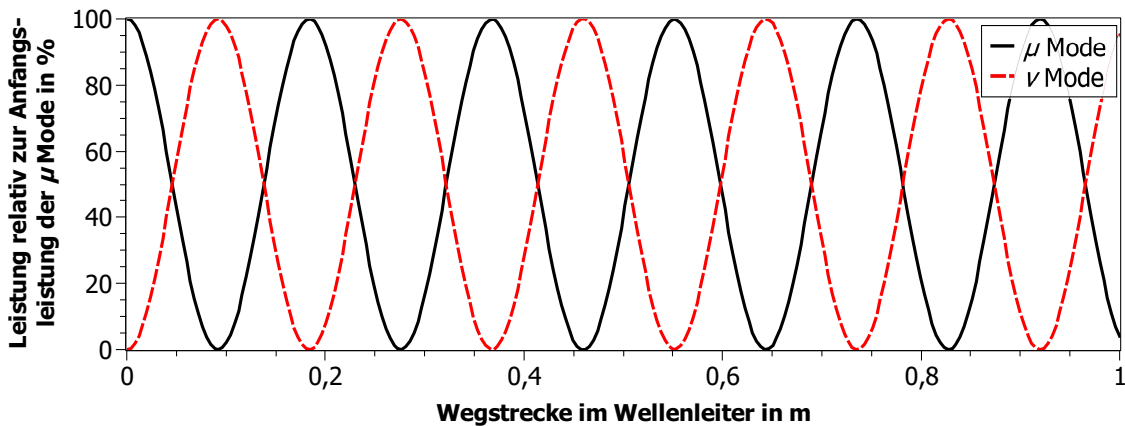


Abb. 2.19: Leistung der gekoppelten, ungedämpften Moden μ und ν in einer LGP. Angeregt wird nur die Mode μ . Die Leistung wird durch die Sinusstörung zwischen den Moden periodisch hin und her übertragen.

In einer mikrostrukturierten LGP zur Lichtauskopplung wird jedoch stetig Licht aus einem bestimmten Winkelbereich ausgekoppelt. Obiges Beispiel wird um die Annahme ergänzt, dass Licht von der Mode ν ausgekoppelt wird. Dies kann durch eine Dämpfung der Mode beschrieben werden. Die in Gleichung (2.41) beschriebene Änderung der Amplitude der Mode ν im Schritt dz wird um eine Abnahme pro Strecke (Abklingkoeffizient δ) ergänzt.

$$\frac{dc_\nu(z)}{dz} = -\hat{R}_{\mu\nu}c_\mu(z) - \delta c_\nu(z) \quad (2.45)$$

Folgende Lösung des so entstandenen neuen Systems aus den Differentialgleichungen (2.40) und (2.45) wurde mittels Wolfram|Alpha [67] bestimmt:

$$c_\mu(z) = \frac{Ae^{-\frac{1}{2}z(\sqrt{\delta^2-4\hat{R}_{\mu\nu}^2}+\delta)} \left(\left(\sqrt{\delta^2-4\hat{R}_{\mu\nu}^2} \left(e^{z\sqrt{\delta^2-4\hat{R}_{\mu\nu}^2}} + 1 \right) + \delta e^{z\sqrt{\delta^2-4\hat{R}_{\mu\nu}^2}} \right) - \delta \right)}{2\sqrt{\delta^2-4\hat{R}_{\mu\nu}^2}} - \frac{B\hat{R}_{\mu\nu} \left(e^{-\frac{1}{2}z(\sqrt{\delta^2-4\hat{R}_{\mu\nu}^2}+\delta)} - e^{\frac{1}{2}z(\sqrt{\delta^2-4\hat{R}_{\mu\nu}^2}-\delta)} \right)}{\sqrt{\delta^2-4\hat{R}_{\mu\nu}^2}} \quad (2.46)$$

$$c_\nu(z) = \frac{A\hat{R}_{\mu\nu} \left(e^{-\frac{1}{2}z(\sqrt{\delta^2-4\hat{R}_{\mu\nu}^2}+\delta)} - e^{\frac{1}{2}z(\sqrt{\delta^2-4\hat{R}_{\mu\nu}^2}-\delta)} \right)}{\sqrt{\delta^2-4\hat{R}_{\mu\nu}^2}} + \frac{Be^{-\frac{1}{2}z(\sqrt{\delta^2-4\hat{R}_{\mu\nu}^2}+\delta)} \left(\left(\sqrt{\delta^2-4\hat{R}_{\mu\nu}^2} \left(e^{z\sqrt{\delta^2-4\hat{R}_{\mu\nu}^2}} + 1 \right) - \delta e^{z\sqrt{\delta^2-4\hat{R}_{\mu\nu}^2}} \right) + \delta \right)}{2\sqrt{\delta^2-4\hat{R}_{\mu\nu}^2}} \quad (2.47)$$

Mit einer beispielhaften Abklingkonstante von $\delta = 8,21 \text{ m}^{-1}$ (vgl. Tabelle 2.3) stellt sich die relative Leistung der Moden in der LGP wie in Abbildung 2.20 dar. Alle weiteren Parameter entsprechen der vorangegangenen beispielhaften Berechnung ungedämpfter, gekoppelter Moden (vgl. Abbildung 2.18).

Es ist deutlich erkennbar, dass durch die Modenkopplung an einer Oberflächenrauheit (bzw. allgemein Inhomogenität) die Strecke, in der Licht aus einer LGP ausgekoppelt wird (hier aus der Mode ν), verlängert wird. Dies kann die Effizienz lichtauskoppelnder LGPs verbessern. Wie das Beispiel zeigt, geschieht dies schon bei sehr geringen Rauheiten. Dies wird in optischen Simulationen und Berechnungen, die von einer idealen LGP ausgehen, nicht berücksichtigt. Durch die Winkelgenauigkeit eines Lichtstrahls mit $1 \cdot 10^{-15^\circ}$ in den in dieser Arbeit durchgeführten optischen Simulationen mit der Software Zemax OpticStudio von der Zemax LLC, Kirkland kann eine relevante Modenkopplung durch numerische Ungenauigkeiten ausgeschlossen werden.

Die in der Beispielrechnung in die Mode ν gekoppelte Leistung wirkt groß. Jedoch wurde hier die Kopplung mit allen weiteren geführten Moden, die die Bedingung (2.28) erfüllen, sowie eine mögliche beidseitige Rauheit der LGP nicht berücksichtigt. Diese Untersuchung lässt lediglich die Aussage zu, dass eine wie in Abbildung 2.14 skizzierte Modenkopplung stattfindet.

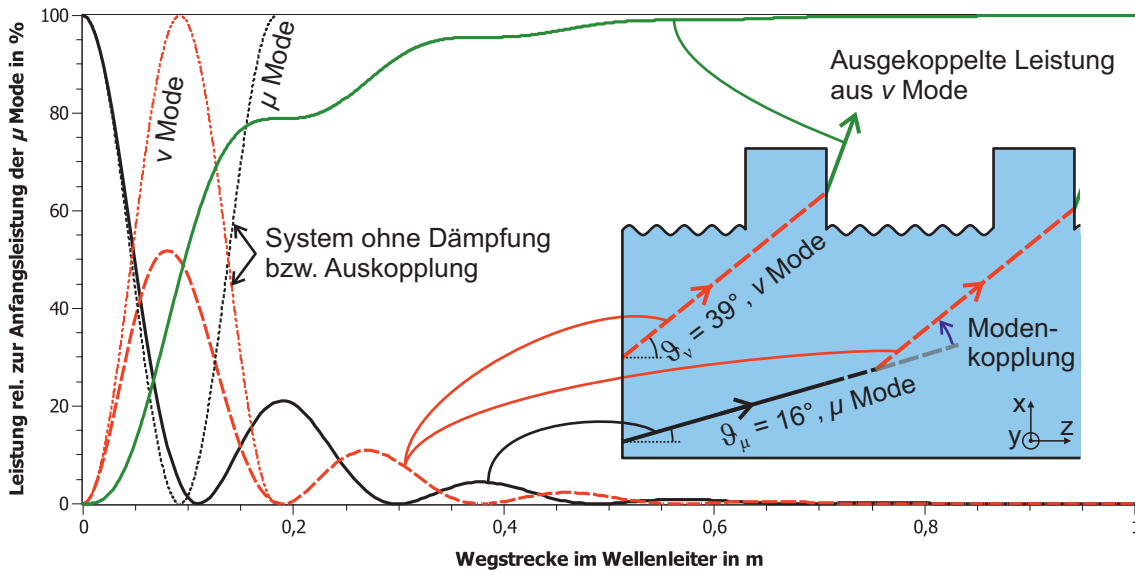


Abb. 2.20: Leistung der gekoppelten Moden μ (gedämpft durch Modenkopplung, schwarz) und ν (gedämpft durch Auskopplung, rot gestrichelt) in einer LGP. Angeregt wird nur die Mode μ . Die Leistung wird durch die Sinusstörung zwischen den Moden periodisch hin und her übertragen. Sie nimmt aber, auf Grund der Auskopplung aus der Mode ν (grün), in beiden Moden ab. Zum Vergleich ist die Leistung der gekoppelten Moden μ und ν im vollständig ungedämpften System schwarz gepunktet bzw. rot strich-gepunktet für den Anfang der LGP eingezeichnet. Die Entsprechung der Moden in der strahlenoptischen Betrachtung ist skizzenhaft dargestellt und mit den Leistungskurven verbunden.

Messungen zeigen, dass die Auskopplung tatsächlich schwächer als simuliert über die Plattenlänge abnimmt. Beispielhaft wird die Auskopplung auf einer LGP vermessen. Die LGP besteht aus Polydimethylsiloxan (PDMS, $n_2 = 1,41$ im sichtbaren Bereich des Lichts [56]) und besitzt eine Länge und Breite von 10 cm sowie eine Höhe von 4 mm. Sie ist einseitig mit Mikrozyklern strukturiert. Deren Durchmesser beträgt $50 \mu\text{m}$ und deren Höhe $42 \mu\text{m}$ [16]. Ihr Abstand (Mitte zu Mitte) beträgt $150 \mu\text{m}$. Der verwendete Messaufbau ist in Abbildung 2.21 skizziert.

Zur Messung wird der Optical Power Sensor MA9802A in Kombination mit dem Optical Power Meter ML910B (beide Geräte von der Anritsu Corporation, Atsugi) verwendet. Der Sensor wird zur Messung mit einer schwarzen Blende auf die LGP aufgesetzt, wodurch eine Absorption an der Grenzfläche zwischen Blende und Decke der Mikrozyklern auftreten kann. Dieser Einfluss wird jedoch als vernachlässigbar angenommen, da nur wenige Lichtstrahlen auf diese Grenzfläche treffen. Simulation (ohne Modenkopplung durch Rauheiten) und Messung werden in Abbildung 2.22 verglichen. Wie zu erwarten nimmt die ausgekoppelte Strahlungsleistung über die Plattenlänge in der Messung weniger stark ab, als in der Simulation. Dies lässt sich durch die Modenkopplung gut erklären.

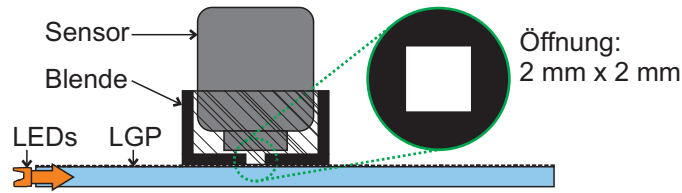


Abb. 2.21: Messaufbau zur Erfassung der ausgekoppelten Strahlungsleistung über die Länge einer LGP. Der Sensor misst durch eine Blende die ausgekoppelte Leistung.

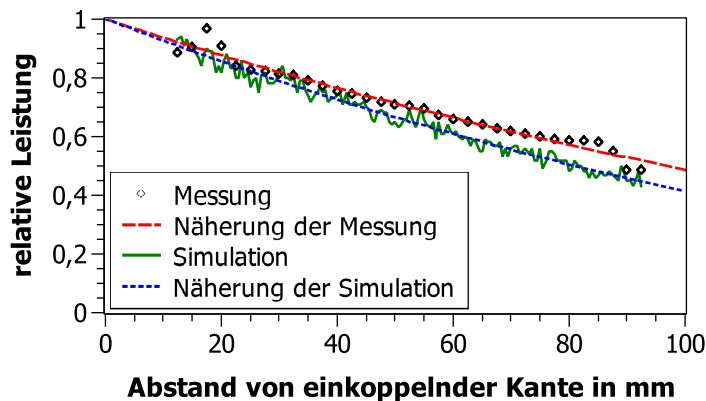


Abb. 2.22: Simulation (ohne Modenkopplung durch Rauheiten, grün) und Messung (schwarz-weiße Rauten) der ausgekoppelten Strahlungsleistung auf der strukturierten Seite einer LGP aus PDMS. Die Näherung der Daten verdeutlicht die stärkere Abnahme der simulierten Leistung (blau gepunktet) im Vergleich zur Messung (rot gestrichelt).

2.5 Auskopplung von Licht aus einer lichtleitenden Platte

Die Möglichkeiten Licht aus einer LGP auszukoppeln sind vielfältig. Es wurden verschiedenste Methoden zu diesem Zweck entwickelt. Es werden hier besonders Strukturen untersucht, die eine einseitige Lichtauskopplung ermöglichen und auch nur auf einer LGP-Seite positioniert sind. Zunächst werden grundsätzliche Überlegungen zur Auskopplung an beliebigen Mikrostrukturen erläutert, bevor die Auskopplung an Mikrozyklindern beispielhaft genauer betrachtet wird.

In dieser Arbeit werden LGPs als mikrostrukturierte Flächenstrahler zu Beleuchtungszwecken entwickelt. Die Lichtauskopplung aus einem Flächenstrahler stellt nicht nur den Übergang des Lichts aus der LGP in den beleuchteten Raum, sondern auch den Übergang von einer physikalischen in eine anwendungsorientierte Betrachtungsweise dar. In

diesem Anwendungsbereich werden optische Systeme üblicherweise durch photometrische Größen auf die durchschnittliche, menschliche Wahrnehmung bezogen. Entsprechend werden Überlegungen und Rechnungen in diesem Abschnitt ebenfalls in photometrischen Größen ausgedrückt. Um Verwirrungen zu vermeiden, ist in Anhang B eine Übersicht der Zusammenhänge zwischen den verwendeten radiometrischen und photometrischen Größen aufgeführt.

2.5.1 Allgemeine Betrachtung

In einer LGP breitet sich der Lichtstrom $\phi_{v,1}$ durch Totalreflexion aus. Trifft das Licht auf die erste Mikrostruktur, koppelt der Lichtstrom $\phi_{v,a1}$ aus. In welche Richtung das Licht auskoppelt, hängt von der Form der Mikrostruktur, der Anordnung der Mikrostrukturen zueinander und dem Brechzahlunterschied von LGP zu Umgebung ab. In der LGP verbleibt bis zur zweiten Mikrostruktur der Lichtstrom $\phi_{v,2}$. Der Anteil des Lichtstroms, der an einer Mikrostruktur ausgekoppelt wird, wird im Folgenden durch den Auskoppelfaktor

$$\eta_a = \frac{\phi_{v,a1}}{\phi_{v,1}} = \frac{\phi_{v,an}}{\phi_{v,n}} \quad (2.48)$$

ausgedrückt. Dabei ist der relative, ausgekoppelte Anteil η_a des Lichtstroms an jeder n -ten Mikrostruktur gleich. Abbildung 2.23 verdeutlicht diese Beschreibung der Lichtauskopplung an einzelnen Mikrostrukturen. Pan und Hu [68] verwenden ein ähnliches Modell für die Lichtauskopplung aus mikrostrukturierten LGPs.

Eine vereinfachte Betrachtung in zwei Dimensionen, wie in den vorherigen Abschnitten, zur allgemeinen Bestimmung des Auskoppelfaktors ist hier nicht möglich. Das Licht der LED breitet sich in der LGP ähnlich wie eine Kugelwelle aus, während die Mikrostrukturen schachbrettartig angeordnet sind. Daher werden hier mit ϑ_y und ϑ_x die Komponenten des Ausbreitungswinkels in der x - bzw. y - z -Ebene separat beschrieben (vgl. Abbildung 2.24). Die Anordnung der Mikrostrukturen ändert sich je nach ϑ_y bezogen auf den entsprechenden Strahlengang des Lichts. Angesichts der Komplexität des Problems werden hier lediglich allgemeine Überlegungen angestellt, die die verschiedenen Aspekte der Lichtauskopplung an Mikrostrukturen beschreiben.

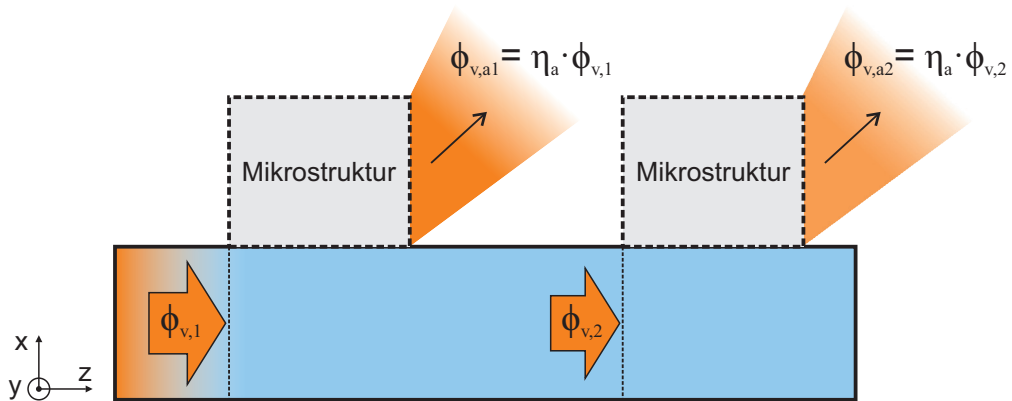


Abb. 2.23: Der Lichtstrom in einer LGP wird an jeder Mikrostruktur mit dem Auskoppelfaktor η_a teilweise ausgekoppelt. Der Lichtstrom nimmt dadurch mit der Anzahl der passierten Mikrostrukturen ab.

Nicht alle Strahlen, die sich in einer LGP ausbreiten, treffen auf die auskoppelnden Strukturen, bzw. genauer genommen auf ihre auskoppelnde(n) Fläche(n). Abhängig von den Ausbreitungswinkeln ϑ_x und ϑ_y lässt sich eine auskoppelnde Fläche A_a eines Elements beschreiben und in den Querschnitt der LGP in der x-y-Ebene als $A_{a,p}$ projizieren. Diese Projektion wird nur von einem Teil $\phi'_{v,1}$ von $\phi_{v,1}$ durchströmt. $\phi'_{v,1}$ wird durch das Integral der Lichtintensität bezogen auf $A_{a,p}$ bestimmt. Die Lichtintensität ist dabei ebenfalls abhängig von ϑ_x und ϑ_y . In Abbildung 2.24 ist eine solche Projektion mit entsprechenden Lichtströmen skizziert.

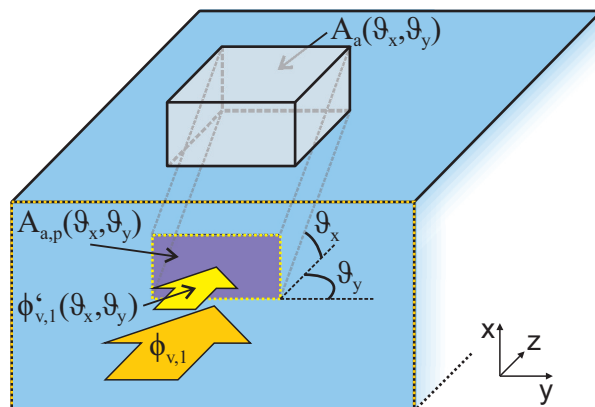


Abb. 2.24: Projektion der auskoppelnden Fläche einer Mikrostruktur in den LGP-Querschnitt in der x-y-Ebene. Die auskoppelnde Fläche und der Lichtstrom, der auf sie trifft, sind vom Ausbreitungswinkel der Lichtstrahlen abhängig.

Weiterhin lässt sich grundsätzlich feststellen, dass Strahlen, die sich unter einem großen Winkel ϑ_x in der LGP ausbreiten, häufiger ausgekoppelt werden, als solche, die sich unter einem kleinen Winkel ϑ_x ausbreiten. Strahlen mit großem ϑ_x werden entlang der LGP häufiger reflektiert und treffen mit entsprechend höherer Wahrscheinlichkeit auf eine

Mikrostruktur. Dies äußert sich praktisch darin, dass auf den ersten Zentimetern einer LGP die meisten solcher Lichtstrahlen ausgekoppelt werden und mit zunehmendem Abstand von der Lichtquelle fast nur noch flache Lichtstrahlen (mit kleinem ϑ_x) ausgekoppelt werden. Entsprechend geringer ist auch der ausgekoppelte Lichtstrom mit steigendem Abstand von der Einkoppelkante. Um dies zu veranschaulichen, wird eine ideale LGP mit $d = 2\text{ mm}$ und $l_y = 100\text{ mm}$ aus PMMA mit Mikrozyklindern, die $50\text{ }\mu\text{m}$ hoch sind und einen Durchmesser von $50\text{ }\mu\text{m}$ aufweisen, simuliert. Die Seitenflächen der LGP sind verspiegelt, um eine endlos breite Platte zu simulieren ($l_y = \infty$). Als Lichtquelle dienen elf gleichmäßig verteilte LEDs mit lambert'scher Abstrahlcharakteristik und dem Abstand $\ell_{LED} = 100\text{ }\mu\text{m}$. Die vollständigen Parameter der Simulation sind in Tabelle 2.1 aufgelistet. In Abbildung 2.25 ist das Winkelspektrum des Lichts in der LGP und das des ausgekoppelten Lichts nach verschiedenen langen Strecken ℓ_z dargestellt.

Tab. 2.1: Systemparameter der Simulation des geführten und ausgekoppelten Winkelspektrums.

| d | ℓ_{LED} | ℓ_y | n_1 | n_2 | λ |
|------|-------------------|----------|-------|-------|------------------------------|
| 2 mm | 100 μm | 100 mm | 1,49 | 1 | 380 nm - 780 nm ³ |

³Intensitätsverteilung gemäß den Herstellerangaben für die LED OSRAM TOPLED E3014[69]

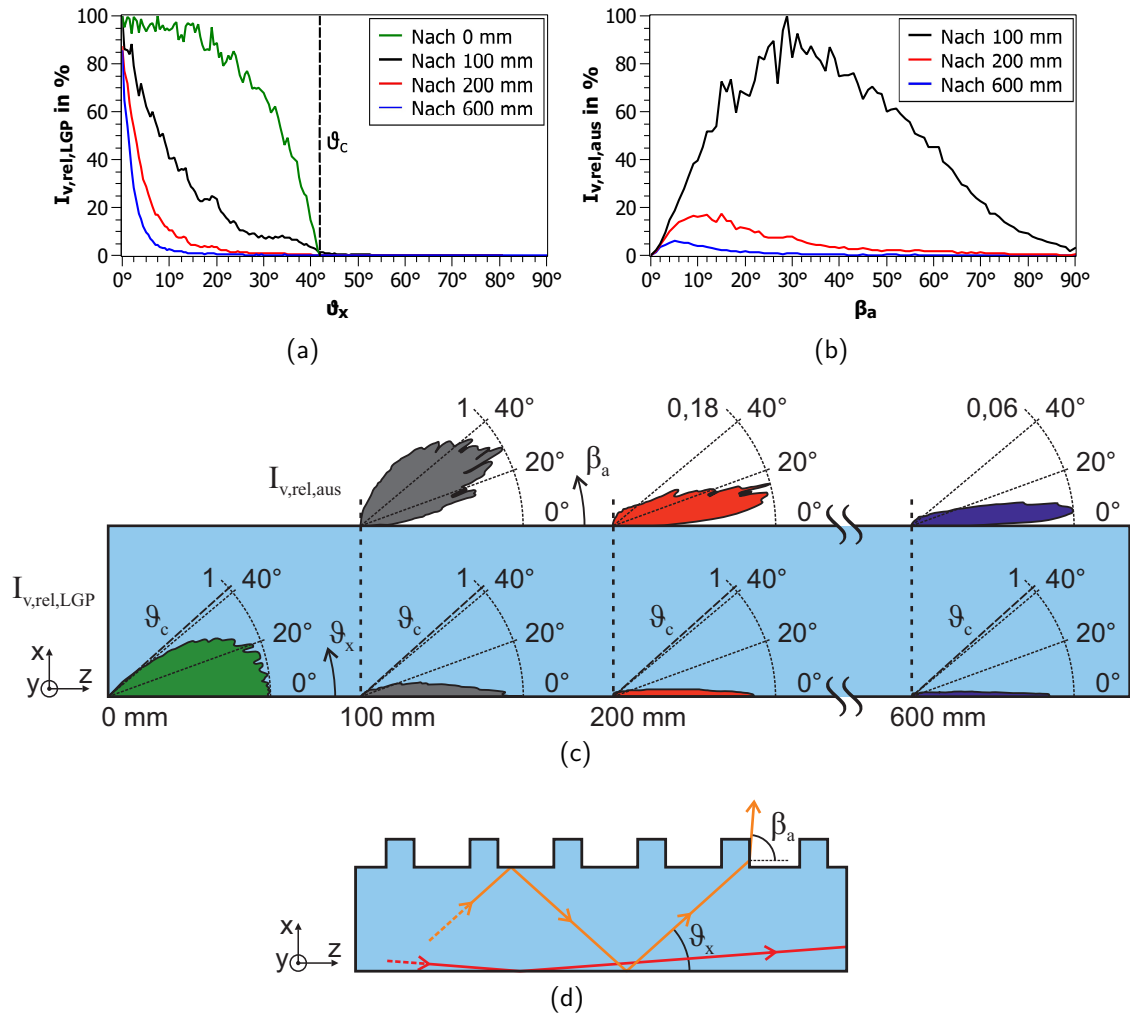


Abb. 2.25: Darstellung des Winkelspektrums des Lichts in der LGP aus PMMA zusammen mit dem größtmöglichen Ausbreitungswinkel ϑ_c (a) und des ausgekoppelten Lichts (b) nach verschieden langem Weg durch die LGP. In der Darstellung der Winkelspektren als relative LVK (c) wird besonders deutlich, dass Lichtstrahlen, die sich unter einem großen Winkel ϑ_x ausbreiten, vor allem am Anfang der LGP ausgekoppelt werden. Solche mit kleinem Ausbreitungswinkel werden auch später noch ausgekoppelt. Denn diese Strahlen werden seltener reflektiert, als Strahlen die sich unter einem großen Winkel ausbreiten (d).

Licht, das ausgekoppelt wurde, kann durch folgende Mikrostrukturen weiter gebrochen, reflektiert oder zurück in die LGP gelenkt werden. Die Lichtstärke für $\vartheta_x > \vartheta_c = 42^\circ$ nach 100 mm in Abbildung 2.25a ist solches Licht, das an den Mikrostrukturen wieder in die Platte gelenkt wurde und durch Totalreflexion nicht weiter in der LGP geführt werden kann. Dies ist ein meist unerwünschter Effekt, weil er eine rückseitige Lichtauskopplung zur Folge haben kann. Das Licht kann auch gedämpft zurück in die Platte gelenkte werden ohne hauptsächlich auszukoppeln. An den einzelnen Mikrostrukturen treten

dann dennoch unerwünschte Reflexionen auf. Gleiches gilt für die Auskopplung auf der strukturierten Seite, bei Brechung an mehreren Mikrostrukturen. Dabei bedingen die Reflexionen eine Dämpfung der Auskopplung in die eigentlich gewünschte Richtung. Diese Auswirkungen eines zu geringen Abstandes zwischen lichtauskoppelnden Mikrostrukturen sind in Abbildung 2.26 skizziert.

Dieser Einfluss nachfolgender Elemente auf ein vorhergehendes Element ist nicht zu vernachlässigen und muss bei einer genauen Betrachtung von $A_{a,p}$ (vgl. Abbildung 2.24) berücksichtigt werden. Die Auswirkung folgender Mikrostrukturen ist bei in drei Dimensionen abgeschlossenen Elementen nicht nur abhängig von ϑ_x , sondern auch von ϑ_y . An einem einzelnen Zylinder aus PMMA mit einem Aspektverhältnis (Höhe:Durchmesser) von 1 wird beispielsweise das in Abbildung 2.27 dargestellte Winkelspektrum ausgekoppelt, wenn sich unter jedem Winkel $0^\circ < \vartheta_x < \vartheta_c$ in der Platte etwa der gleiche Lichtstrom ausbreitet und er vollständig auf den Zylinder trifft. Dieses Winkelspektrum unterscheidet sich deutlich von einem Flächenstrahler mit einer Anordnung mehrerer dieser Zylinder und dem eingekoppelten Winkelspektrum einer realistischen Lichtquelle (vgl. Abbildung 2.25).

Das vorliegende Beispiel macht deutlich, dass eine analytische Beschreibung der Auskopplung unterschiedlicher Flächenstrahler jeweils sehr aufwendig hergeleitet werden müsste. Effizienter ist hier eine numerische Lösung mit Hilfe der automatischen Berechnung einer Vielzahl einzelner Lichtstrahlen (optical raytracing).

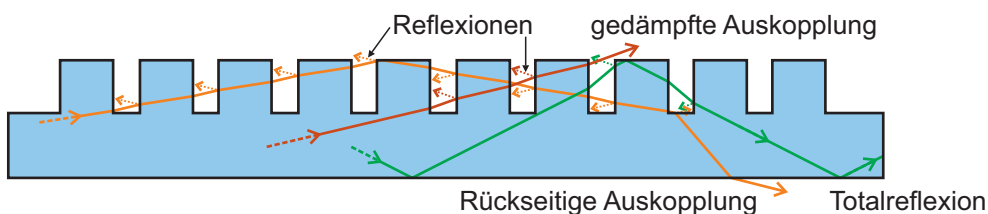


Abb. 2.26: Strahlen werden an zu nah positionierte Mikrostrukturen mehrfach gebrochen. Die Strahlen werden entweder gedämpft (rot) oder auf der Rückseite ausgekoppelt (orange). Die Strahlen können auch gedämpft zurück in die LGP gelenkt und dort weiter durch Totalreflexion geführt werden (grün). In jedem Fall treten an den, vom Strahl passierten, Strukturen unerwünschte Reflexionen auf (gepunktet).

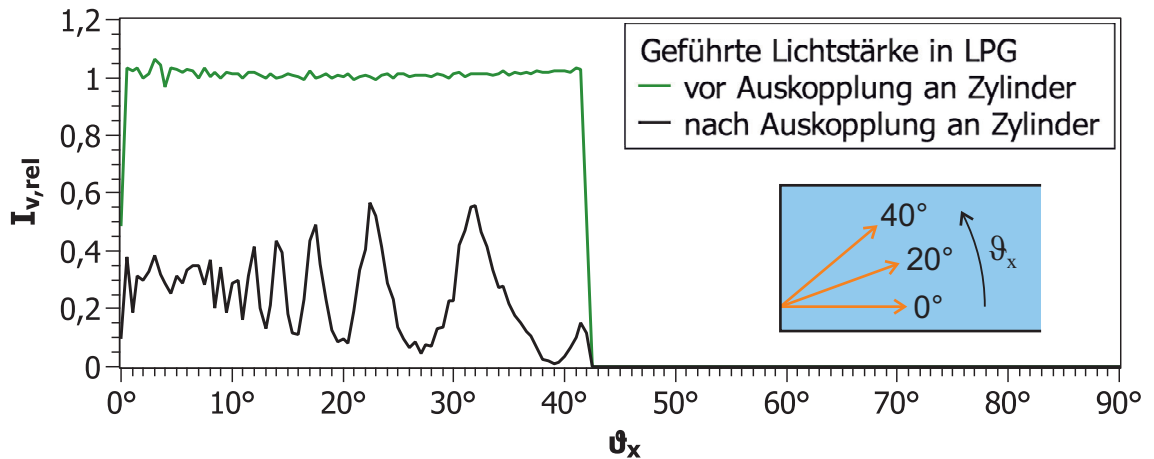


Abb. 2.27: Simuliertes Winkelspektrum der geführten Lichtstärke vor (grün) und nach (schwarz) der Auskopplung an einem einzelnen Zylinder aus PMMA auf einer LPG, in der sich unter jedem geführten Winkel etwa der gleiche Lichtstrom ausbreitet. Die Lichtstärke ist relativ zum Mittelwert der Lichtstärke vor der Auskopplung (grün) aufgetragen. Die Differenz zwischen beiden Kurven ist die ausgekoppelte Lichtstärke. Die Bedeutung von ϑ_x ist strahlenoptisch skizziert.

2.5.2 Auskopplung an Mikrozyklindern

Die Auskopplung wird nun exemplarisch an Mikrozyklindern genauer betrachtet. Diese sind gleichmäßig auf einer Seite der LPG verteilt, $50\ \mu\text{m}$ hoch und besitzen einen Durchmesser von ebenfalls $50\ \mu\text{m}$. Ihre Anordnung mit dem Abstand $\Delta_M = 150\ \mu\text{m}$ (Mitte zu Mitte) ist in Abbildung 2.28 dargestellt.

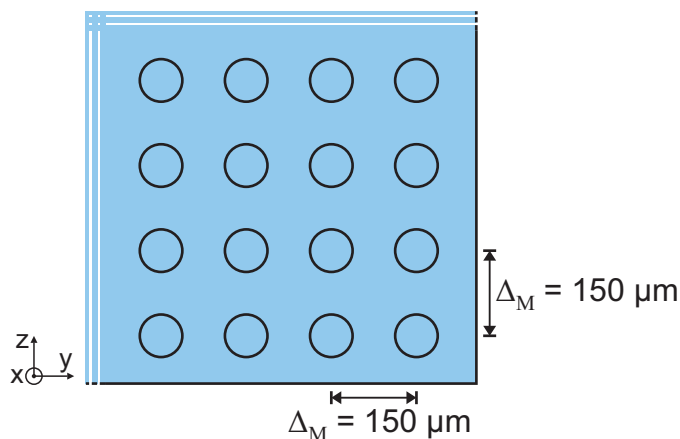


Abb. 2.28: Anordnung der Mikrozyklindern auf der LPG.

Zunächst wird beispielhaft festgestellt wie groß der Auskoppelfaktor η_a für eine solche LPG aus PMMA ist. Hierzu wird die Auskopplung eines Systems mit den Parametern in Tabelle 2.2 simuliert. Die Seitenflächen der LPG entlang der Ausbreitungsrichtung

des Lichts sind reflektierend, um eine gleichmäßige Lichteinkopplung und Verteilung in x-Richtung zu simulieren. Die Stirnfläche gegenüber der einkoppelnden Seite ist absorbierend.

Tab. 2.2: Systemparameter der Simulation zur Bestimmung des Auskoppelfaktors der LGP mit 50 μm -Mikrozylindern.

| d | ℓ_{LED} | ℓ_y | ℓ_z | Δ_M | n_1 | n_2 | λ |
|------|-------------------|----------|----------|-------------------|-------|-------|-----------------|
| 2 mm | 100 μm | 100 mm | 600 mm | 150 μm | 1,49 | 1 | 380 nm - 780 nm |

Um η_a zu bestimmen, wird die Lichtauskopplung über die Länge der LGP betrachtet. Diese lässt sich durch eine einfache natürliche exponentielle Abnahme in guter Näherung beschreiben (Parameter in Tabelle 2.3):

$$\phi_{v,a}(z) = \phi_{v,0} + A \cdot e^{-\delta \cdot z} \quad (2.49)$$

Tab. 2.3: Parameter der Näherung der Lichtauskopplung in Gleichung (2.49).

| $\phi_{v,0}$ | A | δ |
|------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| 0,00159013846519516 lm | 0,0519314806062013 lm | 0,00820742947720 mm^{-1} |

Die Näherung ist in Abbildung 2.29 zusammen mit der simulierten Lichtauskopplung dargestellt. Die Spitze des Lichtstroms an der einkoppelnden Kante wird durch die hohe Leistungsdichte in der Nähe der LED verursacht und bei der Näherung nicht berücksichtigt. Aus dieser Funktion lässt sich η_a wie folgt ableiten

$$\phi_{v,0} + A \cdot e^{-\delta \Delta_M} = \phi_{v,0} + A \cdot (1 - \eta_a). \quad (2.50)$$

Δ_M ist der Abstand zwischen zwei Mikrostrukturen. In der eindimensionalen Betrachtung ist er der Abstand zwischen zwei Reihen von Mikrostrukturen. Umstellen von Gleichung (2.50) liefert

$$\eta_a = 1 - e^{-\delta \Delta_M}. \quad (2.51)$$

In diesem Fall ist $\eta_a = 1,230356911113284 \cdot 10^{-3}$ bezogen auf eine Reihe mit 666 Zylindern.

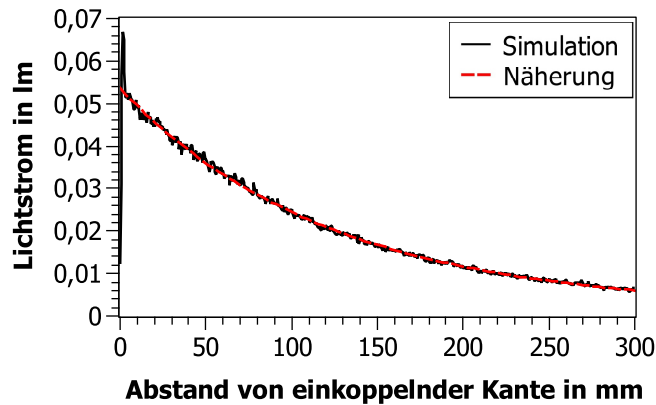


Abb. 2.29: Simulierte Lichtauskopplung über die Länge einer LGP aus PMMA mit 50 μm -Mikrozylindern. Der ausgekoppelte Lichtstrom (schwarz) nimmt mit dem Abstand von der einkoppelnden Kante ab. Die Abnahme kann durch eine einfache natürliche exponentielle Abnahme (rot gestrichelt) gut angenähert werden.

2.5.3 Optimierte Auskopplung

Im letzten Abschnitt wurde erläutert, dass die Lichtauskopplung aus einer gleichmäßig mikrostrukturierten LGP durch eine natürliche exponentielle Abnahme angenähert werden kann. Wie in Abschnitt 2.3 dargelegt wird, ist diese Abnahme in der Realität zwar schwächer, aber entspricht immer noch einer exponentiellen Abnahme. Diese Lichtauskopplung äußert sich auf solchen LGPs als stark unterschiedliche Lichtstromdichte auf deren auskoppelnden Oberfläche. Abbildung 2.30 zeigt die Lichtstromdichte auf der auskoppelnden Fläche für das simulierte System mit den Parametern in Tabelle 2.2. In der Nähe der einkoppelnden Kante ist die Lichtstromdichte besonders hoch. Das Licht der einzelnen LEDs ist als roter Hotspot zu erkennen. Die ausgekoppelte Lichtstärke nimmt in z-Richtung stark ab.

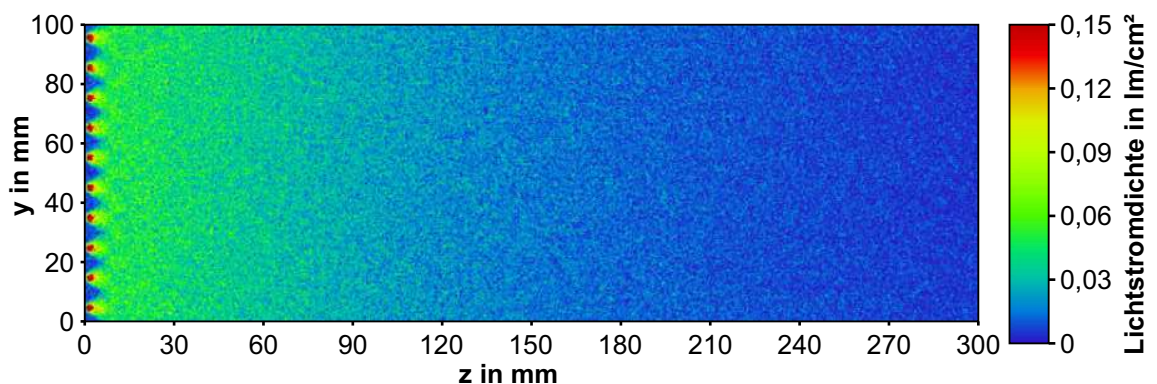


Abb. 2.30: Simulierte Lichtstromdichte auf der strukturierten Fläche einer LGP mit gleichmäßig angeordneten Mikrozylindern. Die Lichtstromdichte ist sehr inhomogen. In der Nähe der LEDs wird der größte Lichtstrom ausgekoppelt (rot/grün).

Wünschenswert für die Anwendung solcher LGPs ist jedoch eine homogene Lichtstromdichte. Verschiedene Ansätze finden zur Homogenisierung der Lichtstromdichte Anwendung. Hauptsächlich wird versucht, die Dichte bzw. den Abstand zwischen den Mikrozyllindern zu optimieren [70, 71, 72, 73, 74, 75]. Dabei handelt es sich lediglich um empirische Lösungsansätze. Auch die Anpassung der Form der Mikrostruktur wird verfolgt [13, 76, 77]. Anders als in den aufgeführten Referenzen wird im Folgenden von der Annahme ausgegangen, dass an jeder Mikrostruktur ein Anteil η_a des Lichtstroms in der LGP ausgekoppelt wird. Daraus wird eine angepasste eindimensionale Verteilungsfunktion der Mikrostrukturen entwickelt. η_a beschreibt im Eindimensionalen den Anteil des Lichtstroms, der an einer Reihe von Mikrostrukturen ausgekoppelt wird.

Eine homogene Lichtstromdichte bedeutet im Eindimensionalen, dass auf einer gleichlangen Strecke an jeder Stelle der LGP immer der gleiche Lichtstrom ausgekoppelt wird. Damit muss für den Abstand $\Delta_{M,z}$ in z-Richtung zwischen einer n -ten und der darauf folgenden Mikrostrukturreihe gelten:

$$\Delta_{M,z}(n) = (1 - \eta_a)^n \cdot \Delta_{M,z}(0) \quad (2.52)$$

bzw. für die absolute Position:

$$p_z(n) = \frac{\Delta_{M,z}(0) \cdot (1 - \eta_a)^n - \Delta_{M,z}(0)}{\ln(1 - \eta_a)} \quad (2.53)$$

Die in den Gleichungen (2.52) und (2.53) verwendeten geometrischen Parameter sind in Abbildung 2.31 dargestellt. $\Delta_{M,z}(0)$ bezeichnet den größten Abstand zwischen zwei Elementen und ist abhängig von der Länge ℓ_z der LGP und dem Mindestabstand $\Delta_{M,\min}$.

$$\Delta_{M,z}(0) = \Delta_{M,\min} - \ell_z \cdot \ln(1 - \eta_a) \quad (2.54)$$

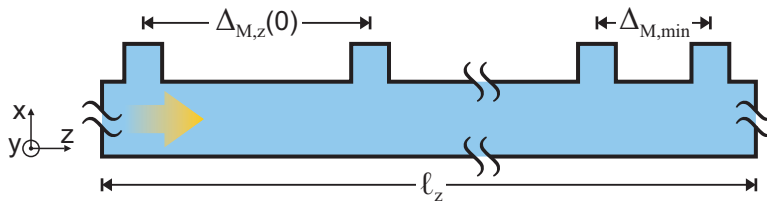


Abb. 2.31: Geometrische Parameter der Verteilungsfunktion der Mikrostrukturen für eine homogene Lichtstromdichte auf der LGP in z-Richtung. Das Licht wird links eingekoppelt und an den Strukturen, die in z-Richtung auf der LGP dichter werden, ausgekoppelt.

Für die LGP mit Mikrozyklindern aus dem letzten Abschnitt mit der Länge $\ell_z = 30$ cm wird hier beispielhaft eine Verteilungsfunktion hergeleitet. η_a ist bereits aus Abschnitt 2.5.2 bekannt. $\Delta_{M,\min}$ ist so zu wählen, dass die gewünschte Abstrahlung an den Mikrostrukturen nicht gestört wird. Basierend auf Überlegungen von Lee et al. [30] wird der Mindestabstand als

$$\Delta_{M,\min} = d_M + \frac{h_M}{\tan(\beta_x)} \quad (2.55)$$

bestimmt. Der Durchmesser der Mikrozyklinder ist d_m und h_M die Höhe. In diesem Fall soll Licht ab einem Winkel von $\beta_x = 30^\circ$ ungestört ausgekoppelt werden. Der minimale Abstand ist entsprechend $\Delta_{M,\min} = 136,6 \mu\text{m}$. Die absolute Position und der Abstand zwischen den Zylindern ist in Abbildung 2.32 dargestellt. In z-Richtung werden die Zylinder immer näher zueinander positioniert. Abbildung 2.33 zeigt die simulierte Lichtstromdichte und Abbildung 2.34 die Auskopplung über die Länge der LGP mit der optimierten Verteilung. Die Lichtauskopplung ist, dank der optimierten Anordnung, weitestgehend homogen. Lediglich in der Nähe der LEDs sind leichte Hotspots und eine Inhomogenität in y-Richtung zu erkennen. Die Lichtstromdichte in diesem Bereich kann durch eine sinusförmige Dichteverteilung der Mikrostrukturen in y-Richtung homogenisiert werden [70]. Bei einer Verwendung der LGP als Flächenstrahler mit einem Rahmen, ist dies zumeist nicht notwendig.

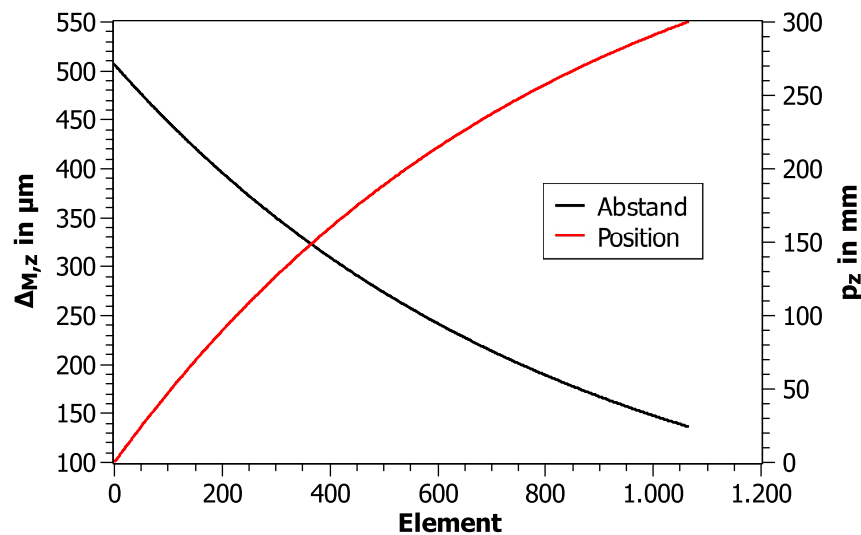


Abb. 2.32: Absolute Position (rot) und Abstand (schwarz) der Mikrozyklinder in der optimierten Verteilung. Der Abstand der Mikrozyklinder nimmt mit steigendem Abstand von der einkoppelnden Kante in z-Richtung ab.

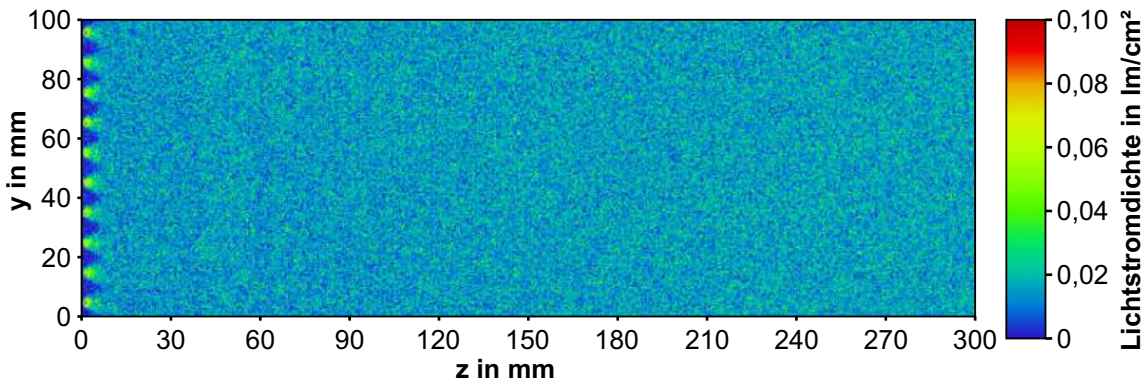


Abb. 2.33: Simulierte, homogene Lichtstromdichte auf der strukturierten Fläche einer LGP mit Mikrozyklindern in der berechneten Anordnung. Links sind in der Nähe der LEDs Hotspots zu erkennen.

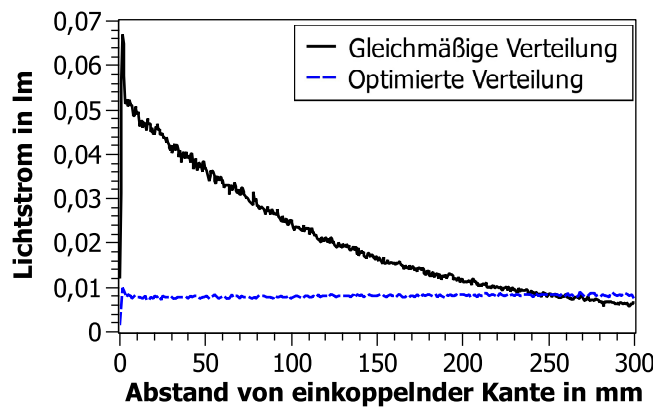


Abb. 2.34: Ausgekoppelter Lichtstrom aus der strukturierten Fläche einer LGP mit Mikrozyklindern in der berechneten Anordnung über die Länge der LGP. Die Lichtauskopplung der LGP mit der optimierten Verteilung (blau gestrichelt) ist entlang der z-Richtung homogen. Der gesamte ausgekoppelte Lichtstrom ist bei der LGP mit regelmäßiger Anordnung (schwarz) höher.

Zur Realisierung der Verteilung in der Simulationssoftware wird die Verteilung mit Hilfe eines selbsterstellten Octave-Scripts durch ein Polynom angenähert. Durch eine optimierte Verteilung nimmt der gesamte ausgekoppelte Lichtstrom ab, wie in Abbildung 2.34 gut zu erkennen ist. Dies ist immer dann zu erwarten, wenn die Anzahl der Mikrostrukturen in der optimierten Verteilung kleiner ist, als die in der regelmäßigen Anordnung. Es muss also in der Anwendung zwischen Effizienz und homogener Lichtstromdichte eines Flächenstrahlers abgewogen werden.

Eine weitere Möglichkeit die Lichtstromdichte gleichmäßiger zu gestalten, ist die Änderung der Form der LGP. Der Abstand $\Delta_{M,z}$ der Mikrostrukturen bleibt dabei konstant, muss aber auf Maße der LGP abgestimmt werden. In diesem Fall ist er $\Delta_{M,z} = 500 \mu\text{m}$. Die LGP wird keilförmig gestaltet und so der Ausbreitungswinkel ϑ_x zur z-Achse kontinuierlich

vergrößert [78, 79]. Das Prinzip ist in Abbildung 2.35 skizziert. In Abbildung 2.36 und 2.37 ist zu erkennen, dass mit dem Ansatz eine homogenere Lichtstromdichte erreicht wird. Allerdings ist diese weniger gleichmäßig, als jene, die durch eine angepasste Verteilung der Mikrostrukturen erreicht werden kann. Im Bereich $60\text{ mm} \leq z \leq 120\text{ mm}$ ist die Lichtstromdichte erkennbar größer als auf der restlichen LGP (ausgenommen die Hotspots in der Nähe der LEDs). Darüber hinaus wird zum einen die Richtung, in die Licht ausgekoppelt wird, stark beeinflusst und zum anderen ändert sich das Winkelspektrum in der LGP so, dass ein Teil der Lichtstrahlen nicht mehr durch Totalreflexion geführt werden kann. Sie koppeln auf der strukturierten Seite und der gegenüberliegenden Seite aus. Vorteil dieser Lösung ist jedoch, dass das Licht, welches in die LGP eingekoppelt wird, auch vollständig wieder ausgekoppelt wird (bei perfekt spitzer LGP). Unter Umständen kann eine Effizienzsteigerung im Vergleich zu einer LGP mit konstanter Höhe und gleichmäßiger Strukturverteilung erzielt werden. Denkbar ist zudem eine angepasste Abnahme der Höhe $d(z)$ der LGP, die von der Keilform abweicht, um die Homogenität der Lichtstromdichte zu erhöhen. Dieser Ansatz wird jedoch nicht weiter verfolgt. Ziel dieser Arbeit ist es eine LGP mit einseitiger, gerichteter Lichtauskopplung zu entwickeln. Der erwartbare Einfluss auf die Auskoppelrichtung des Lichts und die zusätzliche Auskopplung auf der unstrukturierten Seite ist daher nicht wünschenswert.

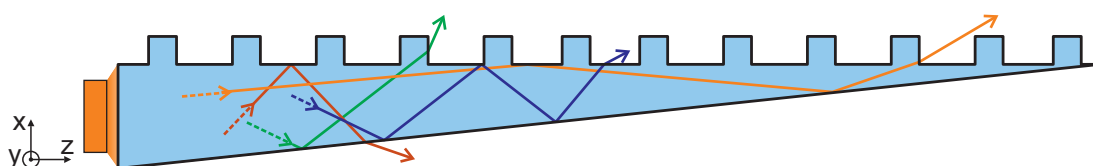


Abb. 2.35: Durch die Keilform der LGP ändert sich der Ausbreitungswinkel der Lichtstrahlen bei jedem Treffen auf die unstrukturierte Seite (unten). Dadurch werden Lichtstrahlen mit einem flachen Ausbreitungswinkel (orange) eher ausgekoppelt. Strahlen mit großem Ausbreitungswinkel können nicht mehr durch Totalreflexion geführt werden und koppeln an den Plattenoberflächen auf der strukturierten (blau) und unstrukturierten Seite (rot) aus, wenn sie nicht stattdessen auf eine Mikrostruktur treffen (grün).

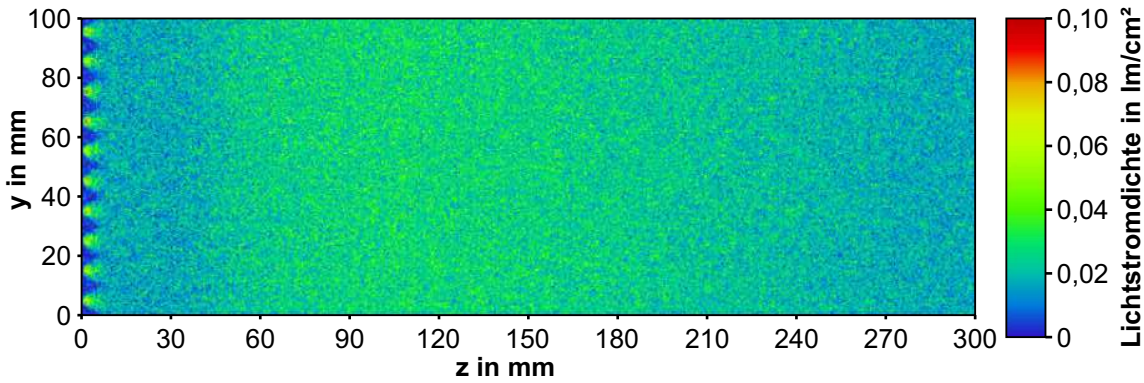


Abb. 2.36: Simulierte Lichtstromdichte auf der strukturierten Fläche einer keilförmigen LGP mit Mikrozyklindern. Die Lichtstromdichte weist ein erkennbares Maximum um $z=120$ mm und in der Nähe der LEDs (links) auf.

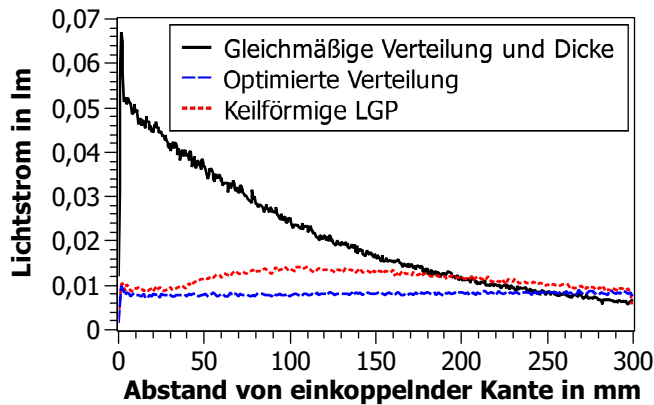


Abb. 2.37: Ausgekoppelter Lichtstrom aus der strukturierten Fläche von LGPs mit Mikrozyklindern über die Länge der LGP. Die Lichtstromdichte der keilförmigen LGP (rot gepunktet) ist gleichmäßiger als eine nicht optimierte LGP (schwarz). Im Vergleich zur LGP mit der optimierten Verteilung (blau gestrichelt) wird ein höherer Lichtstrom weniger gleichmäßig ausgekoppelt.

2.6 Zusammenfassung

Die Einkopplung von Licht einer beliebigen, homogen leuchtenden Fläche in eine LGP wurde mathematisch beschrieben und beispielhaft auf einen realistischen Aufbau eines Flächenstrahlers angewandt. Die Leitung des eingekoppelten Lichts in einem Lichtleiter mit Oberflächenrauheit wird mit Hilfe der Theorie gekoppelter Moden beschrieben. Durch die Erweiterung der Theorie auf makroskopische (multimoden) Lichtleiter mit Dämpfung einer spezifischen Mode wird gezeigt, dass sich durch eine Oberflächenrauheit das Winkelspektrum, unter dem sich Licht in einem makroskopischen Wellenleiter ausbreitet, ständig

ändert. Die damit einhergehende Änderung im Auskoppelverhalten mikrostrukturierter LGPs wurde praktisch verifiziert.

Die Auskopplung des Lichts aus einer LGP an Mikrostrukturen wurde allgemein diskutiert und anhand Mikrozyklindern genauer betrachtet und mathematisch beschrieben. Aus dem mathematischen Modell zur Lichtauskopplung wurde eine optimierte Verteilungsfunktion für lichtauskoppelnde Mikrostrukturen auf LGPs hergeleitet. Mit dieser kann Licht gleichmäßig über die gesamte Fläche des Lichtleiters ausgekoppelt werden. Sie stellt eine Grundlage für homogen leuchtende Flächenstrahler dar.

3 Simulation und Charakterisierung von mikrostrukturierten Flächenstrahlern

In dieser Arbeit werden einseitig strukturierte Flächenstrahler, bei denen die Lichtauskopplung auf der strukturierten Seite erfolgt, behandelt. In Abschnitt 2.1 wurde deren grundsätzlicher Aufbau und Funktionsweise erläutert (vgl. Abbildung 2.2). Für diese Art von strukturierten Flächenstrahlern können zwei optische Phänomene für die Lichtauskopplung genutzt werden: Brechung und Totalreflexion. Durch Brechung wird das Licht an der Fläche der Mikrostruktur, auf die es trifft, ausgekoppelt, während durch die Totalreflexion das Licht zunächst an einer Grenzfläche der Mikrostruktur so reflektiert wird, dass es an einer anderen Fläche gebrochen und ausgekoppelt wird. Abbildung 3.1 zeigt zwei Mikrostrukturen, die Licht durch Brechung bzw. durch Brechung und Totalreflexion auskoppeln.

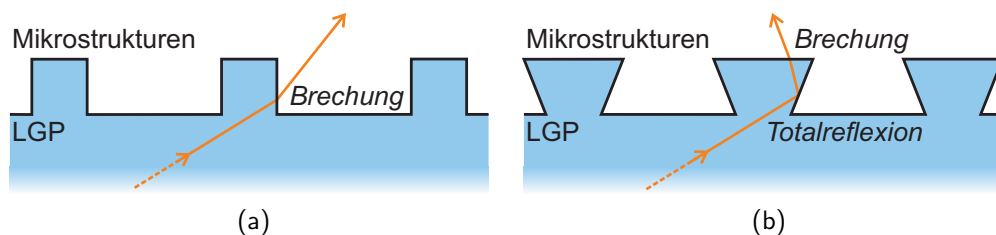


Abb. 3.1: Auskopplung von Licht an zylinderförmigen Mikrostrukturen durch Brechung an der Grenzfläche (a) und Änderung der Ausbreitungsrichtung des Lichts durch Totalreflexion und anschließende Auskopplung durch Brechung an hinterschnittenen, prismatischen Strukturen (b).

Die Auskopplung eines Lichtstrahls an einer Grenzfläche ist im Mikrometerbereich durch geometrische Optik gut beschreibbar. So kann eine erste Abschätzung der für eine gewünschte Abstrahlrichtung notwendigen Geometrie erfolgen. Insbesondere kann eine erste Schätzung für den Flankenwinkel der Struktur sowie die benötigten Mechanismen zur Auskopplung (Brechung, Totalreflexion) bestimmt werden. Wie in Abschnitt 2.5.1

erläutert, ist die Bestimmung der genauen Abstrahlcharakteristik eines mikrostrukturierten Flächenstrahlers bzw. die gewünschte Geometrie der Mikrostruktur sehr komplex. Daher wird der erste Entwurf einer Mikrostruktur mittels optischer Strahlverfolgung (optical ray-tracing) simuliert, um von da aus einen optimierten Flächenstrahler mit der gewünschten Abstrahlcharakteristik zu entwerfen.

Zur Bewertung und Optimierung der optischen Eigenschaften von Flächenstrahlern, wird deren ausgekoppelte Lichtstärke als Lichtstärkeverteilungskurve (LVK) dargestellt und Kennwerte eingeführt, die sowohl die Abstrahlcharakteristik als auch die subjektive Wahrnehmung der Durchsicht durch einen Flächenstrahler widerspiegeln. Sie bauen auf vorhergegangener Forschung auf [16]. Die Bewertung der Durchsicht wird nur auf hergestellte Flächenstrahler angewandt, da keine zufriedenstellende Simulation dieser Charakteristik möglich war. Die Messaufbauten zur Erfassung der optischen Eigenschaften hergestellter Flächenstrahler werden am Ende des Kapitels vorgestellt.

In allen Darstellungsformen und Kennwerten werden Fehler bzw. Abweichungen angegeben, sofern sie in der angegebenen Größenordnung von Bedeutung sind. Der Fehler bzw. die Abweichung wird entweder absolut angegeben oder berechnet sich relativ als [80]

$$\delta_F = \left| \frac{\text{Messwert} - \text{wahrer Wert}}{\text{wahrer Wert}} \right|. \quad (3.1)$$

3.1 Simulation mikrostrukturierter Flächenstrahler

Die eingesetzte Software Zemax OpticStudio erlaubt die Simulation von Lichtstrahlen, welche mit geometrischen Objekten aus verschiedensten Materialien interagieren. Die Objekte werden tabellenbasiert definiert und zusammengesetzt oder aus einem Programm zur computergestützten Entwicklung (computer assisted design, CAD) von dreidimensionalen Objekten importiert. Zur Entwicklung komplexer Modelle wird in dieser Arbeit die Software FreeCAD [81] verwendet. Die Objekte und Lichtquellen in Zemax OpticStudio werden in einem virtuellen, dreidimensionalen Raum positioniert. Detektoren werden als Objekte in diesem Raum platziert, um Lichtstrahlen zu analysieren, die auf sie treffen.

Der virtuelle Versuchsaufbau in dieser Arbeit lässt sich in vier Bereiche unterteilen, welche im Folgenden genauer beschrieben werden. Mittelpunkt des Aufbaus ist die *LGP*. In diese wird Licht aus *Lichtquellen* eingekoppelt. Das Licht wird an *Mikrostrukturen* ausgekoppelt und von *Detektoren* erfasst. Dabei stellt die Simulation langer mikrostrukturierter Flächenstrahler eine besondere Herausforderung dar, auf die im Folgenden noch genauer eingegangen wird.

3.1.1 Lichtleitende Platte

Die LGP besteht bei den entwickelten Flächenstrahlern dieser Arbeit aus PMMA (Plexiglas 0Z024 und 7N von *Evonik*) oder PDMS (RT 601 von der Wacker Chemie AG, München, im Folgenden *Wacker*). Für PMMA werden allgemeine Materialdaten mit Zemax OpticStudio mitgeliefert. Sie enthalten wellenlängenabhängige Brechzahl und Dämpfung. PDMS hingegen wird manuell definiert. Aufgrund der sehr geringen Dämpfung und stabilen Brechzahl im optischen Bereich ($\pm 0,01$) wird vereinfachend eine konstante Brechzahl ($n_{\text{PDMS}} = 1,41$) ohne Dispersion und Dämpfung angenommen [56].

Auf eine Seite der LGP wird ein regelmäßiges Array aus Mikrostrukturen platziert. Bestehen die Strukturen aus einem Photolack, werden Materialeigenschaften entsprechend angepasst und die zusätzliche Lackschicht zwischen Mikrostrukturen und LGP als rechteckiges Volumen eingefügt.

Vor eine Stirnfläche der LGP werden Lichtquellen in Form von LEDs platziert. Die Anzahl richtet sich nach der Breite der LGP. Die leuchtende Fläche der LEDs und die entsprechende Stirnfläche werden außerhalb der LGP von einem ideal absorbierenden Gehäuse umgeben. Dies geschieht, um an der Stirnfläche reflektierte oder wieder austretende Lichtstrahlen sowie Lichtstrahlen aus der LED, welche an der LGP vorbei strahlen würden, zu absorbieren.

Die Seitenflächen der LGP, die parallel zur Ausbreitungsrichtung des Lichts ausgerichtet sind, werden in der Simulation mit ideal reflektierendem Material beschichtet. Dies simuliert eine endlos breite LGP. Dadurch kann für jede simulierte LGP die gleiche Breite festgelegt werden, was die Simulation verschiedener LGPs vereinfacht. Die Breite wird mit $l_y = 5 \text{ cm}$ klein gewählt, um lange Simulationszeiten und zu hohe Ansprüche an die Simulationshardware zu vermeiden. Die Stirnseite gegenüber den LEDs wird ideal absorbierend beschichtet, um ein Austreten des Lichts an dieser Fläche zu verhindern. Eine Skizze des Versuchsaufbaus ohne Detektoren ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

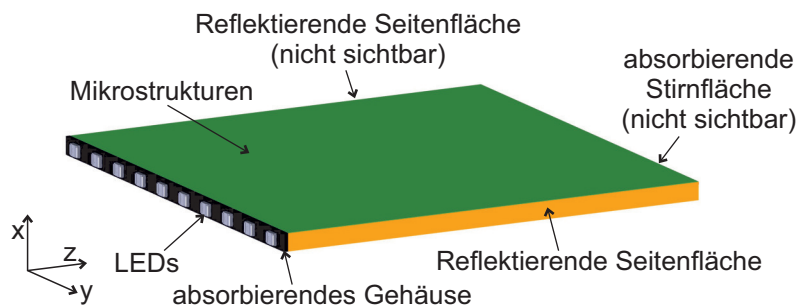


Abb. 3.2: Grundsätzlicher Simulationsaufbau eines mikrostrukturierten Flächenstrahlers in Zemax OpticStudio (Detektoren nicht eingezeichnet).

3.1.2 Lichtquelle

Zur Simulation der Lichtquelle werden LED-Modelle von *Osram* verwendet. Sie sind gut dokumentiert und es werden Simulations- und CAD-Daten für Zemax OpticStudio [82] zur Verfügung gestellt. Simuliert werden 200.000 Strahlen je LED.

Die optischen Eigenschaften der Materialien, aus denen die LEDs bestehen, sind nicht in den zur Verfügung gestellten Modellen enthalten und werden entsprechend ergänzt. Als Beispiel wird die LED TOPLED E3014 von *Osram* betrachtet. Sie weist den typischen Aufbau einer LED in SMD-Bauweise (oberflächenmontiertes Bauelement, surface mounted device) auf. Im Folgenden werden die drei relevanten Oberflächen der LED genauer beschrieben und in Abbildung 3.3 dargestellt. Das verwendete 3D-Modell basiert auf von *Osram* zur Verfügung gestellten CAD-Daten.

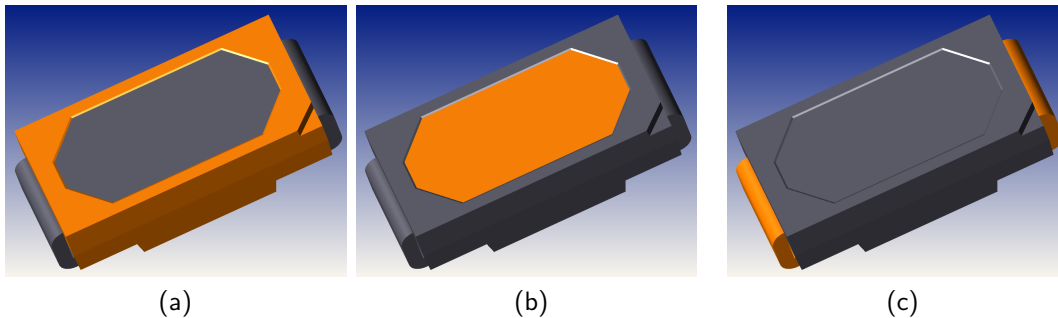


Abb. 3.3: LED-Modell mit den markierten Flächen: (a) Gehäuse, (b) Phosphor-/Silikonschicht und (c) elektrische Anschlüsse.

Das Gehäuse wird aus hoch reflektierendem, weißem Gussmaterial hergestellt [83]. Die Reflexion wird unter Berücksichtigung der Kenndaten kommerziell erhältlicher Materialien als 90 % angenommen [84, 85].

Die leuchtende Fläche der LED besteht üblicherweise aus einer Phosphorschicht bedeckt mit transparentem Silikon [83]. Untersuchungen von Zhu et al. [86] liefern Daten zur Reflexion einer Phosphorschicht im Wellenlängenbereich des blauen, grünen und roten Lichts. Im blauen Spektrum wird die Energie vom Phosphor absorbiert und im gelben Spektrum emittiert. Die daraus resultierende Frequenzverschiebung findet in der Simulation keine Berücksichtigung. Es werden die in Tabelle 3.1 angegebenen, vereinfachten Werte verwendet.

Tab. 3.1: Reflexion und Transmission an der Phosphorschicht der simulierten LED. Abgeleitet von [86].

| Wellenlänge | Reflexion | Transmission |
|-------------|-----------|--------------|
| 470 nm | 34 % | 30 % |
| 520 nm | 40 % | 42 % |
| 625 nm | 43 % | 44 % |

Als Silikonbeschichtung des Phosphors kommen Methyl- und Phenylsilikone zum Einsatz [83]. In Orientierung an dem für die LED-Herstellung verwendeten Silikon OE-6630 von der Dow Corning Inc., Midland (heute DuPont de Nemours Inc., Wilmington) [87] wird von einer im optischen Bereich konstanten Transmission von 99,1 % ausgegangen und zur Vereinfachung angenommen, dass im Material keine Absorption stattfindet. Entsprechend werden in Tabelle 3.1 die Werte für Reflexion und Transmission mit 99,1 % multipliziert und die Reflexion um 0,9 % erhöht.

Als elektronischer Anschluss für Bauteile wird oft eine Legierung aus 58 % Eisen und 42 % Nickel verwendet [88]. Daten zu optischen Eigenschaften dieser Legierung sind nicht öffentlich verfügbar. Aufgrund des optischen Eindrucks des Materials wird das Reflexionsverhalten durch das einer Aluminium-Schicht angenähert. Hierzu kann auf den Beschichtungskatalog von Zemax OpticStudio zurückgegriffen werden. Aluminium ist dort mit einer Brechzahl von $n = 0,82 - j5,99$ angegeben.

Die Reflexionseigenschaften der Oberflächen werden in der Simulationssoftware durch Beschichtungen definiert. In Anhang C sind die für LEDs benötigten Beschichtungen definiert.

3.1.3 Mikrostrukturen

Je nach geometrischer Form können die Mikrostrukturen direkt in Zemax OpticStudio entworfen werden. Zur Verfügung steht ein rudimentärer CAD-Editor, der die einfache Erstellung von Zylindern oder Kegelstümpfen ermöglicht. Komplexere Strukturen erfordern den Einsatz eines leistungsfähigeren CAD-Programms. Dies ist vor allem dann notwendig, wenn Strukturen möglichst nah an hergestellte Muster angenähert werden. Während ideale Geometrien die Vorgabe für die Herstellung sind und den optischen Vorgaben in allen Punkten genügen, weichen hergestellte Systeme oft von den Vorgaben ab. Diese Abweichungen entstehen durch die beschränkte Formgenauigkeit der eingesetzten Herstellungsverfahren (vgl. Kapitel 4) und sind nicht immer vorherzusehen. Um den Einfluss verschiedener Herstellungsparameter bestimmen zu können und die Mikrostrukturen auf

die Herstellungsprozesse zu optimieren, müssen in der Simulation herstellungsbedingte Eckradien, Abformschrägen und weitere Abweichungen von der idealen Geometrie nachgebildet werden. Zur Anschauung ist in Abbildung 3.4 eine in Zemax OpticStudio erstellte ideale Mikrostruktur vergleichend mit einem in FreeCAD erstellten Modell der entsprechend hergestellten Struktur dargestellt. Der Entwurf konkreter Mikrostrukturen wird in Kapitel 5 behandelt.

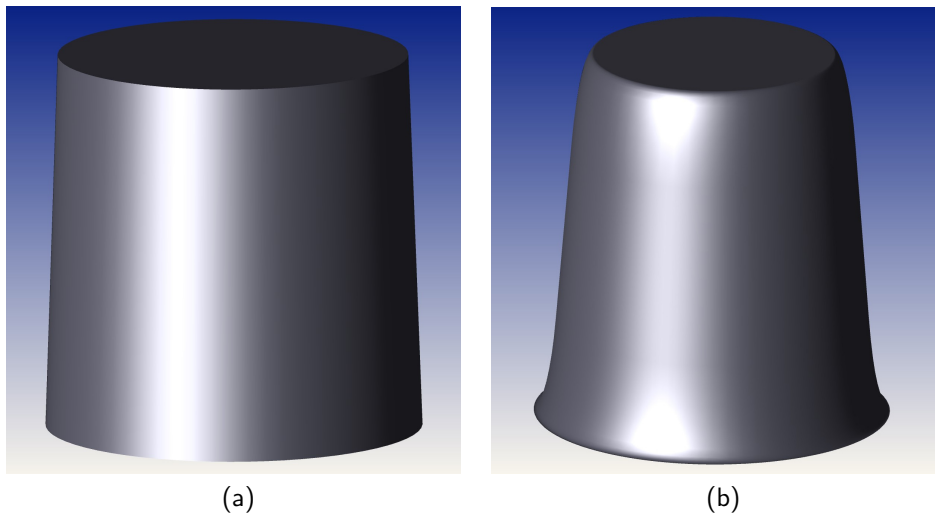


Abb. 3.4: 3D-CAD-Modell eines idealen (a) und hergestellten (b) Mikrozyklinders mit einer Höhe von ca. 25 μm . Die hergestellte Struktur weicht vor allem in der Form der Flanke und entsprechend dem Radius der Deckelfläche von dem idealen Modell ab.

3.1.4 Detektoren

Der gesamte Flächenstrahler wird von einem kugelförmigen Flächendetektor umschlossen. Dieser misst den Lichtstrom und den Ausbreitungswinkel der ausgekoppelten Lichtstrahlen (unabhängig von der Position, an der die Lichtstrahlen auf den Detektor treffen). Der Detektor besteht aus ideal absorbierendem Material, um den Versuchsaufbau optisch abzuschließen. Zur Erfassung des ausgekoppelten Lichtstroms aus einer bestimmten Fläche, werden bei Bedarf transparente, rechteckige Detektoren über dieser positioniert. Zur Bestimmung des eingekoppelten Lichtstroms wird in der LGP ein ideal absorbierender Detektor 25 μm hinter der einkoppelnden Stirnfläche platziert, der den gesamten Platten Querschnitt ausfüllt. Das Licht, das sich am Ende der LGP noch in der Platte befindet, wird ebenfalls von einem Detektor erfasst, der den gesamten Querschnitt der LGP ausfüllt. Die Simulation ist weitestgehend durch selbst erstellte Makros automatisiert. Die Daten der Detektoren werden als Textdatei ausgegeben und mittels der Software LibreOffice Calc von der Stiftung The Document Foundation, Berlin ebenfalls automatisiert ausgewertet.

3.1.5 Simulation langer Flächenstrahler

Bei der Simulation von langen mikrostrukturierten Flächenstrahlern bzw. einer großen Anzahl von Mikrostrukturen treten ohne weitere Vorkehrungen Probleme in Zemax OpticStudio auf. Trifft ein Lichtstrahl auf zu viele Grenzflächen, kann der Strahlenverlauf nicht vollständig simuliert werden [89, 90]. Die Simulation eines Lichtstrahls, der durch eine Grenzfläche transmittiert bzw. reflektiert wird, geschieht rekursiv in einer Baumstruktur. Dabei kann sich ein Lichtstrahl an einer Grenzfläche in mehrere Kind-Strahlen aufspalten. Jeder Knotenpunkt in einem Strahlenpfad bzw. die Generation von Strahlen wird als *Intersection* bezeichnet. Jeder Strahlenabschnitt als *Segment*. Es wird immer erst ein Strahlenpfad in der Baumstruktur bis zum Unterschreiten des Grenzwerts der Lichtstärke eines Strahls zu Ende simuliert, bevor der nächste Strahlenpfad berechnet wird. Der Grenzwert wird relativ zur anfänglichen Lichtstärke des Lichtstrahls als σ_v angegeben. In den Simulationen dieser Arbeit ist $\sigma_v = 0,5\%$. Die Baumstruktur der Strahlensimulation ist in Abbildung 3.5 verbildlicht.

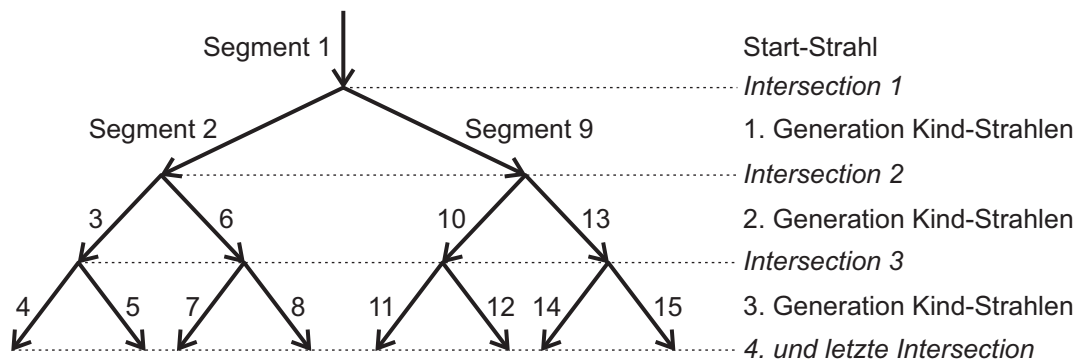


Abb. 3.5: Baumstruktur der Simulation eines Lichtstrahls in Zemax OpticStudio, der mehrfach gespalten wird. Die Strahlenabschnitte werden als Segmente bezeichnet. Sie sind in der Reihenfolge nummeriert in der sie berechnet werden und bis zur zweiten Intersection zusätzlich mit dem Wort „Segment“ gekennzeichnet. Eine *Intersection* bezeichnet eine Ebene von Knotenpunkten. An dieser beginnt eine neue Generation von Kind-Strahlen. Basierend auf [90].

Die Anzahl der Intersections ist in der Simulationssoftware auf 4.000 begrenzt und die Anzahl der Segmente auf 2.000.000. Die Segment-Nummer ist neben dem jeweiligen Strahlenabschnitt in Abbildung 3.5 angegeben. Die Reihenfolge der Nummern bezeichnet die Reihenfolge der Simulation der Strahlenabschnitte. Das Fehlerpotential einer zu geringen Anzahl von simulierbaren Segmenten wird an einem Beispiel deutlich: Die Anzahl der simulierten Segmente sei auf 8 begrenzt und bei dem ersten Knotenpunkt teile sich die Lichtstärke des Start-Strahls (Segment 1) gleichmäßig auf beide Kind-Strahlen (Segment 2 und 9) auf. Damit bleibt die Hälfte der Lichtstärke, die sich zu Beginn

der Simulation im System befindet unberücksichtigt. In der Anwendung äußert sich dies Beschränkung beispielsweise darin, dass eine repräsentative, photolithographisch strukturierte LGP⁴ mit einer Höhe von 2 mm, und einer Breite von 10 cm lediglich bis zu einer Länge von 10 cm fehlerfrei simuliert werden kann.

Das Problem kann umgangen werden ohne σ_v erhöhen zu müssen. Der Flächenstrahler wird zerteilt und abschnittsweise simuliert. Die Lichtstrahlen am Ende des jeweiligen Abschnitts der LGP werden von einem Detektor erfasst. Wird eine Lackschicht auf der LGP simuliert, wird für diese ein separater Detektor eingesetzt. Gleiches gilt für weitere Platten und Schichten im Aufbau entsprechend. Die erfassten Strahlen-Daten werden gespeichert und in einer neuen Simulation als Lichtquelle(n) verwendet. Auf diese Weise können sehr lange Flächenstrahler simuliert werden. Eine Grenze für dieses Verfahren stellt der verfügbare Speicherplatz dar. Der notwendige Speicherplatz für die Simulation eines wie oben beschriebenen Flächenstrahlers mit einer Länge von 50 cm beträgt über 1 TB.

Wenn trotz Aufteilung der LGP eine Simulation des gesamten Flächenstrahlers nicht möglich ist, kann zumindest dessen Effizienz bestimmt werden. Diese wird als Leuchtenbetriebswirkungsgrad (light output ratio, LOR) beschrieben und stellt den Anteil des ausgekoppelten Lichtstroms am Gesamtlichtstrom der Lichtquelle(n) dar. Er wird genauer in Abschnitt 3.2.1 erklärt. Zur Näherung des simulierten LOR wird er mit der Software SciDAVis [91] über die LGP-Länge ℓ_z durch eine exponentielle Funktion des beschränkten Wachstums in der Form

$$f(x) = a \cdot e^{-b \cdot x} + c \quad (3.2)$$

mit dem Levenberg-Marquardt-Algorithmus angenähert. In Abbildung 3.6 ist beispielhaft der LOR eines Flächenstrahlers bestehend aus einer 2 mm hohen LGP aus PMMA mit 50 μm hohen und breiten Zylindern über die Länge ℓ_z aufgetragen. Der Graph zeigt die gute Übereinstimmung zwischen simuliertem und genähertem LOR. Für die Länge $\ell_z = 600 \text{ mm}$ beträgt der relative Fehler des genäherten LOR $\delta_F = 2,48 \%$.

⁴Die LGP besteht aus PMMA und ist mit 50 μm hohen und breiten Zylindern in Photolack strukturiert, die in einem regelmäßigen, rautenförmigen Gitter mit einem Abstand von 150 μm in z-Richtung angeordnet sind.

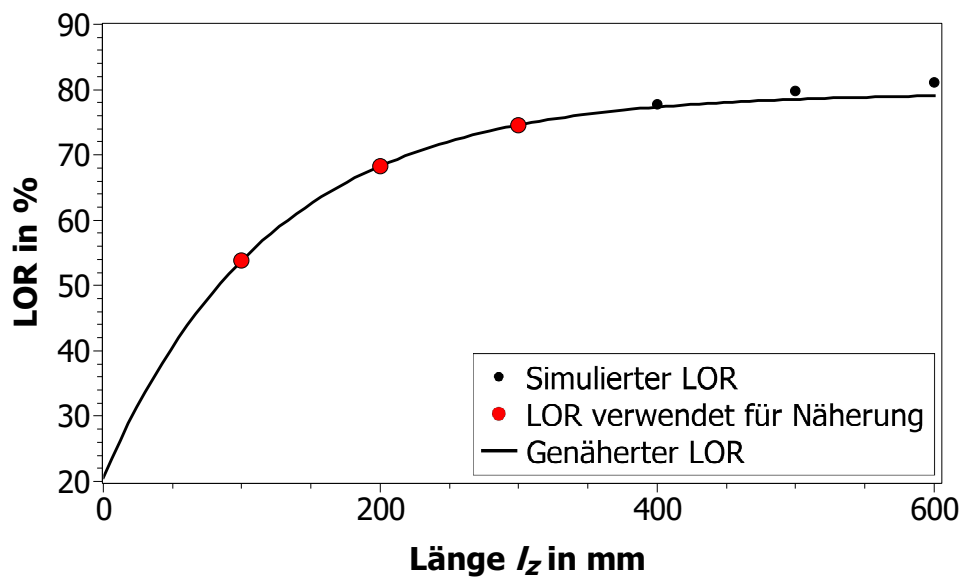


Abb. 3.6: Simulierter LOR eines Flächenstrahlers mit einer LGP aus PMMA mit 50 μm -Zylindern als schwarze Punkte aufgetragen über die Länge der LGP. Aus den ersten drei LOR-Werten (rot) wird eine Näherung für die Bestimmung des LOR nach dem letzten verwendeten Wert ($l_z > 300$ mm) berechnet (schwarze Linie).

3.2 Optische Kennwerte mikrostrukturierter Flächenstrahler

Für die Bewertung von mikrostrukturierten, transparenten Flächenstrahlern sind zwei Eigenschaften von Bedeutung. Zum einen die Abstrahlcharakteristik: In welche Richtung welche Lichtstärke ausgekoppelt wird. Zum anderen die subjektive Durchsicht: Wie störend und auffällig die Mikrostrukturierung bei der Durchsicht von einer betrachtenden Person wahrgenommen wird. Die Kennwerte der Abstrahlcharakteristik werden für simulierte und hergestellte Flächenstrahler angewendet. Der Kennwert der subjektiven Durchsicht ist nur an hergestellten und nicht an simulierten Flächenstrahlern zu ermitteln. Die Simulationssoftware bietet zwar auch die Möglichkeit der Berechnung der Abbildungsqualität für optische Systeme mittels der Modulationstransferfunktion (MTF), allerdings nur für sequentielle Systeme. Bei diesen trifft jeder Strahl in fester Reihenfolge und nur einmal auf jede Grenzfläche [92]. Ein mikrostrukturierter Flächenstrahler ist jedoch ein nicht-sequentielles, optisches System.

3.2.1 Abstrahlcharakteristik

Die Lichtauskopplung aus dem Flächenstrahler wird durch die zweidimensionale Lichtstärkeverteilungskurve und dem davon abgeleiteten Auskoppelbereich charakterisiert. Zudem wird sie durch die einseitige Auskopplung und den Leuchtenbetriebswirkungsgrad beschrieben.

Lichtstärkeverteilungskurve und Auskoppelbereich

In der Simulation wird die ausgekoppelte Lichtstärke I_v und ihre Auskoppelrichtung in drei Dimensionen erfasst. Um diese verständlich darzustellen, wird sie, ähnlich wie in der Architektur und dem Lichtdesign üblich [93], zu einer Darstellung als LVK in zwei Dimensionen vereinfacht. Dargestellt wird die zweidimensionale LVK wie im Beispiel in Abbildung 3.7. In der Mitte der Darstellung befindet sich der mikrostrukturierte Flächenstrahler. Das LED-Licht wird an der, mit einem Pfeil gekennzeichneten, Seite in die LGP eingekoppelt. Die Einkopplung geschieht von unten. Die Struktur ist ebenfalls angedeutet und befindet sich auf der linken Seite. Die Lichtstärke wird in dieser Arbeit bei der Darstellung einer LVK als $I_{v,rel}$ normiert auf 1 aufgetragen. Bei vergleichenden Darstellungen ist eine der verglichenen Kurven auf 1 normiert. Die restlichen Kurven sind dann, soweit möglich, relativ zu dieser Kurve skaliert. Der Winkel zur Beschreibung der Richtung des ausgekoppelten Lichts zählt von einer Auskopplung senkrecht nach oben (0°) über eine waagerechte Auskopplung nach links (senkrecht aus der Plattenoberfläche; 90°) bis 360° um die LGP herum. Bei der Bewertung der einseitigen Auskopplung aus Flächenstrahlern wird ebenfalls auf diese simulierte bzw. gemessene Verteilung zurückgegriffen.

Wird mit der zweidimensionalen LVK eine dreidimensionale Lichtstärkeverteilung abgebildet, so wird diese auf die Schnittfläche in der x-z-Ebene des Lichtkegels, der aus dem Flächenstrahler austritt projiziert. Um den räumlichen Charakter der Lichtauskopplung zu berücksichtigen, ist die zweidimensionale LVK jedoch kein einfacher Schnitt durch den Lichtkegel. Die Lichtstärke aller Lichtstrahlen, die in einem Auskoppelwinkel β zur LGP-Oberfläche austreten, werden gemittelt und dieser Wert dem entsprechenden Winkel β zugeordnet oder anders ausgedrückt: Die LVK aller Schnittebenen entlang des Winkels φ auf der LGP-Oberfläche (y-z-Ebene, vgl. Abbildung 3.8) werden gemittelt. Abbildung 3.7 zeigt die so erstellte zweidimensionale LVK.

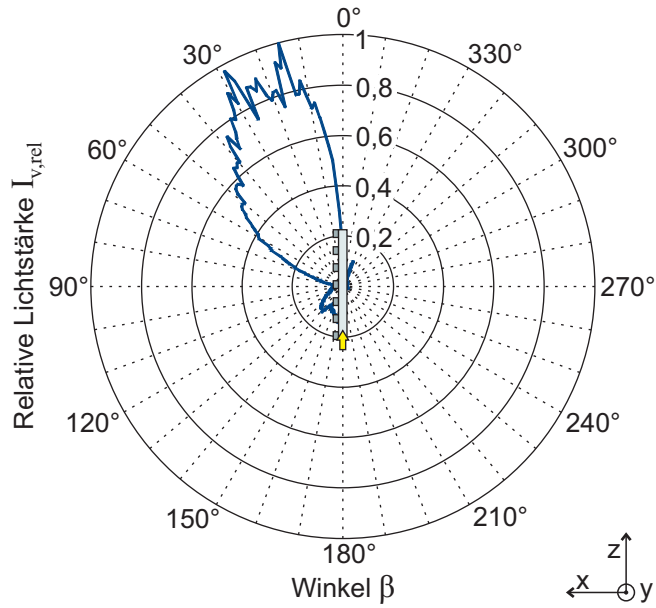


Abb. 3.7: Simulierte zweidimensionale Lichtstärkeverteilungskurve eines Flächenstrahlers mit Mikrozyklindern. Das LED-Licht wird von unten eingekoppelt (gelber Pfeil) und hauptsächlich auf der strukturierten Seite (links) ausgekoppelt.

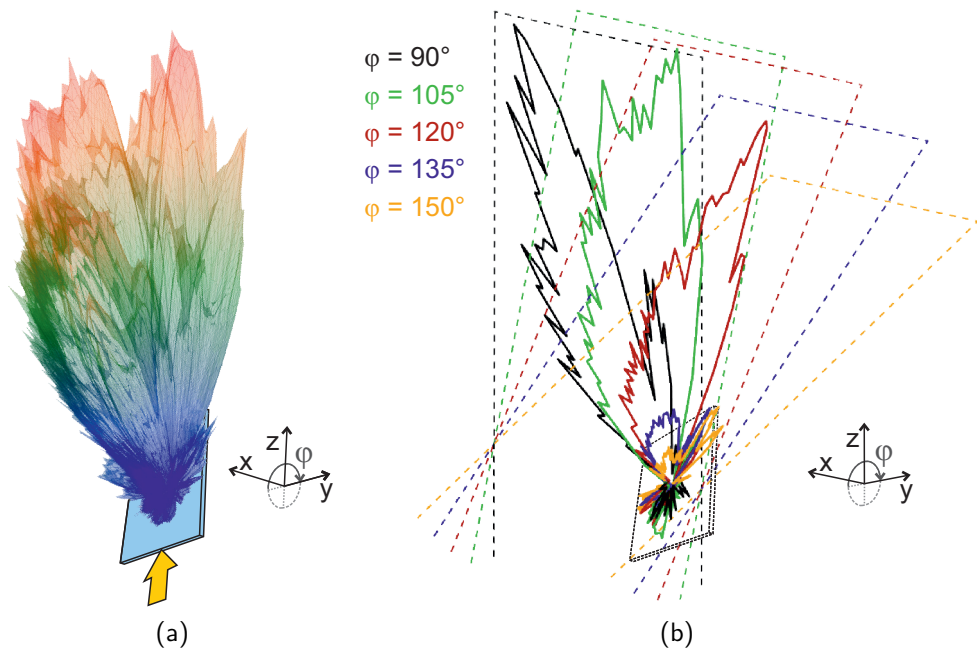


Abb. 3.8: Dreidimensionale Lichtstärkeverteilung eines mikrostrukturierten Flächenstrahlers (a) und einige Schnittebenen entlang φ (b).

Bei gefertigten Mustern wird die LVK mittels eines automatisierten Messaufbaus erfasst. Der vollständige Flächenstrahler mit einem matt schwarzen Rahmen und LEDs wird über einem motorisierten Rotationstisch (CR1/M-Z7K der Thorlabs Inc., Newton, im

Folgenden *Thorlabs*) befestigt. An diesem Rotationstisch ist ein optischer Leistungssensor (S120C Silicon Sensor von *Thorlabs*) mit einem Abstand von 15 cm zum Mittelpunkt des Aufbaus positioniert. Der Sensor wird über den Rotationstisch in 5°-Schritten in einer Ebene, auf der halben Höhe der LGP, um den leuchtenden Flächenstrahler bewegt, während die gemessene Leistung mit einem Leistungsmesser (PM100D von *Thorlabs*) im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 1000 nm aufgenommen wird. Nachdem der Sensor die Hälfte seines Weges (180°) zurückgelegt hat, muss der Flächenstrahler im Aufbau manuell gewendet werden, um eine Kollision mit den Anschlüssen der LEDs und dem Messaufbau zu vermeiden. Entsprechend den Abmessungen des Messaufbaus ist die Länge der zu vermessenden Flächenstrahler auf die Länge $\ell_z = 10$ cm beschränkt.

Der Messablauf wird in der Software LabView von der National Instruments Corporation, Austin und die Auswertung in LibreOffice Calc automatisiert. Die Daten stehen nach der Messung und Auswertung als .ods-Datei und LVK-Diagramm zur Verfügung. Die Messungen werden in einem verdunkelten Labor durchgeführt. Abbildung 3.9 zeigt die Skizze des beschriebenen Messaufbaus. Eine mit diesem Aufbau gemessene LVK eines mikrostrukturierten Flächenstrahlers ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Im Vergleich zu simulierten LVKs weisen Messungen Störungen auf, zumindest der Rahmen des Flächenstrahlers trägt grundsätzlich zu einer unerwünschten Lichtstreuung bei. Dies ist bei der Interpretation der Messergebnisse stets zu berücksichtigen.

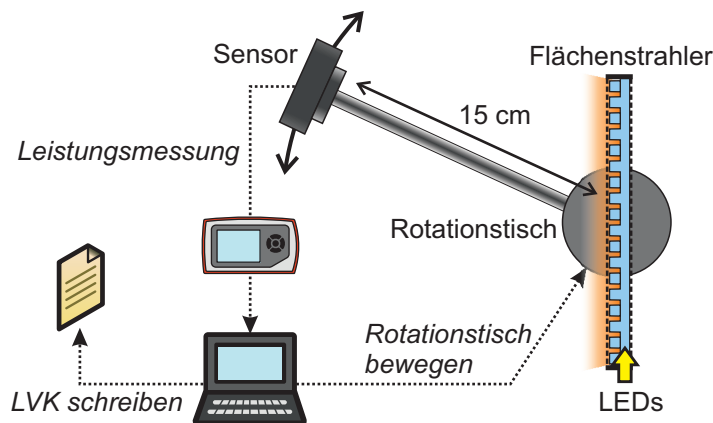


Abb. 3.9: Automatisierter Messaufbau zur Erfassung der LVK von mikrostrukturierten Flächenstrahlern. Der Rotationstisch fährt den Sensor um eine Seite des Flächenstrahlers. Die Strahlungsleistung, die aus dieser Seite auskoppelt, wird automatisch erfasst. Für die Vermessung der LVK der zweiten Seite wird der Strahler manuell gewendet und der Vorgang wiederholt. Die Messdaten werden als LVK gespeichert. Vorgänge sind *kursiv* gekennzeichnet.

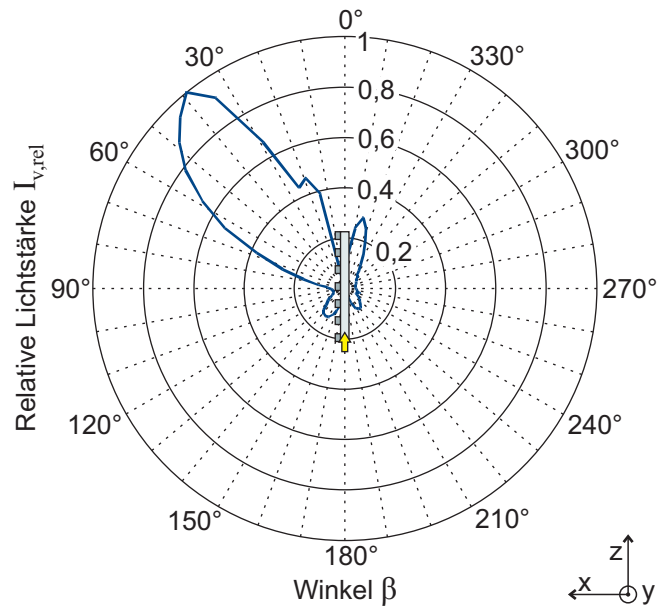


Abb. 3.10: Gemessene LVK eines mit 1 mm hohen Zylindern strukturierten Flächenstrahlers. Die Lichtauskopplung geschieht vorwiegend auf der strukturierten Seite (links). Die größte Lichtstärke koppelt unter einem Winkel von ca. 40° aus.

Die simulierte und gemessene LVK unterscheiden sich in folgenden Punkten:

- Die simulierte LVK fasst die gesamte Abstrahlung zusammen. Die gemessene LVK erfasst lediglich das Licht, das auf die Öffnung des Sensors fällt. Dieser befindet sich in nur einer Ebene und besitzt eine Apertur von 283 mm^2 ($\varnothing 9,5 \text{ mm}$).
- Der Sensor befindet sich nah an der Lichtquelle. Er weist nur eine geringe Öffnung auf, die die Winkelauflösung des Messaufbaus dennoch reduziert. Der Vergleich zwischen Simulation und Messung zeigt hier jedoch keine relevanten Abweichungen.
- Bei der Messung treten Reflexion und Streuung durch den Messaufbau und vor allem am Rahmen des Flächenstrahlers auf. Dies verstärkt eine rückseitige Auskopplung und eine an der Flächennormalen gespiegelte, teils diffuse Auskopplung des Lichts. Bei den in dieser Arbeit entwickelten Flächenstrahlern macht sich diese hauptsächlich in einer rückseitig oder entgegen der Einkoppelrichtung des Lichts gemessenen Auskopplung bemerkbar. Die Messdaten aus [16] zeigen, dass eine relative Abweichung der einseitigen Auskopplung bis $\delta_F = 33 \%$ allein durch Reflexionen an einem Rahmen verursacht werden kann.
- Bei der Simulation werden geringe Rauheiten und damit insbesondere die resultierende Modenmischung nicht berücksichtigt. Die LGP wird weitestgehend als ideal angenommen. In der Messung kann daher im Vergleich zur Simulation ein breiterer Auskoppelbereich sowie eine stärkere Auskopplung über die Länge des Flächenstrahlers auftreten.

Jeder Bereich der LVK, in dem die ausgekoppelte Lichtstärke über 50 % der maximalen ausgekoppelten Lichtstärke liegt, wird als Auskoppelbereich bezeichnet und ermöglicht eine erste, gut vergleichbare Bewertung der Abstrahlrichtung. Er wird durch die beiden Grenzwinkel des Bereichs und mit der Breite des Bereichs in Klammern angegeben. Die Definition des Auskoppelbereichs wird in Abbildung 3.11 an einer LVK erklärt. In dem dargestellten Beispiel ist er 5° - 53° (48°).

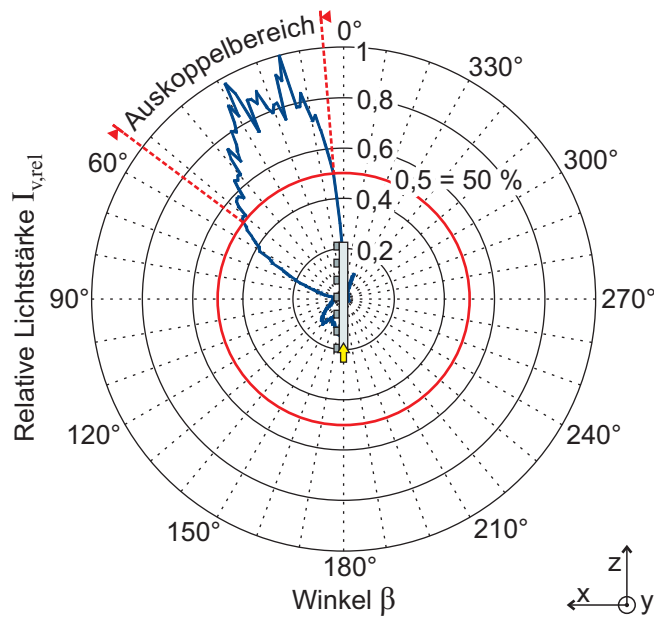


Abb. 3.11: Definition des Auskoppelbereichs an einer LVK (blau). Er liegt zwischen den Punkten an denen die Lichtstärke 50 % der maximalen Lichtstärke (rote Linie) beträgt. Der Bereich ist gepunktet rot eingefasst.

Leuchtenbetriebswirkungsgrad und einseitige Auskopplung

Als Leuchtenbetriebswirkungsgrad η_{LOR} wird der Anteil des ausgekoppelten Lichtstroms $\phi_{v,a}$ am Gesamtlichtstrom der Lichtquelle(n) $\phi_{v,LED}$ bezeichnet:

$$\eta_{LOR} = \frac{\phi_{v,a}}{\phi_{v,LED}} \quad (3.3)$$

Messtechnisch wird η_{LOR} für einige Muster in einer Ulbrichtkugel am FhG-IBP bestimmt. Eine Ulbrichtkugel (vgl. Abbildung 3.12) ermöglicht das Bestimmen des gesamten abgegebenen Lichtstroms $\phi_{v,a}$ einer Lichtquelle. Zu diesem Zweck wird die Lichtquelle mittig in der Kugel positioniert. Diese wird geschlossen und ist von innen mit diffus hochreflektierendem Material beschichtet. An einer Öffnung mit der Fläche A_u , die vor direkter Strahlung der Lichtquelle abgeschattet ist, wird die mittlere diffuse Beleuchtungsstärke $\bar{E}_{v,diff}$ ge-

messen. Unter der Berücksichtigung, dass ein Teil des Lichts abhängig vom Reflexionsgrad ρ von der Kugeloberfläche absorbiert wird, ist der abgegebene Lichtstrom [94]

$$\phi_{v,a} = \frac{\overline{E}_{v,\text{diff}} A_u (1 - \rho)}{\rho}. \quad (3.4)$$

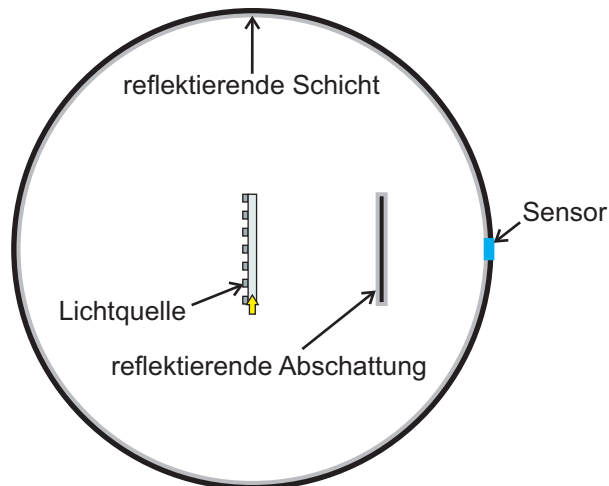


Abb. 3.12: Skizze einer Ulbrichtkugel zur Bestimmung des abgegebenen Lichtstroms einer Lichtquelle. Die Innenseite ist diffus reflektierend beschichtet. Der Sensor wird vor direkter Strahlung abgeschattet und misst die mittlere diffuse Beleuchtungsstärke der Lichtquelle. Basierend auf [94].

Die einseitige Auskopplung η_{eA} bezeichnet den Lichtstrom $\phi_{v,s}$, der auf der strukturierten Seite der Platte ausgekoppelt wird, in Relation zum Lichtstrom $\phi_{v,a}$, der insgesamt aus der Platte ausgekoppelt wird:

$$\eta_{eA} = \frac{\phi_{v,s}}{\phi_{v,a}} \quad (3.5)$$

Die einseitige Auskopplung kann messtechnisch nur für Flächenstrahler inklusive des einfassenden Rahmens und der Aufhängung in der Ulbrichtkugel ermittelt werden, welche stets eine Verringerung der einseitigen Auskopplung im Vergleich zu einem idealen, freistehenden Flächenstrahler zur Folge haben.

Die einseitige Auskopplung ist vor allem dann relevant, wenn nur das einseitig ausgekoppelte Licht genutzt werden kann. Daher wird der effektive Leuchtenbetriebswirkungsgrad η_{eLOR} eingeführt:

$$\eta_{eLOR} = \eta_{LOR} \cdot \eta_{eA} \quad (3.6)$$

Die einseitige Auskopplung wird für einige Muster ebenfalls am FhG-IBP vermessen. Zu diesem Zweck werden zwei Messungen des ausgekoppelten Lichtstroms in einer

Ulbrichtkugel vorgenommen. Bei jeder Messung ist eine andere Seite des Flächenstrahlers mit einem schwarzen Vlies bedeckt. Dies absorbiert den größten Teil des Lichts, das auf der abgedeckten Seite austritt. Verbleibende Reflexionen an der Vlies-Oberfläche müssen bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden. Die einseitige Auskopplung berechnet sich wie in Gleichung (3.5) beschrieben. $\phi_{v,a}$ wird dabei aus dem Lichtstrom $\phi_{v,s}$ der aus der strukturierten Seite ausgekoppelt wird und dem Lichtstrom $\phi_{v,us}$ der aus der unstrukturierten Seite ausgekoppelt wird gebildet.⁵

$$\phi_{v,a} = \phi_{v,s} + \phi_{v,us} \quad (3.7)$$

3.2.2 Subjektive Durchsicht

Wird der Flächenstrahler im Sichtbereich, z.B. in Fassaden, eingesetzt, so ist die subjektive Durchsicht von besonderer Bedeutung. Mit subjektiver Durchsicht ist gemeint, wie gut ein Mensch mit durchschnittlicher Sehfähigkeit Objekte durch den Flächenstrahler sieht, also wie sehr die Mikrostrukturen die Wahrnehmung der Objekte hinter dem Flächenstrahler stören. Hierbei spielt das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges eine wichtige Rolle. In einem Abstand von 250 mm kann ein Auge theoretisch Punkte mit einem Abstand von 75 μm zueinander unterscheiden [52]. Mit wachsendem Abstand nimmt die Auflösung des Auges ab. Liegt die Größe der Mikrostrukturen unter dieser Auflösung können die Strukturen entsprechend nicht mehr einzeln wahrgenommen werden. Eine Verringerung des Kontrastes in der Wahrnehmung durch einen mikrostrukturierten Flächenstrahler tritt auf Grund der Streuung des Lichts an den Strukturen dennoch auf. Hierdurch sind Details weniger gut zu erkennen.

Wie detailliert ein Objekt durch ein optisches Element wie z.B. durch eine Linse oder durch den hier relevanten Flächenstrahler dargestellt wird, wird zunächst objektiv ohne den Einfluss menschlicher Wahrnehmung durch die Modulationstransferfunktion (MTF) beschrieben [95]. Diese erfasst das Kontrastaufklärungsvermögen eines abbildenden Systems und wird vor allem für die Bewertung optischer Systeme in der Photographie eingesetzt. Sie gibt den gemessenen Schwarz-Weiß-Kontrast für Linienpaare pro Millimeter (lp/mm) an. Umso enger die Linienpaare liegen, umso höher muss die Kontrastaufklärung des optischen Systems sein, um die Linien noch unterscheiden zu können. Abbildung 3.13 verdeutlicht die Auswirkung einer beschränkten Kontrastaufklärung. Zum Mittelpunkt des dargestellten Siemenssterns können die Schwarz-Weiß-Segmente immer schwerer unterschieden werden.

⁵Nach Vorgabe vom FhG-IBP.

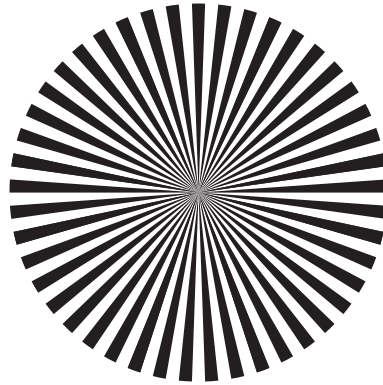


Abb. 3.13: Siemensstern. Zur Sternmitte nimmt die Dichte der Schwarz-Weiß-Wechsel (Linienpaare/Millimeter) zu. Die Segmente sind immer schwerer zu unterscheiden.

Um die MTF eines abbildenden Systems zu bestimmen, wird mit einer digitalen Kamera eine teiltransparente Platte einer schrägen Kante zwischen einem undurchsichtigen und einem durchleuchteten Bereich (vgl. Abbildung 3.14a) aufgenommen. Mit Hilfe dieser Aufnahme wird eine vierfach überabgetastete Kantenspreizfunktion (edge spread function, ESF) erfasst [96, 97]. Durch die ESF wird der Kontrastverlauf senkrecht zur Kante erfasst. Sie ist die eindimensionale gemittelte und normalisierte Projektion der linearen Leuchtdichteverläufe senkrecht zur Kante (vgl. Abbildungen 3.14a und 3.14b). Für die Aufnahme wird eine schräge Kante verwendet, um die unterschiedlichen Positionen der Kante in Bezug auf die Kamerapixel zwischen verschiedenen Aufnahmen zu kompensieren (ebd.). Durch die Überabtastung kann die MTF auch für Frequenzen oberhalb der Nyquist-Frequenz berechnet werden (ebd.). Die Ableitung nach dem Ort liefert die Linienspreizfunktion (LSF) (ebd.). Sie ist definiert in Gleichung (3.8) und ihr Graph in Abbildung 3.14c dargestellt. Die MTF ist der absolute Werte der Fourier-Transformation der LSF (vgl. Gleichung (3.9) und Abbildung 3.14d) und gibt das Kontrastverhältnis über die Ortsfrequenz f_O an (ebd.). Das beschriebene Verfahren basiert weitestgehend auf dem ISO Standard 12233.

$$LSF(x) = \frac{d}{dx} ESF(x) \quad (3.8)$$

$$MTF(f_O) = |\mathfrak{F}[LSF(x)]|, f_O : \text{Ortsfrequenz in } \frac{\text{lp}}{\text{mm}} \quad (3.9)$$

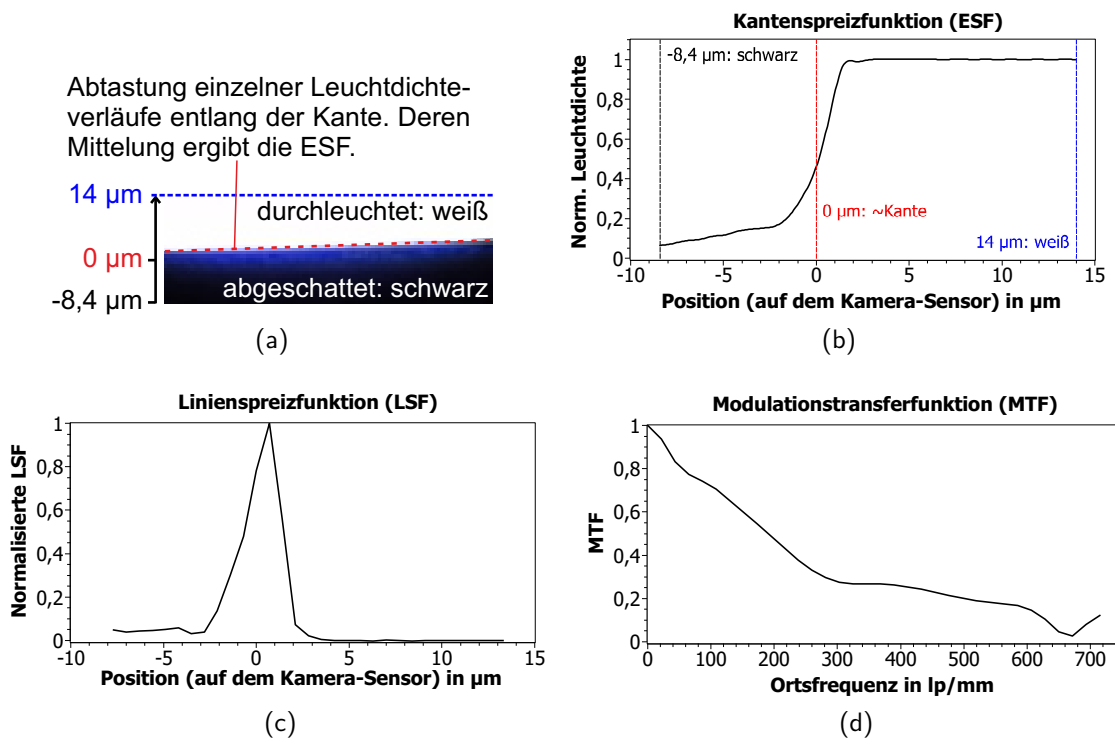


Abb. 3.14: Aufnahme einer schrägen Kante (a) an der die einzelnen Leuchtdichteverläufe gemessen werden. Daraus wird die gemittelte, überabgetastete ESF bestimmt (b). Gleiche Positionen sind mit der gleichen Farbe gekennzeichnet. Die LSF ist die Ableitung der ESF (c). Durch Fourier-Transformation der LSF wird die MTF berechnet (d).

Die Messung wird an einer durchleuchteten Chrom-Glas-Maske mit schräger Kante vorgenommen. Als Lichtquelle wird die kollimierte LED-Leuchte MCWHL5-C1 von *Thorlabs* verwendet, welche um einen zusätzlichen Linsenaufbau aus zwei plankonvexen Linsen mit den Brennweiten 35 mm und 75 mm ergänzt wird, um die Kollimation zu verstärken. Die durchstrahlte Maske wird mit der Kamera USB 3.0 uEye XC von der IDS Imaging Development Systems GmbH, Obersulm aufgenommen. Bei der Darstellung der MTF wird die Pixelgröße des Sensors der Kamera von $1,4 \mu\text{m} \times 1,4 \mu\text{m}$ berücksichtigt [98]. Zwischen Kamera und Maske wird der zu vermessende Flächenstrahler auf einem motorisierten Lineartisch (LTS300/M von *Thorlabs*) senkrecht oder um 45° geneigt positioniert. Mit diesem Aufbau kann der Einfluss der Mikrostrukturierung auf die Sicht auf die durchstrahlte Maske abhängig vom Abstand zwischen Flächenstrahler und betrachtender Person (hier repräsentiert durch die Kamera) erfasst werden. Der Messaufbau wird mittels LabView und der Software Imatest IT von der Imatest LLC, Boulder automatisiert. Der Flächenstrahler wird in 2 cm Schritten zwischen einem Abstand von 10 cm und 40 cm vor der Kamera verfahren. Bei jedem Schritt werden drei Fotos aufgenommen und mit der Software Imatest IT ausgewertet. Die drei Ergebnisse werden gemittelt und in eine

.csv-Datei geschrieben. Die Messungen werden in einem verdunkelten Labor durchgeführt. Der Messaufbau ist in Abbildung 3.15 skizziert.

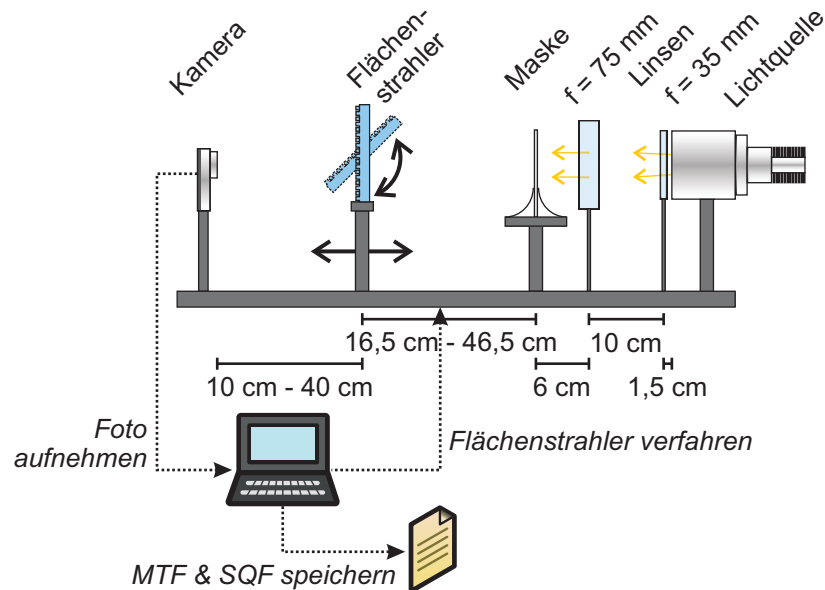


Abb. 3.15: Skizze des automatisierten Messaufbaus zur Bestimmung der subjektiven Durchsicht durch Flächenstrahler. Das Licht aus der Lichtquelle rechts wird durch die zwei Linsen weiter kollimiert. Es trifft danach auf die Maske, den Flächenstrahler und zuletzt auf die Kamera. Die Position des Flächenstrahlers wird programmgesteuert verfahren. In jedem Verfahrensschritt werden automatisch drei Fotos mit der Kamera aufgenommen. Anhand der Fotos wird die MTF und daraus der SQF berechnet. Dieser wird zusammen mit der aktuellen Position des Flächenstrahlers gespeichert. Vorgänge sind *kursiv* gekennzeichnet.

Die Bewertung eines abbildenden Systems durch die MTF berücksichtigt nicht die Charakteristika des menschlichen Auges. Daher wird zur Annäherung der Bewertung an eine subjektive, menschliche Wahrnehmung der Subjektive Qualitätsfaktor (SQF) verwendet [99]. Dieser zeichnet sich dadurch aus, dass er das winkelabhängige Kontrastaufklärungsvermögen des Auges (contrast sensitivity function, CSF) berücksichtigt. Er wird als Wert zwischen 0 % (inakzeptabel) und 100 % (ideal) angegeben. Die Ortsfrequenz wird logarithmisch gewichtet, um einer menschlichen Wahrnehmung näher zu kommen. Die SQF ist das Integral der Fläche unter dieser MTF, gewichtet mit der CSF und normiert durch den Faktor K [52, 100]:

$$SQF = K \int CSF(\nu) MTF(f_o) d(\log(f_o)), \nu : \text{Winkelfrequenz in } \frac{\text{lp}}{\circ} \quad (3.10)$$

Die CSF ist nicht, wie die MTF über die Ortsfrequenz f_O , sondern den Eigenschaften des Auges entsprechend über die Winkelfrequenz ν in Linienpaaren pro Grad (lp/°) bestimmt. In Imatest IT ist die CSF als Gleichung (3.11) implementiert (ebd.). Der Graph dieser genäherten CSF ist in Abbildung 3.16 abgebildet.

$$CSF(\nu) = 0,114\nu \cdot e^{-0,1254\nu} \quad (3.11)$$

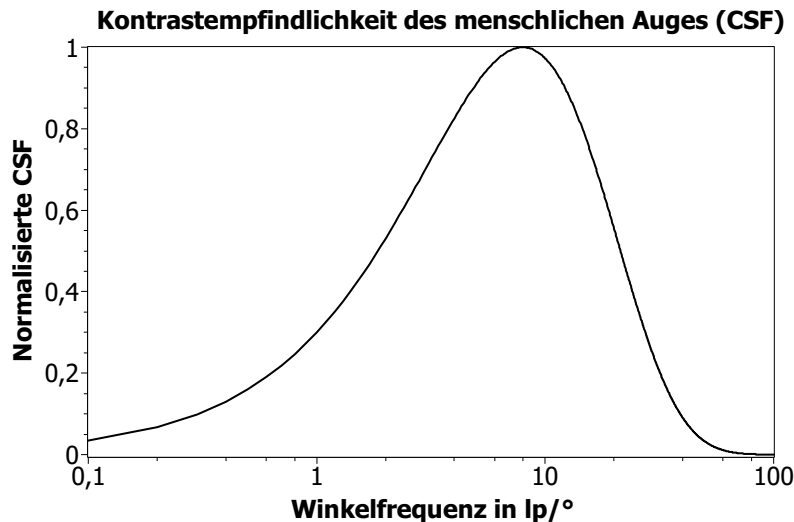


Abb. 3.16: CSF, die in der Software Imatest IT verwendet wird. Basierend auf [100].

Je nach Abstand des betrachteten Objekts vom Auge, übersetzt sich die Ortsfrequenz f_O in die Winkelfrequenz ν . Die eingesetzte Software ist für die Bewertung photographischer Systeme gedacht und die Implementation des SQF auf dieses Anwendungsfeld ausgelegt. So wird der SQF in Imatest IT für einen idealen Druck des aufgenommenen Bildes ausgegeben und anhand der Druckgröße und dem Abstand der betrachtenden Person zum gedruckten Bild ermittelt. Hierzu werden die Frequenzen wie folgt in einander umgerechnet (ebd.).

$$\nu = \frac{\pi n_{PH} d_K f_O}{180 H_{PH}} \quad (3.12)$$

n_{PH} ist die vertikale Pixelanzahl der Aufnahme und H_{PH} die Höhe des gedruckten Bildes.

Um eine korrekte Beurteilung des Flächenstrahlers vorzunehmen, wird das aufgenommene Bild entsprechend des Aufnahmeabstands d_K der Kamera so skaliert, dass es den gesamten Aufnahmebereich der Kamera ausfüllt. So stellt es die Objekte in ihrer realen Größe dar. Zu diesem Zweck wurden Aufnahmen mit einem Längenmaßstab anstelle der Maske aufgenommen. Bei einem Abstand von $d_k = 56,5$ cm ist $H_{PH} \approx 63$ cm. Die vertikale Pixelanzahl beträgt $n_{PH} = 3104$.

Der ermittelte SQF für den Messaufbau ohne Flächenstrahler dient als Referenz. Er beträgt 78,8 % mit einer durchschnittlichen absoluten Abweichung von 0,2 %. Die durch einen Flächenstrahler gemessenen SQFs werden relativ zu diesem Referenzwert angegeben. Für die Bewertung des SQF wird der Maßstab nach Hultgren verwendet (ebd.). Er ist in Abbildung 3.17 dargestellt. Ein Abgleich der relativen SQFs mit Fotos von Mustern findet bei der Anwendung des Messverfahrens zur Bewertung von industriell gefertigten Mustern in Abschnitt 5.1.3 statt.

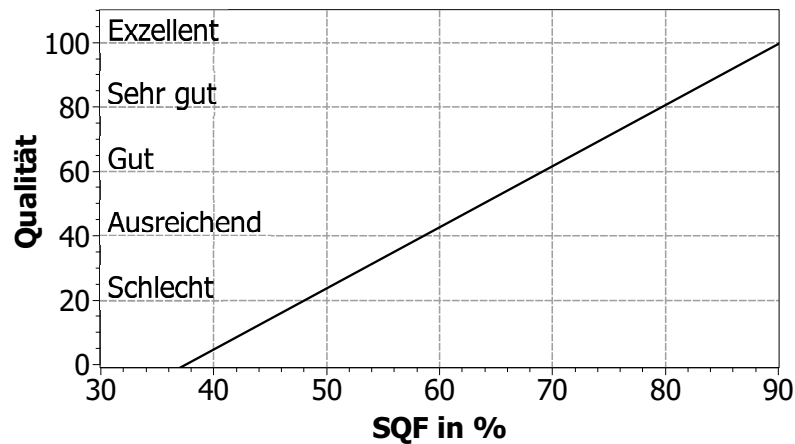


Abb. 3.17: Maßstab zur Bewertung der Durchsicht durch den SQF. Basierend auf [100].

3.3 Zusammenfassung

Der Flächenstrahler besteht aus mehreren Komponenten, die für die Simulation einzeln modelliert werden. Wo möglich wird hierzu auf bestehende CAD- und Materialdaten zurückgegriffen. Zu einem großen Teil werden diese selbst erstellt. Die Komponenten werden zusammen mit Detektoren in einer Simulationsumgebung angeordnet, um die Abstrahlcharakteristik des Flächenstrahlers zu erfassen. Dabei wird der simulierbaren Länge des Strahlers durch die Simulationssoftware Grenzen gesetzt. Dem wird Rechnung getragen, indem der Flächenstrahler abschnittsweise simuliert wird. Für Fälle, bei denen auch dies nicht möglich ist, wird ein Näherungsverfahren zur Ermittlung des LOR vorgestellt.

Für die Beurteilung und den Vergleich der simulierten und hergestellten Flächenstrahler werden optische Kennwerte definiert. Diese beschreiben das Abstrahlverhalten eines Flächenstrahlers und die subjektive Durchsicht. Für die Messung und Berechnung der Kennwerte werden automatische Auswertungen und Messaufbauten konzipiert und erstellt. Das vorgestellte Vorgehen zur Simulation und die eingeführten Kennwerte sowie

3 Simulation und Charakterisierung von mikrostrukturierten Flächenstrahlern

deren messtechnische und simulative Erfassung werden nach der folgenden Diskussion verschiedener Herstellungstechnologien in Kapitel 5 angewendet.

4 Technologien zur Herstellung mikrostrukturierter Flächenstrahler

Die Herstellung von mikrostrukturierten Flächenstrahlern fällt in den Bereich der Mikrostrukturtechnik. In diesem Bereich wird die Herstellung und Anwendung von Strukturen mit Dimensionen zwischen 100 nm und 1 mm behandelt [101]. Mikrostrukturen sind von großer Bedeutung, wenn es um die Miniaturisierung makroskopischer Konzepte geht, um ressourcenschonendere und effizientere Systeme zu gestalten. Klassische Anwendungsfelder der Mikrostrukturtechnik sind mikrofluidische Systeme für die chemische Analytik, Medizin und Konsumgüter (bspw. Tintenstrahldrucker) sowie mikrooptische Systeme für die Kommunikationstechnik. Ein sehr junges Anwendungsfeld ist die Beleuchtungstechnik zu dem die auf LGPs basierenden mikrostrukturierten Flächenstrahler zählen. Für deren Herstellung können verschiedene Verfahren aus dem Bereich der Mikrostrukturtechnik angewendet werden. Grundsätzlich kann zwischen zwei Ansätzen unterschieden werden: Strahlungsinduzierte und abformende Strukturierung.

Zum Ansatz der strahlungsinduzierten Strukturierung gehört die Photolithographie [102], die Laserablation [103] und die Zwei-Photonen-Lithographie [104]. Das letztere Verfahren ist sehr aufwendig und größere Flächen können nur mit hohem Kosten- und Zeitaufwand strukturiert werden. Die Laserablation ist auf Grund der entstehenden Oberflächenrauheit in der Größenordnung von Mikrometern für optische Anwendungen nicht geeignet [105]. Die Zwei-Photonen-Lithographie ist gänzlich ungeeignet für die Strukturierung von großflächigen LGPs. Beim aktuellen Stand der Technik ist sie lediglich dazu geeignet, einzelne Mikrostrukturen zu erschaffen.

Vielfältiger und vielversprechender sind Verfahren zum zweiten Ansatz, der Strukturierung durch Abformverfahren. Diese bestehen grundsätzlich aus mindestens zwei Herstellungsschritten: Zunächst wird ein Formwerkzeug hergestellt, von dem in einem weiteren Schritt die mikrostrukturierte LGP abgeformt wird. Das Werkzeug kann mittels lithographischer Verfahren [29, 33] (optional mit anschließender Galvanik) oder mikromechanischen Verfahren [106, 107] – vor allem dem Diamantfräsen – hergestellt werden. Von der Form wird die mikrostrukturierte LGP abgeformt. Dies geschieht mittels eines Gießprozesses

(z.B. mit Silikon), Heißprägen, UV-Prägen [108] oder Spritzprägen [109]. Zu beachten ist, dass an Formwerkzeuge für optische Anwendungen besonders hohe Anforderungen gestellt werden. So ist eine mittlere Linienrauheit der Oberfläche der LGP und ihrer Mikrostrukturen von $R_a < 40 \text{ nm}$ notwendig. Eine höhere Rauheit verursacht vor allem eine streuende, ungerichtete Auskopplung.

Alle Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich Replikationsgenauigkeit, Verfügbarkeit, Kosten, Ressourcenaufwand, Komplexität und Fertigungszeit. Für verschiedene Stadien in der Entwicklung sind unterschiedliche Verfahren vorteilhaft. So ist der Gießprozess auf Grund hoher Abformtreue für die Fertigung erster Muster zur Überprüfung der optischen Funktion gut geeignet. Präge- und Spritzverfahren zeichnen sich hingegen durch eine geringe Fertigungszeit aus und sind somit für die industrielle Fertigung gut geeignet. Sowohl in der Fertigung des Werkzeugs als auch im Abformprozess sind verfahrensabhängige Toleranzen in der Replikationsgenauigkeit wie minimale bzw. maximale Strukturhöhe, Kantenradien oder Neigung von Strukturflanken zu beachten. Diese bestimmen maßgeblich, welches Verfahren für welche Mikrostruktur – vor allem deren Dimensionierung – geeignet ist. Eine weitere grundsätzliche Einschränkung ist die maximale Größe der strukturierbaren Fläche.

Die Werkzeuge und hergestellten Strukturen werden durch mikroskopische Aufnahmen geometrisch charakterisiert. Hierfür wird der Schwerpunkt vor allem auf eine Betrachtung des Querschnitts der Strukturen gelegt. Die hergestellten Mikrostrukturen können meist jedoch nicht ohne größere Zerstörungen im Querschnitt betrachtet werden. Sie werden daher mit Silikon (PDMS RT 601 von *Wacker*) abgeformt. Diese Abformungen sind sehr genau (bis in den Nanometerbereich) und lassen sich leicht zerschneiden. Sie bieten somit eine gute Möglichkeit den gewünschten Querschnitt zu betrachten. Als Beispiel ist in Abbildung 4.1a der abgegossene Querschnitt eines Zylinders dargestellt. Ergänzt wird die Betrachtung des Querschnitts bei Bedarf durch eine dreidimensionale Vermessung der Oberfläche mit einem konfokalen Laser-Scanning-Mikroskop (confocal laser scanning microscope, CLSM). Dieses ermöglicht Messungen mit einer Höhenauflösung von 5 nm und einer Längenauflösung von 14 nm . Abbildung 4.1b zeigt beispielhaft eine dreidimensionale Aufnahme eines von *Jungbecker* in Heißprägetechnik hergestellten Zylinders mit einer Höhe von $1016 \text{ }\mu\text{m}$ und einem Deckendurchmesser von $982 \text{ }\mu\text{m}$. Hier wird auch deutlich, warum eine Betrachtung des Querschnitts oft notwendig ist. Denn steile Strukturflanken sind mit einem CLSM nur schlecht auflösbar. Mit dem CLSM wird zudem die mittlere Linienrauheit R_a bestimmt. Diese ist eine wichtige Messgröße für optische Systeme und wird in dieser Arbeit als Mittelwert aus 12 Linienrauheitsmessungen an Aufnahmen des CLSM bestimmt. Wenn nicht näher erläutert, wird die höchste gemessene Rauheit angegeben.

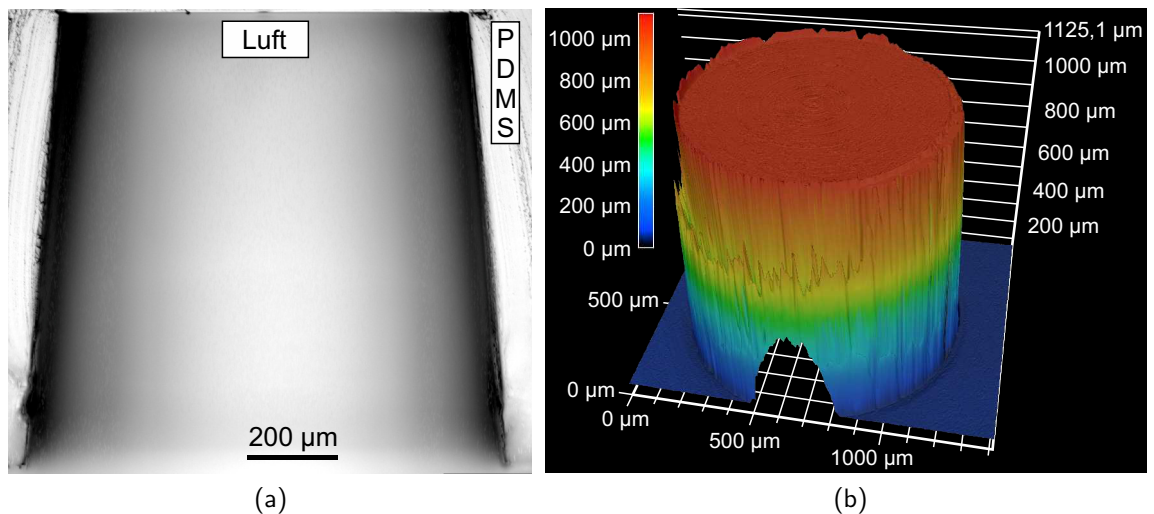


Abb. 4.1: Querschnitt durch die Abformung eines von *Jungbecker* heißgeprägten, ca. 1 mm hohen Zylinders (a). Die geneigte Flanke ist gut zu erkennen. In der CLSM-Aufnahme (b) ist die Deckelfläche des Zylinders und die Plattenoberfläche zu sehen. Die geneigte Flanke des Zylinders wird jedoch nicht aufgelöst (gut sichtbar an den Zacken im gelben Bereich). Der Messbereich des CLSM ist zudem zu klein, um die gesamte Struktur mit einer Messung zu erfassen (transparenter Bereich vorne).

Für ein effizientes Vorgehen in der Entwicklung mikrostrukturierter Flächenstrahler wird nachfolgend ein Entwicklungsschema vorgestellt. Es kann als roter Faden für den Weg vom theoretischen Design ausgehend zum industriell gefertigten Muster für die Massenfertigung verstanden werden. Die verschiedenen Schritte in diesem Schema sind eng verbunden mit ausgewählten Herstellungsverfahren. Ziel des Schemas ist die Schaffung eines industriell gefertigten Musters, welches im Erfolgsfall die Eignung des Systems für die Massenfertigung belegt. Nach der Vorstellung des Entwicklungsschemas werden die verschiedenen Herstellungstechnologien diskutiert.

4.1 Entwicklungsschema für mikrostrukturierte optische Systeme

Ausgegangen wird von einem ersten, mit Hilfe von Simulationsrechnungen optimierten Design für ein mikrostrukturiertes optisches System. Der Entwurf entsprechender Mikrostrukturen und die Simulation von Flächenstrahlern wurden in Kapitel 3 bereits beschrieben. Insbesondere bei neuartigen mikrostrukturierten optischen Systemen ist es sinnvoll die durch Simulationen optimierten Eigenschaften zunächst durch Funktionsmuster zu bestätigen, bevor die Fertigung weiterverfolgt wird. Die Größe des Musters ist hier

nicht ausschlaggebend, sondern vor allem die genaue Replikation der Mikrostrukturen in optisch geeignetem Material. Ist die Funktionalität des Designs belegt, ist die Fertigung eines Prototyps in den Materialien des angestrebten Produkts herzustellen. Für optische Untersuchungen und die mögliche (Weiter-)Entwicklung von Herstellungsverfahren müssen handliche Prototypen günstig und in gleicher Qualität zu replizieren sein. Die Größe ist daher möglichst klein zu wählen. Nach der Fertigung zufriedenstellender Prototypen wird ein industriell gefertigtes Muster mit realistischen Produktabmessungen erstellt. Das Herstellungsverfahren für dieses Muster entspricht so weit wie möglich Verfahren in der Massenfertigung. Das Schema ist in Abbildung 4.2 zusammengefasst.

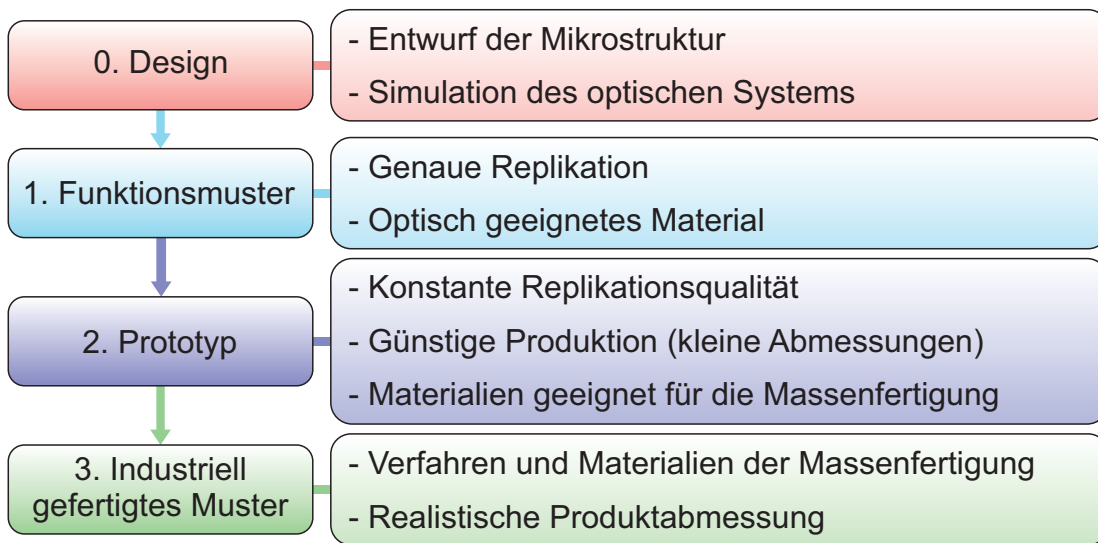


Abb. 4.2: Entwicklungsschema für mikrostrukturierte optische Systeme.

4.2 Fertigungstechnologien zur Herstellung mikrostrukturierter Lichtleiterplatten

In diesem Abschnitt wird zunächst eine Übersicht über geeignete Herstellungstechnologien für die Fertigung mikrostrukturierter LGPs gegeben. Die Technologien werden anhand der aus dem Entwicklungsschema abgeleiteten Anforderungen identifiziert und zugeordnet. Entsprechend der Technologien und Anforderungen an Flächenstrahler werden geeignete Materialien ausgewählt. Anschließend wird die Herstellung der Formwerkzeuge für die gewählten abformenden Verfahren betrachtet, bevor die einzelnen Fertigungstechnologien für die Herstellung mikrostrukturierter LGPs detailliert diskutiert werden.

4.2.1 Auswahl geeigneter Fertigungstechnologien und Materialien

Für die Herstellung eines Funktionsmusters wird eine möglichst genaue Replikation des erstellten Designs der Mikrostrukturen gefordert. Hierfür eignet sich besonders gut die Methode des Gießens [16], adaptiert aus dem Bereich der Softlithographie. Als Material für die Abformung eignet sich besonders PDMS. Es ist im sichtbaren Wellenlängenbereich hoch transparent und formt bis in den Nanometerbereich genau ab [110, 111]. In ihm können leicht Schnitte mit hoher Formtreue vorgenommen werden, was die Betrachtung der hergestellten Strukturen erleichtert. Zum Einsatz kommt das 2-Komponenten Silikon RT 601 von *Wacker*. Die gemessene Transmission und Absorption des verwendeten PDMS ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Sie wurden an einer 4 mm dicken Probe mittels des Zweistrahl-Referenzphotospektrometers Cary 500 gemessen. Die Messung bestätigt die gute Transparenz im Bereich sichtbaren Lichts.

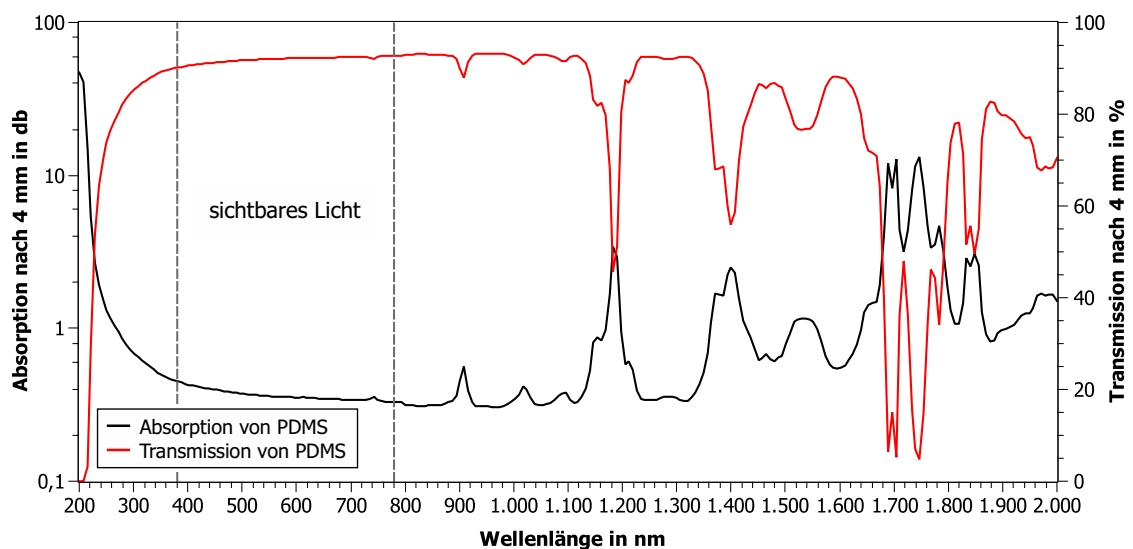


Abb. 4.3: Absorption (schwarz) und Transmission (rot) im PDMS RT 601. Der Bereich des sichtbaren Lichts (380 nm bis 780 nm) ist durch gestrichelte Linien gekennzeichnet.

Die Fertigung des Prototypen von mikrostrukturierten Flächenstrahlern fordert die Herstellung in Materialien, die denen der industriellen Fertigung entsprechen. Für LGPs kommt als Basismaterial PMMA in Frage. Ebenfalls zu berücksichtigen ist die Fertigung der Mikrostrukturen in Photolack auf einem PMMA-Träger. Für die Fertigung von Prototypen mit diesen Materialien kommt das variotherme Spritzprägen und die direkte lithographische Strukturierung zum Einsatz.

Die beiden Materialsysteme werden ausgewählt, weil sie sich sehr gut für die Serienproduktion eignen. Die Massenfertigung verlangt niedrige Herstellungskosten und eine Herstellung der LGPs in leicht handhabbarer Form. Das bedeutet, dass Materialien preiswert und leicht zu verarbeiten sein müssen. Zudem ist der Einsatz eines möglichst einfachen und schnellen Herstellungsverfahrens nötig. Die Flächenstrahler müssen je nach Einsatzgebiet verschiedenen Umwelteinflüssen standhalten und als Komponente größerer Systeme von fachfremden Menschen handhabbar sein. Das Einsatzgebiet von Flächenstrahlern ist vielfältig. Hier wird sich bei der Auswahl der möglichen industriellen Herstellungsverfahren auf den Einsatz als fassadenintegrierte Leuchte konzentriert. Sicherlich sind die Herstellungsverfahren und Materialien auch für andere Anwendungen gut geeignet, z.B. in der Hintergrundbeleuchtung von Bildschirmen. Ein als Leuchte eingesetzter Flächenstrahler – ob integriert in eine Fassade oder als alleinstehende Lösung – besteht neben der LGP aus folgenden Komponenten: Lichtquelle (hier LEDs), elektrische Schaltung, Stromversorgung und evtl. Schutzverglasung und Rahmen. Das bedeutet, dass die LGP Teil eines größeren Fertigungsprozesses ist. Sie kommt dabei vor allem mit der Lichtquelle in engen Kontakt und muss chemisch mit den eingesetzten LEDs kompatibel sein sowie unempfindlich gegenüber deren entstehenden Wärmeverlusten sein.

Die LGP darf also keine Stoffe abgeben, die der LED schaden. Besonderes Augenmerk muss hier auf die Ausgasung von Kunststoffen gelegt werden. Eine umfassende Liste von Stoffen, die die Funktion von LEDs negativ beeinflussen, haben *Osram* [112] und die *Cree, Inc., Durham* [113] zusammengefasst. Eine ausreichende Belüftung der LEDs kann die negativen Auswirkungen auf die LEDs verringern [114].

Die Betriebstemperatur von LEDs muss für einen langlebigen Betrieb unter 85°C liegen [47]. Die LGP muss deshalb mindestens bis zu dieser Temperatur stabil bleiben. Etwaige Umweltfaktoren, wie direkte Sonneneinstrahlung, sind je nach Anwendungsszenario gesondert zu berücksichtigen und können die maximal akzeptable Umgebungstemperatur deutlich über 85°C erhöhen.

Als Material für industriell gefertigte Muster eignet sich PMMA besonders gut. Es weist eine hohe Transparenz für sichtbares Licht (vgl. Abbildung 2.11), eine derzeit gute Verfügbarkeit⁶ und niedrige Kosten ($\sim 7 \text{ € m}^{-2}$)⁷ auf. PMMA kann gut thermisch bearbeitet werden [119]. Ähnlich geeignet für optische Anwendungen sind Polycarbonat (PC) und Cycloolefin-Copolymer (COC) [120]. Im Vergleich zu PMMA weisen diese jedoch

⁶Rohmaterial für PMMA ist derzeit Erdöl, PMMA ist jedoch potentiell mit Pflanzenölen herstellbar [115] und recycelbar [116].

⁷Für 2 mm hohe PMMA-Platten; Preis für PMMA 1. Quartal 2019 in Nordwest Europa: $2,75 \text{ € kg}^{-1}$ – $2,90 \text{ € kg}^{-1}$ [117]; Dichte von PMMA $\rho \approx 1,19 \text{ g cm}^{-3}$ [118]; nicht beachtet wurden die Fertigungskosten der Platten und Gewinnmarge.

eine geringere Transparenz und teilweise weitere unerwünschte optische Eigenschaften wie eine schlechtere UV-Beständigkeit und starke Doppelbrechung auf [118].

Mit einer Vicat-Erweichungstemperatur von bis zu 115 °C [121] bzw. einer Glasübergangstemperatur um $T_g \approx 105$ °C [122] ist PMMA für den geforderten Temperaturbereich bis 85 °C einsetzbar. Die thermischen Eigenschaften variieren je nach Hersteller und Produktform deutlich. In der Serienproduktion kann PMMA direkt mittels Heißprägen strukturiert oder durch UV-Prägen mit Mikrostrukturen in einer hitzebeständigen Photolackschicht versehen werden. Unter Umständen sind die Mikrostrukturen bereits im Entwicklungsschritt des Prototypen für eine Fertigung im Heißpräge-Verfahren geeignet. Dann ist die Anwendung dieser Technologie bereits in der Fertigung des Prototypen möglich und sinnvoll.

4.2.2 Fertigung des Formwerkzeugs für abformende Verfahren

Bevor auf die Herstellungstechnologien für mikrostrukturierte LGPs genau eingegangen wird, wird zunächst die Fertigung der benötigten Formwerkzeuge für die abformenden Verfahren diskutiert. Diese können durch photolithographische [16] und mikromechanische Verfahren [123] gefertigt werden.

Photolithographische Fertigung des Formwerkzeugs

Die lithographische Fertigung eignet sich besonders für einstufige Strukturen mit senkrechten Wänden wie z.B. Zylinder. Sie kann mit größerem Aufwand aber auch für die Fertigung komplexerer Strukturen wie Kegelstümpfe verwendet werden [124]. Sie ermöglicht eine präzise Herstellung von Strukturen bis in den Nanometerbereich. Um das Formwerkzeug herzustellen, wird auf einem Siliziumwafer ein Photolack aufgebracht. Dieser wird durch eine strukturierte Chrom-Glas-Maske belichtet und anschließend entwickelt. Für Herstellungsverfahren, die das Formwerkzeug schonen, wie das Gießen mit Silikon, wird der Wafer mit der strukturierten Lackschicht direkt als Formwerkzeug verwendet. Ansonsten ist eine galvanische Abformung für die Herstellung eines widerstandsfähigeren Formwerkzeugs notwendig.

Abbildung 4.4a zeigt eine Aufnahme von einer mit PDMS gegossenen LGP auf einem mit Trockenresist strukturierten Wafer. Er ist mit zylinderförmigen Löchern, die 42 µm tief sind und einen Durchmesser von 50 µm besitzen, strukturiert. Eine seitliche Aufnahme der abgeformten Zylinder ist in Abbildung 4.4b zu sehen. Die Oberflächenrauheit des Formwerkzeugs beträgt $R_a = 31 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$. Die Schritte zur photolithographischen Fertigung des Werkzeugs sind in Abbildung 4.5 skizziert. Struktur- und resistabhängige

Backschritte werden nicht dargestellt. Eine detaillierte Darstellung ist in [16] zu finden. Die Fertigung dauert etwa 20 Minuten ohne Berücksichtigung der Maskenherstellung (ebd.).

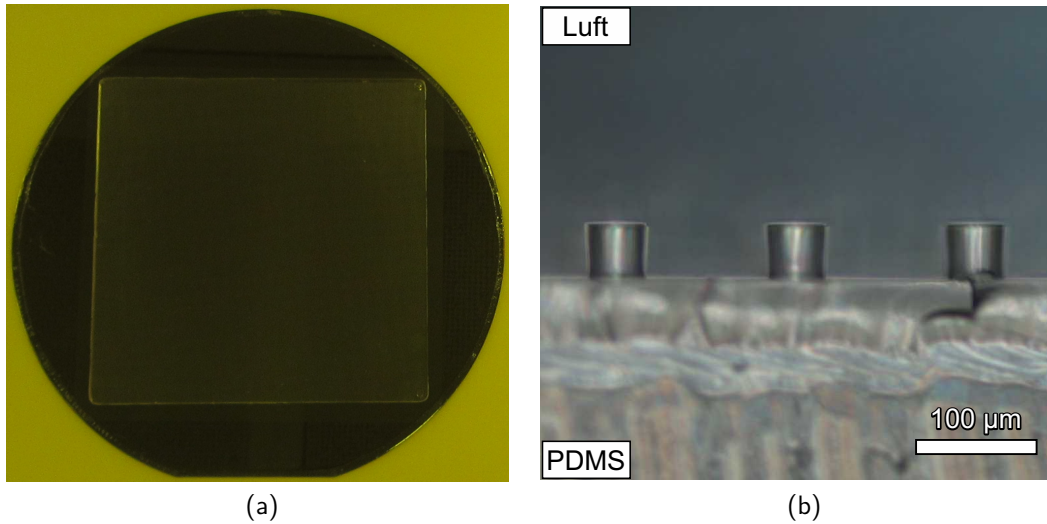


Abb. 4.4: LGP durch Gießtechnik mit PDMS auf lithographisch strukturiertem Wafer hergestellt (a) und eine Seitenaufnahme der abgeformten Mikrozyylinder mit einer Höhe von $42\ \mu\text{m}$ und einem Durchmesser von $50\ \mu\text{m}$ (b) [16].

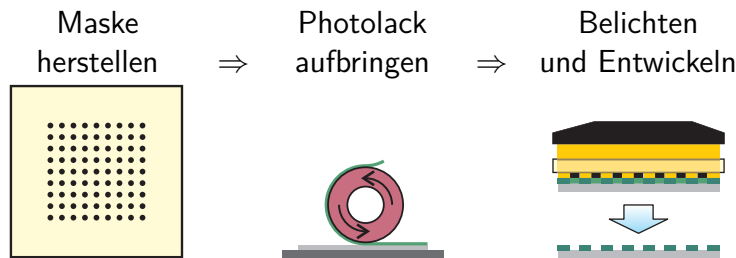


Abb. 4.5: Prozess zur lithographischen Herstellung eines Formwerkzeugs (ohne Backschritte). Basierend auf [16].

Mikromechanische Fertigung des Formwerkzeugs

Insbesondere Formwerkzeuge für Strukturen mit größeren Flankenwinkeln oder Freiform-Strukturen können besser über mikromechanische Verfahren gefertigt werden. Als Werkzeugmaterial kommt vorzugsweise Messing zum Einsatz. Es ist gut zu bearbeiten und verschleißt nur wenig bzw. beim Gießen von Silikon gar nicht. Zudem ist es als Kupferlegierung sehr gut zu recyceln [125] und günstiger als andere verwendbare Materialien wie chemisch vernickelter Stahl [126]. Für einen industriellen Einsatz in der Massenfertigung

mit starker Beanspruchung des Formwerkzeugs, wie dem Heißprägen oder Spritzprägen, wäre jedoch wegen dem geringeren Verschleiß chemisch vernickelter Stahl vorzuziehen.

Die gewünschte Geometrie wird über einen geschliffenen, monokristallinen Diamanten in das Werkstück gebracht. Jedes Element wird einzeln durch Diamantfräsen hergestellt. Im Vergleich zum photolithographischen Verfahren ist die Fertigungsgenauigkeit eingeschränkt. Es sind fertigungsbedingt Radien für Innenkanten von ca. $2\ \mu\text{m}$ und für Außenkanten von ca. $5\ \mu\text{m}$ zu berücksichtigen. Laterale Abmessung und Tiefe der Strukturen können im Mikrometerbereich bis zu $\delta_F = 3\%$ abweichen. Die mechanisch gefertigten Werkzeuge eignen sich sowohl für schonende Abformungsverfahren wie das Gießen als auch für heißprägende Verfahren, die das Formwerkzeug stärker belasten.

Die mikromechanische Bearbeitung von Werkstücken findet, anders als in der photolithographischen Fertigung, nicht im Reinraum statt. Um Verunreinigungen im abzuformenden Muster zu vermeiden, ist auf die Reinigung der Formwerkzeuge besonders zu achten. So ist vor dem ersten Einsatz des Werkzeugs eine „Reinigungsabformung“ mit einer dünnen Schicht PDMS zu empfehlen. Zwar wird die mikromechanische Werkzeugfertigung nicht in Reinraumumgebung durchgeführt, kontrollierte Umgebungsparameter sind jedoch auch hier notwendig. Gerade bei der Fertigung von Mikro- und Nanostrukturen ist eine gleichbleibende Umgebungstemperatur über den Fertigungsprozess einzuhalten, um Verformungen des Werkstücks während der Bearbeitung zu vermeiden.

Für das Diamantfräsen wird zunächst mit einem Werkzeug die zu fertigende Form grob vorgefräst (Schruppen) und anschließend mit einem entsprechend geschliffenen monokristallinen Diamanten die endgültige Mikrostruktur mit der geforderten Oberflächenrauheit gefräst (Schlichten). Die Fräswerkzeuge werden senkrecht rotierend zur Oberfläche des Werkstücks eingesetzt, um die Mikrostrukturen zu fräsen. Die Rauheit auf Flanke und Bodenfläche wird stark durch die Verweildauer des rotierenden Diamantwerkzeugs auf dem Boden der Struktur beeinflusst. Sie sollte möglichst kurz sein.

Ein von der LT Ultra-Precision Technology GmbH, Herdwangen-Schönach (im Folgenden *LT Ultra*) gefertigtes Formwerkzeug ist in Abbildung 4.6a zu sehen. Die dort gefrästen Kegelstümpfe mit einem Durchmesser von $1303\ \mu\text{m}$ und einem Flankenwinkel von 32° sind gut in dem Querschnitt der PDMS-Abformung in Abbildung 4.6b zu erkennen. Das Formwerkzeug wurde mit einer Verweildauer des Diamantwerkzeugs auf dem Grund von $1\ \text{ms}$ gefertigt. Die Rauheit auf der Bodenfläche beträgt $R_a = 60\ \text{nm}$ und die Rauheit auf der Flanke $R_a = 42\ \text{nm}$. Eine höhere Verweildauer ist zu vermeiden. Denn bei einem vergleichbaren Formwerkzeug, bei dem der Diamant $10\ \text{ms}$ auf dem Grund verweilte, beträgt die Rauheit auf dem Boden $R_a = 152\ \text{nm}$ und auf der Flanke $R_a = 80\ \text{nm}$ und ist wegen dieser hohen Rauheit nicht für die Herstellung von optischen Systemen geeignet.

Die Fertigungszeit des hier dargestellten Formwerkzeugs mit 1158 Kegelstümpfen beträgt ca. 8 Stunden (exklusive des Schleifens des Diamanten und der Herstellung des Rohlings) [127]. Das Verfahren zur Fertigung des Formwerkzeugs ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

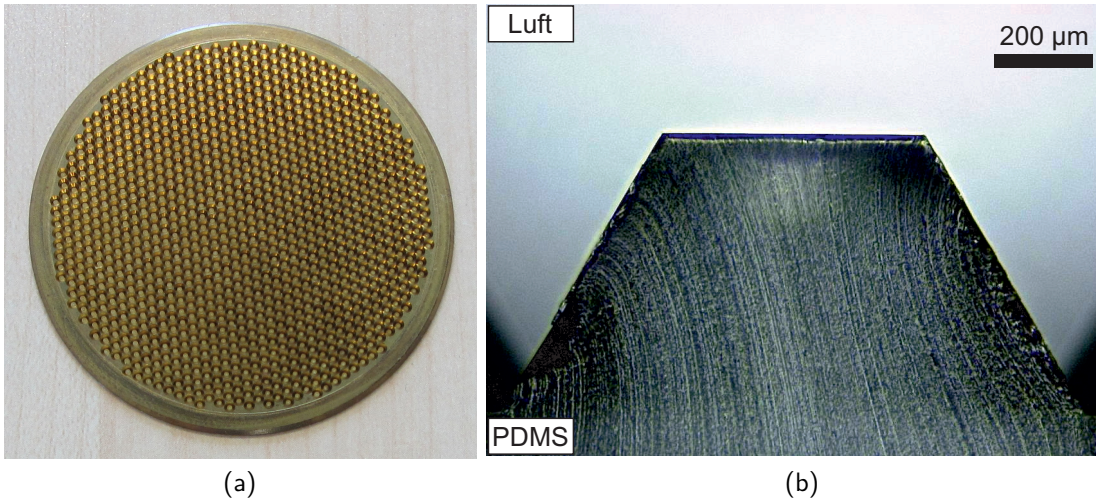


Abb. 4.6: Von *LT-Ultra* durch Diamantfräsen in Messing hergestelltes Formwerkzeug mit Kegelstümpfen (a) und dessen PDMS-Abformung (b).



Abb. 4.7: Prozess zur mikromechanischen Herstellung des Formwerkzeugs mittels Diamantfräsen.

4.2.3 Gießen mit Silikon

Für das Gießen wird das PDMS RT601 von *Wacker* verwendet. Es wird vor dem Gießen aus seinen zwei Komponenten (A: Polymer und B: Platinkatalysator) durch gründliches Vermischen im Verhältnis 9:1 (A:B) hergestellt. Anschließend wird es in einen Exsikkator gestellt, der fünf Minuten evakuiert wird. Während dieser Zeit entweichen eingeschlossene Luftblasen aus dem PDMS [128].

Formwerkzeuge können in photolithographischen und mechanischen Verfahren gefertigt werden. Wird ein photolithographisch gefertigtes Formwerkzeug verwendet, wird die Oberfläche des Wafers und Photolacks durch Behandlung mit Hexamethyldisilazan

(HMDS) durch chemische Gasphasenabscheidung mit Stickstoff bei 100 °C inaktiviert, um eine Haftung des PDMS am Lack und Siliziumwafer zu verhindern [16]. Das Formwerkzeug wird in einen Gießrahmen eingespannt, welcher anschließend bei 5 °C mit dem PDMS befüllt wird. Bei gleichbleibender Temperatur ist das PDMS nach 44 Stunden blasenfrei vulkanisiert und die fertige LGP kann aus dem Rahmen entnommen werden (ebd.). Der Dimension der Strukturabmessungen werden lediglich durch die Formwerkzeuge Grenzen gesetzt. Strukturen können über den gesamten Größenbereich der Mikrostrukturtechnik abgeformt werden. Der Gießprozess ist in Abbildung 4.8 skizziert. Aufnahmen einer so hergestellten 10 × 10 cm² großen LGP aus PDMS mit 42 µm hohen Mikrozylindern mit einem Durchmesser von 103 µm sind in Abbildung 4.9 dargestellt. Die LGP Oberfläche weist eine Rauheit von $R_a = 68$ nm auf.

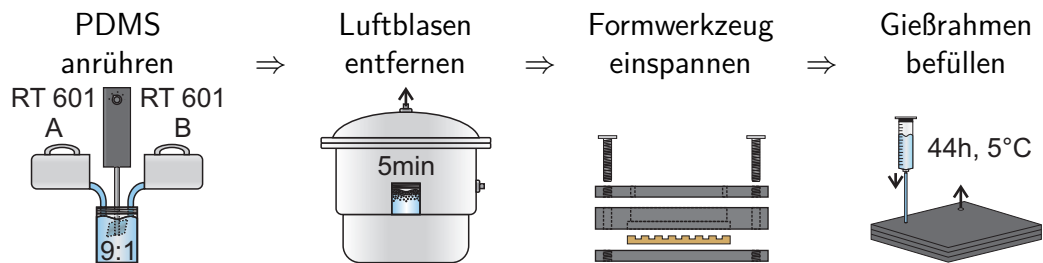


Abb. 4.8: Gießprozess zur Herstellung eines Funktionsmusters. Basierend auf [16].

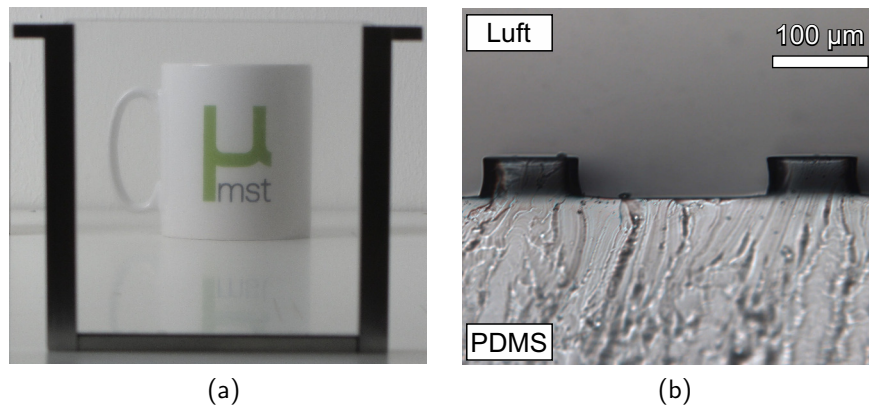


Abb. 4.9: Durch Gießen hergestellte LGP aus PDMS mit den Maßen 0,4 cm × 10 cm × 10 cm (a). Die Platte wird durch einen einfachen schwarzen Rahmen gehalten. Im Hintergrund ist durch die Platte eine bedruckte Tasse zu sehen. (b) zeigt eine seitliche Aufnahme von Zylindern auf der LGP. Sie sind 42 µm hoch und besitzen einen Durchmesser von 103 µm. [16]

4.2.4 Lithographische Strukturierung

Als Basis für die LGP dient in diesem Verfahren eine Platte aus PMMA. Auf diese wird eine dünne Schicht aus Photolack aufgebracht. Dieser besitzt einen Brechungsindex möglichst gleich dem von PMMA: $n_{\text{Lack}} \approx n_{\text{PMMA}} = 1,49$. In jedem Fall muss $n_{\text{Lack}} \geq n_{\text{PMMA}}$ gelten, um Reflexionen an der Grenzschicht weitestgehend zu vermeiden. Der Photolack wird beispielsweise durch Aufschleudern mit einer Dicke entsprechend der gewünschten Strukturhöhe auf die PMMA-Platte aufgebracht. Je nach verwendetem Photolack kann das vorherige Aufbringen eines Haftvermittlers wie Diphenylsilandiol notwendig sein [129]. Das Verfahren verwendet gleiche oder ähnliche Materialien wie das UV-Prägen, welches für die Fertigung des industriell gefertigten Musters eingesetzt werden kann. In Bezug darauf ist eine Lackdicke um $30 \mu\text{m}$ wünschenswert. Der Photolack ist wie in der industriellen Fertigung ein Negativlack (vgl. Abschnitt 4.2.7). Das bedeutet, dass eine Vernetzung des Photolacks im belichteten Bereich geschieht. Dieser wird durch eine Maske belichtet. Die Belichtung kann sowohl von der strukturierten Seite als auch durch die LGP hindurch erfolgen. Für eine Belichtung durch die Platte ist Voraussetzung, dass die Wellenlänge, die die Vernetzung im Photolack auslöst (üblicherweise im ultravioletten Bereich), hinreichend gut durch die LGP transmittiert wird. Mit der lithographischen Strukturierung sind ähnliche Werte bzgl. Auflösung (bis in den Nanometerbereich) und Rauheit ($R_a \leq 40 \text{ nm}$), wie in der lithographischen Herstellung des Formwerkzeugs, möglich (vgl. Abschnitt 4.2.2).

In Zusammenarbeit mit *temicon* wurde ein Muster lithographisch gefertigt. Eine Aufnahme des Flächenstrahlers ist in Abbildung 4.10a dargestellt. Die LGP aus PMMA ist $5,3 \text{ mm}$ hoch, sowie je 10 cm lang und breit. Sie wurde mit $43 \mu\text{m}$ hohen Mikrozyllindern, die einen Durchmesser von $52 \mu\text{m}$ aufweisen, in Photolack strukturiert. Die Rauheit der Oberfläche ist $R_a = 40 \text{ nm}$ und das Verfahren damit für optische Systeme sehr gut geeignet. Abbildung 4.10b zeigt eine Aufnahme der Strukturen. Eine Abweichung der gefertigten Strukturen von der Zylindergeometrie ist nicht festzustellen. Die strukturierte LGP ist als Flächenstrahler in einen Rahmen integriert. Die Fertigungszeit der LGP ist mit der photolithographischen Fertigung des Formwerkzeugs vergleichbar (ca. 25 min). Der Prozess der lithographischen Strukturierung ist in Abbildung 4.11 skizziert.

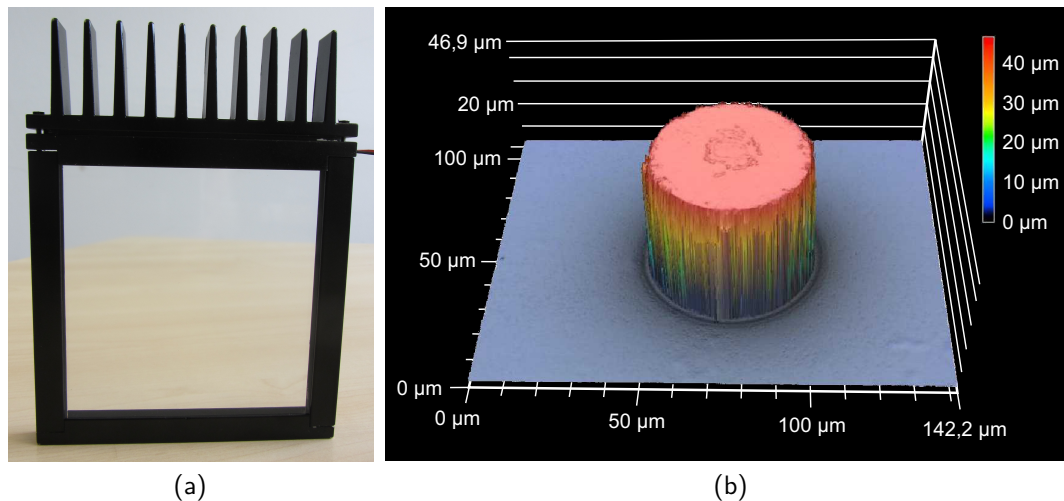


Abb. 4.10: Aufnahme des von *temicon* lithographisch gefertigten mikrostrukturierten Flächenstrahlers mit den Maßen $0,53\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ (a) [130]. (b) zeigt die CLSM-Aufnahme eines Zylinders aus Photolack auf der LGP. Er ist $43\text{ }\mu\text{m}$ hoch und besitzt einen Durchmesser von $52\text{ }\mu\text{m}$. Die sehr steilen Flanken konnten nicht aufgenommen werden.

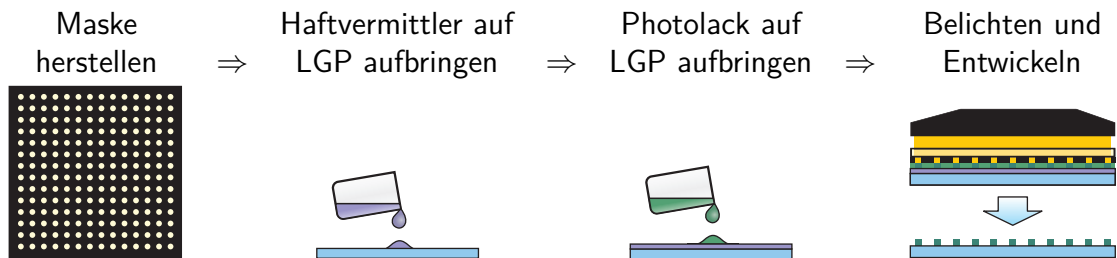


Abb. 4.11: Prozess zur photolithographischen Herstellung des Protoypen.

4.2.5 Variothermes Spritzprägen

Das variotherme Spritzprägen eignet sich sehr gut, um PMMA direkt zu strukturieren. Es ermöglicht die Abformung von Strukturen vom Mikrometer- bis in den Nanometerbereich mit geringer Rauheit in einer hohen Stückzahl bei gleichbleibender Qualität. Die lateralen Abmessungen der LGP sind jedoch auf weniger als 10 cm begrenzt. Diese Größe ist für einen Prototypen ausreichend. Diese werden auf dem von Rytka [34] entworfenen Werkzeug zum variothermen Spritzprägen in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Nanotechnische Kunststoffanwendungen (INKA) und dem Institut für Kunststofftechnik (IKT) an der FHNW hergestellt [131].

Beim variothermen Spritzprägen wird die LGP samt Struktur (ähnlich dem Gießprozess) hergestellt, anstatt eine bereits existierende Platte zu modifizieren. Ausgangsmaterial

ist ein PMMA-Granulat (PMMA 7N von *Evonik*), welches auf $240\text{ }^{\circ}\text{C}$ erhitzt und in ein mikrostrukturiertes Formwerkzeug mit einer Einspritzgeschwindigkeit von $20\text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ injiziert wird. Dieses Formwerkzeug ist in ein umschließendes Prägwerkzeug eingesetzt. Das Prägwerkzeug besteht aus zwei gegenüberliegenden Teilen (vgl. Abbildung 4.12), die während des Einspritzvorgangs so zusammen gepresst werden, dass zwischen ihnen ein Kompressionsspalt mit einer konstanten Breite von $0,5\text{ mm}$ existiert. In diesen Spalt wird das Granulat eingespritzt. Anschließend wird der Kompressionsspalt durch Erhöhen des Prägedrucks auf 300 kN geschlossen, während für 12 Sekunden ein Nachdruck im PMMA von 750 bar aufrecht erhalten wird. Das Werkzeug wird dabei dynamisch von $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Einspritztemperatur) bis $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Auswurftemperatur) temperiert. Durch das Erwärmen der Werkzeuge, wird ein vorzeitiges Erstarren des eingespritzten flüssigen PMMA auf der Oberfläche des kälteren Formwerkzeugs vermieden. Ohne Prägeschritt und dynamische Temperierung des Werkzeugs nahe der Glasübergangstemperatur könnte keine hohe Abformgenauigkeit erzielt werden. Zudem werden beim beschriebenen Verfahren thermische Spannungen im erstarrten Material reduziert. Diese Spannungen würden die optischen Eigenschaften der LGP negativ beeinflussen [132, 133]. Für eine möglichst genaue Abformung von Strukturen mit hohen Aspektverhältnissen, ist eine Werkzeugtemperatur über der No-Flow-Temperatur (für PMMA 7N $T_{no} \approx 130\text{ }^{\circ}\text{C}$) notwendig (ebd.). Der Prägeprozess wird in Abbildung 4.13 zusammengefasst.

Der produzierte Spritzling (ohne Zuschnitt) mit Kegelstümpfen mit einem Basisdurchmesser von $1283\text{ }\mu\text{m}$, einer Höhe von $586\text{ }\mu\text{m}$ und einem Flankenwinkel von 32° ist in Abbildung 4.14 dargestellt. Die Rauheit auf der Oberfläche des Spritzlings ist mit $12\text{ nm} \leq R_a \leq 59\text{ nm}$ ausreichend gering. Das Formwerkzeug biegt sich während der Herstellung der Mikrostrukturen im variothermen Spritzprägen leicht durch. Dadurch variiert die effektive Höhe der Mikrostrukturen um $\pm 6,2\text{ }\mu\text{m}$ [131]. Durch die Wahl einer höheren Stärke des Formwerkzeugs (bspw. 2 mm statt 1 mm) ist eine Verformung vermeidbar. Abgesehen von der Höhe ist die Qualität der Replikation über den gesamten Spritzling gleichbleibend gut. Die Fertigungszeit eines Spritzlings beträgt etwa 100 Sekunden .

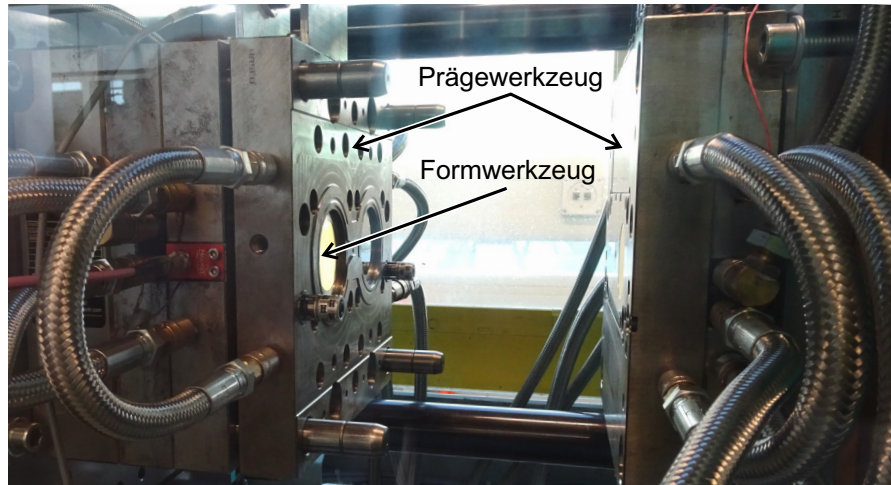


Abb. 4.12: Prägewerkzeug am INKA mit eingesetztem Formwerkzeug aus Messing (links). Der linke Teil des Prägewerkzeugs wird beim Spritzprägen gegen den rechten Teil gepresst, während das PMMA von rechts eingespritzt wird.

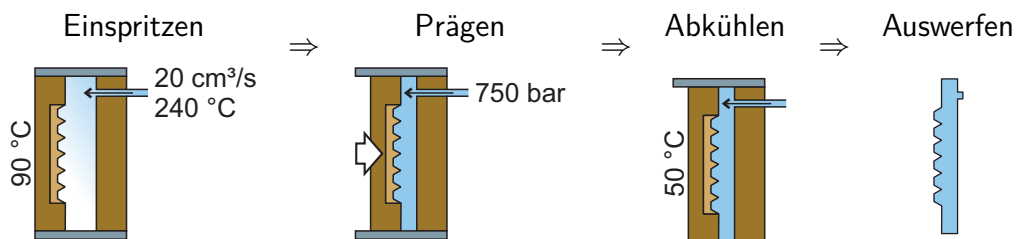


Abb. 4.13: Prozessablauf des variothermen Spritzprägens mikrostrukturierter PMMA-Platten.

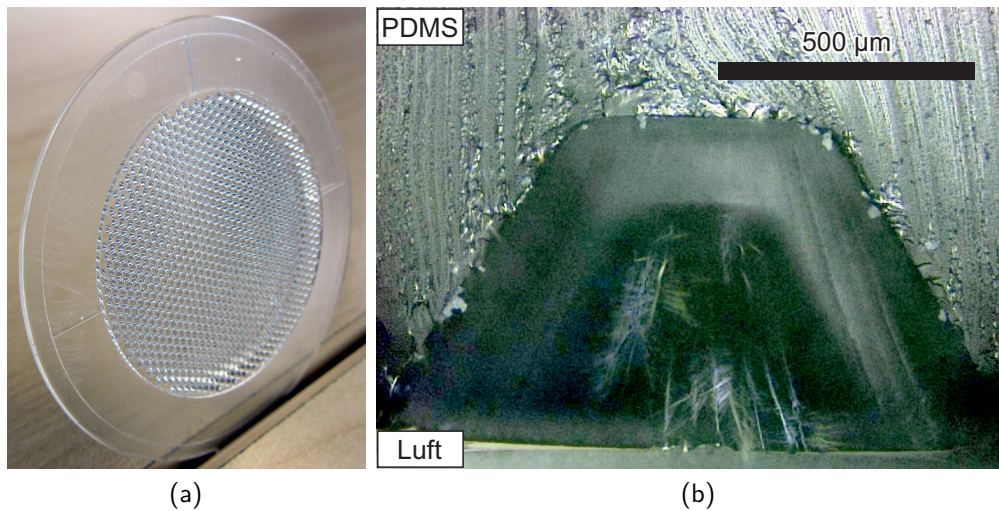


Abb. 4.14: Durch variothermes Spritzprägen am INKA hergestellter Spritzling (a) und Querschnitt durch die PDMS-Abformung eines Kegelstumpfs auf dem Spritzling (b). Die strukturierter Fläche besitzt einen Durchmesser von 4,7 cm. Der Kegelstumpf ist 586 µm hoch und besitzt einen Basisdurchmesser von 1283 µm.

4.2.6 Heißprägen

Mikrostrukturierte LGPs lassen sich für die Serienproduktion gut im Heißpräge-Verfahren industriell fertigen. Ausgangsmaterial sind PMMA-Platten. In diese Platten wird mit einem beheizten mikromechanisch gefertigten Formwerkzeug die gewünschte Struktur geprägt. Um das PMMA formbar zu machen, wird es über seine Glasübergangstemperatur T_g erwärmt, ebenso wie das Formwerkzeug [134]. In der großflächigen Strukturierung sind die herstellbaren Strukturen – abhängig von ihrer Form – in ihrer Größe beschränkt. Je nach Höhe und Aspektverhältnis müssen die Strukturflanken für eine problemlose Entformung eine Abformschräge aufweisen. Jede Geometrie ist einzeln zu beurteilen. Es muss im Einzelfall entschieden werden, ob Heißprägen für die jeweilige Struktur geeignet ist bzw. die Struktur unter Umständen an das Herstellungsverfahren angepasst werden muss. Bei geeigneter Geometrie sind Strukturen ab einer Höhe von 10 µm mit einer Formgenauigkeit von 1 µm herstellbar [135, 136]. Das Formwerkzeug wird mittels Flycutting oder Diamantfräsen hergestellt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde von *Jungbecker* eine LGP mit Zylinder-Strukturen gefertigt. Für eine solche Geometrie mit einem Aspektverhältnis von 1 ist bei einer Höhe von 1 mm ein Flankenwinkel von mindestens 5° notwendig. Bei einer Höhe von 600 µm ist bereits ein Flankenwinkel von 10° erforderlich [137]. Kanten werden bis zu einem minimalen Radius von 9 µm formtreu geprägt. Abbildung 4.15 zeigt Aufnahmen der

mittels Heißprägen hergestellten $15,5 \times 15,5 \text{ cm}^2$ LGP mit 1 mm hohen Zylindern. Die um $4,5^\circ$ geneigte Flanke des Zylinders ist gut zu erkennen. Die Oberflächenrauheit beträgt $R_a = 55 \text{ nm}$. Der Prozess des Heißprägens wird in Abbildung 4.16 zusammengefasst. Für solche, relativ leicht entformbaren, Mikrostrukturen auf kleinen Flächen kann dieses Verfahren auch zur Fertigung von Prototypen verwendet werden. Die Fertigungszeit solcher LGPs, in Abmessungen für eine kommerzielle Nutzung ($l_y = l_z \geq 600 \text{ mm}$), beträgt $0,18 \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ (ohne Fertigung des Formwerkzeugs) [138].

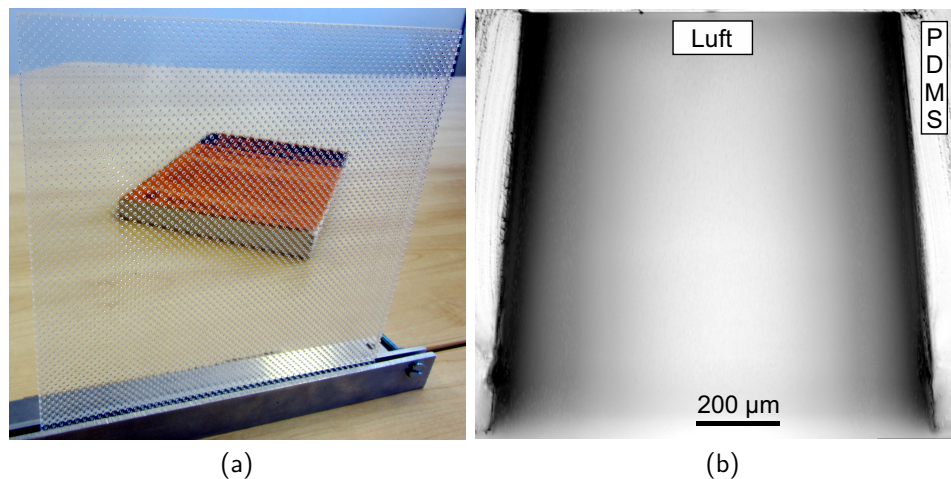


Abb. 4.15: Aufnahme einer von *Jungbecker* heißgeprägten LGP mit den Maßen $0,23 \text{ cm} \times 15,5 \text{ cm} \times 15,5 \text{ cm}$ mit ca. 1 mm hohen Zylindern (a). Sie wurde für die Aufnahme in einer Metallhalterung eingespannt. (b) zeigt eine Mikroskopaufnahme des Querschnitts eines abgeformten Zylinders auf der LGP. Deutlich erkennbar ist dessen geneigte Flanke.

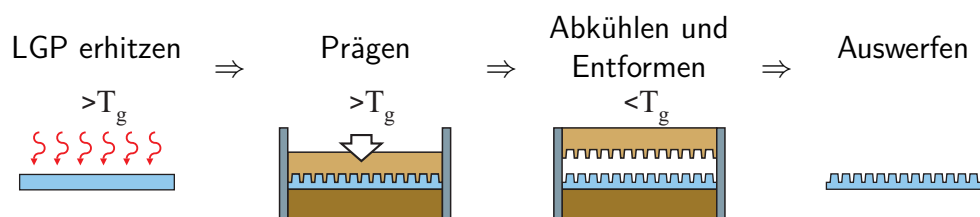


Abb. 4.16: Prozess zum Heißprägen mikrostrukturierter PMMA-Platten.

4.2.7 UV-Prägen

Für die industrielle Serienproduktion ebenfalls sehr gut geeignet ist das UV-Prägen im Rolle-zu-Rolle- oder Rolle-zu-Platte-Verfahren. Beim UV-Prägen wird ein entsprechend hitzebeständiger, photosensitiver Lack und falls erforderlich ein Haftvermittler (vgl. Abschnitt 4.2.4) auf die LGP aufgebracht. In die Lackschicht wird ein mikrostrukturierter

Stempel gedrückt, während der Lack durch die Bestrahlung mit UV-Licht vernetzt [134, 139]. Entsprechend eignen sich lediglich Negativlacke für das UV-Prägen. Das Schema des UV-Prägens ist in Abbildung 4.17 skizziert.

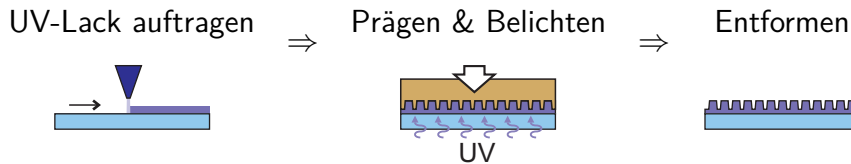


Abb. 4.17: Grundprozess des UV-Prägens.

Im Rolle-zu-Rolle- oder Rolle-zu-Platte-Verfahren wird eine mikrostrukturierte Walze oder eine mikrostrukturierte Master-Folie als Stempel bzw. Formwerkzeug eingesetzt [140]. Die Walze wird bevorzugt direkt mikromechanisch strukturiert, um eine Naht zu vermeiden [141]. Die Master-Folie wird in einem vorhergehenden Rolle-zu-Rolle-Verfahren an einer strukturierten Walze hergestellt. Beide Verfahren werden bei *temicon* zur Fertigung von LGPs angewandt. Die Verfahren sind schematisch in Abbildung 4.18 dargestellt. Abhängig von der Transparenz der LGP im UV-Bereich kann die UV-Lichtquelle den Lack durch die LGP oder durch eine transparente Prägewalze bzw. durch eine transparente Master-Folie belichten. Je nach Formstabilität des Lacks kann eine Belichtung auch nach dem Entformen erfolgen. Für die in dieser Arbeit betrachteten stabilen LGPs mit einer Höhe im Millimeterbereich ist das Rolle-zu-Platte-Verfahren zu bevorzugen. Beim Verwenden einer mikrostrukturierten Folie, die auf eine Platte aufgebracht wird, entsteht eine zusätzliche Grenzschicht zwischen zwei Materialien, die unerwünschte Reflexionen verursacht.

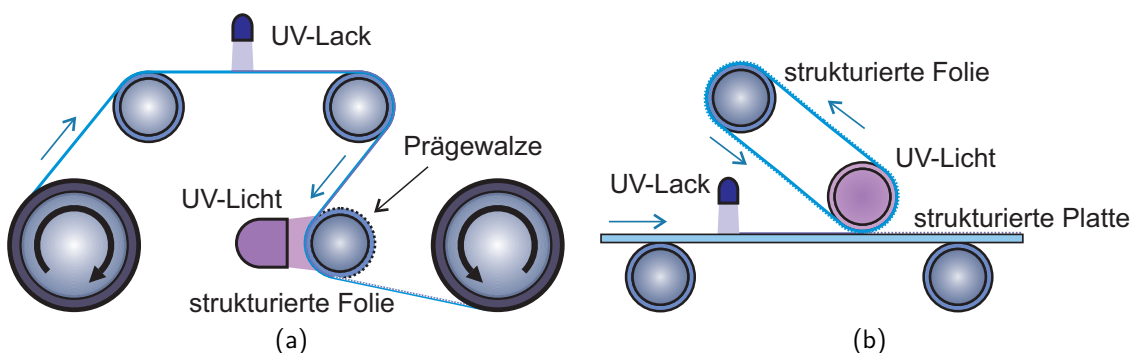


Abb. 4.18: UV-Präge-Verfahren, die bei *temicon* angewendet werden: Im Rolle-zu-Rolle-Verfahren (a) wird eine Folie mit Lack beschichtet, in den mit einer Prägewalze die Mikrostruktur geprägt wird. Durch gleichzeitige Belichtung vernetzt der Lack. Das Rolle-zu-Platte-Verfahren (b) verwendet eine Master-Folie um die Mikrostrukturen in eine Lackschicht auf einer Platte zu prägen. [142]

Mittels UV-Prägen lassen sich Strukturen im Mikro- und Nanometerbereich abformen. Die Höhe ist bei den vorgestellten Verfahren jedoch auf etwa $30\ \mu\text{m}$ begrenzt. Wie beim Heißprägen müssen die Strukturen für eine problemlose Entformung je nach Höhe und Aspektverhältnis eine Abformschräge aufweisen.

Von *temicon* wurde im Rahmen dieser Arbeit im Rolle-zu-Platte-Verfahren eine LGP mit Zylinder-Strukturen und den Abmessungen $30 \times 60\ \text{cm}^2$ gefertigt (vgl. Abbildung 4.19). Für die Zylindergeometrie mit einem Aspektverhältnis von 1 ist bei einer Höhe von $28\ \mu\text{m}$ eine Abformschräge von mindestens 5° notwendig. Kanten werden bis zu einem minimalen Radius von $1,5\ \mu\text{m}$ formtreu geprägt. Abbildung 4.20 zeigt die Aufnahme einer der Zylinder auf der gefertigten LGP. Die Oberflächenrauheit beträgt $R_a = 22\ \text{nm}$. Solche LGPs lassen sich mit einer Geschwindigkeit von ca. $3\ \text{m}^2\text{min}^{-1}$ (ohne Fertigung der Walze und Master-Folie) fertigen [143].



Abb. 4.19: Aufnahme einer $0,3\ \text{cm} \times 30\ \text{cm} \times 60\ \text{cm}$ LGP mit $28\ \mu\text{m}$ hohen Zylindern hergestellt von *temicon* mittels Rolle-zu-Platte UV-Prägen. Eine $10\ \text{cm} \times 10\ \text{cm}$ Ecke der Platte (oben rechts) wurde für die Vermessung der Strukturen herausgesägt.

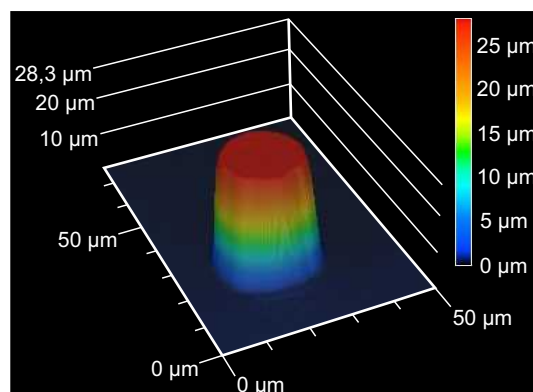


Abb. 4.20: CLSM-Aufnahme eines Zylinders der von *temicon* UV-geprägten LGP. Er ist $28\ \mu\text{m}$ hoch und besitzt einen Durchmesser von ca. $18\ \mu\text{m}$.

4.3 Herstellung hinterschnittener Mikrostrukturen

Die Herstellung von hinterschnittenen Strukturen ist notwendig, um spezielle Abstrahlcharakteristika von mikrostrukturierten Flächenstrahlern zu erreichen (z.B. eine Auskopplung senkrecht aus der LGP, vgl. Abschnitte 5.2 und 5.3). Diese können in den bisher beschriebenen Herstellungsverfahren nicht gefertigt werden. Zum einen ist die Fertigung von Formwerkzeugen für hinterschnittene Strukturen mechanisch bisher nicht möglich und zum anderen können steife Materialien wie PMMA in solchen Formen nicht ohne Zerstörung der LGP oder des Werkzeugs entformt werden. Mit aufwendig lithographisch gefertigten Formwerkzeugen aus Silikon können LGPs mit hinterschnittenen Strukturen gegossen werden [29, 31]. Xue et al. [144] erweitern dieses Verfahren und schaffen ein temporäres Formwerkzeug aus Eis, um auch hinterschnittene Mikrostrukturen aus PMMA herzustellen. Dieses Verfahren ist ebenfalls sehr aufwendig.

Im Folgenden wird ein Verfahren entwickelt, welches Mikrostrukturen aus PMMA mit einer LGP aus gleichem Material verbindet. Eine Verbindung von Mikrostrukturen aus PDMS mit einer LGP aus gleichem Material ist durch Behandlung mit Sauerstoffplasma, ähnlich wie bei Fleger [145] ausgeführt, ebenfalls möglich, wird aber nicht näher erläutert, weil das Verfahren in dieser Arbeit keine Anwendung findet. Das Prinzip, das beiden Bondtechniken zu Grunde liegt, ist in Abbildung 4.21 skizziert. Die Strukturen werden in einem ersten Schritt „auf dem Kopf stehend“ (an der Plattenoberfläche gespiegelt) auf einer Basisplatte hergestellt. Der zweite Schritt ist das Verbinden („Bonden“) der strukturierten Basisplatte mit der LGP durch eine Oberflächenmodifikation.

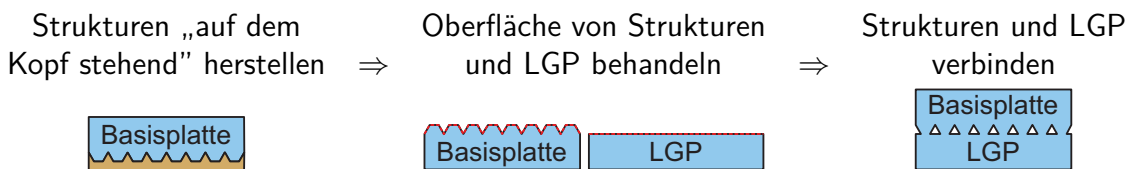


Abb. 4.21: Prinzip der Verbindung von LGP und Mikrostrukturen durch Oberflächenmodifikation.

LGP mit hinterschnittenen Strukturen aus PMMA können mittels UV-Strahlung unterstützter thermischer Bonden realisiert werden. Es ist der Fertigung mikrofluidischer Systeme entlehnt [35, 36, 37]. Dort wird es zum flächigen Verbinden zweier PMMA-Platten verwendet.

Durch die Bestrahlung der PMMA-Oberfläche mit einer Wellenlänge von 172 nm werden dort die Polymerketten zertrennt und damit das Molekulargewicht in der oberflächennahen Schicht deutlich reduziert. Daraus folgt unmittelbar ein Absinken der Glasübergangstemperatur.

peratur T_g in dieser Schicht. Die Eindringtiefe der UV-Strahlung und somit die Dicke der modifizierten Oberflächenschicht beträgt etwa 400 nm [105].

Werden die bestrahlten PMMA-Teile auf eine Temperatur zwischen dem abgesenkten T_g der Oberfläche und dem T_g des restlichen PMMA erwärmt, so können diese unter Druck thermisch verbunden werden ohne, dass sich die PMMA-Teile verformen. Beim thermischen Verbinden werden die Polymerketten im PMMA durch das Erwärmen beweglicher und ihre Nebervalenzbindungen aufgebrochen. Die Polymerketten der zusammengedrückten Oberflächen diffundieren ab T_g in die jeweils andere Oberfläche und verhaken sich ineinander [146, 147]. Sie bilden beim Abkühlen erneut Nebervalenzbindungen aus und sind nach dem Abkühlen fest verbunden.

Nach diesem Prinzip wurde in Kooperation mit dem INKA ein Verfahren zur Herstellung mikrostrukturierter LGPs mit hinterschnittenen Strukturen entwickelt [131, 148]. Die LGP und die Mikrostrukturen werden zunächst bei einer Wellenlänge von $\lambda = 172 \text{ nm}$ und einer Strahlungs-dosis von $H = 465 \text{ mJ cm}^{-2}$ für $t_{UV} = 60 \text{ s}$ in einem Excimer (EX-mini von der Hamamatsu Photonics K.K., Hamamatsu) bestrahlt. Anschließend werden Mikrostruktur und LGP bei einer Temperatur von $T_P = 103^\circ\text{C}$ und einem Druck von $p = 336 \text{ kPa}$ für eine Dauer von $t_P = 20 \text{ min}$ zusammengedrickt. Dabei wird sowohl die Temperatur des Presswerkzeugs als auch der Umgebung auf 103°C erwärmt. Der ganze Aufbau wird abschließend unter anhaltendem Druck innerhalb von 1,5 Stunden auf 60°C abgekühlt. Der hohe Druck von 336 kPa ist notwendig, da die Höhen der Mikrostrukturen der verarbeiteten Proben um $\pm 6,2 \mu\text{m}$ variieren (vgl. Abschnitt 4.2.5). Der Prozess des Verbindens von Mikrostruktur und LGP aus PMMA ist in Abbildung 4.22 skizziert. Ein Querschnitt durch die PDMS-Abformung der am INKA verbundenen LGP mit hinterschnittenen Strukturen ist in Abbildung 4.23 dargestellt. Es ist eine durchgehende Verbindung von LGP und Mikrostruktur zu erkennen.

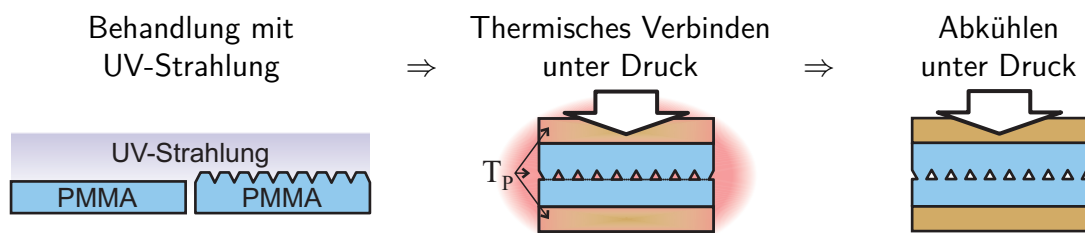


Abb. 4.22: Verbinden von Mikrostruktur und LGP aus PMMA durch UV-Strahlung unterstütztes thermisches Bonden.

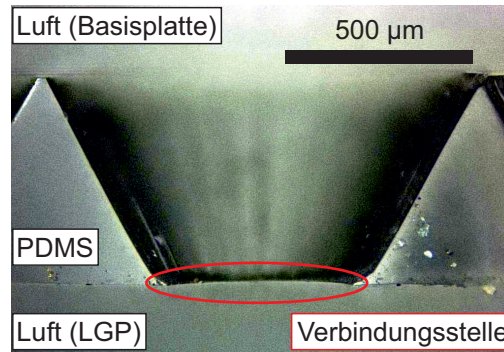


Abb. 4.23: Querschnitt durch eine PDMS-Abformung einer LGP aus PMMA mit hinter-schnittenen Mikrostrukturen, die mittels UV-Strahlung unterstütztem thermischen Bondens am INKA verbunden wurde. Die Verbindungsstelle ist rot markiert. *Adapted by permission from Springer Nature Customer Service Centre GmbH: [148], © Springer Nature 2020.*

4.4 Fazit: Vergleich der Herstellungstechnologien

In Tabelle 4.1 sind alle vorgestellten Technologien zur Fertigung von mikrostrukturierten Flächenstrahlern in Form charakteristischer Kenndaten zusammengefasst. Die angegebene Dauer ist je nach Anwendungsbereich des Verfahrens zu bewerten. So ist für ein Funktionsmuster eine Fertigungszeit im Stunden-Bereich akzeptabel, während in der Serienproduktion Fertigungszeiten im Minuten- oder besser Sekunden-Bereich wünschenswert sind. Dafür ist bei letzterem Anwendungsbereich die Fertigungszeit des Werkzeugs weniger kritisch. Diese kann nicht für alle Verfahren angegeben werden, da die Werkzeuge teils von Zulieferern im Auftrag kooperierender Unternehmen gefertigt werden. Die angegebenen Toleranzen beziehen das Formwerkzeug mit ein. Berücksichtigt werden hierbei lediglich die vorgestellten Herstellungsverfahren für Formwerkzeuge. Die angegebenen Flächen sind keine exakten Grenzwerte, sondern orientieren sich an den selbst oder in Kooperation mit Unternehmen und Instituten gefertigten Mustern. Sie dienen hier lediglich der Orientierung.

Tab. 4.1: Herstellungstechnologien für mikrostrukturierte LGPs im Vergleich.

| Technologie | Dauer 1 Stück (inkl. Werkzeugfertigung) | Strukturgröße (Toleranz) | Fläche |
|--------------------------------|---|-----------------------------|-------------------------|
| Gießen | 44 h (44,5 h - 49 h) | bis mm-Bereich (nm-Bereich) | 100 cm ² |
| Lithographische Strukturierung | 25 min | < 50 µm (nm-Bereich) | 100 cm ² |
| Variothermes Spritzprägen | 100 s (8 h) | bis mm-Bereich (5 µm) | 16 cm ² |
| Heißprägen | 0,18 m ² min ⁻¹ | ≥ 600 µm (6 µm) | m ² -Bereich |
| UV-Prägen | 3 m ² min ⁻¹ | ≤ 30 µm (2 µm) | m ² -Bereich |

Mit dem Gießen steht für die Fertigung von Funktionsmustern ein Verfahren mit hoher Abformtreue zur Verfügung. Es können Strukturen verschiedenster Formen gegossen werden. Vorteil des Gießprozesses ist die Anwendung in der Mikrotechnologie etablierter Prozesse für die Herstellung der Formwerkzeuge: Die lithographische Strukturierung auf Siliziumwafern für einstufige Strukturen und das Mikrofräsen für komplexere Strukturen ab einer Höhe und einem Durchmesser von etwa 0,6 mm. Die Dauer der Fertigung eines Funktionsmusters ist von untergeordneter Bedeutung.

Für Prototypen eignen sich die lithographische Strukturierung, das Heißprägen und das variotherme Spritzprägen. Während mit der lithographischen Strukturierung Strukturen auf LGPs bis in den Nanometerbereich genau hergestellt werden können, greift dieses Verfahren nur teilweise auf etablierte Prozesse zurück und bedarf daher eigener Entwicklungsarbeit. Es ist sehr gut für die Herstellung von Prototypen geeignet, soweit eine Fertigung des Endprodukts im UV-Präge-Verfahren angestrebt wird. Soll das Endprodukt durch Heißprägen hergestellt werden, kann bei geeigneten Mikrostrukturen (Strukturhöhe $\geq 600 \mu\text{m}$ und ausreichend großer Flankenwinkel) eben dieses Verfahren auch bereits für den Prototypen angewendet werden. Ansonsten ist das variotherme Spritzprägen vorzuziehen. Dieses ist, wie das Heißprägen, ein etabliertes Verfahren in der Herstellung mikrostrukturierter Komponenten. Es bietet die Möglichkeit mehrere kleine Muster in kürzester Zeit kostengünstig zu produzieren. Allerdings ist die Abformtreue weniger hoch als die der lithographischen Strukturierung. Gleiches gilt für das Heißprägen. Die Fertigung von hinterschnittenen Mikrostrukturen ist, durch das entwickelte Verfahren zum PMMA-Bonden, für Muster, die durch Heißprägen und variothermes Spritzprägen hergestellt werden, möglich. Der Durchsatz hergestellter LGPs ist in allen drei Methoden geeignet mehrere Muster für optische und Materialversuche zur Verfügung zu stellen. Die Methoden bieten dadurch auch die Möglichkeit Mikrostrukturen und Prozessparameter zügig für eine optimierte Herstellung anzupassen.

4 Technologien zur Herstellung mikrostrukturierter Flächenstrahler

Eine industrielle Fertigung der Muster kann durch UV- oder Heißprägen erfolgen. Während durch das UV-Prägen besonders kleine Mikrostrukturen ($\leq 30 \mu\text{m}$) mit hoher Abformtreue gefertigt werden können, ist es lediglich in heißgeprägten Mustern möglich hinterschnittene Strukturen zu realisieren. Hier müssen jedoch Abzüge in der möglichen Strukturhöhe ($\geq 600 \mu\text{m}$) und Abformtreue in Kauf genommen werden. Für eine Massenfertigung ist der Durchsatz hergestellter Muster in beiden Verfahren geeignet. Abbildung 4.24 zeigt abschließend die Zuordnung der verschiedenen Herstellungsverfahren zu den einzelnen Schritten im Entwicklungsschema.

| Entwicklungsschema | 1. Funktionsmuster | 2. Prototyp | 3. industr. gefert. Muster |
|--------------------|--------------------|---------------|----------------------------|
| Technologie | Gießen* | | |
| | | Lithographie | |
| | | Spritzprägen* | |
| | | Heißprägen* | |
| | | | UV-Prägen |

* Fertigung hinterschnittener Strukturen möglich

Abb. 4.24: Einordnung der Herstellungstechnologien in das Entwicklungsschema bezogen auf mikrostrukturierte Flächenstrahler zur Verwendung als fassadenintegrierte Leuchten.

5 Beispiele hergestellter mikrostrukturierter Flächenstrahler

Ausgehend von bereits als Funktionsmustern erprobten Flächenstrahlern mit Mikrozyklindern, werden Prototypen und industriell gefertigte Muster zum Einsatz als fassadenintegrierte Leuchten zur indirekten Raumbelichtung hergestellt. Die industriell gefertigten Muster weisen eine hervorragende Durchsicht auf und konnten im Rahmen des Verbundprojekts TaLed (vgl. Anhang A) in Fassaden integriert werden [149]. Im Rahmen der Projektzusammenarbeit wurde zudem ein optimiertes Abstrahlverhalten für fassadenintegrierte Leuchten berechnet, welches als Grundlage für die Entwicklung eines verbesserten Flächenstrahlers dient [150]. Die dort eingesetzte komplexe, hinterschnittene Mikrostruktur leitet sich von der im Folgenden für die Herstellung in PMMA entwickelten und als Prototyp hergestellten Mikrostruktur für Flächenstrahler mit horizontaler Lichtauskopplung her [148]. In diesem Kapitel wird auf die Simulationsumgebung und Herstellungsverfahren aus Kapitel 3 und 4 zurückgegriffen.

5.1 Durchsichtige Flächenstrahler für indirekte Raumbelichtung

Flächenstrahler sind optimal als Fassadenelemente geeignet, wenn sie eine hohe Transparenz aufweisen, da sie dann im gesamten transparenten Bereich der Fassade eingesetzt werden können. Besonders geeignet für transparente mikrostrukturierte Flächenstrahler sind Zylinderstrukturen (vgl. Abbildung 1.4). Neben einer guten Durchsicht muss der Flächenstrahler eine effiziente, einseitige Lichtauskopplung aufweisen, weil ausschließlich die Beleuchtung des Gebäudeinneren gewollt ist. Angestrebt wird eine indirekte Raumbelichtung über die Beleuchtung der Raumdecke aus der Fassade, um eine mögliche Blendung zu vermeiden. Entsprechend gerichtet muss das Licht vom Flächenstrahler abgestrahlt werden.

Für die Fertigung des Systems werden zwei Ansätze verfolgt: Es werden für die Flächenstrahler LGPs mit Zylindern im unteren Mikrometerbereich mittels UV-Prägen und mit

Zylindern im oberen Mikrometerbereich mittels Heißprägen gefertigt. Beide Systeme basieren auf dem gleichen Funktionsmuster aus PDMS, das die Funktion des entworfenen Flächenstrahlers belegt [16, 33] (vgl. Abschnitt 4.2.3).

5.1.1 Mikrostruktur

Zylinder besitzen eine Deckelfläche parallel zur Oberfläche der LGP und eine senkrechte Flanke (Flankenwinkel $\varphi_F = 0^\circ$). Bei vertikaler Sicht auf eine so strukturierte LGP sind ideale Zylinder daher nicht wahrnehmbar und damit für dein Einsatz in transparenten Flächenstrahlern gut geeignet. Mit größer werdendem Blickwinkel tritt allerdings eine zunehmende Störung der Durchsicht auf, weil die Flanke der Zylinder einen immer größeren Teil des Blickfelds einnimmt.

Gefertigte Zylinder weichen immer von der Idealform eines Zylinders ab. Sie weisen zumindest einen Radius an der oberen und unteren Kante auf. Damit diese Abweichungen von der Idealform nicht die Durchsicht stören, ist es wünschenswert die Abmessungen des Zylinders so klein zu wählen, dass er nicht mehr vom menschlichen Auge aufgelöst wird. Für die Rauheit aller Oberflächen ist $R_a \leq 40 \text{ nm}$ anzustreben, um die Durchsicht nicht merklich zu verschlechtern und eine streuende Lichtauskopplung zu minimieren. Für einen durchsichtigen Flächenstrahler werden entsprechend die in Abbildung 5.1a skizzierten Mikrozyylinder mit einer Höhe von $h_m = 50 \mu\text{m}$ und einem Durchmesser von $d_m = 50 \mu\text{m}$ verwendet.

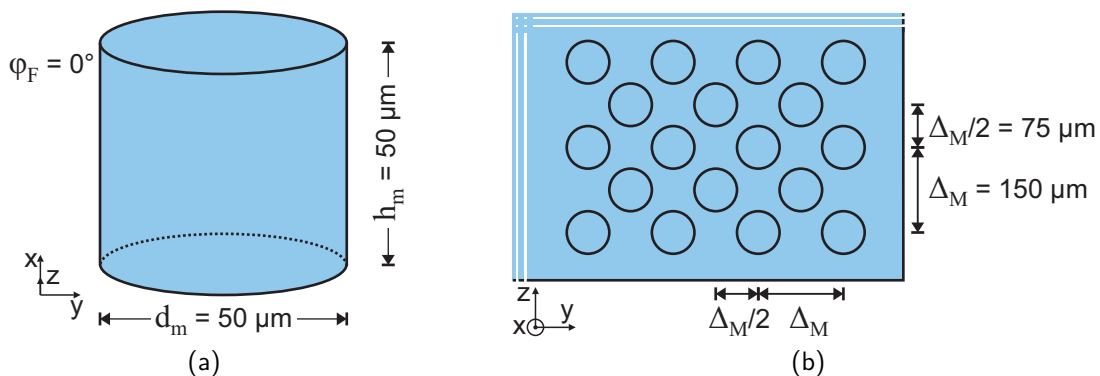


Abb. 5.1: Geometrie der idealen Zylinderstruktur (a) und ihre regelmäßige Anordnung auf der LGP (b).

Das Licht koppelt an der Flanke einzelner Zylinder ungestört aus. Wird das Licht jedoch aus einer LGP mit mehreren Zylindern ausgekoppelt, ist für eine stark einseitige Auskopplung der Abstand zwischen den Strukturen groß genug zu wählen, um störende Reflexionen des ausgekoppelten Lichts an weiteren Zylindern zu vermeiden (vgl. Abbildung 2.26

und Gleichung (2.55)). Für eine gerichtete, einseitige Lichtauskopplung werden die Mikrozyylinder entsprechend Abbildung 5.1b mit einem Abstand von $\Delta_M = 150 \mu\text{m}$ angeordnet. Dieser Abstand ermöglicht eine störungsfreie Auskopplung von Lichtstrahlen mit einem Winkel von $\beta_x \geq 27^\circ$.

Für die theoretische Verifikation des LGP-Designs und zur Bestimmung von idealen Referenzwerten für die gefertigten Muster, wird ein Flächenstrahler mit diesen Mikrozyindern simuliert. Die Länge der LGP beträgt $\ell_z = 600 \text{ mm}$, ihre Breite $\ell_y = 50 \text{ mm}$ und ihre Höhe $d = 2 \text{ mm}$. Sie besteht aus PMMA und als Lichtquelle werden 11 LEDs vom Typ TOPLED E3014 von *Osram* verwendet. Die simulierte LVK in Abbildung 5.2 bestätigt die gute einseitige Auskopplung mit $\eta_{eA} = 95 \%$ und einem Auskoppelbereich zwischen 5° und 53° sowie einem hohen LOR von $\eta_{LOR} = 81 \%$. Die Simulation belegt die prinzipielle Eignung eines solchen Flächenstrahlers für den Einsatz als effiziente, einseitig abstrahlende Leuchte. Die Kennwerte sind in Tabelle 5.1 aufgelistet. In den folgenden Abschnitten werden entsprechend den verwendeten Herstellungsverfahren angepasste Referenzsysteme simuliert, die verfahrensbedingten Randbedingungen Rechnung tragen.

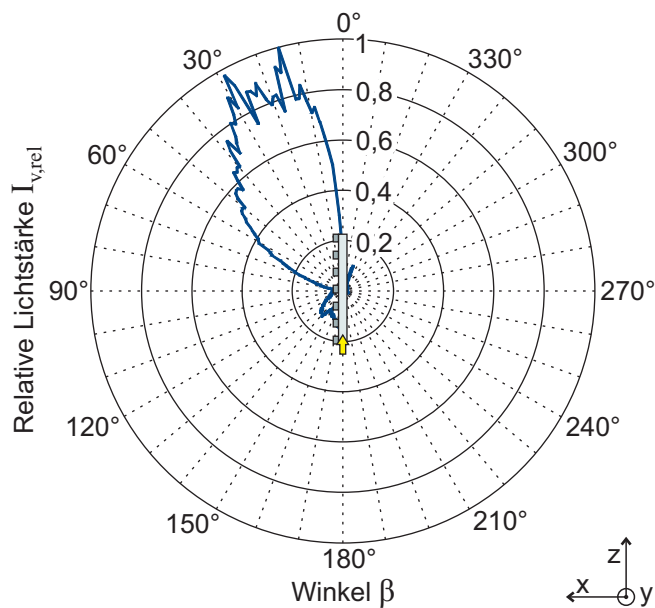


Abb. 5.2: LVK des simulierten Flächenstrahlers mit idealen Mikrozyindern. Das Licht wird gerichtet auf der strukturierten Seite (links) ausgekoppelt.

Tab. 5.1: Kennwerte und Abmessung des simulierten Flächenstrahlers mit idealen Mikrozyklindern.

| | |
|----------------------|-------------------|
| η_{LOR} | 81 % |
| η_{eA} | 95 % |
| η_{eLOR} | 77 % |
| Auskoppelbereich | 5° - 53° (48°) |
| h_m | 50 μm |
| d_m | 50 μm |
| Δ_M | 150 μm |
| R_a | 0 nm |
| φ_F | 0° |
| ℓ_z | 600 mm |
| ℓ_y | 50 mm |
| d | 2 mm |

5.1.2 Prototyp

Es werden zwei Prototypen untersucht. In Bezug auf das UV-Prägen wird ein Prototyp lithographisch hergestellt, während der Prototyp für das Heißprägen auch bereits durch Heißprägen hergestellt wird. Die Parameter der Mikrostrukturen werden für die verschiedenen Herstellungsverfahren angepasst und entsprechende Referenzsimulationen durchgeführt, die die eingesetzten Materialien und geänderten Geometrievorgaben berücksichtigen.

Photolithographische Fertigung

Der lithographisch gefertigte Prototyp wird von der Firma *temicon* hergestellt. Als Referenzstruktur ist die bereits beschriebene ideale Zylindergeometrie in Abbildung 5.1a vorgegeben. Die Zylinder werden entsprechend Abbildung 5.3 vereinfacht angeordnet. Der Abstand $\Delta_M = 150 \mu\text{m}$ wird nicht geändert. Die Länge und Breite der Platte wird für eine einfachere Fertigung auf $\ell_z = \ell_y = 100 \text{ mm}$ sowie die Höhe auf $d = 4 \text{ mm}$ angepasst. Die Fertigung der Mikrostrukturen geschieht im Photolack Ordyl FP450 von der ElgaEurope s.r.l, Mailand. Dieser wird in der Simulation des Referenzsystems mit einer genährten Brechzahl von $n = 1,51$ und Schichtdicke von $50 \mu\text{m}$ berücksichtigt. Die LGP wird zur Vermessung mit 10 LEDs vom Typ TOPLED LW G6CP von *Osram* in einen schwarzen Rahmen als vollständiger Flächenstrahler eingefasst. Die Lichtquellen werden in der Simulation entsprechend angepasst.

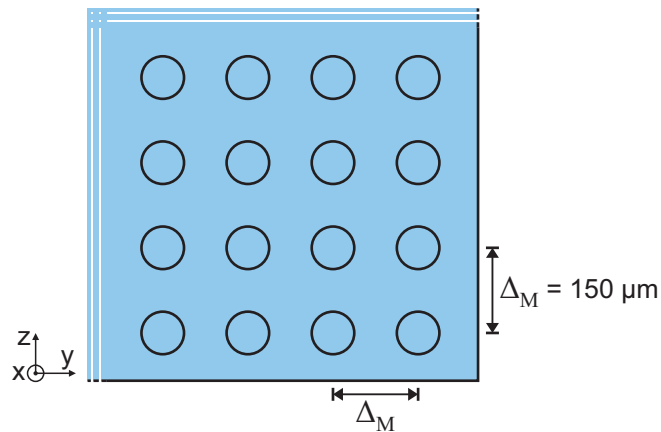


Abb. 5.3: Anordnung der Zylinder auf dem lithographisch gefertigten Prototypen mit $50 \mu\text{m}$ -Zylindern.

Das im Messrahmen eingefasste Muster und eine CLSM-Aufnahme eines Zylinders sind in Abbildung 5.4 dargestellt. Mit einer Höhe von $43 \mu\text{m}$, einem Durchmesser von $52 \mu\text{m}$ und einem Flankenwinkel von $\varphi_F = 0,2^\circ$ weicht die Geometrie der Zylinder geringfügig vom Referenzsystem ab. Der Abstand ist wie vorgegeben $\Delta_M = 150 \mu\text{m}$. Das gefertigte Muster weist abweichend eine Höhe von $d = 5,3\text{mm}$ auf. Dies ist in Bezug auf die gemessenen Kennwerte vernachlässigbar.

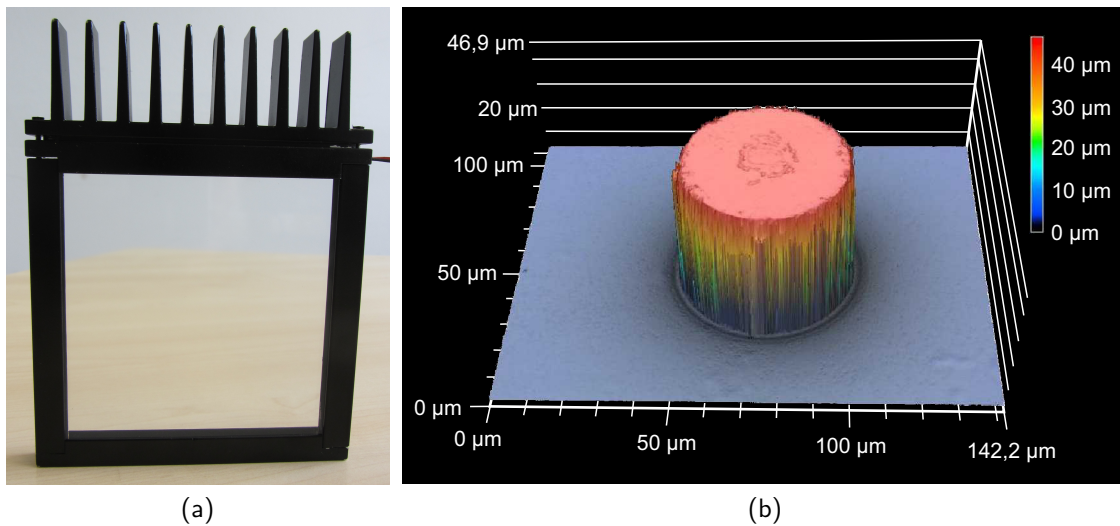


Abb. 5.4: Die Strukturen sind auf dem von *temicon* lithographisch gefertigten Prototypen (a) von Nahem nicht zu erkennen [130]. Die Durchsicht wird kaum beeinträchtigt. Das Muster besitzt eine Kantenlänge von 100mm . In der CLSM-Aufnahme eines $43 \mu\text{m}$ hohen Zylinders aus Photolack auf der LGP (b) ist die vertikale Flanke zuerkennen, die wegen dem geringen Flankenwinkel nicht an allen Stellen aufgelöst werden kann.

Der Vergleich des simulierten Referenzsystems mit den gemessenen Werten in Abbildung 5.5 und Tabelle 5.2 bestätigen die gute Übereinstimmung zwischen dem photolithographisch gefertigten Prototypen und der simulierten Referenz. Ausnahme ist die einseitige Auskopplung ($\delta_F = 18\%$), deren Abweichung hauptsächlich auf Streuung am Rahmen und in sehr geringem Maße auf Schlieren in der Photolackschicht zurückzuführen ist. Eine Aufnahme der Schlieren ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Sie können selbst bei einer Betrachtung von Nahem nur sehr schwer erkannt werden und sind vermutlich ein Nebeneffekt der Entwicklung des belichteten Photolacks. Die stärkere Auskopplung bei einem Winkel von $\beta_x = 150^\circ$ (vgl. Abbildung 5.5) wird ebenfalls auf Reflexionen am Rahmen zurückgeführt. Die weitere Abweichung von der idealen Referenz beruht auf der Verwendung von Photolack für die Mikrostrukturen.

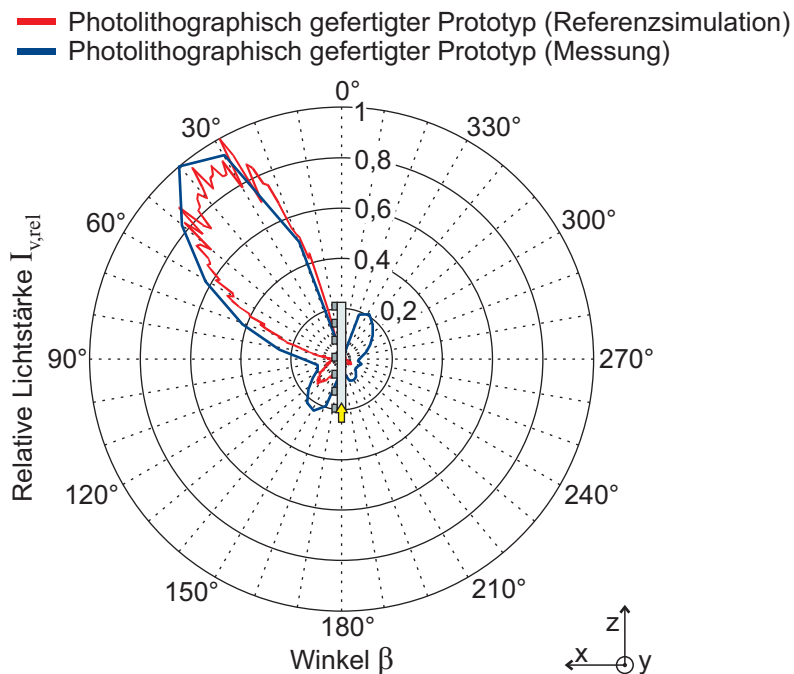


Abb. 5.5: LVK des gemessenen, lithographisch hergestellten Prototypen (blau) und des simulierten, entsprechenden Referenzsystems (rot). Die Hauptauskoppelrichtung stimmt überein. Mit der Auskopplung unter einem Winkel von 150° und auf der unstrukturierten Seite (blau, rechts) weicht der Prototyp vom Referenzsystem ab.

Tab. 5.2: Kennwerte und geometrische Abmessungen des von *temicon* lithographisch gefertigten Prototypen und dessen Referenz im Vergleich mit dem idealen, simulierten Flächenstrahler.

| | Photolithographisch gefertigter Prototyp | | Ideal Referenz |
|------------------|--|-------------------|-------------------|
| | Messung | Referenz | |
| η_{eA} | 77 % | 94 % | 95 % |
| Auskoppelbereich | 20° - 65° (45°) | 19° - 61° (42°) | 12° - 56° (44°) |
| h_m | 43 μm | 50 μm | 50 μm |
| d_m | 52 μm | 50 μm | 50 μm |
| Δ_M | 150 μm | 150 μm | 150 μm |
| R_a | 40 nm \pm 5 nm | 0 nm | 0 nm |
| φ_F | 0,2° | 0° | 0° |
| l_z | 100 mm | 100 mm | 100 mm |
| l_y | 100 mm | 50 mm | 50 mm |
| d | 5,3 mm | 4 mm | 2 mm |

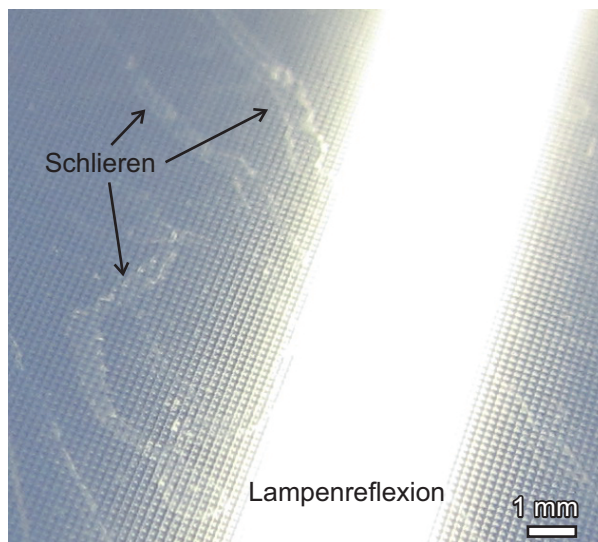


Abb. 5.6: Schlieren auf dem von *temicon* lithographisch gefertigten Prototypen. Der breite, weiße Streifen in der Mitte der Aufnahme ist die Reflexion einer Lampe. Die Schlieren sind mit Pfeilen gekennzeichnet. Das periodische Muster sind Reflexionen an den Mikrozyklindern.

Fertigung durch Heißprägen

Der Prototyp in PMMA wird von der Firma *Jungbecker* mittels Heißprägen gefertigt. Entsprechend der Einschränkungen dieses Herstellungsverfahrens wird die Referenzgeometrie, wie in Abbildung 5.7 angegeben, angepasst. Die Höhe des Zylinders wird bei gleichbleibendem Aspektverhältnis auf 1000 μm skaliert und die Flanke um 5° geneigt, um eine fehlerfreie Abformung zu gewährleisten. Die Anordnung des Idealsystems wird

beibehalten (vgl. Abbildung 5.1b) und der Abstand entsprechend der skalierten Geometrie auf $\Delta_M = 3000 \mu\text{m}$ erhöht, um die störungsfreie Auskopplung ab $\beta_x = 27^\circ$ beizubehalten. Die Referenz-LGP ist $\ell_z = \ell_y = 100 \text{ mm}$ lang und breit sowie $d = 2 \text{ mm}$ hoch. Der Prototyp wird in einem Rahmen mit sieben LEDs vom Typ Duris E3 von *Osram* als vollständiger Flächenstrahler vermessen. Die Änderung an der Mikrostruktur, LGP und den verwendeten LEDs werden in der Referenzsimulation berücksichtigt.

Die Aufnahme des gefertigten Musters mit den LGP-Abmessungen $\ell_z = \ell_y = 155 \text{ mm}$ und $d = 2,25 \text{ mm}$ wird in Abbildung 5.8 dargestellt. Die Abweichung der Plattendicke d ist dadurch bedingt, dass PMMA-Platten üblicherweise nur in bestimmten Abmessungen verfügbar sind und d während des Heißprägens abnimmt. Die erreichte Dicke ist die, die mit herkömmlich verfügbaren PMMA-Platten der Vorgabe von 2 mm am nächsten ist, ohne sie zu unterschreiten. In Abbildung 5.9 sind Aufnahmen der Mikrostruktur des Musters zu sehen. Auf der Zylinderdecke befindet sich eine $2 \mu\text{m}$ tiefe Störung mit einem Durchmesser von $27 \mu\text{m}$. Für die Lichtauskopplung spielt diese Abweichung keine Rolle, weil nur ein sehr geringer Teil des Lichts auf die Zylinderdecke trifft. Der Flankenwinkel weicht mit $\varphi_F = 4,5^\circ$ nur gering von der Referenz ab. Die Höhe $h_m = 1016 \mu\text{m}$ und der Durchmesser der Decke $d_{m, \text{Decke}} = 982 \mu\text{m}$ der Zylinder weichen mit $\delta_F = 2\%$ ebenfalls nur wenig ab. Der Radius an den Kanten der Mikrostruktur beträgt ca. $15 \mu\text{m}$. Die auf der LGP gemessene Rauheit $R_a \leq 55 \text{ nm}$ ist so hoch, dass eine geringe Auswirkung auf die Lichtauskopplung zu erwarten ist. Die Abweichungen sind auf Ungenauigkeiten in der Werkzeugfertigung und der thermischen Ausdehnung bzw. Schwindung des PMMAs während des Prägevorgangs zurückzuführen.

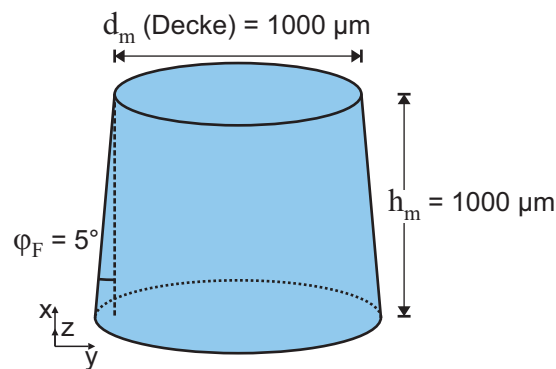


Abb. 5.7: Zylindergeometrie angepasst für das Heißprägen. Die Höhe, der Durchmesser und der Flankenwinkel werden für eine gute Endformbarkeit vergrößert.

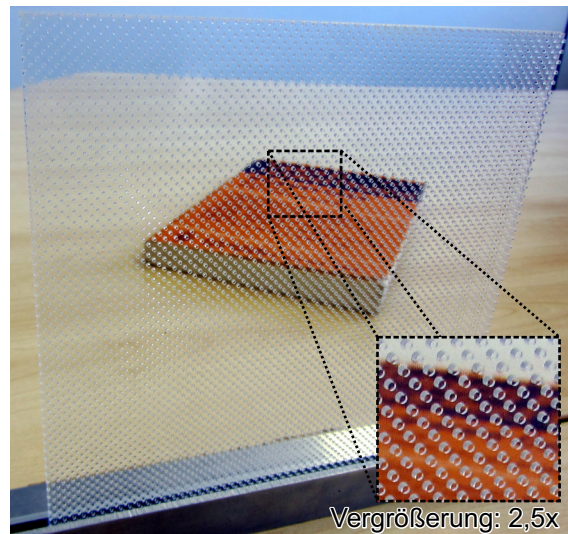


Abb. 5.8: Durch Heißprägen von *Jungbecker* gefertigter Prototyp mit einer Kantenlänge von 155 mm. Der vergrößerte Ausschnitt zeigt die Zylinder mit einem Durchmesser von 982 μm , welche von Nahem deutlich zu erkennen sind.

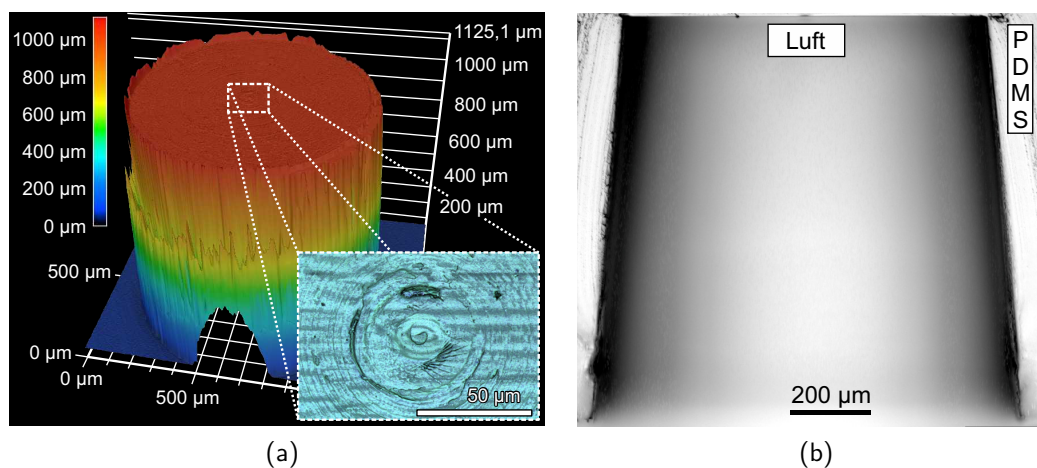


Abb. 5.9: CLSM-Aufnahme mit vergrößerter Störung auf der Zylinderdecke (a) und Aufnahme des Querschnitts durch eine PDMS-Abformung (b) der von *Jungbecker* mittels Heißprägen gefertigten Zylinder. Die gute Endformung und die schräge Flanke sind in der Abformung gut zu erkennen.

Um die Auswirkung der geometrischen Abweichungen auf das Abstrahlverhalten zu untersuchen, werden die Mikrostrukturen digital nachgebildet und simuliert. Das Bild des CAD-Modells der nachgebildeten Mikrostruktur ist in Abbildung 5.10 dargestellt. Die LVK der simulierten Systeme sowie die Messung des hergestellten Musters sind in Tabelle 5.3 und Abbildung 5.11 aufgeführt. Für die Vermessung wird das Muster auf $\ell_z = \ell_y = 100\text{ mm}$ zugeschnitten. Die Abweichung in der Plattendicke d um 0,25 mm hat Simulationen zu Folge keinen erkennbaren Einfluss auf das Abstrahlverhalten. Der

Auskoppelbereich des vermessenen Flächenstrahlers ist 7° schmäler als die Referenz und dessen Maximum ist um ca. 5° verschoben. Dies stellt nur eine geringe Abweichung dar und ist auf die Oberflächenrauheit sowie Reflexionen am Rahmen zurückzuführen. Die Simulation der CAD-Nachbildung belegt, dass die einzige relevante Folge der geometrischen Abweichung an den Mikrostrukturen eine höhere einseitige Auskopplung ist. Diese wird im gleichen Maße wie beim photolithographisch gefertigten Prototypen durch Reflexionen am Rahmen und Messaufbau verringert ($\delta_F = 18\%$).

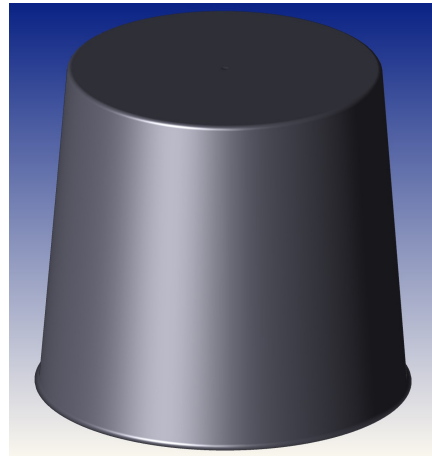


Abb. 5.10: CAD-Modell der von *Jungbecker* mittels Heißprägen hergestellten Mikrostruktur.

Tab. 5.3: Kennwerte und geometrische Abmessungen des mittels Heißprägen von *Jungbecker* gefertigten Prototypen im Vergleich mit der CAD-Nachbildung und den Referenzsimulationen.

| | Heißgeprägter Prototyp | | | Ideal Referenz |
|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | Messung | CAD-Nachb. | Referenz | |
| η_{eA} | 77 % | 94 % | 90 % | 95 % |
| Ausk.-Bereich | $25^\circ - 60^\circ (35^\circ)$ | $11^\circ - 53^\circ (42^\circ)$ | $10^\circ - 52^\circ (42^\circ)$ | $12^\circ - 56^\circ (44^\circ)$ |
| h_m | 1016 μm | 1016 μm | 1000 μm | 50 μm |
| $d_{m, \text{Decke}}$ | 982 μm | 982 μm | 1000 μm | 50 μm |
| Δ_M | 3180 μm | 3180 μm | 3000 μm | 150 μm |
| R_a auf LGP | 55 nm \pm 5 nm | 0 nm | 0 nm | 0 nm |
| R_a auf Zylinder | 41 nm \pm 5 nm | 0 nm | 0 nm | 0 nm |
| φ_F | $4,5^\circ$ | $4,5^\circ$ | 5° | 0° |
| Kantenradius | 15 μm | 15 μm | 0 μm | 0 μm |
| l_z | 100 mm | 100 mm | 100 mm | 100 mm |
| l_y | 100 mm | 50 mm | 50 mm | 50 mm |
| d | 2,25 mm | 2,25 mm | 2 mm | 2 mm |

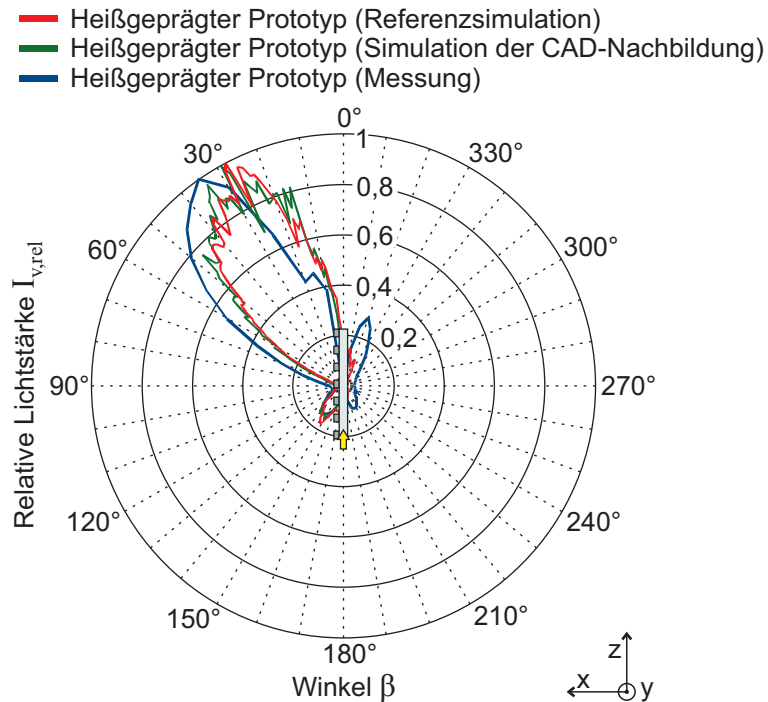


Abb. 5.11: LVK des von *Jungbecker* durch Heißprägen hergestellten Prototypen (blau) im Vergleich mit der entsprechenden Referenzsimulation (rot) und der Simulation der CAD-Nachbildung (grün). Die Länge der LGPs beträgt $\ell_z=100$ mm. Der Bereich der Auskopplung des gemessenen Musters ist im Vergleich zu den Simulationen verschoben und breiter. Zudem tritt eine rückseitige Auskopplung auf (blau, rechts).

Zwischenfazit

Grundsätzlich sind die entworfenen Zylinderstrukturen in PMMA und Photolack herstellbar. Für die Herstellung des Flächenstrahlers durch Heißprägen, muss die Höhe der Zylinder auf 1 mm erhöht werden. Beide Muster weisen eine einseitige, gerichtete Lichtauskopplung auf, wobei die einseitige Auskopplung deutlich geringer als die der Referenzsimulationen ist. Zwar tragen Ungenauigkeiten basierend auf den Herstellungsverfahren zu einer rückseitigen Auskopplung bei, ausschlaggebend ist hier allerdings der Einfluss der Rahmung der LGP und Messumgebung. Demzufolge ist bei einem Einsatz von mikrostrukturierten Flächenstrahlern besonderes Augenmerk auf die Integration der LGP in den Rahmen zu legen. Eine wie auch immer geartete Rahmung der LGP verursacht eine Veränderung der Abstrahlcharakteristik.

5.1.3 Industriell gefertigtes Muster

Es werden zwei Muster mit Mikrozyllindern industriell gefertigt. Sie werden mittels UV-Prägen von *temicon* und im Heißpräge-Verfahren von *Jungbecker* zur Integration in einen Scheibenverbund hergestellt. Die Bewertung des Abstrahlverhaltens bezieht sich auf $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ große Ausschnitte aus diesen Flächenstrahlern. An den vollständigen Mustern wird am FhG-IBP zuvor der LOR und die einseitige Auskopplung gemessen.

Fertigung durch Heißprägen

Das von *Jungbecker* heißgeprägte industriell gefertigte Muster unterscheidet sich vom Prototypen lediglich in den Abmessungen. Die vorgesehene Höhe und Breite des Prototyps ist auf die Integration in einen Scheibenverbund für eine Fassade ausgelegt und beträgt $\ell_z = \ell_y = 600\text{ mm}$. Die Messwerte für einen Ausschnitt des Prototyps mit der Länge $\ell_z = 100\text{ mm}$ sind mit denen des Materialmusters identisch (vgl. Abschnitt 5.1.2).

Die simulierten und vom FhG-IBP in der Ulbrichtkugel gemessenen Werte für das gesamte Muster ($\ell_z = 600\text{ mm}$) sind in Tabelle 5.4 aufgeführt. Die deutlich einseitige Auskopplung des industriell gefertigten Musters stimmt gut mit der Messung am Prototypen bzw. LGP-Ausschnitt überein ($\delta_F = 1\%$, vgl. Tabelle 5.3) und weicht entsprechend des Einflusses des Rahmens von der simulierten einseitigen Auskopplung ab ($\delta_F = 14\%$). Bei der Messung in der Ulbrichtkugel kommt zu dem störenden Rahmen die Reflexion an der Vlies-Abdeckung hinzu. Der gemessene LOR stimmt gut mit dem simulierten LOR der CAD-Nachbildung überein ($\delta_F = 1\%$). Mit größerer Länge der LGP steigt der Anteil an flach ausgekoppelten Strahlen (vgl. Abschnitt 2.5.1). Dies erklärt den flacheren Auskoppelbereich in den Simulationen im Vergleich zu denen des kürzeren LGP-Ausschnitts (vgl. Tabelle 5.3).

Tab. 5.4: Kennwerte und geometrische Abmessungen des von *Jungbecker* mittels Heißprägen industriell gefertigten Modells mit einer Länge von 600 mm im Vergleich mit der CAD-Nachbildung und den Referenzsimulationen.

| | Heißgeprägtes, industriell gefertigtes Modell, lang | | | Ideal Referenz |
|----------------------|---|--------------------|--------------------|-------------------|
| | Messung | CAD-Nachb. | Referenz | |
| η_{LOR} | 73 % | 74 % | 78 % | 81 % |
| η_{eA} | 78 % | 91 % | 85 % | 95 % |
| η_{eLOR} | 57 % | 68 % | 66 % | 77 % |
| Ausk.-Bereich | - | 6° - 47° (41°) | 5° - 49° (44°) | 5° - 53° (48°) |
| h_m | 1016 μm | 1016 μm | 1000 μm | 50 μm |
| $d_{m,\text{Decke}}$ | 982 μm | 982 μm | 1000 μm | 50 μm |
| Δ_M | 3180 μm | 3180 μm | 3000 μm | 150 μm |
| R_a auf LGP | 55 nm \pm 5 nm | 0 nm | 0 nm | 0 nm |
| R_a auf Zylinder | 41 nm \pm 5 nm | 0 nm | 0 nm | 0 nm |
| φ_F | 4,5° | 4,5° | 5° | 0° |
| Kantenradius | 15 μm | 15 μm | 0 μm | 0 μm |
| l_z | 600 mm | 600 mm | 600 mm | 600 mm |
| l_y | 600 mm | 50 mm | 50 mm | 50 mm |
| d | 2,25 mm | 2,25 mm | 2 mm | 2 mm |

Fertigung durch UV-Prägen

Für die bessere Fertigung der Mikrozyylinder im Rolle-zu-Platte-Verfahren durch *temicon* ist eine Verkleinerung der Zylindergeometrie auf eine Höhe von $h_M = 25 \mu\text{m}$ und die Vergrößerung des Flankenwinkels auf $\varphi_F = 2^\circ$ notwendig. Die angepassten Parameter der Zylinder sind in Abbildung 5.12 skizziert. Sie werden wie in der idealen Referenz angeordnet (vgl. Abbildung 5.1b). Um die störungsfreie Auskopplung ab $\beta_x = 27^\circ$ zu gewährleisten, wird ihr Abstand entsprechend ihrer Größe auf $\Delta_M = 75 \mu\text{m}$ festgelegt. Die Brechzahl des verwendeten Photolacks wird nach Angaben von *temicon* konstant als $n = 1,5268$ angenähert. Das industriell gefertigte Modell besitzt eine Länge und Breite von $l_y = l_z = 600 \text{ mm}$. Seine Höhe beträgt $d = 3 \text{ mm}$, um die Ankopplung der LEDs zu vereinfachen. Die Vermessung der LVK des Prototyps erfolgt als kleineres Modell ($l_z = l_y = 100 \text{ mm}$) in einem Messrahmen mit sieben LEDs vom Typ Duris E3 von *Osram*. Die Referenzsimulation wird entsprechend der obigen Fertigungsvorgaben vorgenommen.

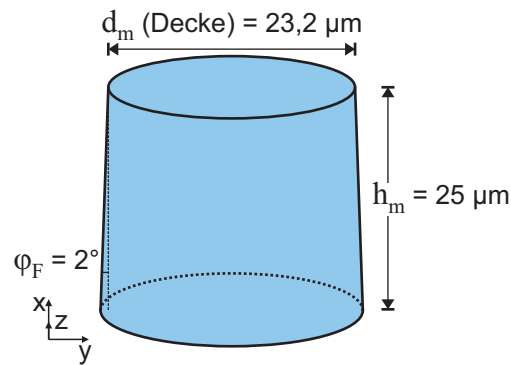


Abb. 5.12: Zylindergeometrie angepasst für das UV-Prägen. Höhe und Durchmesser werden reduziert und die Flanke geneigt.

Eine Aufnahme des nach obigen Vorgaben von *temicon* industriell gefertigten Musters ist in Abbildung 5.13 dargestellt. Bemerkenswert ist die hervorragende Durchsicht durch den UV-geprägten Prototyp. Zum Zeitpunkt der Arbeit war eine Fertigung der LGP nur auf einer Maschine mit einer Bearbeitungsbreite von 300 mm möglich, so dass die LGP eine Länge von $\ell_z = 300 \text{ mm}$, eine Breite von $\ell_y = 600 \text{ mm}$ und eine Höhe von $d = 3 \text{ mm}$ aufweist. In der Aufnahme ist der, für die Messungen ausgeschnittene, fehlende Teil zu erkennen. Die vermessene Struktur ist in Abbildung 5.14 dargestellt. Während erster Herstellungsversuche zeigte sich, dass der Flankenwinkel für eine optimale Endformung größer als im Referenzsystem gewählt werden muss. So ist er beim hergestellten Prototypen mit $\varphi_F = 5,5^\circ$ um $3,5^\circ$ größer als im Referenzsystem vorgesehen. Herstellungsbedingt tritt an den Strukturkanten zudem ein Radius von $1,5 \mu\text{m}$ auf. Die Höhe der Zylinder beträgt $h_m = 28 \mu\text{m}$ und ihr Durchmesser auf der Zylinderdecke $d_{m,\text{Decke}} = 18 \mu\text{m}$. Die Werte weichen um $3 \mu\text{m}$ bis $5 \mu\text{m}$ nur geringfügig vom Referenzsystem ab. Während der Herstellungsversuche wurde bei *temicon* entschieden, die Zylinder stochastisch auf der LGP zu verteilen, um mögliche optische Interferenzen an der periodischen Strukturierung zu vermeiden. Der mittlere Abstand beträgt $\Delta_M = 105 \mu\text{m} \pm 71 \mu\text{m}$. Er liegt damit teilweise unter der Referenz von $75 \mu\text{m}$. Die Fläche ist nicht homogen mit Photolack beschichtet. Es gibt einige Fehlstellen die als Streuzentren auf der LGP-Oberfläche bemerkbar sind (vgl. Abbildung 5.15). Hervorzuheben ist die sehr geringe Rauheit außerhalb der Störstellen von $R_a = 22 \text{ nm}$ auf der LGP und $R_a = 8 \text{ nm}$ auf der Zylinderdecke.

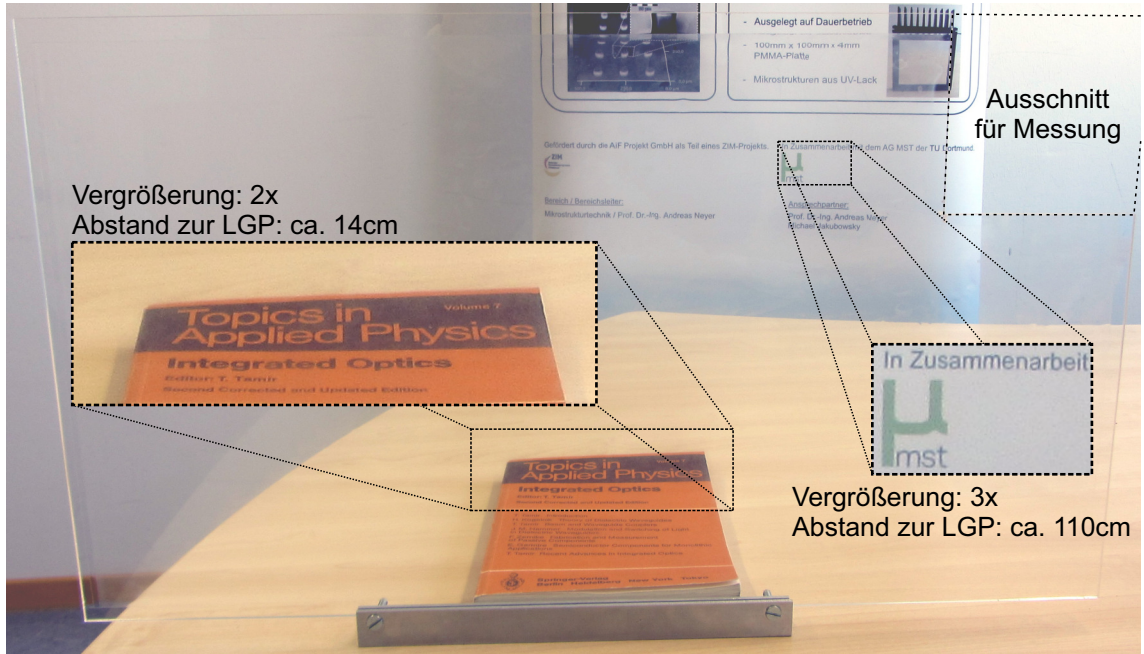


Abb. 5.13: Durch UV-Prägen von *temicon* industriell gefertigtes Muster mit den Abmessung 300 mm × 600 mm. Die zwei vergrößerten Ausschnitte verdeutlichen die gute Durchsicht. Angegeben ist dort der horizontale Abstand des jeweiligen Objekts zur LGP. Der Ausschnitt oben rechts wurde für die Messung herausgeschnitten.

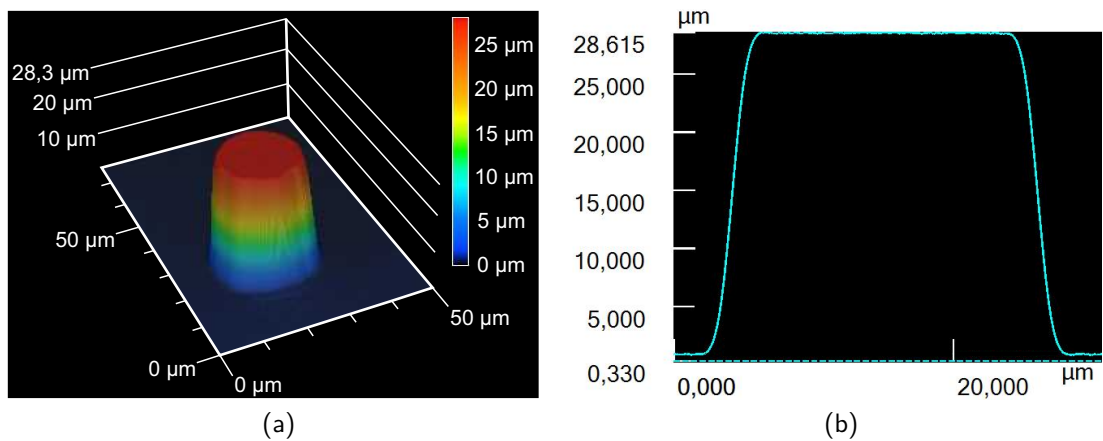


Abb. 5.14: CLSM-Aufnahme (a) eines Zylinders auf dem von *temicon* mittels UV-Prägen industriell gefertigten Musters und der Querschnitt (b) durch diese Aufnahme. Die Flanke ist geneigt und an den Kanten finden sich Radien.

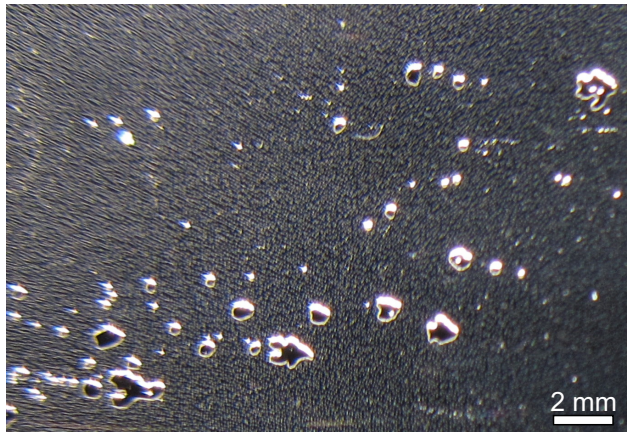


Abb. 5.15: Einige Störstellen in der Lackschicht des von *temicon* UV-geprägten Musters verursachen eine streuende Auskopplung.

Die hergestellte Mikrostruktur wird mit dem CAD-Modell in Abbildung 5.16 nachgebildet. Mit diesem wird eine Simulation durchgeführt, um den Einfluss der geometrischen Abweichungen des industriell hergestellten Musters vom Referenzsystem zu bewerten. Die Anordnung der Strukturen wurde wegen Einschränkungen der Simulationssoftware regelhaft belassen und der Abstand auf $\Delta_M = 105 \mu\text{m}$ erhöht. Bei der Größe der Strukturen ist ein Unterschied in der Lichtauskopplung auf Grund der unterschiedlichen Anordnung nur in geringem Maße zu erwarten.

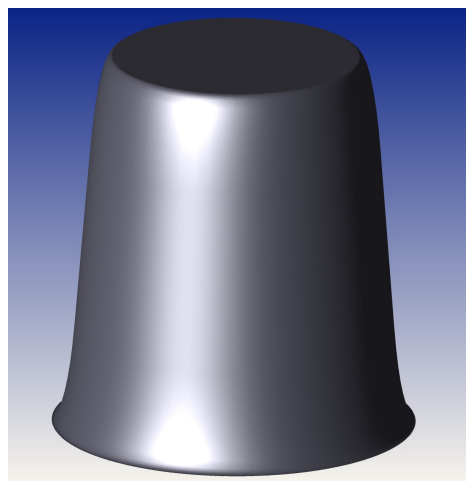


Abb. 5.16: CAD-Modell der von *temicon* durch UV-Prägen hergestellten Mikrostruktur.

Die LVK und Kennwerte der simulierten Systeme sowie die Messung des industriell hergestellten Musters sind in Abbildung 5.17 und Tabelle 5.5 aufgeführt. Der Auskoppelbereich des vermessenen Flächenstrahlers weicht um 2° von der Referenzsimulation ab und stimmt gut mit ihr überein. Die Abweichung ist auf die stärker geneigte Flanke zurückzuführen. Der Simulation der CAD-Nachbildung zu Folge verschiebt sich der Auskoppelbereich

auf Grund der geometrischen Abweichung an den Mikrostrukturen um ca. 5° . In der Realität wird diese Abweichung durch die stochastischen Strukturordnung und der damit teilweise engeren Anordnung der Zylinder wieder ausgeglichen. Denn durch die Reflexion und Dämpfung des ausgekoppelten Lichts an folgenden Zylindern verschiebt sich so der Auskoppelbereich um ca. 5° und das Maximum der LVK um ca. 10° . Zu dieser Verschiebung kann zudem eine Abweichung der simulierten von der realen Brechzahl des UV-Lacks beitragen. Die einseitige Auskopplung ist auf Grund von Reflexionen am Rahmen und Messaufbau geringer ($\delta_F = 6\%$) als in der Simulation der CAD-Nachbildung. Durch den Einsatz eines verbesserten Rahmens konnte dessen Einfluss im Vergleich zu den Prototypen allerdings verringert werden.

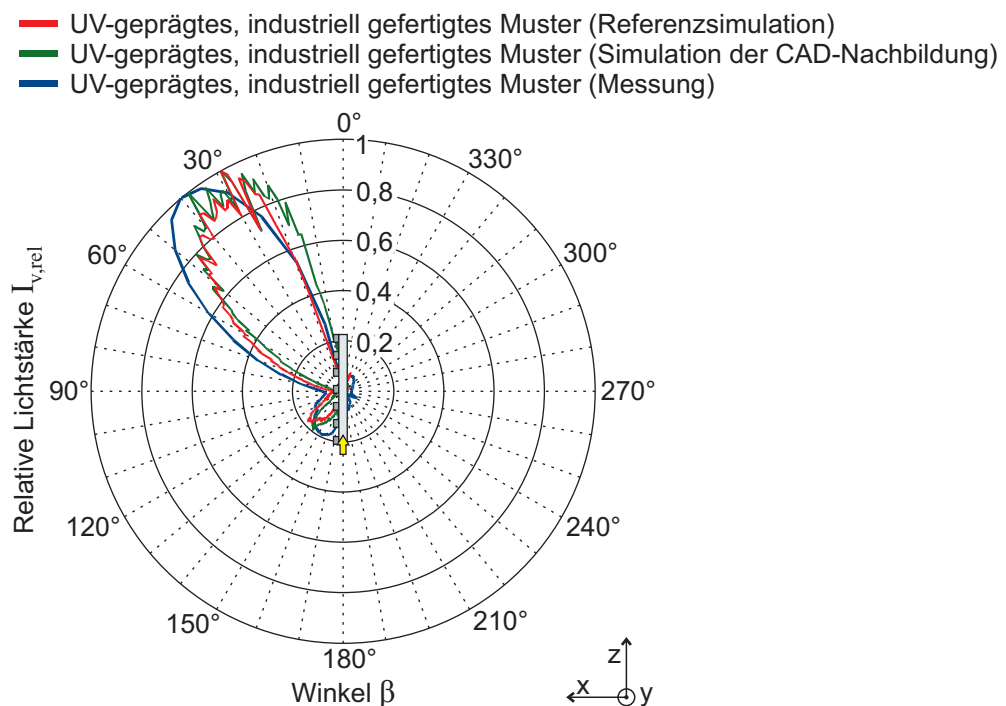


Abb. 5.17: LVK des durch UV-Prägen von *temicon* industriell hergestellten Musters (blau) im Vergleich mit der entsprechenden Referenzsimulation (rot) und der Simulation der CAD-Nachbildung (grün) mit einer Länge von $\ell_z=100$ mm. Der Bereich der Auskopplung des gemessenen Musters ist im Vergleich zu den Simulationen leicht verschoben. Messung und CAD-Nachbildung weisen einen breiteren Auskoppelbereich als die Referenzsimulation auf.

Tab. 5.5: Kennwerte und geometrische Abmessungen des mittels UV-Prägen von *temicon* industriell gefertigten Musters mit einer Länge von 100 mm im Vergleich mit der CAD-Nachbildung und den Referenzsimulationen.

| | UV-geprägtes, industriell gefertigtes Muster | | | Ideal Referenz |
|--------------------|--|-------------------|--------------------|-------------------|
| | Messung | CAD-Nachb. | Referenz | |
| η_{eA} | 88 % | 94 % | 96 % | 95 % |
| Ausk.-Bereich | 20° - 60° (40°) | 15° - 56° (39°) | 20° - 58° (38°) | 12° - 56° (44°) |
| h_m | 28 μm | 28 μm | 25 μm | 50 μm |
| $d_{m,Decke}$ | 18 μm | 18 μm | 23,2 μm | 50 μm |
| Δ_M | $\varnothing 105 \mu\text{m}$ | 105 μm | 75 μm | 150 μm |
| R_a auf LGP | 22 nm \pm 5 nm | 0 nm | 0 nm | 0 nm |
| R_a auf Zylinder | 8 nm \pm 5 nm | 0 nm | 0 nm | 0 nm |
| φ_F | 5,5° | 5,5° | 2° | 0° |
| Kantenradius | 1,5 μm | 1,5 μm | 0 μm | 0 μm |
| l_z | 100 mm | 100 mm | 100 mm | 100 mm |
| l_y | 100 mm | 50 mm | 50 mm | 50 mm |
| d | 3 mm | 3 mm | 3 mm | 2 mm |

Für die Bestimmung des LOR und der einseitigen Auskopplung des gesamten Musters, wird dieses in der Ulbrichtkugel am FhG-IBP vermessen. Untersucht wird ein von *temicon* gefertigtes Muster mit der Länge $l_z = 600 \text{ mm}$. Dieses Maß entspricht dem der geplanten Anwendung. Die strukturierte Oberfläche setzt sich allerdings aus zwei separat strukturierten Lackschichten mit einer Länge von 300 mm und einer Breite von 600 mm zusammen. Es existiert eine Kante an der Stelle, an der die beiden Lackschichten aneinander stoßen. Hier ist eine streuende Auskopplung zu erwarten. Abbildung 5.18 verdeutlicht den Aufbau dieses industriell gefertigten Musters.

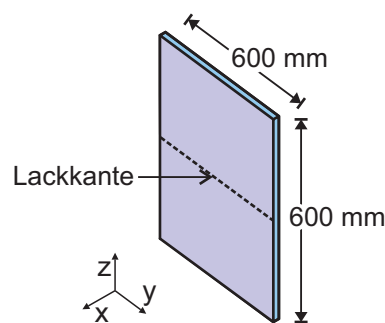


Abb. 5.18: Skizze des von *temicon* UV-geprägten industriell gefertigten Musters für die Anwendung als fassadenintegrierter Flächenstrahler. Bei halber Länge befindet sich eine Kante im Lack zwischen den beiden gleich strukturierten Bereichen.

Die simulierten und gemessenen Werte für dieses gesamte Muster mit einer Breite und Länge von $l_z = l_y = 600 \text{ mm}$ sind in Tabelle 5.6 aufgeführt. Der Auskoppelbereich

und die einseitige Auskopplung wurden bis zu einer Länge von $\ell_z = 400$ mm (Referenz) bzw. $\ell_z = 500$ mm (CAD-Nachbildung) simuliert (vgl. Abschnitt 3.1.5). Der LOR wird für eine Länge von $\ell_z = 600$ mm angenähert. Eine relevante Änderung der restlichen Kennwerte ist nicht zu erwarten. Zudem dient der angegebene Auskoppelbereich nur der Orientierung. Eine Vermessung der LVK des gesamten Musters ist auf Grund seiner Größe nicht möglich. Die in der Ulbrichtkugel gemessene, einseitige Auskopplung weicht von der Messung des Musters mit einer Länge von $\ell_z = 100$ mm ab ($\delta_F = 9\%$). Dies wird neben der zusätzlichen Reflexion an der Vlies-Abdeckung (vgl. Abschnitt 3.2.1) vor allem auf die Kante in der Lackschicht zurückgeführt, welche zudem eine Steigerung des LOR bedingt. Entsprechend ist der gemessene effektive LOR (η_{eLOR}), trotz höherem LOR (η_{LOR}), deutlich geringer als der simulierte ($\delta_F = 11\%$). Die Abweichung des simulierten LOR der CAD-Nachbildung von der Referenz des Prototypen ($\delta_F = 15\%$) ist durch den erhöhten Abstand der Mikrostrukturen zu begründen, während die Abweichung von der idealen Referenz in der unterschiedlichen Plattendicke begründet liegt. Wie beim heißgeprägten, industriell gefertigten Muster ist der flachere Auskoppelbereich in den Simulationen im Vergleich zu denen des kürzeren LGP-Ausschnitts (vgl. Tabelle 5.5) dadurch zu begründen, dass mit größerer Länge der LGP der Anteil an flach ausgekoppelten Strahlen zunimmt.

Tab. 5.6: Kennwerte und geometrische Abmessungen des mittels UV-Prägen von *temicon* industriell gefertigten Musters mit einer Länge von 600 mm im Vergleich mit der Simulation der CAD-Nachbildung und der Referenzen.

| | UV-geprägtes, industriell gefertigtes Muster, lang | | | Ideal Referenz |
|--------------------|--|-------------------|-------------------|----------------|
| | Messung | CAD-Nachb. | Referenz | |
| η_{LOR} | 70 % | 65 % ⁸ | 76 % ⁸ | 81 % |
| η_{eA} | 80 % | 93 % | 95 % | 95 % |
| η_{eLOR} | 56 % | 60 % | 74 % | 77 % |
| Ausk.-Bereich | - | 13° - 49° (36°) | 19° - 48° (29°) | 5° - 53° (48°) |
| h_m | 28 μ m | 28 μ m | 25 μ m | 50 μ m |
| $d_{m,Decke}$ | 18 μ m | 18 μ m | 23,2 μ m | 50 μ m |
| Δ_M | Ø105 μ m | 105 μ m | 75 μ m | 150 μ m |
| R_a auf LGP | 22 nm \pm 5 nm | 0 nm | 0 nm | 0 nm |
| R_a auf Zylinder | 8 nm \pm 5 nm | 0 nm | 0 nm | 0 nm |
| φ_F | 5,5° | 5,5° | 2° | 0° |
| Kantenradius | 1,5 μ m | 1,5 μ m | 0 μ m | 0 μ m |
| ℓ_z | 600 mm | 500 mm | 400 mm | 600 mm |
| ℓ_y | 600 mm | 50 mm | 50 mm | 50 mm |
| d | 3 mm | 3 mm | 3 mm | 2 mm |

⁸Genähert für eine Länge von $\ell_z = 600$ mm

Durchsicht der industriell gefertigten Muster

Da die Flächenstrahler idealerweise im gesamten Fensterbereich eingesetzt werden, muss eine mindestens ausreichende Durchsicht gewährleistet sein, um das Wohlbefinden der Personen im angrenzenden Raum zu erhalten. Als ausreichend wird die Durchsicht ab einem relativen SQF von 74 % definiert (vgl. Abschnitt 3.2.2). Der relative SQF ist in Abbildung 5.19 für beide industriell gefertigten Muster über den Abstand zur betrachtenden Person aufgetragen. Das UV-geprägte Muster mit den 28 µm hohen Zylindern weist eine durchweg gute Durchsicht auf, während das Muster mit den 1016 µm hohen Zylindern ab einem Abstand von 320 mm eine ausreichende Durchsicht aufweist. Diese wird mit steigendem Abstand stetig besser. Ein geneigter Blickwinkel führt bei beiden Prototypen zu einer Beeinträchtigung der Durchsicht. Das heißgeprägte Muster weist um 45° geneigt erst ab ca. 400 mm eine ausreichende Durchsicht auf, während sie bei einer Neigung des UV-geprägten Musters um 45° weiterhin gut ist. Beim geneigten, heißgeprägten Muster ist in einem Abstand 140 mm ein Ausreißer zu sehen, der auf eine fehlgeschlagene Kantenerkennung des Testmusters bei der automatischen Ermittlung des SQF zurückzuführen ist. Die einzelnen Messwerte aus denen der dargestellte relative SQF berechnet wurde sind in Abbildung 5.20 eingezeichnet, um deren vorwiegend geringe Abweichung zu zeigen. In Abbildung 5.21 und 5.22 sind mehrere Aufnahmen der Durchsicht durch die Flächenstrahler ihrem relativen SQF zugeordnet. Sie bestätigen die Bewertung der Durchsicht durch den gemessenen relativen SQF.

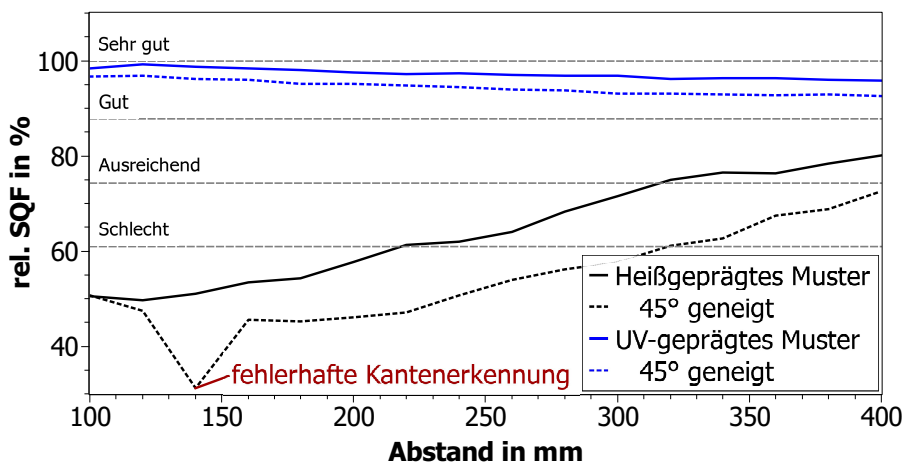


Abb. 5.19: Relative SQF der industriell gefertigten Muster für verschiedene Abstände und Ausrichtungen zur betrachtenden Person. Bei einem Abstand von 140 mm trat ein Fehler in der automatischen Kantenerkennung für das geneigte heißgeprägte Muster auf. Der Wert besitzt entsprechend keine Aussagekraft.

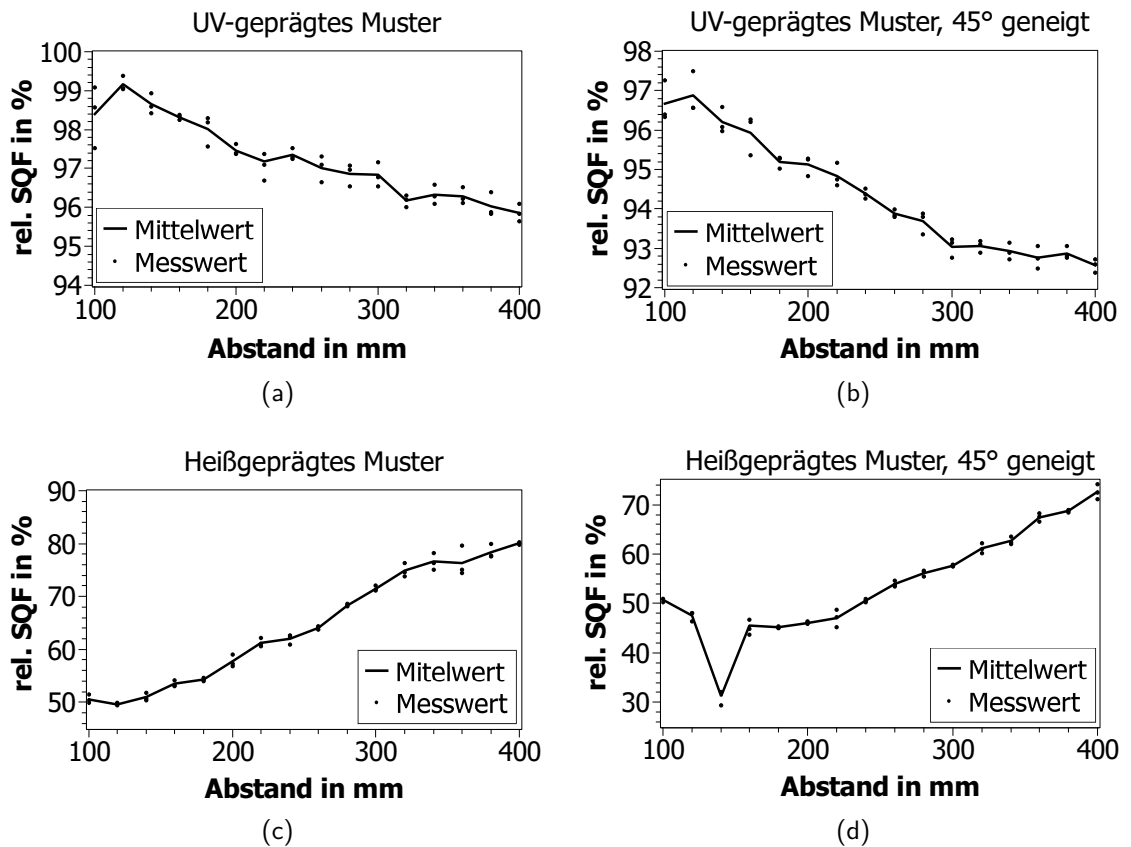


Abb. 5.20: Streuung der Messwerte (Punkte) um den zur Bewertung verwendeten Mittelwert (Linie) für die industriell gefertigten Muster in unterschiedlichen Ausrichtungen. Zu beachten sind die unterschiedlich skalierten y-Achsen in (a), (b) und (c), (d)

5 Beispiele hergestellter mikrostrukturierter Flächenstrahler

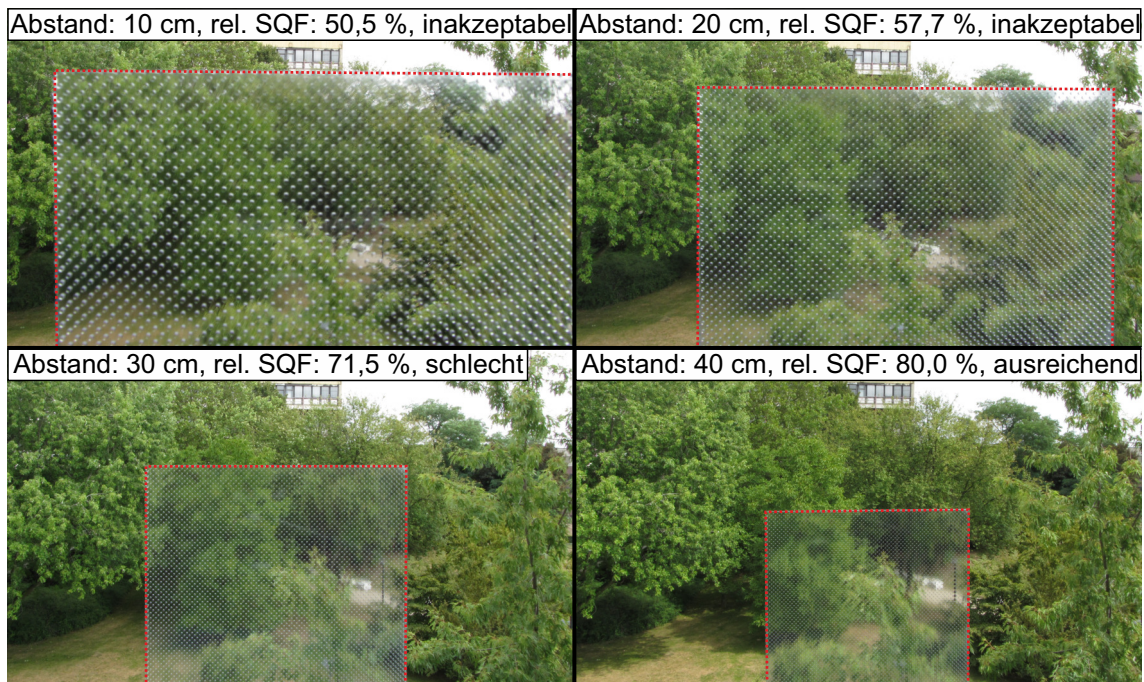


Abb. 5.21: Durchsicht durch das von *Jungbecker* heißgeprägte Muster. Das strukturierte Muster ist rot gepunktet markiert. Bei den Abständen 10 cm und 20 cm ist die Qualität der Durchsicht inakzeptabel, bei 30 cm schlecht und bei 40 cm ausreichend.

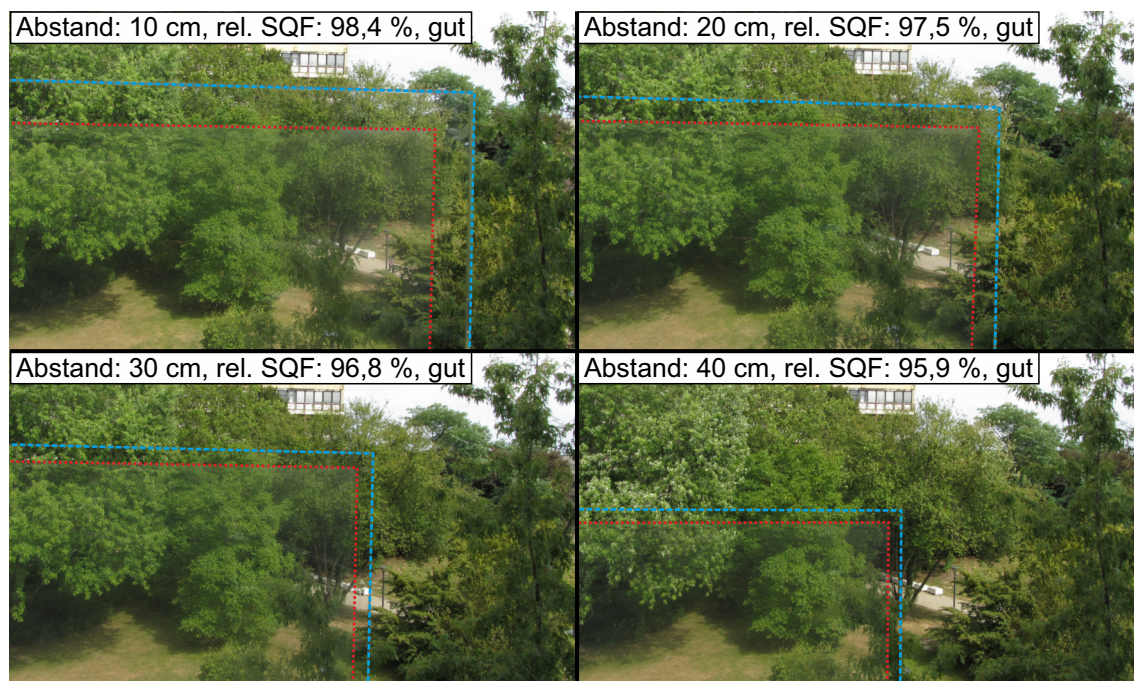


Abb. 5.22: Durchsicht durch das von *temicon* UV-geprägte Muster in den Abständen 10 cm, 20 cm, 30 cm und 40 cm. Der strukturierte Bereich (rot gepunktet) ist etwas kleiner als die Platte (blau gestrichelt). Die Durchsicht ist bei jedem Abstand gut.

Zwischenfazit

Bei den Firmen *Jungbecker* und *temicon* wurden erfolgreich durchsichtige, mikrostrukturierte Flächenstrahler zur einseitigen Lichtauskopplung im Heißpräge- und UV-Prägeverfahren gefertigt. Die vorgegebenen Geometrien konnten weitestgehend reproduziert werden. Lediglich die Oberflächenqualität der industriell gefertigten Muster weicht nennenswert von der Referenz ab. Die Funktion der Durchsicht, als auch der gerichteten Lichtauskopplung sowie des LOR wurden Messtechnisch bestätigt. Beim UV-geprägten, von *temicon* industriell gefertigten Muster sind Aussagen über den gemessenen LOR nur beschränkt möglich. Dies ist auf die zweiteilige Fertigung des Musters zurückzuführen. An dieser Stelle ist eine Optimierung des Musters nötig und absehbar. Ebenfalls Potential zur Verbesserung bietet die Oberflächenqualität, sowohl im UV-Prägen, als auch im Heißprägen, um die gerichtete Auskopplung zu verbessern.

Abgesehen von der zweiteiligen Fertigung, stimmen die mittels UV-Prägen gefertigten, 28 μm hohen Zylinder am besten mit den Kennwerten der Zielvorgaben überein. Sie weisen auch bei naher Entfernung eine gute Durchsicht und eine hohe einseitige Auskopplung auf. Die von *Jungbecker* mittels Heißprägen hergestellten 1016 μm hohen Zylinder weisen ab einem Abstand von 35 cm zwischen Flächenstrahler und betrachtender Person eine ausreichende Durchsicht auf, die sich mit wachsendem Abstand verbessert. Die deutlich einseitige Auskopplung ist gegeben, fällt jedoch wegen größerer Kantenradien und höherer Oberflächenrauheit schlechter aus als die des UV-geprägten Flächenstrahlers. Die Oberflächenrauheit kann durch eine präzisere Bearbeitung der Oberfläche der eingesetzten Werkzeuge verbessert werden, während die Kantenradien durch die Anwendung optimierter, variothermer Heißpräge-Schritte minimiert werden könnte. Die einseitige Auskopplung wird allgemein stark durch den einfassenden Rahmen beeinflusst. Eine Optimierung dieses Rahmens bietet großes Potential die gerichtete Abstrahlung der Muster zu verbessern. Beide industriell gefertigten Flächenstrahler können prinzipiell als transparente Leuchte im Fassadenbereich eingesetzt werden. Die heißgeprägten Flächenstrahler sollten zur Gewährleistung einer ausreichenden Durchsicht weit genug (bspw. 1 m) von Arbeitsplätzen bzw. Aufenthaltsorten entfernt sein oder im oberen Bereich der Fassade eingesetzt werden.

5.1.4 Integration der industriell gefertigten Muster in einen Scheibenverbund

Für den Einsatz in der Fassade, werden die von *Jungbecker* und *temicon* industriell gefertigten Muster in einen Scheibenverbund integriert. Dies geschieht in der Form, dass ein dreifach verglastes Fenster gefertigt wird. Statt der mittleren Scheibe wird der

Flächenstrahler in den Scheibenverbund eingesetzt [151]. Die Details der Integration der Flächenstrahler sind in gemeinsamen Diskussionen im Verbund des TaLed-Projekts entstanden [152].

Im Rahmen des Scheibenverbunds werden 160 LEDs vom Typ Duris E3 von *Osram* abwechselnd mit warmer und kalter Farbtemperatur untergebracht (Platine und Rahmenintegration durch die *Durlum GmbH*, Schopfheim, im Folgenden *Durlum*), während die Spannungsversorgung außerhalb des Fensters platziert wird. Die Verlustwärme wird über flexible Kupferverbindungen über den Fensterrahmen an den Raum abgegeben. Um Verluste am einfassenden Rahmen zu vermeiden, ist der Rand auf der Vorder- und Rückseite der LGP mit einer 10 mm breiten Verspiegelung versehen. Die Scheiben und die LGP besitzen eine Länge und Breite von $\ell_z = \ell_y = 600$ mm. Die Glasscheiben sind $d = 4$ mm hoch. Die Höhe der LGP ist $d = 2,25$ mm für das heißgeprägte und $d = 3$ mm für das UV-geprägte Muster. Der Aufbau des Scheibenverbundes (gefertigt bei der *Saint-Gobain Sekurit Deutschland GmbH & Co. KG*, Herzogenrath, im Folgenden *Saint-Gobain*) ist in Abbildung 5.23 skizziert. Die simulierten Abstrahlcharakteristiken der Flächenstrahler im Scheibenverbund sind in Abbildung 5.24 und Tabelle 5.7 aufgeführt. Die Tabelle enthält zudem das Ergebnis der LOR-Messung des Scheibenverbunds mit dem heißgeprägten Flächenstrahler in der Ulbricht-Kugel durch das FhG-IBP. Der Scheibenverbund mit dem UV-geprägten Flächenstrahler wurde wegen der erwartbar starken Abweichung vom Referenzsystem auf Grund der zweiteiligen Fertigung der Lackschicht (vgl. Abbildung 5.18) nicht vermessen. In der Simulation werden zwei Fensterscheiben mit der konstanten Brechzahl $n = 1,52$ ohne Absorption und ein ideal absorbierender Rahmen verwendet. Simuliert werden die als CAD-Modell angenäherten Strukturen.

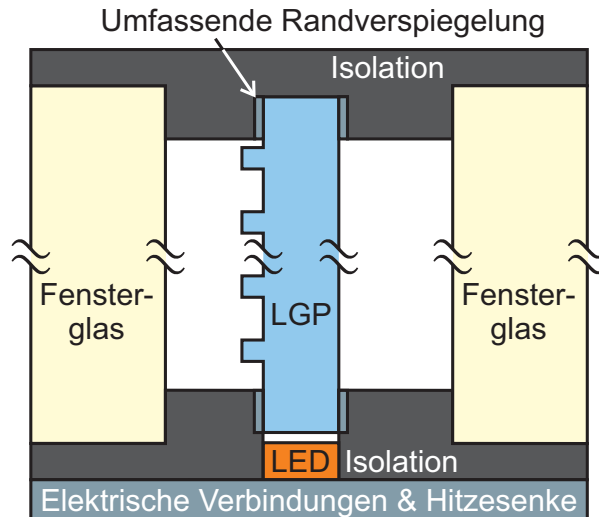


Abb. 5.23: Aufbau des Scheibenverbunds mit integriertem Flächenstrahler. Die mikrostrukturierte LGP ist zwischen zwei Scheiben aus Fensterglas positioniert und am Rand von Isolationsmaterial eingefasst. Dort wo die Isolation die Vorder- und Rückseite der LGP berührt ist eine umlaufende Verspiegelung angebracht. An der unteren Stirnseite sind die LEDs positioniert und mit einer Hitzesenke verbunden. Basierend auf [151].

- Heißgeprägter Flächenstrahler im Scheibenverbund (Simulation der CAD-Nachbildung)
- Heißgeprägter Flächenstrahler freistehend (Simulation der CAD-Nachbildung)
- UV-geprägter Flächenstrahler im Scheibenverbund (Simulation der CAD-Nachbildung)
- UV-geprägter Flächenstrahler freistehend (Simulation der CAD-Nachbildung)

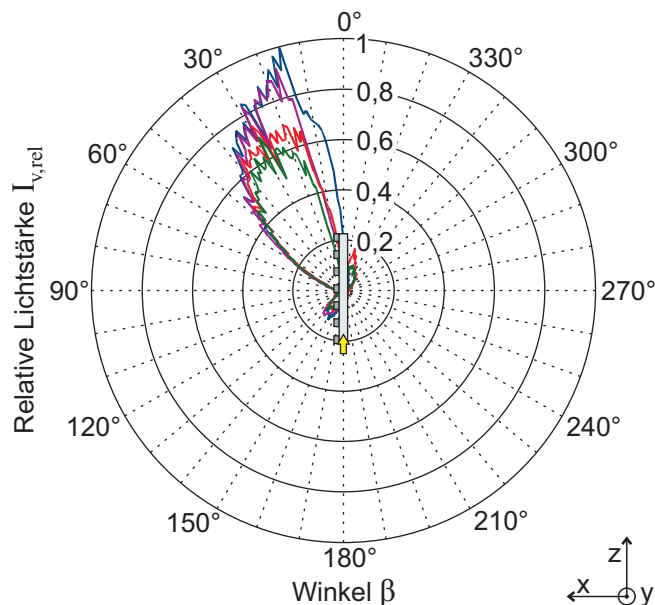


Abb. 5.24: Simulierte LVK der industriell gefertigten Flächenstrahler integriert im Scheibenverbund (rot, grün) und freistehend (blau, violett).

Tab. 5.7: Kennwerte der industriell gefertigten Flächenstrahler im Scheibenverbund (Messung nur am heißgeprägten Muster) im Vergleich zur Simulation der CAD-Nachbildungen im Scheibenverbund und den Simulationen und Messungen der freistehenden Muster.

| | Scheibenverbund | | Freistehend | | | |
|---------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|--------------------|
| | Heißprägen Messung | CAD-Nachb. | Heißprägen Messung | UV-Prägen CAD-Nachb. | | |
| η_{LOR} | 55 % | 61 % | 73 % | 76 % | | |
| η_{eA} | - | 83 % | 78 % | 95 %*** | | |
| η_{eLOR} | - | 51 % | 57 % | 74 % | | |
| A.-Bereich | - | 12° - 49° (37°) | 25° - 60° (35°)** | 6° - 47° (41°) | 20° - 60° (40°)** | 19° - 48° (29°)*** |
| ℓ_z | 600 mm | 600 mm | 600 mm | 600 mm | 600 mm | 600 mm |
| ℓ_y | 600 mm | 50 mm | 600 mm | 50 mm | 600 mm | 50 mm |
| d | 2,25 mm | 2,25 mm | 2,25 mm | 2,25 mm | 3 mm | 3 mm |

* Simuliert für eine Länge $\ell_z = 400$ mm.

** Gemessen an einem Ausschnitt mit der Länge $\ell_z = 100$ mm.

*** Simuliert für eine Länge $\ell_z = 500$ mm.

Die Abnahme des LOR der simulierten Scheibenverbünde ($\delta_{F,\text{Heißprägen}} = 18\%$ und $\delta_{F,\text{UV-Prägen}} = 25\%$) und der einseitigen Auskopplung ($\delta_{F,\text{Heißprägen}} = 9\%$ und $\delta_{F,\text{UV-Prägen}} = 11\%$) ist im Vergleich zu den freistehenden Mustern deutlich erkennbar. Gleiches gilt für den LOR des gefertigten, heißgeprägten Musters im Vergleich mit dem hergestellten Scheibenverbund ($\delta_F = 24\%$). Diese Abnahmen werden durch die zusätzliche Innenscheibe verursacht. An dieser wird ausgekoppeltes Licht reflektiert. In der praktischen Umsetzung fallen zudem Fertigungstoleranzen bei der Lichteinkopplung ins Gewicht. So können LEDs auf Grund von aktuellen Grenzen in der Fertigung von Scheibenverbänden lediglich in einem Abstand von $\ell_{\text{LED}} = 500\ \mu\text{m}$ (anstelle der $100\ \mu\text{m}$ in den Referenzsystemen und freistehenden, industriell gefertigten Mustern) vor der LGP platziert werden. Zudem konnte die Scheibe an der einkoppelnden Seite in der Fertigung nicht vollständig durch Isolationsmaterial eingefasst werden. Durch den größeren Abstand der LEDs wird weniger Licht in die LGP eingekoppelt und durch die fehlende Einfassung strahlt Licht an der LGP vorbei in den Scheibenzwischenraum. Dadurch wird der LOR, die einseitige Auskopplung und gerichtete Lichtauskopplung reduziert. Abbildung 5.25 verdeutlicht die Abweichung zwischen dem entworfenen System und der Umsetzung von *Durlum* und *Saint-Gobain*. Die Vermessung des Scheibenverbundes durch das FhG-IBP mit dem heißgeprägten Muster bestätigt einen reduzierten LOR gegenüber dessen Simulation ($\delta_F = 10\%$). Aufnahmen der integrierten industriell gefertigten Muster sind in den Abbildungen 5.26 und 5.27 zu sehen.

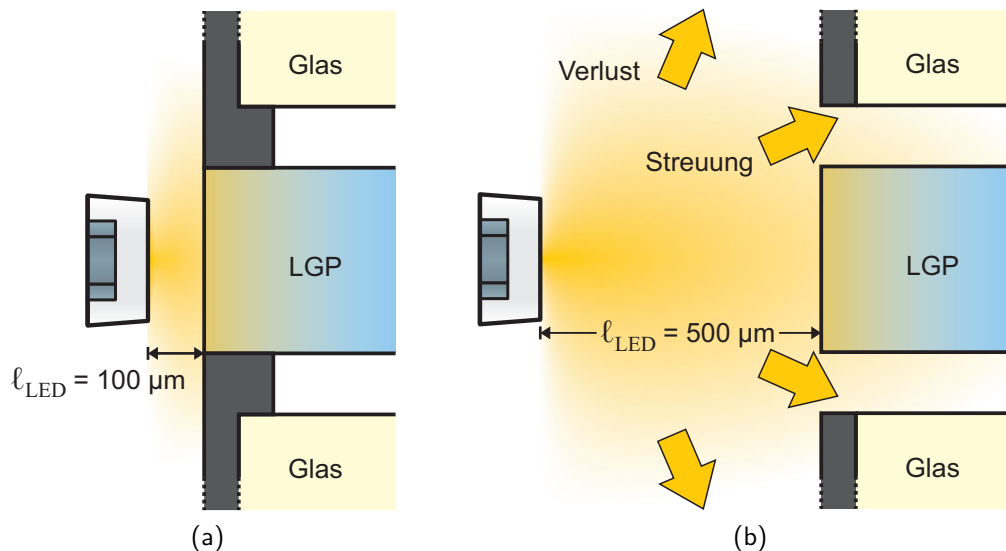


Abb. 5.25: Entwurf (a) und von *Durlum* und *Saint-Gobain* umgesetzte (b) Ankopplung der LEDs an die LGP. Durch den größeren Abstand der LEDs trifft weniger Licht auf die LGP. Ein Teil des LED-Lichts gelangt wegen der fehlenden Abdeckung in den Scheibenzwischenraum und trägt zu einer streuenden Auskopplung aus dem Scheibenverbund bei.

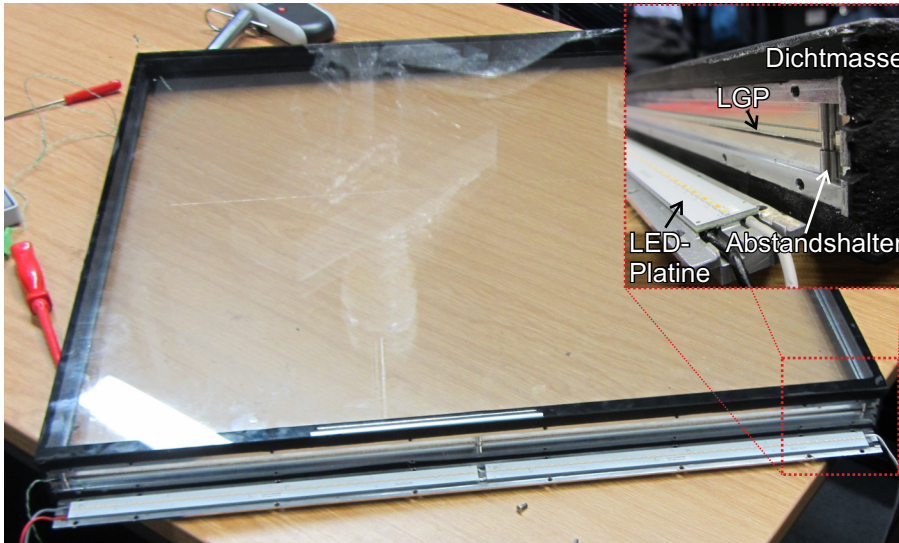


Abb. 5.26: Von *temicon* UV-geprägter, industriell gefertigter Flächenstrahler integriert in einen Scheibenverbund von *Saint-Gobain*. Der Rahmen wurde geöffnet, um die Ankopplung der LED-Leiste von *Durlum* zu zeigen. Die Nahaufnahme der LGP-Kante und LED-Leiste ist rot gepunktet markiert.



Abb. 5.27: Eingeschalteter, von *Jungbecker* heißgeprägter, industriell gefertigter Flächenstrahler integriert in einen Scheibenverbund von *Saint-Gobain* und angebracht in der geöffneten Ulbricht-Kugel am FhG-IBP.

Drei heißgeprägte Flächenstrahler wurden in den oberen Teil (Maße ca. 800 mm × 600 mm) der Fassade eines Versuchsraums am FhG-IBP eingebaut. Aufnahmen des eingebauten Scheibenverbundes mit ein- und ausgeschalteter Beleuchtung sind in Abbildung 5.28 zu sehen. In dem dargestellten Raum wurde die Ausleuchtung auf der Tischebene durch die künstliche Beleuchtung aus der Fassade vom FhG-IBP messtechnisch erfasst (vgl. Abbildung 5.29). Bis zu einem Abstand von 2 Metern wird durch die fassadenintegrierten Flächenstrahler eine, für eine Hintergrundbeleuchtung ausreichende, Beleuchtungsstärke von mindesten $E_v = 300 \text{ lx}$ erreicht [153, 154, 155].

Die hier beschriebene indirekte Beleuchtung aus der Fassade muss für eine ausreichende Beleuchtungsstärke von $E_v = 500 \text{ lx}$ an Arbeitsplätzen um eine direkte Beleuchtung ergänzt werden (ebd.). Dies kann durch die Ankopplung einer zusätzlichen LED-Leiste an der Oberkante der Flächenstrahler geschehen. Hierdurch wird deren Abstrahlcharakteristik um einen Direktlichtanteil (Lichtauskopplung in Richtung Boden) ergänzt.



Abb. 5.28: Scheibenverbund mit von *Jungbecker* heißgeprägten, industriell gefertigten Flächenstrahlern, eingebaut im oberen Bereich einer Fassade am FhG-IBP. (a) LEDs sind ausgeschaltet, (b) LEDs sind eingeschaltet.

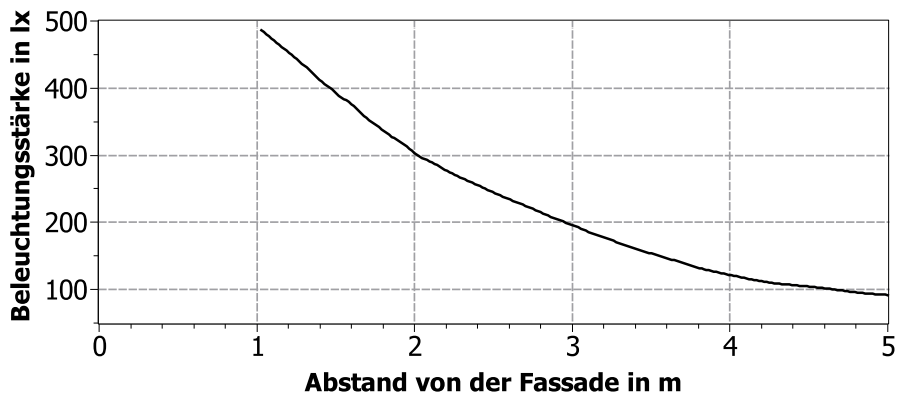


Abb. 5.29: Vom FhG-IBP gemessene Beleuchtungsstärke auf der Tischebene über die Entfernung von der Fassade [153]. Bis zu einem Abstand von 2 Metern liegt die Beleuchtungsstärke über 300 lx.

5.1.5 Fazit der Entwicklung von durchsichtigen Flächenstrahlern für indirekte Raumbelichtung

Vom Prototypen bis zum industriell gefertigten Muster wurden zwei durchsichtige, mikrostrukturierte Flächenstrahler mit guter Durchsicht und hoher, einseitiger Lichtauskopplung entwickelt. Sie wurden durch UV-Prägen und Heißprägen von den Firmen *temicon* und *Jungbecker* hergestellt sowie ihre Funktion simulativ und messtechnisch verifiziert. Die mögliche Strukturgröße ist abhängig vom eingesetzten Herstellungsverfahren und hat Auswirkung auf die Abstrahlcharakteristiken der Flächenstrahler. Grundsätzlich ist festzustellen, dass die mittels UV-Prägen gefertigten Flächenstrahler mit kleineren Mikrostrukturen (Höhe $h_m = 28 \mu\text{m}$) eine bessere einseitige Auskopplung und eine gute Durchsicht bei geringen Entfernungen aufweisen, während die heißgeprägten Flächenstrahler mit größeren Strukturen (Höhe $h_m = 1016 \mu\text{m}$) einen höheren LOR besitzen und erst ab einer größeren Entfernungen (320 mm) eine ausreichende Durchsicht bieten. Beide Herstellungsverfahren sind für die Massenfertigung geeignet.

Ein Konzept für die Integration der Flächenstrahler in einen Scheibenverbund wurde im Projektverbund erarbeitet und dort umgesetzt. Die Integration der entwickelten Flächenstrahler in eine Fassade wurde in Räumlichkeiten des FhG-IBP demonstriert und die resultierende Raumbelichtung dort vermessen. Ansatzpunkte zur Optimierung der Herstellung der industriell gefertigten Flächenstrahler und des Scheibenverbundes wurden aufgezeigt.

Mit den hergestellten Flächenstrahlern ist eine fassadenseitige, indirekte Raumbelichtung bis zu einer Raumtiefe von 2 Metern möglich. Durch die Integration in den Scheibenverbund

wird der LOR um 24 % gesenkt. Die Weiterentwicklung von Mikrostrukturen für eine effizientere, tiefere Raumbelichtung erfolgt in den folgenden Abschnitten.

5.2 Modifizierung eines Flächenstrahlers für horizontale Lichtauskopplung

Neben einer Anwendung als fassadenintegrierte Raumbelichtung, sind alleinstehende Leuchten ein interessantes Einsatzfeld von mikrostrukturierten Flächenstrahlern. Diese können beispielsweise als Raumtrenner oder Schreibtischleuchten Anwendung finden. In diesem Bereich sind Flächenstrahler wünschenswert, welche Licht senkrecht zur ihrer Oberfläche emittieren. Die Entwicklung eines solchen Flächenstrahlers ist darüber hinaus ein Schritt zu einer optimierten fassadenintegrierten Beleuchtung, die durch den größeren bzw. horizontalen Auskoppelwinkel den Raum tiefer ausleuchtet.

5.2.1 Mikrostruktur

Für die senkrechte Lichtauskopplung aus einer einseitig strukturierten LGP wird auf das Prinzip der Totalreflexion zurückgegriffen. Trifft Licht auf eine ausreichend schräge Strukturflanke, wird es dort reflektiert und an der Strukturoberfläche ausgekoppelt. Ähnliche Strukturen wurden bereits für den Einsatz in Flachbildschirmen entwickelt und ihre Funktion anhand von Funktionsmustern in PDMS belegt [12, 29, 31].

Von diesen Überlegungen ausgehend wird eine Mikrostruktur in Form eines Kegelstumpfs simulativ optimiert [148]. Die Struktur wird mit einer Höhe von $600\ \mu\text{m}$ für eine Herstellung in PMMA entworfen. Dimension und Material werden auf das zu fertigende Formwerkzeug optimiert. Je kleiner die Struktur, umso mehr Kegelstümpfe werden auf gleicher Fläche gefertigt und umso aufwendiger und kostenintensiver ist die Fertigung. Der entwickelte, hinterschnittene Kegelstumpf mit einem Bodendurchmesser von $d_{m,\text{Boden}} = 600\ \mu\text{m}$ sowie einem Flankenwinkel von $\varphi_F = 32^\circ$ wird in Abbildung 5.30 gezeigt. Im Entwurf der Struktur wird eine Basisplatte mit einer Höhe von $2\ \text{mm}$ berücksichtigt, die zur Fertigung von hinterschnittenen Strukturen benötigt wird (vgl. Abschnitt 4.3). Der Flankenwinkel wurde durch die Durchführung vergleichender Simulationen ermittelt. Eine ähnliche Struktur mit einem Flankenwinkel von $\varphi_F = 33^\circ$ berechnet auch Huang et al. [12] für eine optimierte Displaybeleuchtung mit senkrechter Lichtauskopplung.

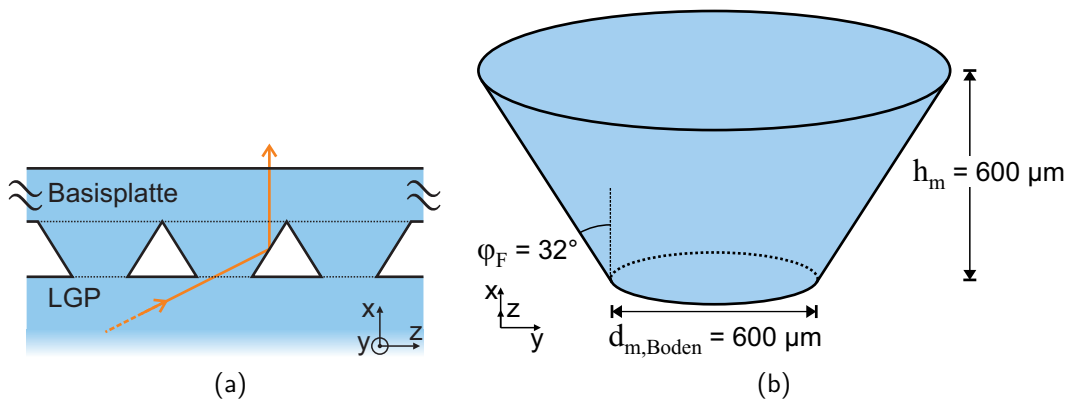


Abb. 5.30: Mikrostruktur zur horizontalen Lichtauskopplung im Querschnitt auf einer LGP mit Basisplatte (a). Das Licht wird in die LGP eingekoppelt und an der Mikrostruktur in die Basisplatte umgelenkt und ausgekoppelt. (b) zeigt die Struktur in einer perspektivischen Darstellung.

Ein Flächenstrahler mit solchen Kegelstümpfen wird mit den Abmessungen $\ell_z = 600 \text{ mm}$ und $d = 2 \text{ mm}$ und 11 Duris E3 LEDs von *Osram* als Referenzsystem simuliert. Die Mikrostrukturen sind, wie in Abbildung 5.31 gezeigt, möglichst dicht mit einem Abstand von $\Delta_M = 1350 \text{ }\mu\text{m}$ angeordnet. Die simulierte Abstrahlcharakteristik ist in Abbildung 5.32 und Tabelle 5.8 aufgeführt. Es wird eine gute horizontale, einseitige Auskopplung bei hohem LOR erreicht.

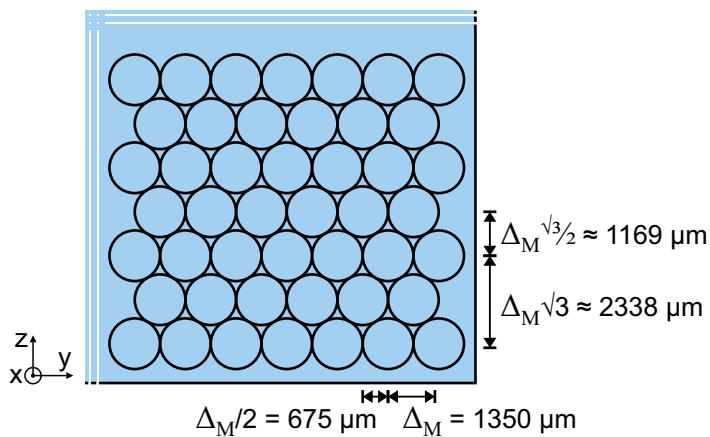


Abb. 5.31: Anordnung der Kegelstümpfe zur horizontalen Lichtauskopplung auf der LGP.

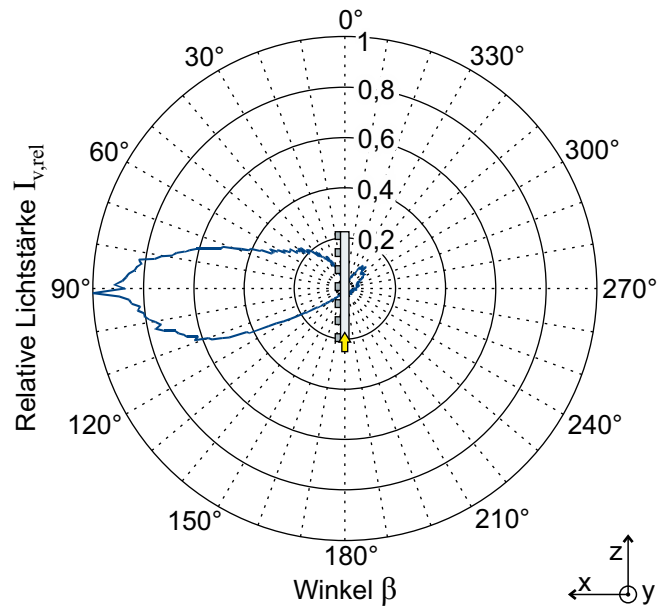


Abb. 5.32: Simulierte LVK des entwickelten Flächenstrahlers mit Kegelstümpfen. Das Licht wird hauptsächlich einseitig, horizontal ausgekoppelt.

Tab. 5.8: Kennwerte der simulierten idealen Referenz des Flächenstrahlers mit Kegelstümpfen zur horizontalen Lichtauskopplung.

| | |
|------------------|--------------------|
| η_{LOR} | 88 % |
| η_{eA} | 86 % |
| η_{eLOR} | 76 % |
| Auskoppelbereich | 71° - 112° (41°) |
| h_m | 600 μm |
| $d_{m,Boden}$ | 600 μm |
| Δ_M | 1350 μm |
| φ_F | 32° |
| l_z | 600 mm |
| l_y | 50 mm |
| d | 2 mm |

5.2.2 Prototyp

Der Prototyp wird mit einer Breite von $l_y = 50\text{ mm}$ und einer Länge von $l_z = 60\text{ mm}$ durch variothermes Spritzprägen in PMMA am INKA gefertigt. Die Höhe der LGP und der Basisplatte ist $d = 2\text{ mm}$. Die Referenz für den Prototypen ist mit seinen Maßen auf den verwendeten Rahmen und Messaufbau ausgelegt. Der Rahmen ist mit 10 LEDs vom Typ Duris E3 von *Osram* bestückt. Er maskiert die zu messende Seite des Musters mit einem kreisförmigen Ausschnitt (Durchmesser 40 mm) vor der runden,

strukturierten Fläche und fasst die LEDs und Stirnflächen der LGP sowie die Basisplatte ein. Die Maskierung ist notwendig, um die streuende Auskopplung aus den Rändern der Basisplatte auszublenden. Die Form des eigentlich runden, strukturierten Bereichs wird in der Simulation als quadratisch angenähert, da vergleichende Simulationen von rundem und quadratischem Bereich auf einem solchen Flächenstrahler keinen Unterschied in der Abstrahlcharakteristik zeigten. Der im Vergleich zu den bisherigen Simulationen stark modifizierte Simulationsaufbau wird in Abbildung 5.33 skizziert.

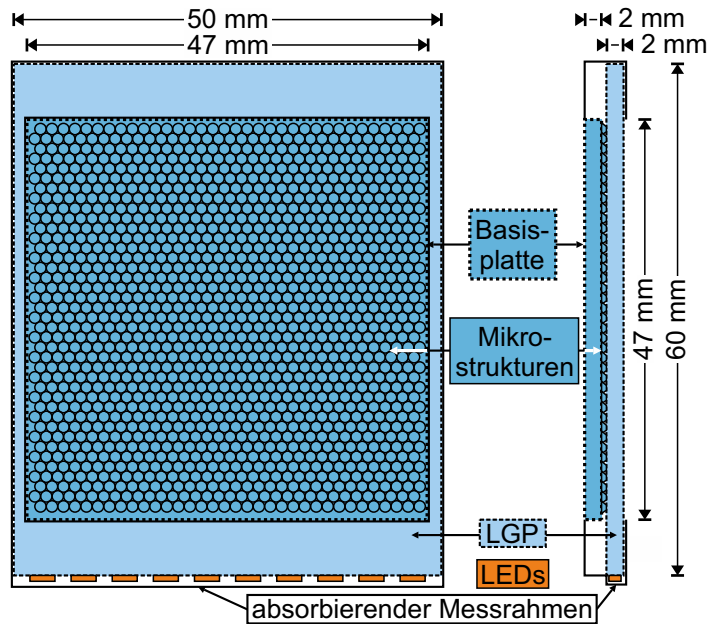


Abb. 5.33: Modifizierter Simulationsaufbau für den Prototypen zur horizontalen Lichtauskopplung. Adapted by permission from Springer Nature Customer Service Centre GmbH: [148], © Springer Nature 2020.

Basisplatte und LGP des Prototypen werden durch das hierfür in Abschnitt 4.3 entwickelte Verfahren nach einer UV-Bestrahlung am INKA thermisch verbunden. Der strukturierte Bereich ist eine runde Fläche mit einem Durchmesser von 47 mm. Abbildung 5.34 zeigt Aufnahmen des Prototypen. Die Aufnahme des leuchtenden Flächenstrahlers (Abbildung 5.34b) bestätigt die gute Verbindung der Mikrostrukturen mit der LGP. Eine Aufnahme der Mikrostrukturen vor dem Bonden durch das Rasterelektronenmikroskop (REM) am INKA und der Querschnitt durch eine Abformung der verbundenen LGP sind in Abbildung 5.35 dargestellt. Am Boden des Kegelstumpfs weicht die gefertigte Struktur leicht von der Referenz ab (Abbildung 5.35b). Die Flanke weist Rattermarken auf.

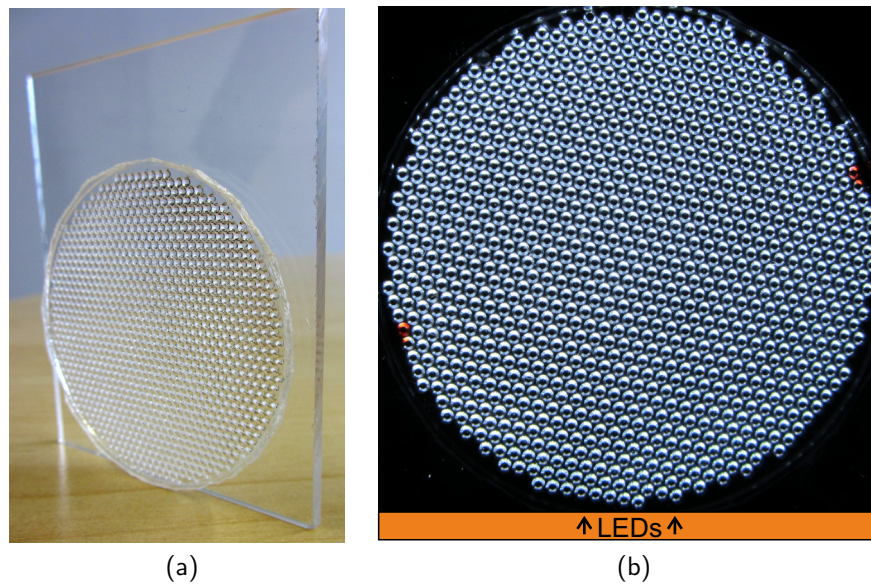


Abb. 5.34: Aufnahme des am INKA gefertigten 50 mm×60 mm großen Prototypen für die horizontale Lichtauskopplung alleinstehend (a) und leuchtend, von der strukturierten Seite betrachtet (b). Jeder einzelne, verbundene Kegelstumpf ist zu erkennen. *Reprinted by permission from Springer Nature Customer Service Centre GmbH: [148], © Springer Nature 2020.*

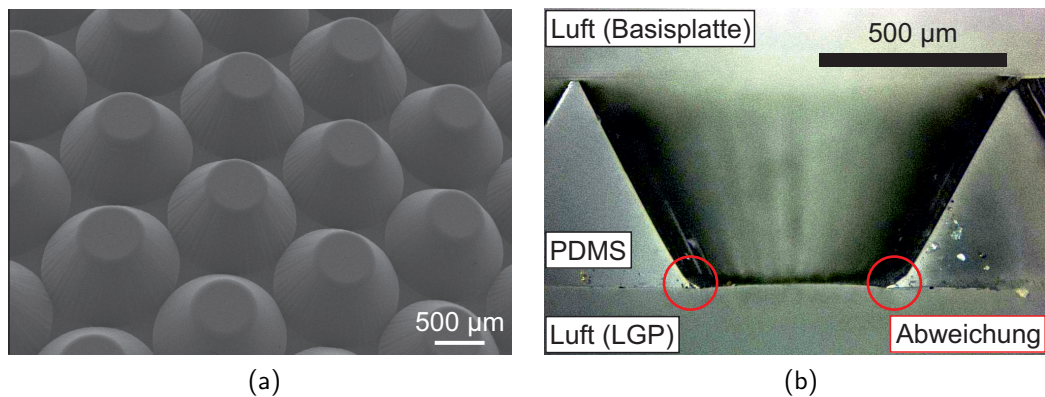


Abb. 5.35: REM-Aufnahme der Mikrostrukturen am INKA vor dem Bonden (a) und Querschnitt durch eine PDMS-Abformung des fertigen Prototypen (b). Die Abweichung von der Form der Referenz ist rot markiert. *Adapted by permission from Springer Nature Customer Service Centre GmbH: [148], © Springer Nature 2020.*

Die hergestellten Kegelstümpfe werden mit einem CAD-Modell angenähert. Die Abstrahlcharakteristik und Parameter des Flächenstrahlers sind für den hergestellten und simulierten Prototypen in Abbildung 5.36 und Tabelle 5.9 aufgeführt.

Die Abweichung in der Höhe h_m der Struktur ($\delta_F = 7\%$) hat keine Auswirkung auf das Abstrahlverhalten. Diese Abweichung lässt sich durch Verarbeitungs- und Nachschwindung sowie hauptsächlich Schrumpfung des PMMA während der thermischen Bearbeitung begründen [156]. Der geringere Bodendurchmesser ($\delta_F = 20\%$), wird durch eine teilweise unvollständige Füllung der Kanten des Formwerkzeugs beim Spritzprägen hervorgerufen und bedingt eine Abnahme des LOR, da die strukturierte Fläche des Flächenstrahlers – trotz geringerem Strukturabstand ($\delta_F = 4\%$) – abnimmt. Durch diese Formabweichung am Boden des Kegelstumpfs zeigt die LVK des Prototyps bei $\beta = 45^\circ$ zudem ein zusätzliches lokales Maximum. Simulationen zeigen, dass die Rattermarken keine merkliche Auswirkung auf die Abstrahlcharakteristik haben. Der um 11° breitere Auskoppelbereich in der Messung ist auf die Oberflächenrauheit der Basisplatte mit $R_a = 87 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$ zurückzuführen, während die etwas geringere einseitige Auskopplung ($\delta_F = 4\%$) durch diese Rauheit und der Rauheit auf der LGP ($R_a = 61 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$) sowie Reflexionen am Rahmen bedingt werden. Die Rauheiten entstehen durch raue Werkzeugoberflächen in der Apparatur zum Verbinden von LGP und Mikrostruktur.

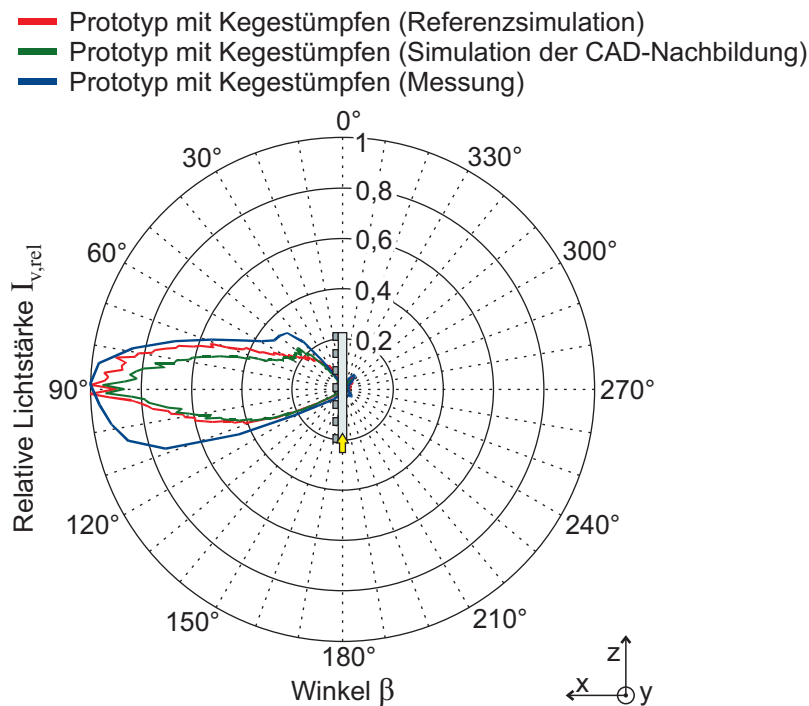


Abb. 5.36: LVK des vermessenen (blau) und simulierten Prototypen (grün) zur horizontalen Lichtauskopplung sowie der entsprechende Referenz (rot).

Tab. 5.9: Kennwerte und geometrische Abmessungen des Prototypen zur horizontalen Lichtauskopplung und dessen Simulation sowie die der Referenzen.

| | Prototyp | | |
|-----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | Messung | CAD-Nachb. | Referenz |
| η_{LOR} | - | 34 % | 40 % |
| η_{eA} | 91 % | 95 % | 93 % |
| η_{eLOR} | - | 32 % | 37 % |
| Ausk.-Bereich | 70° - 110° (40°) | 75° - 104° (29°) | 71° - 104° (33°) |
| h_m | 558 μm | 558 μm | 600 μm |
| $d_{m,\text{Boden}}$ | 478 μm | 478 μm | 600 μm |
| Δ_M | 1290 μm | 1290 μm | 1350 μm |
| R_a auf LGP innen | 32 nm \pm 5 nm | 0 nm | 0 nm |
| R_a auf LGP außen | 61 nm \pm 5 nm | 0 nm | 0 nm |
| R_a auf Basispl. innen | 38 nm \pm 5 nm | 0 nm | 0 nm |
| R_a auf Basispl. außen | 87 nm \pm 5 nm | 0 nm | 0 nm |
| φ_F | 32° | 32° | 32° |
| ℓ_z | 60 mm | 60 mm | 60 mm |
| ℓ_y | 50 mm | 50 mm | 50 mm |
| d | 2 mm | 2 mm | 2 mm |

5.2.3 Fazit der Modifizierung eines Flächenstrahlers für horizontale Lichtauskopplung

Für die horizontale Lichtauskopplung wurde basierend auf existierenden Funktionsmustern ein Flächenstrahler mit Kegelstümpfen in PMMA entwickelt. Der am INKA gefertigte Prototyp belegt die Funktion und Realisierbarkeit des Flächenstrahlers in für die Serienproduktion geeignetem Material. Für den Prototypen wurde das entwickelte Verfahren zur Herstellung hinterschnittener Strukturen in PMMA erfolgreich angewandt. Prinzipiell kann die Herstellung des entwickelten Flächenstrahlers zur horizontalen Lichtauskopplung in einer Serienproduktion mittels Heißprägen und UV-Bonden erfolgen. Optimierungsbedarf besteht in der Reduzierung der Oberflächenrauheit des Prototypen durch einen verbesserten Aufbau zum Bonden der PMMA-LGP und Mikrostrukturen. Anwendung kann der entwickelte Flächenstrahler in freistehenden und fassadenintegrierten Leuchten zur tiefen Raumbelichtung sowie der Hintergrundbeleuchtung von flachen Bildschirmen finden.

5.3 Optimierung des horizontal abstrahlenden Flächenstrahlers für indirekte Raumbelichtung

Die in Abschnitt 5.1 beschriebenen Flächenstrahler mit Zylinderstrukturen eignen sich als transparente Leuchten, die in Fassaden integriert werden können. Allerdings ermöglichen sie nur eine fassadennahe Beleuchtung. Zudem treten durch den flachen Winkel der Lichtauskopplung besonders hohe Reflexionen an Glasscheiben auf, wenn der Flächenstrahler in einen Scheibenverbund integriert wird. Dies verringert seinen LOR. Ausgehend von den Ansprüchen einer guten Raumbelichtung wurde mit dem FhG-IBP eine ideale LVK für einen Flächenstrahler zur indirekten Beleuchtung entwickelt [150]. Dieser Flächenstrahler ist darauf ausgelegt, im oberen Bereich der Fassade integriert zu werden, um Blendung zu vermeiden (vgl. Abbildung 5.37). Damit steht die Transparenz des Systems nicht mehr im Mittelpunkt. Entsprechend der idealen LVK wurde eine Mikrostruktur entwickelt und simulativ an den Ansprüchen für eine gute Beleuchtung gemessen sowie mit einer konventionellen Beleuchtungslösung verglichen.

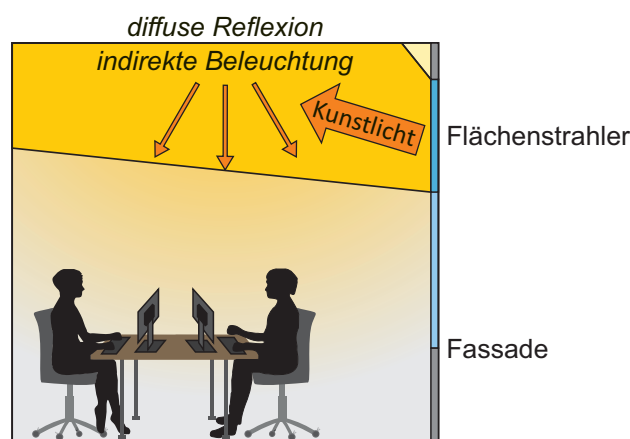


Abb. 5.37: Anwendungsszenario des optimierten horizontalen Flächenstrahlers für indirekte Raumbelichtung. Basierend auf [6].

5.3.1 Ideale LVK zur indirekten Raumbelichtung

Maßgebend für die Funktion einer Beleuchtung im Büro oder Wohnraum ist das Wohlbefinden des Menschen, das stark durch Licht beeinflusst wird und die Konzentrations- und Wahrnehmungsfähigkeit beeinflusst [157, 158]. Für einen geringen Energieverbrauch sollten nur der notwendige Lichtstrom zur Verfügung gestellt und hoch effiziente Lichtquellen verwendet werden [3]. Für den Tätigkeitsbereich ist entsprechend eine Beleuchtungsstärke von $E_v = 500 \text{ lx}$ und für den Hintergrundbereich eine Beleuchtungsstärke von $E_v = 300 \text{ lx}$ bereitzustellen [154, 155]. Für Bildschirmarbeitsplätze ist die erforderliche Gleichmäßigkeit

5.3 Optimierung des horizontal abstrahlenden Flächenstrahlers für indirekte Raumbelichtung

der Beleuchtungsstärke mit $U_0 \geq 0,6$ besonders hoch [154]. U_0 bezeichnet das Verhältnis der niedrigsten zur durchschnittlichen Beleuchtungsstärke. Um Blendung und Reflexionen auf Bildschirmen zu vermeiden, ist bis zu einem Abschirmwinkel (gemessen zur Vertikalen) von 65° die Leuchtdichte auf $L_v \leq 3000 \text{ cd m}^{-2}$ beschränkt (ebd.).

Um die laut Standard geforderte Blendfreiheit zu gewährleisten, wird die raumweite, fassadenseitige Beleuchtung als indirekte Beleuchtung ausgelegt. Der Flächenstrahler muss das Licht einseitig in die obere Raumhälfte abstrahlen. Um dies formal zu erfassen, wird die relative Auskopplung Richtung Raumdecke als η_D eingeführt.

$$\eta_D = \frac{\phi_{v,D}}{\phi_{v,s}} \quad (5.1)$$

$\phi_{v,D}$ ist der Lichtstrom, der Richtung Raumdecke ausgekoppelt wird und $\phi_{v,s}$ der Lichtstrom, der aus der strukturierten Seite des Flächenstrahlers ausgekoppelt wird.

Die LVK der idealen Lichtquelle wird am FhG-IBP mit Hilfe eines dort entwickelten Excel-Makros berechnet (vgl. Abbildung 5.38). Hierbei wird das photometrische Abstandsgesetz verwendet, um die Lichtstärke der Lichtquelle zu ermitteln. Sie soll einen Raum mit 500 lx auf einer Höhe von $0,8 \text{ m}$ gleichmäßig beleuchten. Das Gesetz beschreibt den Zusammenhang der Beleuchtungsstärke E_v auf einer Fläche und der Lichtstärke I_v einer Lichtquelle.

$$E_v = \frac{I_v \cos \theta_F}{d_s^2} \quad (5.2)$$

θ_F ist der Winkel zur Flächennormalen und d_s der Abstand zwischen Lichtquelle und beleuchteter Fläche. Die ideale Lichtquelle ist für einen repräsentativen Büroraum mit einer Höhe von 3 m , einer Tiefe von 5 m und einer Breite von $4,8 \text{ m}$ ausgelegt (vgl. Abbildung 5.39). Er wird aus vier Lichtquellen beleuchtet. Die berechnete LVK der idealen Lichtquelle wurde als Eulumdat-Datei zur Verfügung gestellt. Dieses Dateiformat wird allgemein für die digitale Übermittlung der dreidimensionalen LVK von Leuchten verwendet. Die entsprechende zweidimensionale LVK ist in Abbildung 5.40 dargestellt. Ihre Kennwerte sind in Tabelle 5.10 aufgelistet.

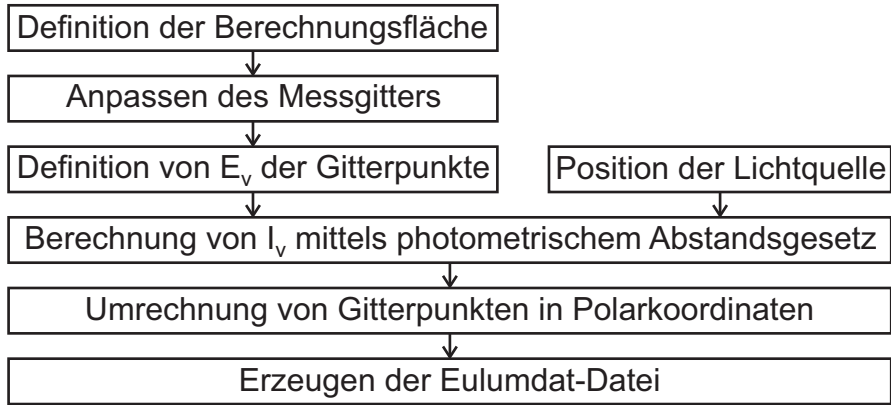


Abb. 5.38: Aufbau des Excel-Makros zur Berechnung der LVK der idealen Lichtquelle. Adapted with permission from [150] © The Optical Society.

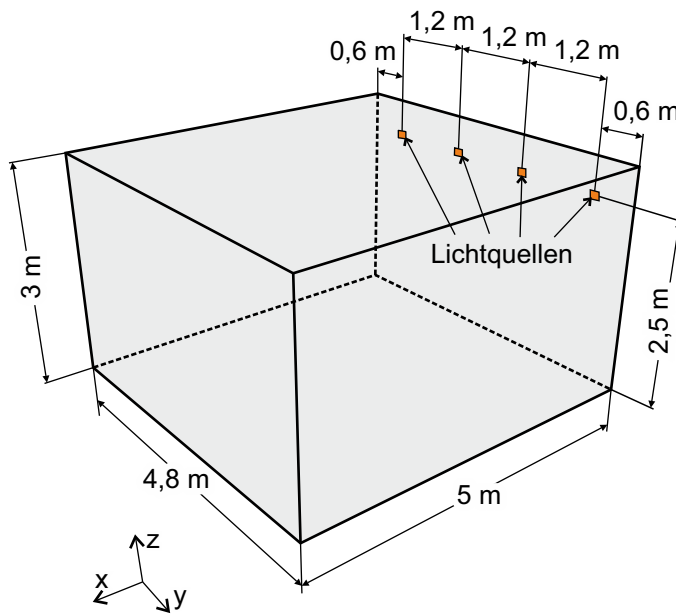


Abb. 5.39: Referenzraum für die berechnete, ideale Lichtquelle. Adapted with permission from [150] © The Optical Society.

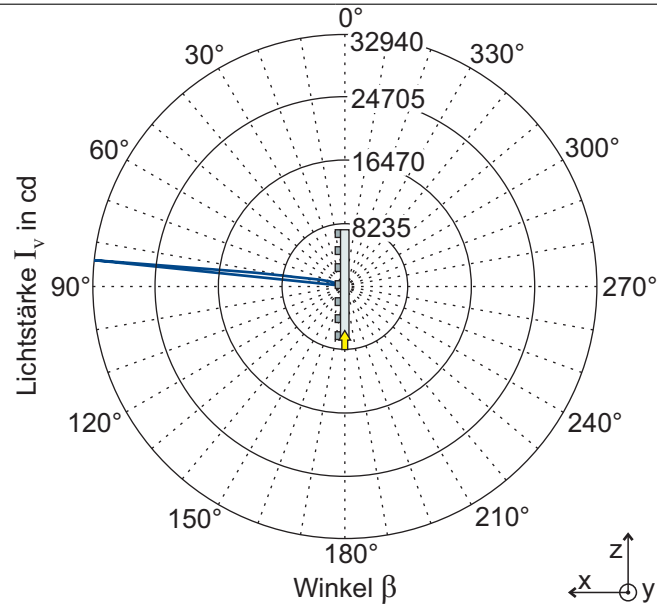


Abb. 5.40: LVK der vom FhG-IBP berechneten, idealen Lichtquelle für eine indirekte Raumbeleuchtung aus der Fassade. *Adapted with permission from [150] © The Optical Society.*

Tab. 5.10: Kennwerte der LVK der vom FhG-IBP berechneten, idealen Lichtquelle für eine indirekte Raumbeleuchtung aus der Fassade.

| | |
|------------------|----------------|
| η_{LOR} | 100 % |
| η_{eA} | 100 % |
| η_{eLOR} | 100 % |
| η_D | 100 % |
| Auskoppelbereich | 82° - 84° (2°) |

5.3.2 Mikrostruktur

Die LVK der idealen Lichtquelle stellt eine fast horizontale Lichtauskopplung dar. Ein passender mikrostrukturierter Flächenstrahler wird daher aufbauend auf der Mikrostruktur zur horizontalen Lichtauskopplung aus Abschnitt 5.2 entwickelt. Als Material wird PMMA und als Strukturhöhe $h_M = 50 \mu\text{m}$ gewählt. Dies ermöglicht die Fertigung der Mikrostruktur in verschiedenen der vorgestellten Herstellungsverfahren (Gießen, variothermes Spritzprägen, durch skalieren der Struktur: Heißprägen). Als Lichtquelle wird die LED TOPLED E3014 von *Osram* simuliert. Die Länge der LGP ist $\ell_z = 600 \text{ mm}$ und ihre Höhe ist $d = 2 \text{ mm}$.

Zur Verkleinerung des Auskoppelbereichs des Flächenstrahlers, werden zunächst verschiedene Rundungen der Flanke simuliert. Die Verwendung einer geeigneten Ellipse als Form für die Flanke stellt das beste Ergebnis dar. Um die Position des Auskoppelbereichs an

den der idealen Lichtquelle anzunähern und dabei dessen Breite möglichst schmal zu halten, wird der obere und untere Flankenwinkel variiert. Mit der in Abbildung 5.41 dargestellten Mikrostruktur wird die LVK der idealen Lichtquelle möglichst gut angenähert. Die Strukturen werden wie in Abbildung 5.42 skizziert mit einem Abstand von $\Delta_M = 210 \mu\text{m}$ auf der LGP angeordnet. Beide LVKs sind vergleichend in Abbildung 5.43 eingezeichnet und die Kennwerte in Tabelle 5.11 aufgeführt.

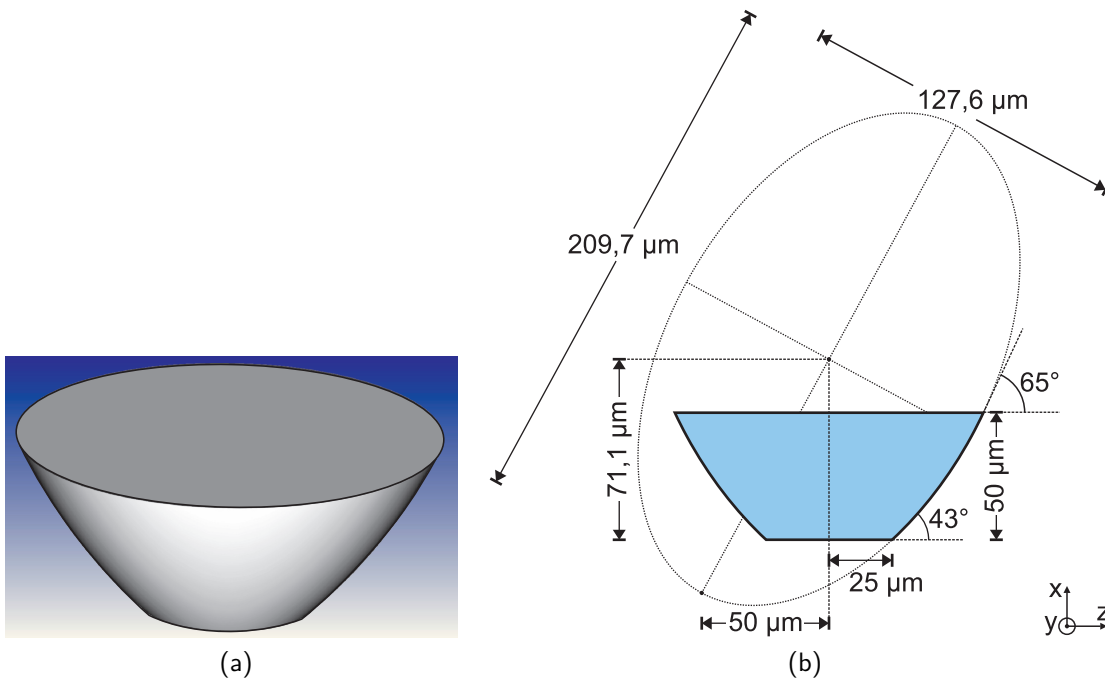


Abb. 5.41: Perspektives CAD-Modell der optimierten Mikrostruktur für horizontale Abstrahlung (a) und ihre geometrischen Abmessungen im Querschnitt (b). Der Querschnitt der Hälfte der Struktur ist ein Ausschnitt der eingezeichneten, geneigten Ellipse (gepunktet). *Adapted with permission from [150] © The Optical Society.*

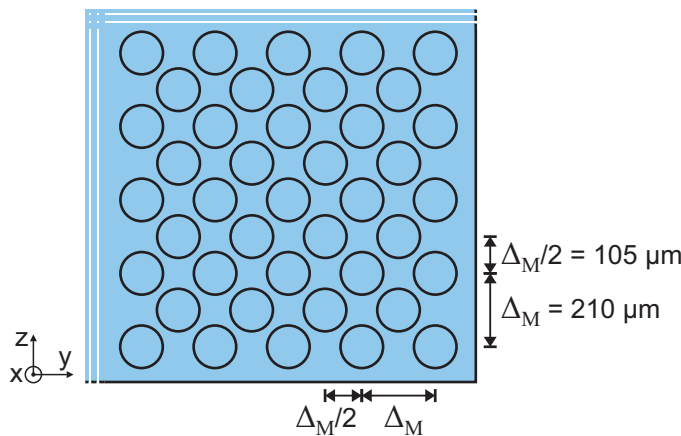


Abb. 5.42: Anordnung der optimierten Mikrostruktur für horizontale Abstrahlung.

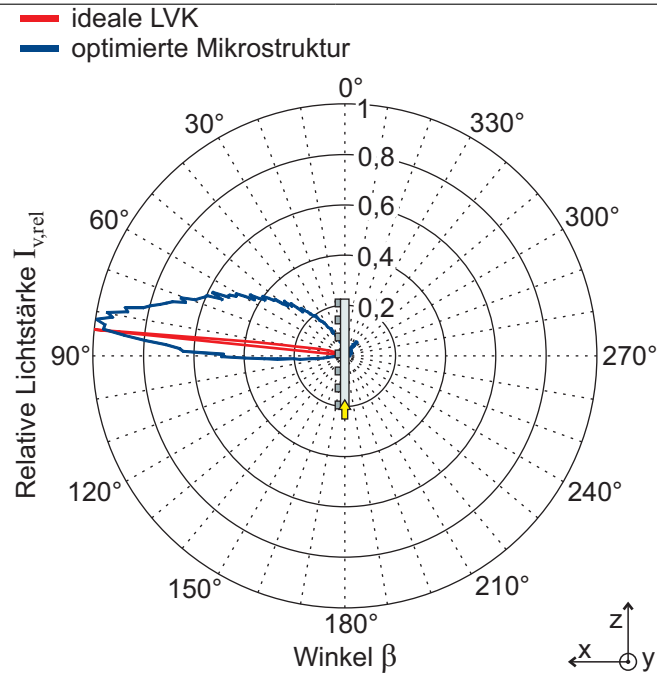


Abb. 5.43: LVK des Flächenstrahlers mit optimierter Mikrostruktur zur horizontalen Abstrahlung im Vergleich mit der idealen LVK vom FhG-IBP. Adapted with permission from [150] © The Optical Society.

Tab. 5.11: Kennwerte des Flächenstrahlers mit optimierten Mikrostrukturen im Vergleich mit denen der idealen Lichtquelle vom FhG-IBP.

| | ideale Lichtquelle | optimierter Flächenstrahler |
|------------------|--------------------|-----------------------------|
| η_{LOR} | 100 % | 80 % |
| η_{eLOR} | 100 % | 77 % |
| η_{eA} | 100 % | 96 % |
| η_D | 100 % | 92 % |
| Auskoppelbereich | 82° - 84° (2°) | 64° - 89° (25°) |

5.3.3 Vergleichende Simulation der Raumbelichtung

Zur Überprüfung der Eignung des Flächenstrahlers mit den optimierten Mikrostrukturen als Raumbelichtung, wird dieser vergleichend mit der idealen Lichtquelle, der freistehenden Flächenstrahler mit idealen Mikrozyklindern (vgl. Abschnitt 5.1.1) und einer konventionellen Pendelleuchte⁹ simuliert. Die Simulation der Raumbelichtung erfolgt am FhG-IBP mittels der Software Dialux Evo der DIAL GmbH, Lüdenscheid. Hierzu werden die dreidimensionalen Abstrahlcharakteristiken der Flächenstrahler aus Zemax OpticStudio in Eulumdat-Dateien exportiert, um in Dialux Evo verwendet werden zu können.

⁹Als repräsentatives Modell wird die in Dialux Evo verfügbare Leuchte "Glamox C80-P1138 30/70 LED 6000 830 OP HI; indirect/direct lighting ratio: 30/70" verwendet.

Die Simulationen in Dialux Evo beziehen sich auf die repräsentativen Raumabmessungen, die zur Berechnung der LVK der idealen Lichtquelle genutzt wurden. Die Reflexion an den Oberflächen wird auf übliche Werte gesetzt [154]. Für die Decke auf 0,7, für die Wände auf 0,5 und für den Boden auf 0,2. Der Raum wird durch alle Systeme mit einem Lichtstrom von $\phi_v = 40.000 \text{ lm}$ beleuchtet.

Die ideale Lichtquelle und der optimierte Flächenstrahler werden, wie im Referenzraum, als vier Lichtquellen in einer Höhe von 2,5 m positioniert. Der Flächenstrahler mit Mikrozylindern wird als 600 mm hoher Streifen in dieser Höhe angebracht. Die Pendelleuchten werden zu sechst in einer Höhe von 2,6 m unter der Decke verteilt.

Die Beleuchtungswerte werden auf der Decke und auf der Tätigkeitshöhe von 0,8 m durch ein Messgitter erfasst. Die Ebene auf der Tätigkeitshöhe ist dabei in zwei Bereiche unterteilt. Zum einen in einen beispielhaften Tätigkeitsbereich an der Fassadenseite mit einer Tiefe von 3,5 m und einer Breite von 3,2 m. Zum anderen in eine mittige Linie über die gesamte Raumtiefe. Die Lichtquellen und die Messflächen sind in Abbildung 5.44 in den simulierten Raum eingezeichnet. Die Anzahl der Punkte des Messgitters auf den Flächen ist in Tabelle 5.12 angegeben.

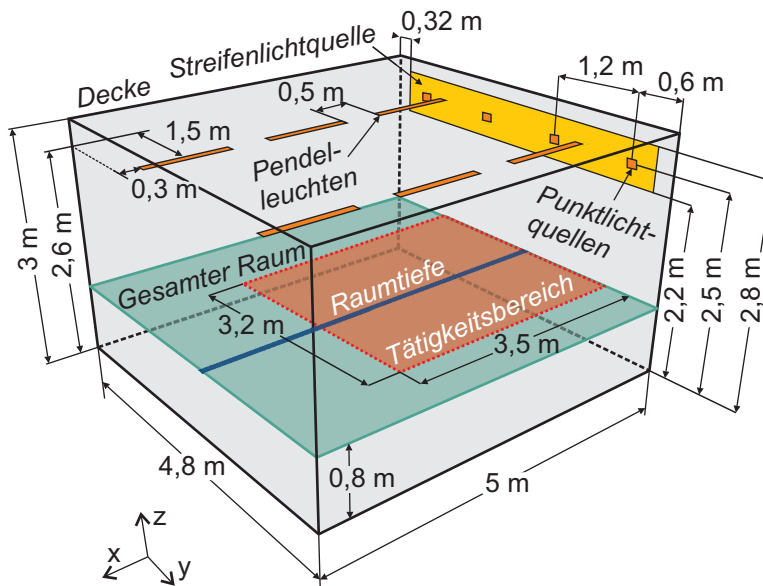


Abb. 5.44: Aufbau der Simulation der Raumbelichtung. Adapted with permission from [150] © The Optical Society.

Tab. 5.12: Anzahl der Punkte des Messgitters auf den Messflächen.

| Fläche | Decke | Gesamter Raum | Tätigkeitsbereich | Raumtiefe |
|--------|-----------|---------------|---------------------|-----------|
| Punkte | 100 × 100 | 100 × 100 | 7 × 8 ¹⁰ | 1 × 26 |

¹⁰Konform zu [154]

5.3 Optimierung des horizontal abstrahlenden Flächenstrahlers für indirekte Raumbelichtung

Die simulierte Beleuchtungsstärke auf der Decke und im gesamten Raum ist in den Abbildungen 5.45 und 5.46 für die verschiedenen Lichtquellen dargestellt. Im Tätigkeitsbereich wird durch den optimierte Flächenstrahler eine durchschnittliche Beleuchtungsstärke von $E_v = 552 \text{ lx}$ bei einer Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke von $U_0 = 0,67$ erreicht. Sie ist damit nah an der Vorgabe durch die ideale Lichtquelle und erfüllt die Anforderungen für eine gute Beleuchtung. Die Beleuchtungsstärke wird auf der Tätigkeitshöhe effizienter verteilt als durch das konventionelle System. Bei diesem liegt die durchschnittliche Beleuchtungsstärke im Tätigkeitsbereich ($E_v = 902 \text{ lx}$) deutlich über den geforderten 500 lx . Die Beleuchtungsstärke und deren Gleichmäßigkeit sind in Abbildung 5.47 für die verschiedenen Messflächen dargestellt. Abbildung 5.48 zeigt die Beleuchtungsstärke über die Raumtiefe. Bis zu einer Raumtiefe von $2,8 \text{ m}$ liefert der optimierte Flächenstrahler eine Beleuchtungsstärke über $E_v = 500 \text{ lx}$ und ist in diesem Bereich somit als einzige Lichtquelle ausreichend. Für eine Hintergrundbeleuchtung mit $E_v = 300 \text{ lx}$ kann der optimierte Flächenstrahler bis zu einer Raumtiefe von $4,6 \text{ m}$ als alleinige Lichtquelle dienen.

5 Beispiele hergestellter mikrostrukturierter Flächenstrahler

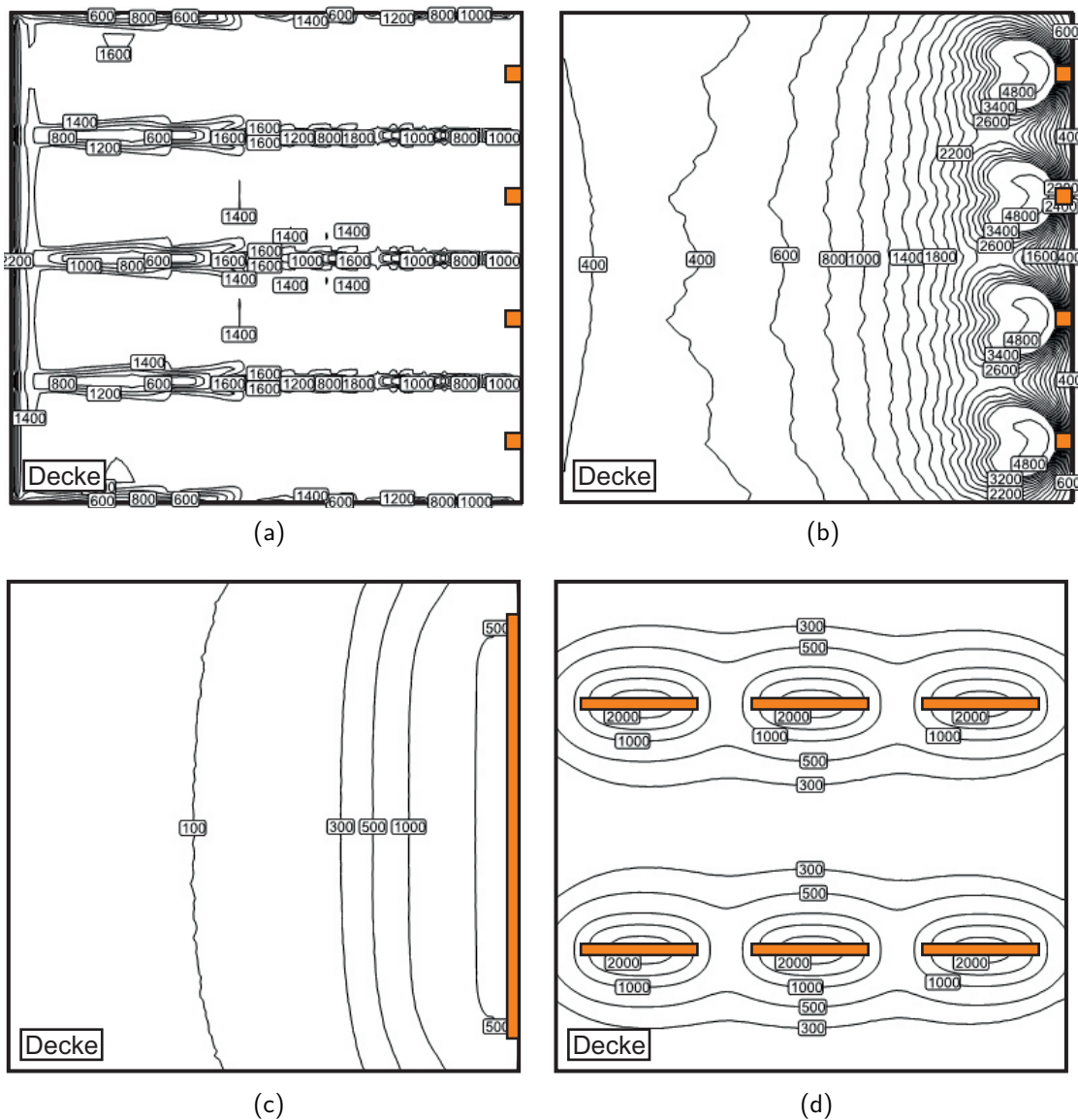


Abb. 5.45: Am FhG-IBP simulierte Beleuchtungsstärke auf der Decke für: (a) ideale Lichtquelle vom FhG-IBP, (b) optimierter Flächenstrahler, (c) Flächenstrahler mit Mikrozyklindern und (d) konventionelle Pendelleuchte. Die Leuchten sind Orange dargestellt.

Die ideale Lichtquelle beleuchtet die Decke in Streifen gleicher Beleuchtungsstärke. Die Beleuchtungsstärke durch den optimierten Flächenstrahler und den Flächenstrahler mit Mikrozyklindern nimmt mit steigender Entfernung von der Fassade ab. Die konventionelle Leuchtquellen erzeugen ein deutliches Maximum der Beleuchtungsstärke über jeder Pendelleuchte. *Adapted with permission from [150] © The Optical Society.*

5.3 Optimierung des horizontal abstrahlenden Flächenstrahlers für indirekte Raumbelichtung

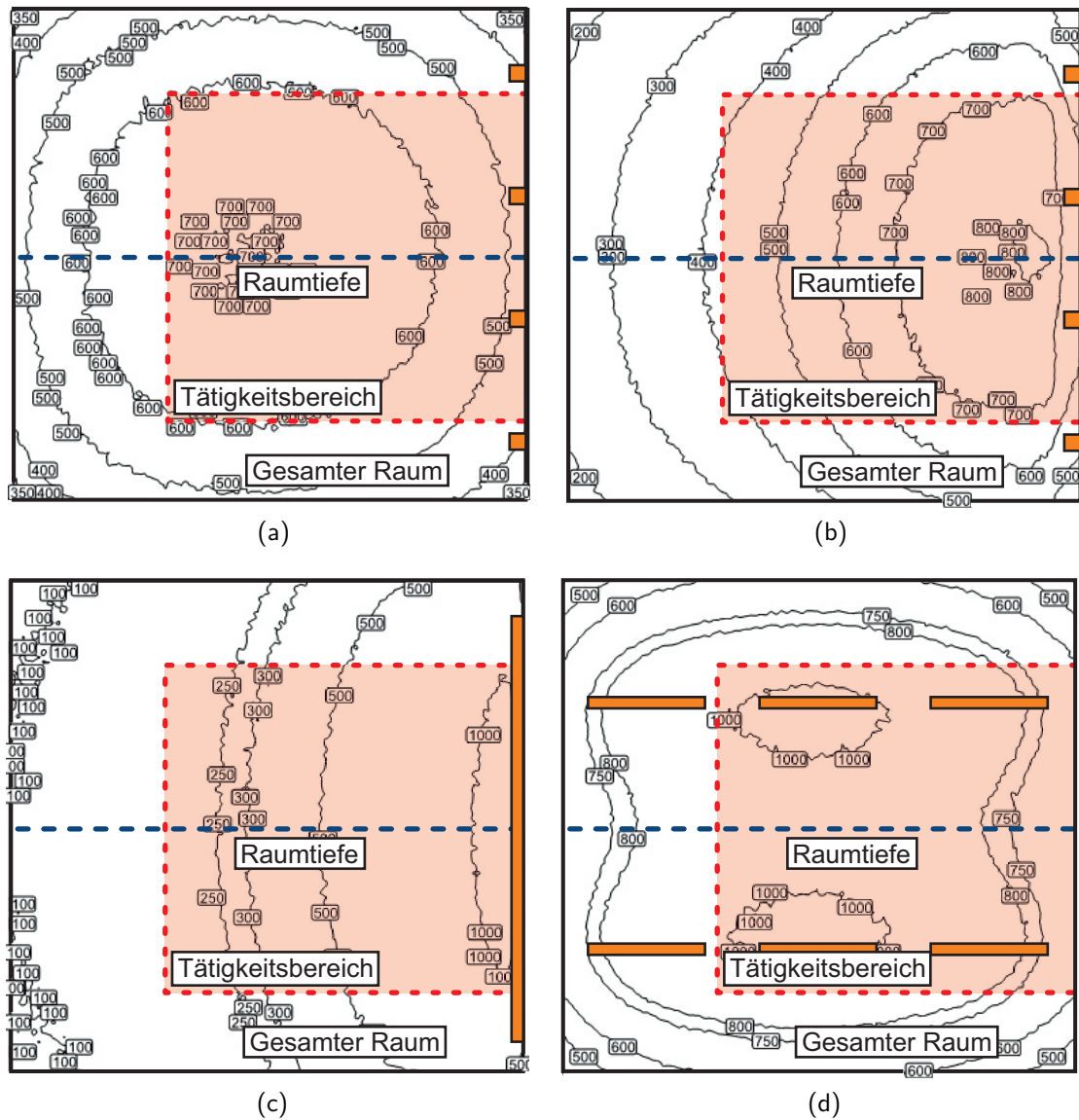


Abb. 5.46: Am FhG-IBP simulierte Beleuchtungsstärke auf Tätigkeitshöhe für: (a) ideale Lichtquelle vom FhG-IBP, (b) optimierter Flächenstrahler, (c) Flächenstrahler mit Mikrozyklindern und (d) konventionelle Pendelleuchte. Die Leuchten sind Orange dargestellt.

Die Beleuchtung durch die ideale Lichtquelle variiert kaum und hat ihr wenig ausgeprägtes Maximum in der Raummitte. Die Beleuchtungsstärke durch den optimierten Flächenstrahler und der Flächenstrahler mit Mikrozyklindern nimmt mit steigender Entfernung von der Fassade ab, wobei die Beleuchtung durch den optimierten Flächenstrahler weniger stark variiert. Die konventionellen Pendelleuchten weisen eine hohe Beleuchtungsstärke auf, die ausgehend von zwei Maxima zu den Wänden und der Fassade abnimmt. *Adapted with permission from [150] © The Optical Society.*

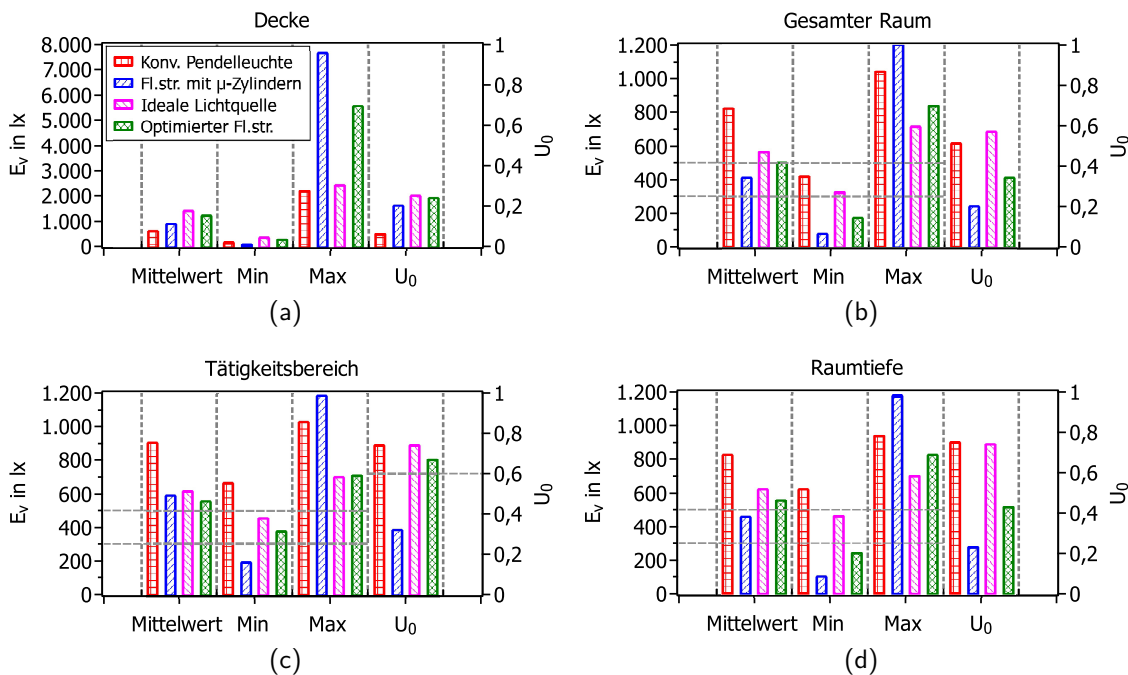


Abb. 5.47: Beleuchtungsstärke und deren Gleichmäßigkeit für die verschiedenen Lichtquellen und Messflächen (a) - (d). Die Richtwerte der Beleuchtungsstärke für Tätigkeiten (500 lx) und dessen Umgebung (300 lx) sind gestrichelt markiert. Für den Tätigkeitsbereich ist die geforderte Gleichmäßigkeit von 0,6 eingezeichnet. Adapted with permission from [150] © The Optical Society.

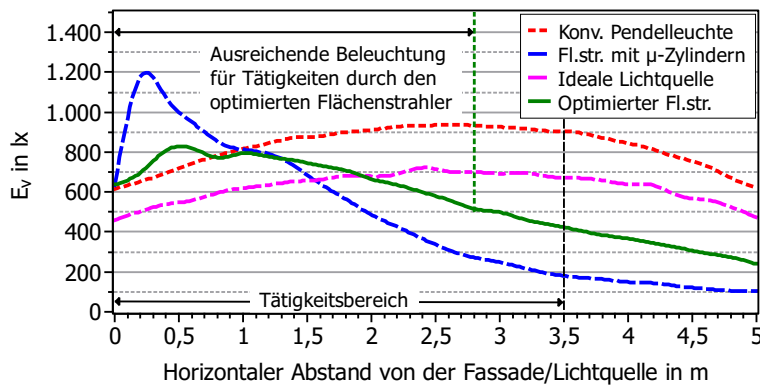


Abb. 5.48: Beleuchtungsstärke über die Raumtiefe. Eingezeichnet ist der für die Messung definierte Tätigkeitsbereich (3,5 m, schwarz gestrichelt) und der Bereich, der mit dem optimierten Flächenstrahler ausreichend beleuchtet wird, um Tätigkeiten durchzuführen (2,8 m, grün gestrichelt). Adapted with permission from [150] © The Optical Society.

5.3.4 Fazit der Optimierung des horizontal abstrahlenden Flächenstrahlers zur indirekten Raumbeleuchtung

Anhand einer vom FhG-IBP vorgegebenen LVK zur idealen Raumbeleuchtung wurde ein mikrostrukturierter Flächenstrahler für eine gute, indirekte Raumbeleuchtung aus der Fassade entwickelt. Mittels Simulationen der Raumbeleuchtung eines Referenzraums durch das FhG-IBP wurde bestätigt, dass eine Raumbeleuchtung einzig mit dem entwickelten Flächenstrahler aus der Fassade ausreicht, um Tätigkeiten bis zu einer Entfernung von 2,8 m von der Fassade durchzuführen. Als Leuchte für eine ausreichende Hintergrundbeleuchtung kann der Flächenstrahler für Räume bis zu einer Tiefe von 4,6 m eingesetzt werden. Er ist damit als alleinige Beleuchtung von Kleinraumbüros gut geeignet. Ein Nachteil ist der hohe Energiebedarf im Vergleich zum konventionellen System. Dieser ist für alle Systeme zur indirekten Beleuchtung gegeben. Grundsätzlich entstehen Verluste bei der Reflexion an der Raumdecke. Ein weiterführender Schritt kann hier die Erweiterung des entwickelten Systems um einen Direktlichtanteil und die Optimierung der Deckenoberfläche sein.

6 Nachhaltigkeit und Ökobilanz

mikrostrukturierter Flächenstrahler

Die Notwendigkeit der Bewertung und Einordnung technologischen Fortschritts, nicht nur in Bezug auf die Gegenwart und den unmittelbaren Nutzen, sondern vor allem in Bezug auf die zukünftige und nachhaltige Auswirkung auf Mensch und Umwelt hielt spätestens Anfang des 20. Jahrhunderts unter dem Eindruck der vorhergegangenen Industrialisierung und des ersten Weltkriegs als Grundbegriff „Verantwortung“ in die Ethik Einzug [159, 160]. Die Betrachtung technologischen Fortschritts unter ethischen Gesichtspunkten ist der Erkenntnis geschuldet, dass die technischen Möglichkeiten inzwischen so mächtig geworden sind, dass ein nachhaltig zerstörerischer Eingriff in die Natur möglich ist und das Fortbestehen des Menschen verhindert werden kann [161]. Anwendung findet diese Verantwortungsethik unter anderem in den ethischen Grundsätzen des Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) [162] und des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) [163]. Es werden nachhaltige Entwicklungspraxen gefordert (IEEE) und die Reflexion gesellschaftlicher, ökonomischer und ökologischer Zusammenhänge unter Beachtung künftiger Generationen (VDI). Zudem werden vom VDI die Priorisierung von Menschenrechten vor Nutzenerwägungen und des öffentlichen Wohls vor privaten Interessen gefordert.

Neben den physischen Auswirkungen ist es angezeigt, den Einfluss des technologischen Fortschritts auf die jetzige und zukünftige menschliche Gesellschaft zu reflektieren. Dies macht die stetige Präsenz und Verflechtung der Technik in die Gesellschaft und ihre Prozesse notwendig. Diese Verflechtung birgt zudem die Gefahr der Konzentration des Sinnes und Wertes des Menschen oder Kollektivs auf dessen technologischen Fortschritt [164]. Gepaart mit dem im aktuellen Wirtschafts- und Gesellschaftssystem angelegten Zwang zur Verschwendung – der dem zu Grunde liegenden Profitinteresse folgen muss [165] – ist besondere Aufmerksamkeit geboten, um in der Technik einen Fortschritt nur des Fortschritts wegen zu vermeiden. Es ist daher konsequent, dass der VDI zur Überprüfung der Sinnhaftigkeit einer technischen Erfindung in seinen ethischen Grundsätzen aufruft. Konkret fordert er „*sinnvolle* technische Erfindungen und Lösungen“ ([163], Hervorhebung durch den Autor).

Um der geforderten Verantwortung einigermaßen gerecht zu werden, werden im Folgenden mögliche Auswirkungen der in dieser Arbeit praktisch umgesetzten Erfindung eines mikrostrukturierten Flächenstrahlers zur Integration in die Fassade untersucht. Dabei wird die Betrachtung in drei Abschnitte unterteilt: Die Auswirkungen der eingesetzten Erfindung, der Herstellung der Erfindung und des Rohstoffgewinns für diese Herstellung. Ziel der Untersuchung ist eine grobe sozioökologische Einordnung möglicher Folgen der Umsetzung der Erfindung sowie die Identifikation von Optimierungspotential. Eine umfassende Lebenszyklus-Analyse würde zu umfangreich für den Rahmen dieser Arbeit.

6.1 Auswirkungen der Anwendung von fassadenintegrierten, mikrostrukturierten Flächenstrahlern zur Raumbelichtung

Die Bewertung der Anwendung der integrierten Fassadenelemente ist insofern recht unkonkret, als das eine Anwendung als Produkt noch nicht stattfindet. Daher können die Überlegungen in diesem Abschnitt ausschließlich theoretischer Natur sein.

6.1.1 Energieverbrauch

Angesichts der menschengemachten, globalen Erwärmung bzw. des Klimawandels und der daraus abgeleiteten Handlungsnotwendigkeit in Bezug auf die Reduzierung der weltweiten Kohlenstoffdioxid-Emissionen spielt die Betrachtung des Energieverbrauchs neuer technischer Entwicklungen eine wichtige Rolle [1, 166]. Die vorgestellten Flächenstrahler nutzen LEDs als Lichtquelle. Diese sind vergleichsweise energieeffizient. Während eine Leuchtstofflampe (als übliche Lichtquelle in Büroräumen) eine Lichtausbeute von $60 \text{ lm W}^{-1} \leq \eta_v \leq 104 \text{ lm W}^{-1}$ aufweist [167], erreichen die in den fassadenintegrierten Flächenstrahlern eingesetzten LEDs bereits $\eta_v = 153 \text{ lm W}^{-1}$ [168].

Wie Effizient eine Leuchte ist, hängt nicht nur von deren Lichtquelle ab, sondern auch von den Verlusten innerhalb der Leuchte. Gewöhnliche Muldenleuchten weisen einen LOR von $65 \% \leq \eta_{LOR} \leq 85 \%$ auf [167]. Diesen unterschreiten die integrierten Flächenstrahler in Praxis und Theorie (wenn auch nur knapp): $55 \% \leq \eta_{LOR} \leq 62 \%$. Die optimierten Systeme versprechen hier jedoch eine Steigerung des LOR.

6.1.2 Auswirkung auf den Menschen und die Gesellschaft

Durch den Einsatz von LEDs sind die Leuchten in ihrer Farbtemperatur und Intensität an die Bedürfnisse des Menschen anpassbar. Dies ist insofern besonders relevant, da jeder Mensch anders auf unterschiedliche Lichtströme reagieren kann [169]. Durch die individuelle Anpassung der Lichtquelle kann eine Steigerung des Wohlbefindens des Menschen erreicht werden. Diese Anpassbarkeit birgt jedoch auch Gefahren, die es zu vermeiden gilt [170]: An Plätzen der Lohnarbeit kann eine Leistungssteigerung der Menschen über die Manipulation ihres natürlichen Tag-Nacht-Rhythmus durch angepasste Beleuchtung erzwungen werden [171]. Auch die Lenkung menschlichen Konsumverhaltens durch entsprechende Beleuchtung ist möglich [172].

Dadurch, dass die Leuchte in dem gleichen Element integriert ist, aus dem auch die natürliche Beleuchtung durch die Sonne in den Raum eintritt, wird der Leuchte etwas von ihrem künstlichen Charakter genommen. Ob dies die Aufenthaltsqualität in einem so beleuchteten Raum steigert, ist schwer abzusehen, kann jedoch vermutet werden. Es besteht allerdings die Gefahr, dass bei einer individuellen Bedienung der Leuchte der Energieverbrauch steigt, eben weil die Leuchte weniger stark mit diesem assoziiert wird.

Zunächst handelt es sich bei dem entwickelten Flächenstrahler um die Vorlage eines hochpreisigen Produkts. Dies ist bedingt durch den innovativen Charakter und die, für eine Serienproduktion bisher ungewohnte, hohe Komplexität des gesamten Scheibenverbundes. Ein Zugang für den Großteil der Bevölkerung ist nur wahrscheinlich, wenn die Anschaffungskosten für eine fassadenintegrierte Beleuchtung mit denen herkömmlicher Leuchten vergleichbar werden. Zudem fand die Entwicklung mit einem eurozentristisch geprägten Blick statt und es bleibt zu untersuchen, ob eine Anwendung in anderen Regionen und Kulturen sinnvoll ist. Ein relevanter gesellschaftlicher Einfluss ist in nächster Zeit daher nicht zu erwarten. In der Forschung hingegen setzen die entwickelten Flächenstrahler neue Maßstäbe im Bezug auf ihre Fertigung und ihren Einsatz in der Raumbeleuchtung. Sie geben Anstoß für weitere Innovationen in der Lichtplanung und Fassadenfertigung.

6.1.3 Auswirkung auf die Umwelt

Bei der Beleuchtung in Gebäuden mit Fenstern ist für die Umwelt vor allem die Lichtverschmutzung relevant. Damit ist gemeint, dass Licht insbesondere bei Dunkelheit aus dem Gebäude in die Umgebung austritt. Lichtverschmutzung hat einen deutlich negativen Effekt auf die Tier- und Pflanzenwelt und sollte daher vermieden werden [173]. Durch die

stark gerichtete Beleuchtung aus der Fassade kann der Lichtstrom, der aus dem Raum durch die Fassade nach außen tritt, reduziert werden. Die Erfindung kann so zu einer Verringerung der Lichtverschmutzung durch Gebäude beitragen.

6.2 Auswirkung der Herstellung von mikrostrukturierten Flächenstrahlern

In diesem Abschnitt findet lediglich der Flächenstrahler aus PMMA und LEDs als Lichtquelle Beachtung. Die Auswirkung der Nutzung und Herstellung von LEDs wird umfassend von Carr-Wilson et al. [174] behandelt. Das Augenmerk wird daher auf PMMA gelegt. Die Untersuchung von Fassaden bzw. Fenstern und der am UV-Prägen beteiligten Chemikalien würde an dieser Stelle zu weit greifen. Aus dem gleichen Grund werden weitere Komponenten, wie Stromversorgung, Gehäuse usw. nicht behandelt. Die hier präsentierte Herangehensweise kann als Vorlage für die Untersuchung weiterer Herstellungsverfahren dienen.

6.2.1 Energieverbrauch

Bei den als Lichtquelle eingesetzten LEDs handelt es sich um ein Produkt, das auf Halbleitertechnologie basiert und somit komplexe und energieintensive Herstellungsschritte benötigt. Andererseits wird in jedem Herstellungsschritt eine große Zahl von LEDs je Wafer produziert. Der Energieverbrauch pro LED beträgt etwa 109 kJ^{11} [175] (Stand 2012). Je Prototyp werden 160 LEDs eingesetzt. Dies entspricht einem Energieverbrauch von 17 MJ in der Herstellung.

Eine Einschätzung zum Energieverbrauch in der Herstellung von PMMA liefert der Industrieverband PlasticsEurope auf der Basis von Industrieangaben bis zum Jahr 2015 [176, 177]. Da es sich um einen Interessenverband handelt, sind die Daten entsprechend kritisch zu lesen. Ihm zu Folge wird für die Produktion von 1 kg extrudierter PMMA-Platte mindestens 117 MJ Energie eingesetzt (1,2% davon aus erneuerbaren Quellen). Für einen Flächenstrahler mit einer LGP mit den Abmessungen $\ell_y = \ell_z = 600 \text{ mm}$ und $d = 2 \text{ mm}$ und 160 LEDs beträgt, die in der Herstellung notwendige, Energie mindestens 118 MJ, während für eine konventionelle Leuchte mit Leuchtstoffröhre (ohne Elektronik) etwa 194 MJ notwendig sind (Stand 2014) [178].

¹¹Es wird angenommen, dass auf einem 3-Zoll-Wafer 456.036 LEDs mit einer Fläche von jeweils $0,04 \text{ mm}^2$ hergestellt werden. Diese Annahme orientiert sich an Angaben von Schmidtke [47].

6.2.2 Auswirkung auf den Menschen und die Gesellschaft

In der Herstellung von LEDs werden gefährliche Chemikalien eingesetzt [179]. Darüber hinaus entsteht durch mangelnde Qualitätssicherung im Produktionsprozess ein Risiko für Menschen sowohl in der Herstellung als auch in der Nutzung von LEDs (ebd.)¹².

Die LGP des Flächenstrahlers besteht aus PMMA. In der Herstellung dieses Polymers kommen zahlreiche Stoffe zum Einsatz. PMMA entsteht aus Polymerisation von Methacrylsäuremethylester (MMA) mit einem Katalysator [180, 181]. Als repräsentatives Beispiel wird der Katalysator TEMPO betrachtet. In Abbildung 6.1 und 6.2 wird eine Übersicht über die eingesetzten Stoffe bei der industriellen Herstellung von PMMA gegeben. Jeder Herstellungsschritt ist durch die angegebenen Referenzen belegt. Wenn mehrere Herstellungsverfahren für einen Stoff beschrieben sind, wird das, als am ehesten für die industrielle Nutzung geeignet beschriebene, Verfahren angegeben. An einigen Stellen konnten wegen zu allgemeiner Angaben in der Literatur die Herstellungsschritte nicht weiter aufgeschlüsselt werden.

Um einen Eindruck der eingesetzten Stoffe bzgl. ihrer potentiellen Auswirkung auf Mensch und Umwelt zu bekommen, sind in Abbildung 6.3 die Gefahrenstoffkennzeichnungen in einer Größe entsprechend der Anzahl der Stoffe im Herstellungsprozess, die durch sie gekennzeichnet sind, dargestellt. Stoffe die in verschiedenen Prozessen eingesetzt werden, werden entsprechend öfter gezählt. Eine Erklärung der Zeichen findet sich in Anhang D. Stoffe ohne Gefahrenstoffkennzeichnung werden mit einem grünen Haken repräsentiert. Konnten zu einem Stoff keine Informationen zur Kennzeichnung gefunden werden, wird dies durch ein schwarzes Fragezeichen gekennzeichnet. Mengenverhältnisse werden nicht beachtet. Dies ist vor allem bzgl. des Katalysators zu beachten, weil dieser nur in relativ geringen Mengen zum Start der Polymerisation des MMA eingesetzt wird. Dies macht die in der Herstellung des Katalysators eingesetzten Stoffe jedoch nicht weniger schädlich. Die Zuordnung der Kennzeichnungen wurden der GESTIS-Stoffdatenbank [182] und zugehörigen Sicherheitsdatenblättern¹³ entnommen. Hervorzuheben ist, dass 34 % der eingesetzten Stoffe stark gesundheitsgefährdend und 32 % umwelt- und/oder gesundheitsschädigend sind. 12 % der eingesetzten Stoffe sind akut toxisch. Dies macht einen besonderen Schutz der an den Produktionsstätten arbeitenden Menschen erforderlich.

¹²Jain et. al beziehen sich bei ihren Betrachtungen auf die Fertigung von LED-Glühbirnen. Die Risiken sind jedoch auch bei der günstigen Massenfertigung von LED-Komponenten für LGP-Leuchten zu erwarten.

¹³[183, 184, 185, 186]

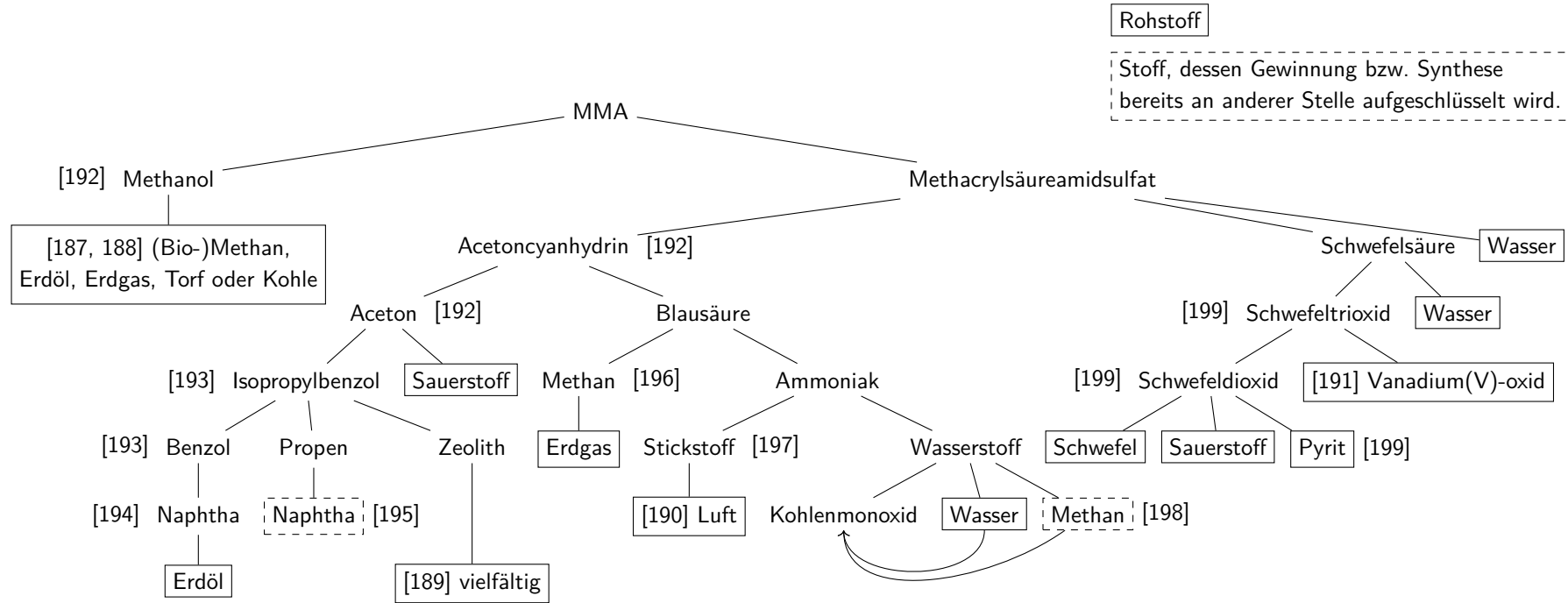
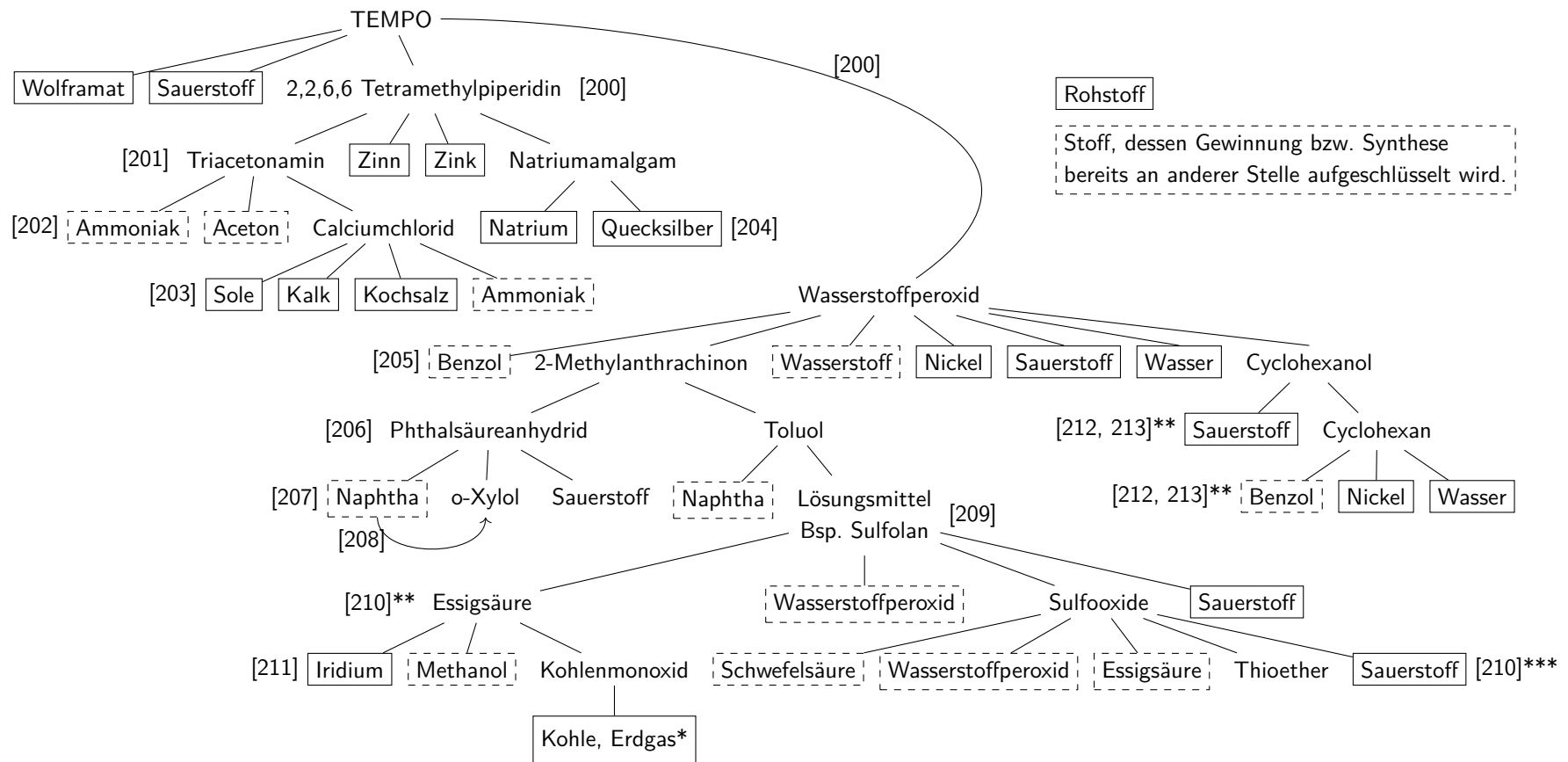


Abb. 6.1: Eingesetzte Rohstoffe und Elemente in der Herstellung von MMA.



* Keine genauen Angaben in der Literatur. Aber eine Gewinnung in petrochemischen Prozessen ist wahrscheinlich.

** In der Literatur sind nur ungenaue Angaben für den Prozess angegeben. Weitere benötigte Stoffe können daher in der Auflistung fehlen.

*** Kann wegen ungenauer Angaben in der Literatur nicht über diese Ebene hinaus aufgelöst werden. Weitere benötigte Stoffe können in der Auflistung fehlen.

Abb. 6.2: Eingesetzte Rohstoffe und Elemente in der Herstellung von TEMPO.

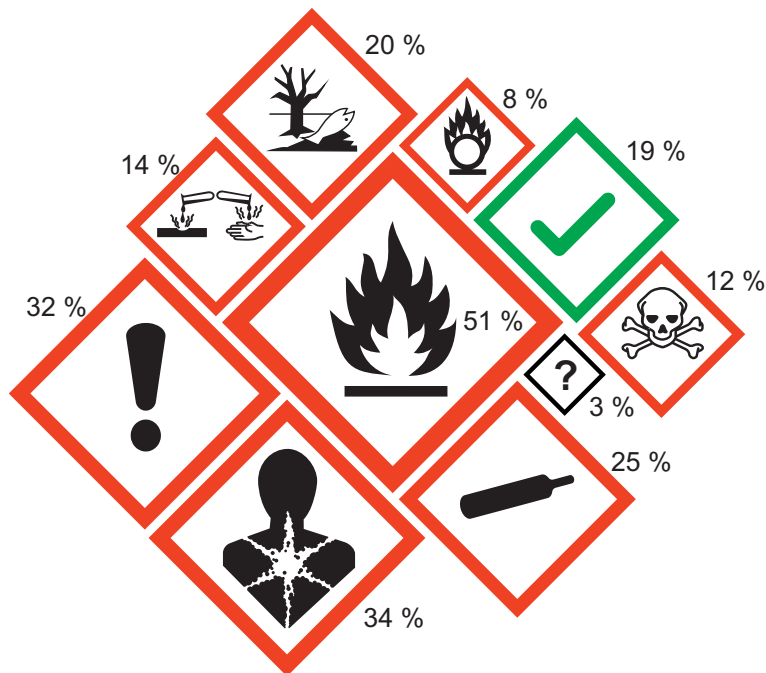


Abb. 6.3: Gefahrenstoffkennzeichen in der Größe der Symbolfläche sortiert nach der Anzahl der Verwendung der entsprechend gekennzeichneten Stoffe in den Herstellungsschritten von PMMA. Die Prozentzahlen geben das Vorkommen zahlenmäßig an.

6.2.3 Auswirkung auf die Umwelt

Durch Chemieabfälle in der LED-Herstellung, aber vor allem durch die Energieversorgung, wird die Umwelt geschädigt [179]. Letztere beruht zum größten Teil auf fossilen Energieträgern oder Atomenergie.

Die bei der Produktion von PMMA eingesetzten Stoffe sind zu 20 % gewässergefährdend und zu 32 % umwelt- und/oder gesundheitsschädigend. Die Abfallprodukte der Herstellungsschritte sind ebenso schädlich. In dem stark belasteten Schmutzwasser finden sich Reste der synthetisierten bzw. gewonnenen Stoffe und Nebenprodukte (vgl. Referenzen aus Abbildung 6.1 und 6.2). Für die Produktion von 1 kg extrudierter PMMA-Platte werden mindestens 506 kg Wasser gebraucht [177]. Zum Vergleich: Ein Mensch in Deutschland verbraucht im alltäglichen Leben durchschnittlich etwa 180 kg pro Tag (Stand 2009) [214]. In Bezug auf das Treibhauspotential werden Stoffe äquivalent zu mindestens 4,38 kg Kohlenstoffdioxid emittiert [177]. Bei der mechanischen Bearbeitung von PMMA fällt zudem Abfall in Form von Mikroplastik an, welches ebenfalls eine Umweltbelastung darstellen kann [215].

6.3 Auswirkung der Rohstoffgewinnung für die Herstellung von mikrostrukturierten Flächenstrahlern

Aufbauend auf dem letzten Abschnitt werden hier die Rohstoffe für die Herstellung von PMMA und LEDs behandelt. Ihre Auswirkungen auf Mensch und Umwelt werden zusammengefasst und bewertet. Der Energieverbrauch der Gewinnung ist nur schwer abzuschätzen und wird nicht genauer betrachtet. Ausgeklammert wird auch die Rohstoffgewinnung für die Energieversorgung der Herstellung. Diese beruht weitestgehend auf nicht erneuerbaren Energien (vgl. Abschnitt 6.2.1).

Für die Produktion von LEDs werden seltene Erden, Gold und Silber benötigt, welche sich dadurch auszeichnen, dass sie nur durch hohe Umweltzerstörung und Gefährdung von Menschenleben gewonnen werden können [216]. Dies liegt auch darin begründet, dass zugunsten einer möglichst ökonomischen Gewinnung so wenig Sicherheitsvorkehrung wie möglich getroffen werden. Die genannten Rohstoffe werden im Bergbau aus Erzen gewonnen. In der Herstellung von PMMA (insbesondere des benötigten Katalysators) kommen an vielen Stellen ebenfalls Stoffe zum Einsatz die im Erz-Bergbau gewonnen werden (Pyrit, Nickel, Vanadium(V)-Oxid, Quecksilber, Zinn, Zink, Iridium, vgl. Abbildung 6.1 und 6.2). Vor allem aber basiert die industrielle PMMA-Produktion auf petrochemischen Prozessen. Wichtigster Rohstoff ist Erdöl. Im Folgenden werden daher die Auswirkungen des Erz-Bergbaus und der Petrochemie diskutiert.

6.3.1 Auswirkung auf den Menschen und die Gesellschaft

Die Gewinnung ausreichend hoch konzentrierter Rohstoffe aus Erz erfordert den Einsatz gesundheits- und umweltschädigender Stoffe. Diese belasten die dort arbeitenden Menschen und die in der Nähe befindliche Bevölkerung. Beim Betrieb der Minen entstehen radioaktive, mit Schwermetallen belastete Tailings (Abfallprodukt der Erzgewinnung), die in Staubecken – oft als Schlamm – gelagert werden [216]. Diese, durch Erddämme gebildeten, Staubecken brechen, sofern sie nicht gewissenhaft gebaut und gewartet werden. Der jüngste Dammbbruch ereignete sich am 25. Januar 2019 in Brumadinho, Brasilien (Stand August 2019). Für die Vernachlässigung der Sicherheitspflichten werden wirtschaftliche Gründe als wahrscheinlich angesehen [217]. Der Damm und die dazugehörige Mine wurde von der Vale S.A., Rio de Janeiro betrieben und dessen Stabilität von der TÜV Süd AG, München zertifiziert. Die beim Dammbbruch freigesetzte Lawine aus schädlichem Schlamm tötete mindestens 310 Menschen (ebd., Stand März 2019). Dieses Beispiel zeigt wie

Gefährlich der Abbau – und somit auch der Einsatz – von Rohstoffen aus Erzminen zurzeit ist.

Das Erdöl wird durch Bohrlöcher aus dem Inneren der Erde gefördert und anschließend raffiniert. Von der Erschließung über die Förderung bis zur Raffinerie von Erdöl sind die, auf den Ölfeldern und in den Raffinerien arbeitenden, Menschen gesundheitsschädigenden Stoffen ausgesetzt. Dies gilt ebenfalls für die angrenzende Bevölkerung [218]. Die Gesellschaft in ärmeren Regionen bzw. Staaten mit schwacher Wirtschaft wird von der Erdölindustrie negativ beeinflusst. Korruption, langsame Wirtschaftsentwicklung, geringer Fortschritt gegen Mangelernährung von Kindern und Analphabetismus bei Erwachsenen sind charakteristisch für Länder, die von der Erdölindustrie abhängig sind (ebd.).

Die Schadstoffe aus dem Erz-Bergbau und der Erdölförderung gelangen in den Nahrungskreislauf und schädigen auf diese Weise Menschen. Dies betrifft in besonderem Maße Menschen, die in der Nähe der beschriebenen neo-extraktivistischen Industrie Subsistenzwirtschaft betreiben (ebd.). Die Verletzung von Menschenrechten ist eine übliche Begleiterscheinung der Rohstoffgewinnung. Für den Abbau werden Menschen vertrieben und mit dem Tod bedroht (ebd., [219]).

Die petrochemische Industrie ist eng mit der neoliberalen Lebensweise verbunden. Es besteht eine enge Verbindung von der Vorstellung eines guten Lebens mit der Verwendung von Produkten die auf Erdöl basieren [220]. Dies beeinträchtigt strukturell die Erforschung und industrielle Nutzung von Alternativen zu Erdöl oder PMMA.

6.3.2 Auswirkung auf die Umwelt

Die Erz-Minen befinden sich oft an der Erdoberfläche und zerstören weite Teile der Landschaft. Die beim Bergbau anfallenden Tailings kontaminieren die umliegende Umwelt und schädigen sie bei unsachgemäßer Lagerung erheblich [216]. Bei dem, im letzten Abschnitt beschriebenen, Dambruch in Brumadinho wurden bis zu einer Entfernung von 100 km Häuser zerstört und das Ökosystem geschädigt [221].

Bei der Erdölförderung tritt kontrolliert Erdgas aus, welches ungenutzt abgelassen oder abgefackelt wird. Es trägt mit einer jährlichen Emission von ca. $1,955 \cdot 10^9$ t Kohlenstoffdioxid-Äquivalent (Stand 2013) merkbar zur globalen Erwärmung bei [222, 223]. Zum Vergleich: 2017 wurde für die Stromversorgung in Deutschland $313 \cdot 10^6$ t Kohlenstoffdioxid-Äquivalent freigesetzt [224]. Erdgas und Erdöl treten während der Förderung und Erschließung allerdings auch zusätzlich unkontrolliert aus. Zusammen mit den weiteren giftigen, radioaktiven und mit Schwermetallen belasteten Abfällen schädigen sie die Umwelt. Das belastete Abwasser wird als Teil des Förderprozesses in tiefe Erdschichten

gepumpt oder oberflächlich in der Umwelt entsorgt [218]. Letztendlich geht mit der Erschließung und Förderung einer Erdölquelle eine größere Umweltbelastung einher, als mit einer großen Ölpest. Es geschieht eine umfassende Veränderung der lokalen Umwelt: Entwaldung, Zerstörung des Ökosystems, chemische Kontamination von Land und Wasser und Langzeitschädigung der Tierpopulation (ebd.). Beim Transport des Erdöls und der raffinierten Produkte treten jährlich zahlreiche kleinere und 1 bis 3 große Unfälle mit einer folgenden Ölverschmutzung durch jeweils mindestens $45,5 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ Erdöl auf (ebd., Stand 2003).

6.4 Fazit

In der Anwendung weist der in die Fassade integrierte, mikrostrukturierte Flächenstrahler Vorteile gegenüber herkömmlicher Beleuchtung auf. Vor allem die möglichen Auswirkungen auf das Wohlbefinden der Menschen in den so beleuchteten Räumen und der Energieeinsparung in der Herstellung ist zu beachten. Ein Einsatz ist dennoch nur dann sinnvoll, wenn die in dieser Arbeit aufgezeigten Optimierungspotentiale genutzt werden, um den LOR der Flächenstrahler zu steigern. Darüber hinaus ist für einen verantwortungsvollen Einsatz von künstlicher Beleuchtung die Energiegewinnung für deren Betrieb auf erneuerbare Energieträger zu fokussieren.

Wie weitreichend die Anwendungsmöglichkeiten der mikrostrukturierten Flächenstrahler als Leuchte geographisch und gesellschaftlich sind, ist unklar. Um eine möglichst große Reichweite und damit einen möglichst großen Nutzen von Entwicklungen sicherzustellen, sollte die Forschung von den Bedürfnissen der Menschen durch alle sozialen Schichten in möglichst weiten Bereichen der Erde ausgehen [225].

Die Auswirkung in der Herstellung und Rohstoffgewinnung – insbesondere für PMMA – auf Mensch und Umwelt sind sehr schädlich. Ethische Maßstäbe, wie die Grundsätze des VDI (Priorisierung von Menschenrechten und öffentlichem Wohl), werden dort nicht beachtet. Eine Verwendung von PMMA in der Serienproduktion ist lediglich dann zu rechtfertigen, wenn die negativen Auswirkungen nicht größer als die konventioneller Leuchten sind. Diese bestehen aus Metall, und ebenfalls aus Kunststoffen. Durch die Integration des Flächenstrahlers in die Fassade können aufgewendete Energie und Rohstoffe in der Fertigung relativiert werden. Fassadenelemente werden unabhängig von der künstlichen Beleuchtung benötigt und hergestellt. Daher ist von einer ähnlichen sozioökologischen Auswirkung der Herstellung wie bei konventioneller Beleuchtung auszugehen. Gleichzeitig muss an verträglichen Alternativen für LEDs und PMMA geforscht werden. Ansonsten kann ein mikrostrukturierter Flächenstrahler als Leuchte höchstens besser, aber nie gut

sein. Anknüpfungspunkt kann hier das Forschungsgebiet der „Grünen Chemie“ sein, in dem solche Anstrengungen unternommen werden. Meier et al. [115] forscht beispielsweise an alternativen erneuerbaren Rohstoffen für PMMA.

Letztendlich können neue Technologien nur auf Grundlage vorhandener Materialien entwickelt werden. Sie müssen jedoch zukünftige Alternativen ermöglichen. Die präsentierten Systeme sind grundsätzlich weder auf die Lichtquelle noch das verwendete Material ausgelegt. Vielmehr kommt es auf ihre optischen und thermischen Eigenschaften, sowie ihre Verarbeitbarkeit an. Durch eine Reflexion des Einflusses von technischen Entwicklungen auf Mensch und Umwelt kann die Notwendigkeit der Forschung an verträglichen Technologien bewusst gemacht und damit deren Förderung unterstützt werden.

7 Fazit, Zusammenfassung und Ausblick

Mit dieser Arbeit wurde ein wichtiger Schritt in Richtung einer neuartigen Raumbeleuchtung getan. Architektur und Mikrostrukturtechnik wurden für die Schaffung einer fassadenintegrierten, künstlichen Beleuchtung erfolgreich verknüpft. Die entwickelten Systeme eröffnen neue, große Potentiale sowohl im Bereich der Energieeffizienz als auch der Verbesserung von Gebäuden hinsichtlich ihres Einflusses auf Menschen und Umwelt. Durchsichtige, mikrostrukturierte Flächenstrahler zur einseitigen Lichtauskopplung wurden theoretisch betrachtet und erfolgreich hergestellt. Sie wurden als Leuchte in eine Fassade integriert und in einem Testraum verbaut. Die umfassende Forschung von der theoretischen Erfassung über Design, Simulation und der Untersuchung verschiedener Herstellungsverfahren bis hin zur Fertigung von industriell gefertigten Muster und ihren Einsatz sowie ihre Nachhaltigkeit und Ökobilanz wird in diesem Kapitel zusammengefasst. Darauf aufbauend wird ein Ausblick auf Anknüpfungspunkte für Weiterentwicklungen und Anwendungen der vorliegenden Arbeit gegeben.

7.1 Zusammenfassung

Diese Arbeit zeigt ein neues Konzept für die Raumbeleuchtung auf, für das verschiedene, neuartige Flächenstrahler basierend auf mikrostrukturierten LGPs entwickelt und deren Funktion und Herstellbarkeit erfolgreich demonstriert wurden. Hierzu wurden zunächst die Einkopplung, Leitung und Auskopplung von Licht in und aus mikrostrukturierten LGPs untersucht und die physikalischen Vorgänge beschrieben. Zu diesem Zweck wurde ein mathematisches Modell entwickelt, das die Effizienz der Einkopplung des Lichts einer beliebigen, homogen leuchtenden Fläche in eine makroskopische LGP beschreibt. Besonderheiten in der Lichtauskopplung aus einer mikrostrukturierten Platte wurden über die Mischung von Moden an Oberflächenrauheiten unter Anwendung der Theorie gekoppelter Moden untersucht. Hierbei wurde die Theorie um die Anwendung auf Lichtleiter mit modenspezifischer Dämpfung erweitert. Für die Realisierung einer homogen

leuchtenden, mikrostrukturierten Fläche wurde eine optimierte Verteilung auskoppelnder Mikrostrukturen hergeleitet.

Es wurde ein allgemein anwendbares Schema zur Entwicklung von mikrostrukturierten optischen Systemen entworfen. Dieses unterteilt sich neben dem Entwurf und der Simulation in die drei Entwicklungsstadien Funktionsmuster, Prototyp und industriell gefertigtes Muster. Für jedes dieser Stadien wurden Herstellungsverfahren identifiziert und hinsichtlich ihrer Anwendung auf die Herstellung der mikrostrukturierten Flächenstrahler charakterisiert und verglichen. Beruhend auf Erkenntnissen aus der Herstellung mikrofluidischer Systeme wurde ein neues Herstellungsverfahren für die Herstellung von Flächenstrahlern mit hinterschnittenen Mikrostrukturen in PMMA zusammen mit dem INKA entwickelt. Die Flächenstrahler wurden von den Firmen *temicon* und *Jungbecker* mittels UV-Prägen im Rolle-zu-Platte-Verfahren und mittels Heißprägen industriell gefertigt.

Entlang des Entwicklungsschemas wurde zunächst ein mit Mikrozyklindern strukturierter, transparenter Flächenstrahler zur einseitigen Lichtauskopplung entwickelt, um so erstmalig ein fassadenintegriertes System zur Raumbelichtung zu realisieren. Die Mikrostrukturen weisen eine Höhe von $28\ \mu\text{m}$ und $1016\ \mu\text{m}$ auf und wurden mit in einer Größe von $60 \times 60\ \text{cm}^2$ und $80 \times 60\ \text{cm}^2$ industriell gefertigt. Zur Erfassung und Bewertung von Abstrahlcharakteristiken der Flächenstrahler wurden eine Simulationsumgebung und ein entsprechender Messaufbau konzipiert. Die subjektive Durchsicht wird mit Hilfe eines neuen Verfahrens bestimmt, das aufbauend auf Erkenntnissen aus der Photographie in dieser Arbeit entwickelt wurde. Es wurde in einem automatisierten Messaufbau erstmals auf Beleuchtungssysteme und Fassadenelemente angewendet. So konnte die Eignung der hergestellten Flächenstrahler als transparente Fassadenelemente verifiziert werden. Der UV-geprägte Flächenstrahler bietet stets eine gute subjektive Durchsicht, während für diese bei dem heißgeprägten Flächenstrahler ein größerer Abstand von der betrachtenden Person nötig ist. Der heißgeprägte Flächenstrahler kann ab einem Betrachtungsabstand von $35\ \text{cm}$ mit einer ausreichenden subjektiven Durchsicht in einer Fassade verwendet werden.

Die Entwicklung und Charakterisierung der Flächenstrahler reicht bis zur Integration in Fassadenelemente, durchgeführt von den Unternehmen *Durlum* und *Saint-Gobain*. Am FhG-IBPs wurden die Fassadenelemente in einen Testraum eingebaut und vermessen. Diese neuartige, fassadenintegrierte Leuchte zeichnet sich durch eine einseitige Lichtauskopplung zur indirekten Raumbelichtung über die Decke und einer guten Durchsicht aus. Sie kann Räume bis zu einer Raumtiefe von 2 Metern mit den für eine Hintergrundbeleuchtung notwendigen $300\ \text{lx}$ beleuchten. Zur Erweiterung auf größere Raumtiefen wurden zwei optimierte Systeme entworfen.

Das erste System dient zur horizontalen Lichtauskopplung, dessen Funktion und Herstellbarkeit durch einen am INKA gefertigten Prototypen positiv evaluiert wurde. Die Besonderheit an diesem System ist, dass es auf hinterschnittenen Mikrostrukturen basiert, die erstmals mit dem hier entwickelten Verfahren in PMMA hergestellt wurden. Dieses System bietet neben einer Anwendung als Leuchte großes Potential in der Hintergrundbeleuchtung von flachen Bildschirmen.

Zur Weiterentwicklung der fassadenintegrierten Flächenstrahler wurden gemeinsam mit dem FhG-IBP detaillierte Anforderungen für eine optimierte Leuchte zur fassadenintegrierten, indirekten und gleichzeitig tiefen Raumbelichtung formuliert. Darauf aufbauend wurde ein Flächenstrahler mit vasenförmigen, hinterschnittenen Mikrostrukturen entwickelt, der, Simulationen zufolge, eine solche Raumbelichtung mit den für eine aktive Tätigkeit geforderten 500 lx bis zu einer Raumtiefe von 2,8 Metern ermöglicht. Der Flächenstrahler ist für Räume bis zu einer Tiefe von 4,6 Metern als alleinige Lichtquelle für eine Hintergrundbeleuchtung von 300 lx ausreichend und stellt damit eine vollständige Alternative zu herkömmlichen Leuchten dar.

Abschließend wurden Nachhaltigkeit und Ökobilanz der entwickelten Flächenstrahler für den Einsatz in Fassaden diskutiert. Es wird festgestellt, dass die Entwicklung nach ethischen Maßstäben (unter anderem VDI und IEEE) eingesetzt werden kann und in Teilaspekten zu Verbesserungen für Mensch und Umwelt führt, aber sehr großes Verbesserungspotential in der Auswahl bzw. Entwicklung der Materialien besteht. In der Herstellung der mikrostrukturierten Flächenstrahler findet ebenso wie bisher bei allen elektrischen Beleuchtungslösungen eine Schädigung von Mensch und Umwelt statt. Für die Herstellung der Leuchten mit derzeit verwendeten Rohstoffen und Verfahren werden Menschen geschädigt sowie Flora und Fauna großflächig zerstört. Die globale Erwärmung wird durch eine sehr hohe Emission von Treibhausgasen erheblich unterstützt.

Im Rahmen des TaLed-Projekts wurden mit Erkenntnissen aus dieser Arbeit erstmals fassadenintegrierte Leuchten entwickelt, hergestellt und in einem Testraum verbaut. Die Schaffung eines Fensters, das neben der natürlichen Beleuchtung durch Sonnenlicht als künstliche Lichtquelle dient, eröffnet völlig neue Ansätze in der Raumbelichtung und -gestaltung sowie der Planung energieeffizienter Gebäude. Die Einführung der Messung der subjektiven Durchsicht bietet erstmals eine Methode, um die menschliche Wahrnehmung durch (semi-) transparente Fenster automatisiert abzuschätzen. Die erzielten Fortschritte im Verständnis und der Herstellung von mikrostrukturierten Flächenstrahlern stellen die Grundlage für die Serienproduktion und Weiterentwicklung solcher klein- und großformatiger Systeme dar, die nicht nur der Beleuchtung, sondern auch allen anderen Anwendungsbereichen von LGPs, wie der Bildschirmtechnik, neue Möglichkeiten eröffnen.

7.2 Ausblick

Der Anwendungsbereich der entwickelten Flächenstrahler in der Raumbelichtung ist groß. Von den bereits realisierten fassadenintegrierten Leuchten reicht er über Raumteiler bis zu Arbeitsplatzleuchten (vgl. Abbildung 7.1). Dabei bieten die hergestellten, fassadenintegrierten Muster noch Potential zur Verbesserung. Insbesondere mögliche Verbesserungen in der Lichtstärkeverteilung und Effizienz wurden bereits mit dem Design eines optimierten Flächenstrahlers Rechnung getragen. Diese in einen Prototypen umzusetzen ist nun anzustreben. Die dafür notwendigen Herstellungsverfahren wurden im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und können nun auf einen industriellen Maßstab zur Serienproduktion gehoben werden.

Insbesondere die Weiterentwicklung der Verbindungstechnik für hinterschnittene Mikrostrukturen in PMMA bietet in vielen Einsatzbereichen enormes Potential. So ist neben der Beleuchtungstechnik die Fertigung von LGPs mit hinterschnittenen Mikrostrukturen auch in der Display-Industrie (z.B. zur Reduzierung des komplexen Aufbaus der Hintergrundbeleuchtung in Flachbildschirmen) relevant.

Die gewonnenen Erkenntnisse über die Modenmischung in mikrostrukturierten LGPs bieten Anknüpfungspunkte zur Verbesserung ihrer Effizienz. Durch die Herstellung von Modenmischern auf LGPs könnte die Ausbreitung des Lichts im mikrostrukturierten Flächenstrahler und damit auch dessen Abstrahlcharakteristik gezielt beeinflusst werden.

Die Erfassung der vorgestellten, subjektiven Durchsicht kann zu einem neuen, standardisierten Verfahren im architektonischen Bereich weiterentwickelt und in Studien verifiziert werden. Es ist zudem sinnvoll diese Messung in Simulationswerkzeuge zu übertragen, um die subjektive Durchsicht bereits im Entwurfsprozess besser berücksichtigen zu können.

Fassadenintegrierte Leuchten sollten zukünftig in umfassende Konzepte zur energieeffizienten Beleuchtung eingebettet werden. Eine Kombination mit Systemen zur Tageslichtlenkung und mit einer automatischen Abstimmung von Lichtstärke sowie -temperatur ist ein sehr vielversprechendes Zukunftskonzept [6, 226, 227].

Basierend auf den Überlegungen über die Auswirkungen der fassadenintegrierten Flächenstrahler auf Mensch und Umwelt, ist eine intensive Forschung zu diesbezüglichen Auswirkungen notwendig, wie zum Beispiel die psychische und physische Auswirkung in der Nutzung auf Menschen oder die Erstellung einer umfassenden Lebenszyklus-Analyse. Ziel dieser interdisziplinären Aufgabe sollte es zudem sein, die Identifizierung und Entwicklung alternativer Materialien für LGP und Lichtquelle voranzutreiben und gleichzeitig bisherige Belastungen durch die Herstellungsverfahren einzudämmen. So stellt die vorliegende Arbeit den Ausgangspunkt für die Forschung an einem innovativen Beleuchtungskonzept

für Gebäude dar, das deren ökologische Verträglichkeit sowie die Gesundheit und das Wohlbefinden von Menschen erheblich steigern kann.

Im Zusammenspiel zwischen Mikrostrukturtechnik und Architektur bricht durch die entwickelten mikrostrukturierten Flächenstrahler eine neue Zeit für die künstliche Raumbeleuchtung an.

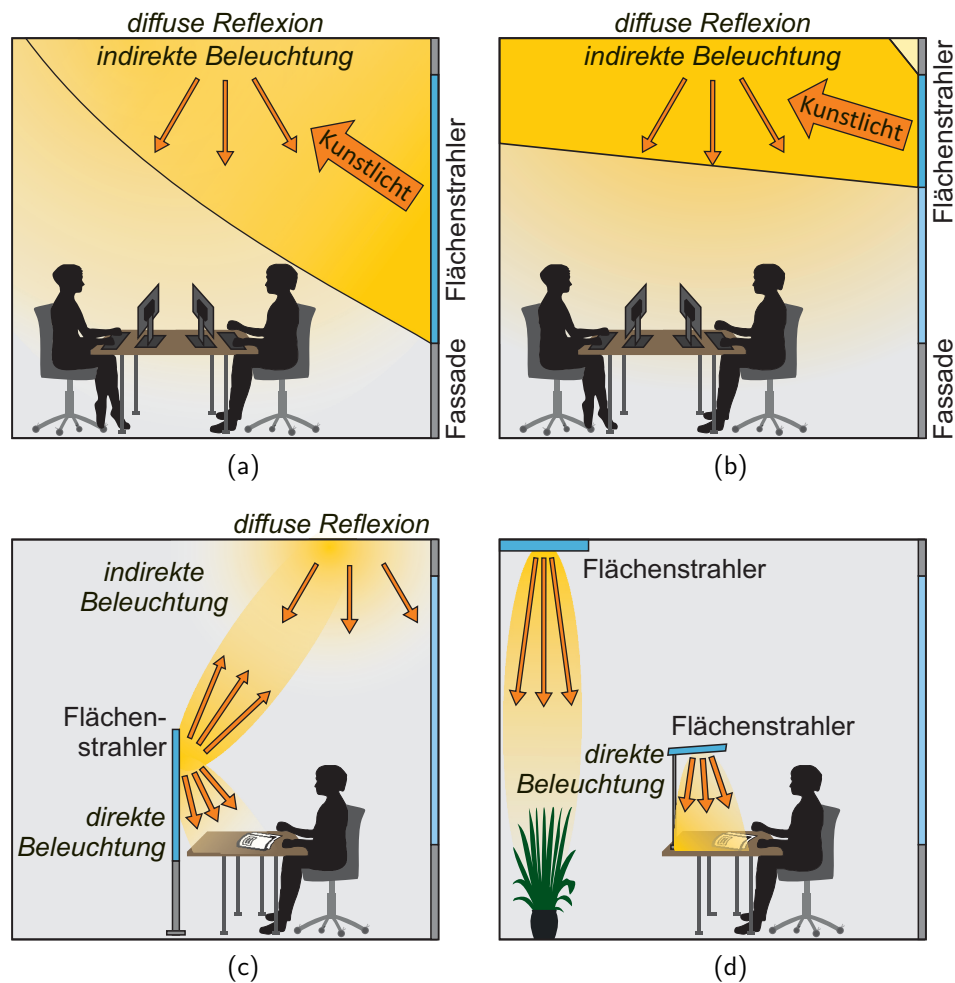


Abb. 7.1: Anwendungsmöglichkeiten mikrostrukturierter Flächenstrahler zur Raumbeleuchtung:

- (a) Indirekte Beleuchtung durch einen transparenten Flächenstrahler integriert in die komplette Fassade. Basierend auf [6].
- (b) Indirekte Beleuchtung durch einen Flächenstrahler integriert in den oberen Bereich einer Fassade. Basierend auf [6].
- (c) Transparente Standleuchte zur Direkt-Indirekt-Beleuchtung. Basierend auf [149].
- (d) Arbeitsplatz und Deckenleuchte zur direkten Beleuchtung.

A TaLed-Projekt

Energie- und kosteneffiziente, fassadenintegrierte Tageslicht- und LED-Beleuchtung mittels mikrooptischer Baukomponenten

„Das Projekt ist Teil des Förderbereichs EnOB – Forschung für Energieoptimiertes Bauen, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. [...]

Durch den Einsatz mikrostrukturierter optischer Komponenten für Tageslichtnutzung und elektrische Beleuchtung in Gebäudefassaden sollen Energieeffizienz, Lebenszyklusbilanz und die Aufenthaltsqualität im Gebäudebereich verbessert werden. Grundlage bilden zwei neuartige, miteinander funktional kombinierbare, kostengünstig zu fertigende mikrooptische Strukturen [...]. Ziel ist es eine Gebäudefassade zu entwickeln, in welcher beide Technologien kombiniert werden.

Zum einen handelt es sich um lichtumlenkende Strukturen, die beidseitig auf transparenten Trägerschichten aufgebracht sind und dafür optimiert sind, Tageslicht blendfrei tief in fassadenferne Gebäudebereiche umzulenken.

Zum anderen handelt es sich um lichtauskoppelnde Strukturen auf der Oberfläche transparenter Träger, die Licht von LEDs, das seitlich eingekoppelt wird, gezielt auf nur einer Seite abstrahlen. Das Element bleibt bei Draufsicht transparent und kann somit mit Glas oder der lichtumlenkenden Struktur zu Fassadenkomponenten kombiniert werden, die sowohl Tageslicht direkt durchlassen oder umlenken und zugleich, wenn raumseitig erforderlich, künstliches Licht hinzufügen. [...]“ [228]

Kooperationspartner*innen im Projekt sind:

- RIF Institut für Forschung und Transfer e.V., Dortmund: Entwicklung der mikrostrukturierten Flächenstrahler und Mikrostrukturen zur Tageslichtumlenkung sowie Vermessung und Bewertung hergestellter Muster.
- temicon GmbH, Dortmund: Herstellung von Mikrostrukturen im UV-Präge-Verfahren.
- Karl Jungbecker GmbH & Co. KG, Olpe: Herstellung von Mikrostrukturen im Heißpräge-Verfahren.

- Saint-Gobain Sekurit Deutschland GmbH & Co. KG, Herzogenrath: Herstellung von Glas und Fensterverbund.
- Green Building R&D GmbH, Düsseldorf: Architektonische Planung und Bewertung von Anwendungsszenarien.
- Durlum GmbH, Schopfheim: Integration der LEDs.
- Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart: Projektkoordination, Integration des Scheibenverbunds in eine Versuchsfassade, Proband*innen-Studien sowie photometrische Messungen im Labor und Versuchsraum.

B Radiometrische und photometrische Größen

Tab. B.1: Entsprechung von radiometrischen und photometrischen Größen und ihre Bezeichnung.

| radiometrisch | | | photometrisch | | |
|---------------|----------------------------------|--|---------------|---|---|
| Größe | Einheit | Bezeichnung | Größe | Einheit | Bezeichnung |
| ϕ_e | W | Strahlungsleistung | ϕ_v | lm | Lichtstrom |
| I | W sr^{-1} | Strahlungsintensität | I_v | $\text{cd} = \text{lm sr}^{-1}$ | Lichtstärke |
| E | W m^{-2} | Strahlungsstromdichte, Bestrahlungsstärke | E_v | $\text{lx} = \text{lm m}^{-2}$ | Lichtstromdichte, Beleuchtungsstärke |
| L | $\text{W sr}^{-1} \text{m}^{-2}$ | Strahldichte | L_v | cd m^{-2} $= \text{lm sr}^{-1} \text{m}^{-2}$ | Leuchtdichte |




Die photometrischen Größen leiten sich von den radiometrischen Größen durch Gewichtung mit der Hellempfindlichkeitskurve des menschlichen Auges ab.






C Definition der Beschichtungen für die Simulation von LEDs in Zemax OpticStudio

```
1 MATE ALUM2 .546 0.82 -5.99
2
3 COAT LED_LeadFrame ALUM2 0.04
4
5 IDEAL LED_Encapsulation 0 0.90
6
7 TABLE LED_Lightarea
8 ANGL 0.0
9 WAVE 0.470 0.34594 0.34594 0.2973 0.2973 0 0 0 0
10 WAVE 0.520 0.4054 0.4054 0.41622 0.41622 0 0 0 0
11 WAVE 0.625 0.43513 0.43513 0.43604 0.43604 0 0 0 0
```

D Gefahrenstoffkennzeichen

Die verwendeten Gefahrenstoffkennzeichen des global harmonisierten Systems zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien [229] sind verschiedenen Gefahrenbeschreibungen zugeordnet. Diese Beschreibungen sind wörtlich der EU-Chemikalienverordnung 1272/2008 [230] entnommen.

| | |
|---|--|
|  | Korrosiv gegenüber Metallen |
| | Ätzwirkung auf die Haut |
| | Schwere Augenschädigung |
|  | Gase unter Druck |
|  | Akute Toxizität (oral, dermal, inhalativ) |
| | Reizwirkung auf die Haut |
| | Augenreizung |
| | Sensibilisierung der Haut |
| | Spezifische Zielorgan-Toxizität (einmalige Exposition) |
| | Atemwegsreizung |
| | Narkotisierende Wirkungen |
| | Die Ozonschicht schädigend |

| | |
|---|--|
|  | Entzündbare Gase |
| | Aerosole |
| | Entzündbare Flüssigkeiten |
| | Entzündbare Feststoffe |
| | Selbstersetzliche Stoffe und Gemische |
| | Pyrophore Flüssigkeiten |
| | Pyrophore Feststoffe |
| | Selbsterhitzungsfähige Stoffe und Gemische |
| | Stoffe und Gemische, die in Berührung mit Wasser entzündbare Gase entwickeln |
| | Organische Peroxide |
|  | Gewässergefährdend |
|  | Oxidierende Gase |
| | Oxidierende Flüssigkeiten |
| | Oxidierende Feststoffe |
|  | Sensibilisierung der Atemwege |
| | Keimzellmutagenität |
| | Karzinogenität |
| | Reproduktionstoxizität |
| | Spezifische Zielorgan-Toxizität (einmalige Exposition) |
| | Spezifische Zielorgan-Toxizität (wiederholte Exposition) |
| Aspirationsgefahr | |
|  | Akute Toxizität (oral, dermal, inhalativ) |

Wissenschaftliche Veröffentlichungen im Rahmen der Promotion

Artikel in Zeitschriften

- M. Jakubowsky, C. Hubschneider, A. Neyer, Y. Fang, und J. de Boer, “Microstructured light guiding plate for single-sided light emission as light source for room illumination,” *Appl. Opt.*, vol. 58, no. 1, pp. 76–86, Jan. 2019.
- M. Jakubowsky, J. Werder, C. Rytka, P. M. Kristiansen, und A. Neyer, “Design, manufacturing and experimental validation of a bonded dual-component microstructured system for vertical light emission,” *Microsyst. Technol.*, vol. 26, no. 6, pp. 2087–2093, Jun. 2020.

Artikel in Konferenzbänden

- M. Jakubowsky, A. Neyer, und H. Müller, “Energy efficient room lighting by combined daylighting and LED lightguide elements integrated into building façades,” in *Proc. 11th ABS*, Bern, CH, 2016, pp. 850–854.
- C. Rytka, M. Jakubowsky, J. Werder, P. M. Kristiansen, und A. Neyer, “Replication of two-sided optical micro- and nanostructures with high accuracy,” in *Proc. PRN 2017*, Aachen, Mai, p. 21.
- M. Jakubowsky und A. Neyer, “Optimized design of daylight redirection microstructures combined with planar micro structured light sources for high efficient room lighting integrated in building façades,” *Energy Procedia*, vol. 122, pp. 157–162, Sep. 2017.
- M. Jakubowsky und A. Neyer, “Abformtechnik von polymeren Mikrostrukturen zur Tageslichtumlenkung,” in *Proc. VDI Wissensforum: 7. Fachkonferenz Kunststoffe in Optischen Systemen*, Berlin, Okt. 2017.

- M. Jakubowsky, A. Neyer, und H. Müller, "Microstructured façade elements for energy efficient office room illumination by sunlight combined with LED light," in Proc. 5th SASEC, Durban, ZA, 2018.
- M. Jakubowsky und A. Neyer, "Optimized optical microstructures for daylight redirection and efficient LED-based planar light guides," in Proc. 13th ABS, Bern, CH, 2018, pp. 852–858.
- M. Jakubowsky und J. de Boer, "TALED-Fassadenintegrierte Tageslicht- und LED-Beleuchtung mittels Mikrooptiken," in Proc. 2. Kongress Energiewendebauen, Berlin, 2019, pp. 52–53.

Berichte

- J. de Boer, L. Buchty, M. Bülters, M. Hof, C. Hubschneider, W. Jäger, M. Jakubowsky, M. Kraemer, H. Müller, M. Neander, und A. Neyer, "Energie- und kosteneffiziente, fassadenintegrierte Tageslicht- und LED-Beleuchtung mittels mikrooptischer Baukomponenten (Kurzname: TaLed) : Abschlussbericht : Laufzeit: 1. März 2016 - 28. Februar 2019," FhG-IBP, Stuttgart, Abschlussbericht, 2019.

Vorträge

- A. Neyer, S. Klammt, M. Jakubowsky, und H. Müller, "Energy efficient room illumination by the redirection of sunlight: New micro structured components," präsentiert auf der 3rd SASEC, Skukuza, ZA, Mai 2015, Vortrag.
- M. Jakubowsky, "Simulation mikrooptischer Systeme für eine effiziente Tageslichtnutzung," präsentiert auf dem 1. Dortmunder Tag der Simulationen, Jan. 2017, Vortrag.
- C. Rytka, M. Jakubowsky, J. Werder, P. M. Kristiansen, A. Neyer, und M. Rawert, "Replication of two-sided optical micro- and nanostructures with high accuracy," präsentiert auf der PRN 2017, Aachen, Mai, Vortrag.
- M. Jakubowsky und A. Neyer, "Abformtechniken von polymeren Mikrostrukturen zur Tageslichtumlenkung," präsentiert auf dem VDI Wissensforum: 7. Fachkonferenz Kunststoffe in Optischen Systemen, Berlin, Okt. 2017, eingeladener Vortrag.
- M. Jakubowsky und A. Neyer, "Optimized design of daylight redirection microstructures combined with planar micro structured light sources for high efficient room

lighting integrated in building façades,” präsentiert auf der CISBAT 2017, Lausanne, CH, Sep., Vortrag.

- M. Jakubowsky, A. Neyer, und H. Müller, “Microstructured façade elements for energy efficient office room illumination by sunlight combined with LED light,” präsentiert auf der 5th SASEC, Durban, ZA, Jul. 2018, Vortrag.
- M. Jakubowsky und A. Neyer, “Optical microstructures for daylight redirection and efficient LED-based planar light guides,” präsentiert auf der 13th ABS, Bern, CH, Okt. 2018, Vortrag.

Posterpräsentationen

- M. Jakubowsky und A. Neyer, “Flache, durchsichtige und selbstleuchtende mikrostrukturierte Elemente,” präsentiert auf der Jubiläumsfeier: 25 Jahre RIF Institut für Forschung und Transfer, Dortmund, Sep. 2015, Poster.
- M. Jakubowsky, S. Klammt, und A. Neyer, “Mikrostrukturierte Systeme zur Tageslichtlenkung,” präsentiert auf der Jubiläumsfeier: 25 Jahre RIF Institut für Forschung und Transfer, Dortmund, Sep. 2015, Poster.
- M. Jakubowsky, A. Neyer, und H. Müller, “Energy efficient room lighting by combined daylighting and LED lightguide elements integrated into building façades,” präsentiert auf der 11th ABS, Bern, CH, Okt. 2016, Poster.
- J. de Boer und M. Jakubowsky, “TALED-Fassadenintegrierte Tageslicht- und LED-Beleuchtung mittels Mikrooptiken,” präsentiert auf dem 2. Kongress Energiewendebauen, Berlin, Jan. 2019, Poster.

Literaturverzeichnis

- [1] IEA, Paris, FR, "Accelerating the transition to sustainable buildings," in *Energy Technology Perspectives 2017*, 2017, ch. 3, pp. 119–159.
- [2] —, "In the eye of the beholder: Human factors in lighting," in *Light's Labour's Lost: Policies for Energy-efficient Lighting*, 2006, ch. 2, pp. 67–98.
- [3] —, "Lighting, appliances and equipment," in *Energy Technology Perspectives 2017*, 2017, ch. 2, pp. 98–99.
- [4] R. Skowranek, "Grundlagen der Lichtplanung," in *Basics Lichtplanung*. Berlin; Boston, MA, USA: de Gruyter, 2017, pp. 11–18.
- [5] E. Plessen, "Diözesanmuseum Kolumba in Köln. Vom Fügen und Feilen," *deutsche bauzeitung*, no. 3, pp. 49–51, 2008.
- [6] M. Jakubowsky and A. Neyer, "Optimized design of daylight redirection microstructures combined with planar micro structured light sources for high efficient room lighting integrated in building façades," *Energy Procedia*, vol. 122, pp. 157–162, 2017.
- [7] K. J. Hathaway, R. M. Knox Jr., D. A. Arego, and G. R. Kornfuehrer, "Faceted light pipe," Patent US 000 005 050 946A, 1991.
- [8] Y. Kondo, "Technological trends of LED backlight units," in *LCD Backlights*, S. Kobayashi, S. Mikoshiba, and S. Lim, Eds. Chichester, UK: Wiley, 2009, ch. 15, pp. 195–205.
- [9] S. Aoyama, "Backlights for handheld data terminals," in *LCD Backlights*, S. Kobayashi, S. Mikoshiba, and S. Lim, Eds. Chichester, UK: Wiley, 2009, ch. 6, pp. 73–87.
- [10] H. F. O. Müller and F. Sasso, "Energy-efficient lighting by led," in *Renewable Energy in the Service of Mankind Vol I*, A. Sayigh, Ed. Basel, CH: Springer Int. Publishing, 2015, pp. 801–807.
- [11] C. K. Chung, K. L. Sher, Y. J. Syu, and C. C. Cheng, "Fabrication of cone-like microstructure using uv liga-like for light guide plate application," *Microsyst. Technol.*, vol. 16, no. 8-9, pp. 1619–1624, 8 2010.

- [12] B.-L. Huang and T.-L. Guo, "Integrated backlight module to provide a collimated and uniform planar light source," *Appl. Opt.*, vol. 55, pp. 7301–7313, 2016.
- [13] Y. C. Kim, "LGP pattern design with single LED light source," *Optik - Int. J. for Light and Electron Opt.*, vol. 125, no. 3, pp. 1341–1345, 2014.
- [14] S.-I. Ochiai, "Light guide plate for point source," Patent US 6,196,691 B1, 2001.
- [15] M. Jakubowsky, "Konfigurationen einer transparenten Platte zur gerichteten Lichtauskopplung," Studienarbeit, TU Dortmund, 2012.
- [16] —, "Herstellung und Charakterisierung transparenter, Licht emittierender Platten," Diplomarbeit, TU Dortmund, 2013.
- [17] B. H. Hong, "Notebook PC/monitor backlights," in *LCD Backlights*, A. C. Lowe, S. Kobayashi, S. Mikoshiba, and S. Lim, Eds. Chichester, UK: Wiley, 2009, ch. 5, pp. 61–71.
- [18] Y. Ishiwatari, "Light - guide plates," in *LCD Backlights*, S. Kobayashi, S. Mikoshiba, and S. Lim, Eds. Chichester, UK: Wiley, 2009, ch. 19, pp. 237–250.
- [19] P. Benoit and M. Gebauer, "Lichtleiterplatte mit trapez- oder rechteckförmigen Mikrostrukturen," Patent WO 00/60 278 A1, 2000.
- [20] K. Mori, "Lichtverteileranordnung zur gleichmäßigen Beleuchtung," Patent DE 3 240 942 C2, 1989.
- [21] H.-J. Fandrich, "Vorrichtung bestehend aus einer Lichtleiterplatte," Patent DE 37 36 804 C1, 1989.
- [22] S. Park, J. T. Lim, W.-Y. Jin, H. Lee, B.-H. Kwon, N. S. Cho, J.-H. Han, J.-W. Kang, S. Yoo, and J.-I. Lee, "Efficient large-area transparent OLEDs based on a laminated top electrode with an embedded auxiliary mesh," *ACS Photon.*, vol. 4, no. 5, pp. 1114–1122, 2017.
- [23] C.-C. Li, H.-Y. Tseng, H.-C. Liao, H.-M. Chen, T. Hsieh, S.-A. Lin, H.-C. Jau, Y.-C. Wu, Y.-L. Hsu, W.-H. Hsu, and T.-H. Lin, "Enhanced image quality of OLED transparent display by cholesteric liquid crystal back-panel," *Opt. Express*, vol. 25, no. 23, pp. 29 199–29 206, 2017.
- [24] M. Flämmich and N. Danz, "Optical characterisation of OLED emitters from radiation pattern analyses," in *Organic Light-Emitting Diodes (OLEDs)*, ser. Woodhead Publishing Ser. in Electron. and Opt. Mater., A. Buckley, Ed. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2013, ch. 11, pp. 319–359.
- [25] D.-Y. Kim, Y. C. Han, H. C. Kim, E. G. Jeong, and K. C. Choi, "Highly transparent and flexible organic light-emitting diodes with structure optimized for anode/ca-

- thode multilayer electrodes," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 25, no. 46, pp. 7145–7153, 2015.
- [26] Panasonic Marketing, Hamburg, *Transparenter OLED: Jetzt wird der Fernseher durchsichtig*, 2019, abgerufen: 26.09.2019. [Online]. Available: <https://www.experience.panasonic.de/tv-audio/transparenter-oled-tv-durch-und-durch-durchsichtig>
- [27] LG Electronics, Seoul, KR, "Datasheet 55ew5f-a," 2019, abgerufen: 26.09.2019. [Online]. Available: https://www.lg.com/global/business/download/resources/CT00000221/CT00000221_31352.pdf
- [28] M. Kuisseko and A. Sato, "Surface light emitter," Patent US 2011/0 019 426 A1, 1 27, 2011.
- [29] J.-H. Lee, H.-S. Lee, B.-K. Lee, W.-S. Choi, H.-Y. Choi, and J.-B. Yoon, "Simple liquid crystal display backlight unit comprising only a single-sheet micropatterned polydimethylsiloxane (pdms) light-guide plate," *Opt. Lett.*, vol. 32, no. 18, pp. 2665–2667, 2007.
- [30] J.-H. Lee, J. Yeon, K.-D. Kim, and J.-B. Yoon, "Mass-producible polydimethylsiloxane (PDMS) frontlight unit (flu) for reflective displays," *J. Disp. Technol.*, vol. 7, no. 9, pp. 526–531, 2011.
- [31] J. Yeon, J.-H. Lee, H.-S. Lee, H. Song, Y.-K. Mun, Y.-S. Choi, H.-Y. Choi, S. Lee, and J.-B. Yoon, "An effective light-extracting microstructure for a single-sheet backlight unit for liquid crystal display," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 22, no. 9, p. 095006, 2012.
- [32] X.-P. Yang, G.-F. Jin, Y.-B. Yan, D. Feng, H.-T. Liu, and Q.-F. Tan, "Light guide plate and a backlight system," Patent US 2007/0 041 701 A1, 2, 2007.
- [33] F.-C. Tengler, M. Jakubowsky, and A. Neyer, "High transparent light guiding plate for single-sided light emission," *Microelectron. Eng.*, vol. 119, pp. 174–177, 2014.
- [34] C. Rytka, P. M. Kristiansen, and A. Neyer, "Iso- and variothermal injection compression moulding of polymer micro- and nanostructures for optical and medical applications," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 25, no. 6, pp. 65 008–65 023, 2015.
- [35] R. Truckenmüller, P. Henzi, D. Herrmann, V. Saile, and W. Schomburg, "Bonding of polymer microstructures by uv irradiation and subsequent welding at low temperatures," *Microsyst. Technol.*, vol. 10, no. 5, pp. 372–374, 2004.
- [36] H. H. Tran, W. Wu, and N. Y. Lee, "Ethanol and UV-assisted instantaneous bonding of PMMA assemblies and tuning in bonding reversibility," *Sens. Actuators, B*, vol. 181, pp. 955–962, 2013.

- [37] A. Neyer and M. Jöhnck, "Verfahren zum fremdstofffreien Verbinden von zwei Werkstücken aus Kunststoff," Patent WO 01/21 384 A1, 2001.
- [38] K.-J. Tsai, "Light guide plate," Patent US 7,325,959 B2, 2008.
- [39] D. Feng, Y. Yang, X. Yang, G. Jin, and S. Fan, "Novel integrated light-guide plates for liquid crystal display backlight," *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, vol. 7, no. 3, pp. 111–117, 3 2005.
- [40] C.-Y. Fang, P.-Y. Chen, and K.-J. Huang, "Light-guide plate," Patent US 2006/0 198 598 A1, 2006.
- [41] Y. K. Park, J.-Y. Joo, C. Lee, and S.-K. Lee, "Design and fabrication of a light emitting diode-based diffuser sheet-less light guide plate for light applications," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 14, no. 6, pp. 1017–1022, 2013.
- [42] Y.-Y. Chang and W.-I. Yang, "Light guide plate," Patent US 2008/0 158 912 A1, 2008.
- [43] W. S. C. Chang, "Periodic structures and their application in integrated optics," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. MTT-21, no. 12, pp. 775–785, 1973.
- [44] S. T. Peng, T. Tamir, and H. L. Bertoni, "Theory of periodic dielectric waveguides," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 23, no. 1, pp. 123–133, 1975.
- [45] T. Suhara and H. Nishihara, "Integrated optics components and devices using periodic structures," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-22, no. 6, pp. 845–867, 1986.
- [46] Y. Ye and L. Chen, "Light guide plate based on sub-micron gratings," *Key Eng. Mater.*, vol. 364-366, pp. 1061–1065, 2008.
- [47] K. Schmidtke, "Anforderungen an Materialien in LED-Lichtquellen," präsentiert auf dem VDI Wissensforum: 7. Fachkonferenz Kunststoffe in Optischen Systemen, Berlin, 2017.
- [48] J.-L. Néron, "Fiber coupling efficiency calculation," 2005, application Note, Doric Lenses, Quebec, CA.
- [49] T. Q. Khanh, Q. T. Vinh, and H. Ganey, "Construction principles of LED luminaire units," in *LED Lighting*, T. Q. Khanh, P. Bodrogi, Q. T. Vinh, and H. Winkler, Eds. Weinheim: Wiley, 2015, ch. 8.2, pp. 445–451.
- [50] OSRAM Opto, Regensburg, "Datasheet TOPLED E3014," 2015.
- [51] Evonik, Darmstadt, "Technische Information: PLEXIGLAS® optical 0z024," 2011.
- [52] H. Gross, F. Blechinger, and B. Ahtner, "Human eye," in *Handbook of Optical Systems*. Weinheim: Wiley, 2015, vol. 4, ch. 36, pp. 1–87.

- [53] E. Hornbogen, G. Eggeler, and E. Werner, "Physikalische Eigenschaften," in *Werkstoffe*, 10th ed. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2012, ch. 6.
- [54] T. V. Vorburger, E. Marx, and T. R. Lettieri, "Regimes of surface roughness measurable with light scattering," *Appl. Opt.*, vol. 32, no. 19, pp. 3401–3408, 1993.
- [55] W. Menz and P. Bley, "Anwendungsbeispiele," in *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*, 1st ed. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 1993, ch. 7.7, pp. 241–259.
- [56] S. Kopetz, "Technologie optischer Lagen für elektrisch-optische Leiterplatten," Ph.D. dissertation, Universität Dortmund, 2007.
- [57] D. Marcuse, "The asymmetric slab waveguide," in *Theory of Dielectric Optical Waveguides*, 2nd ed. New York, NY, USA: Academic Press, 1991, ch. 1, pp. 1–59.
- [58] —, "Coupled mode theory," in *Theory of Dielectric Optical Waveguides*, 2nd ed. New York, NY, USA: Academic Press, 1991, ch. 3, pp. 97–133.
- [59] H. Kogelnik, "Theory of dielectric waveguides," in *Integrated Optics*, 2nd ed., T. Tamir, Ed. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1985, ch. 2, pp. 13–81.
- [60] —, "Theory of optical waveguides," in *Guided-Wave Optoelectronics*, 2nd ed., T. Tamir, Ed. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1990, ch. 2, pp. 7–88.
- [61] W. Karthe and R. Müller, "Ausgewählte Wellenleiter," in *Integrierte Optik*. Leipzig: Akad. Verl.-Ges. Geest & Portig, 1991, ch. 3, pp. 31–78.
- [62] D. Marcuse, "Applications of the coupled mode theory," in *Theory of Dielectric Optical Waveguides*, 2nd ed. New York, NY, USA: Academic Press, 1991, ch. 4, pp. 134–176.
- [63] A. Yariv and M. Nakamura, "Periodic structures for integrated optics," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 13, no. 4, pp. 233–253, 1977.
- [64] Y. Yamamoto, T. Kamiya, and H. Yanai, "Improved coupled mode analysis of corrugated waveguides and lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 14, no. 4, pp. 245–258, 1978.
- [65] —, "Improved coupled mode analysis of corrugated waveguides and lasers - II: TM mode," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 14, no. 8, pp. 620–624, 1978.
- [66] D. Marcuse, "Coupled power theory," in *Theory of Dielectric Optical Waveguides*, 1st ed. New York, NY, USA: Academic Press, 1974, ch. 5, pp. 173–246.
- [67] Wolfram Res., Champaign, IL, USA, "Wolfram|Alpha," Onlinedienst, 2018. [Online]. Available: www.wolframalpha.com

- [68] J.-W. Pan and Y.-W. Hu, "Light-guide plate using periodical and single-sized microstructures to create a uniform backlight system," *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 17, pp. 3726–3728, 2012.
- [69] OSRAM Opto, Regensburg, "Information for osram rayfile data topped e3014, white," 2014.
- [70] Y. C. Kim, "Optimize pattern design for the thin LGP," *Optik - Int. J. for Light and Electron Opt.*, vol. 124, no. 15, pp. 2171–2173, 2013.
- [71] S.-F. Lin, C.-Y. Su, Z.-Y. Feng, and X.-D. Li, "Microstructure density generation for backlight display using probability analysis method," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 50, no. 43, p. 435601, 2017.
- [72] M. wu Kang, K.-X. Guo, Z.-L. Liu, Z. hai Zhang, Bin-Chen, and R. zhen Wang, "Dot pattern designing on light guide plate of backlight module by the method of molecular potential energy," *J. Disp. Technol.*, vol. 6, no. 5, pp. 166–169, 2010.
- [73] S. W. Kim, H. G. Kim, S. E. Lee, H. Lee, and H. C. Lee, "Fabrication of film-type light guide plates by using uv nano-imprint lithography to enhance optical properties," *Nanosci. and Nanotechnol. Lett.*, vol. 8, no. 1, pp. 13–20, 2016.
- [74] Y. C. Kim, T.-S. Oh, and Y. M. Lee, "Optimized pattern design of light-guide plate (lgp)," *Optica Applicata*, vol. 41, no. 4, pp. 863–872, 2011.
- [75] B.-L. Huang, J. tang Lin, Y. Ye, S. Xu, E. guo Chen, and T.-L. Guo, "Pattern optimization of compound optical film for uniformity improvement in liquid-crystal displays," *Opt. Laser Technol.*, vol. 97, pp. 254–259, 2017.
- [76] Y.-C. Kim, S.-J. Ahn, S.-J. Ahn, T.-S. Oh, H.-S. Kim, and D.-W. Kim, "Output characteristics of a lgp for tft-lcd with pyramid shaped pattern," *J. of the Korea Academia-Ind. cooperation Soc.*, vol. 10, pp. 3080–3086, 2009.
- [77] J.-R. Yan, D.-C. Li, Z.-K. Wang, and W.-P. Rao, "An iterative method for the uniformity improvement of edge-lit backlight," *Adv. OptoElectron.*, vol. 2016, 2016.
- [78] V. Schumacher, "Beleuchtungstechnik," in *Photonik: Grundlagen, Technologie und Anwendung*, E. Hering and R. Martin, Eds. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2006, pp. 317–349.
- [79] A. Wagner and M. Gebauer, "Beleuchtung für einen transmissiv betriebenen flachen Bildschirm," WO Patent 01/61 239 A1, 2001.
- [80] H.-J. Bartsch, "Fehlerrechnung," in *Mathematische Formeln*, 11th ed. Köln: Buch- und Zeit-Verlagsgesellschaft, 1977, ch. 10.3, pp. 454–460.

- [81] J. Riegel, W. Mayer, Y. van Havre, and Development Community. (2019) FreeCAD. Software. [Online]. Available: <https://www.freecadweb.org>
- [82] OSRAM Opto, Regensburg. (2019) Optical simulation / ray files + package cad data. Abgerufen: 29.04.2019. [Online]. Available: <https://www.osram.com/os/applications/optical-simulation-ray-files-package-cad-data/index.jsp>
- [83] S. Goldbach and W. Peels, "Plastics in the LED supply chain," präsentiert auf der Microsystemes sur plastique, Oyonnax, FR, 2013.
- [84] Dow Corning, Midland, MI, USA, "Dow corning ms-2002 moldable white reflector silicone," 2013, product Information.
- [85] H. Kotani, T. Akimoto, T. Matsuno, and T. Hayashi, "New high heat resistant white molding compound for led," Hitachi Chemical, Tech. Rep. 57, 2015.
- [86] Y. Zhu, N. Narendran, and Y. Gu, "Investigation of the optical properties of YAG:Ce phosphor," in *Proc. Sixth Int. Conf. on Solid State Lighting*, I. T. Ferguson, N. Narendran, T. Taguchi, and I. E. Ashdown, Eds., vol. 6337. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2006.
- [87] Dow Corning, Midland, MI, USA, "Dow corning oe-6630 resin," 2013, product Information.
- [88] L. Halbo and P. Ohlckers, "Components for electronic systems," in *Electronic Components, Packaging and Production*. Oslo, NO: University of Oslo, 1995, ch. 4.
- [89] Zemax, Kirkland, WA, USA, "System explorer," in *OpticStudio 16.5 SP4 Help Files*. Kirkland: Zemax, 2017, pp. 67–151.
- [90] D. Hill, "What does "not enough segments allocated to trace all possible ray paths"mean?" *Zemax Knowledge Base*, 2015, abgerufen: 02.05.2019. [Online]. Available: <https://customers.zemax.com/os/resources/learn/knowledgebase/what-does-not-enough-segments-allocated-to-trace-a>
- [91] T. Benkert, K. Franke, A. Narayanankutty, D. Pozitron, and R. Standish. (2017) SciDAVis. Software. [Online]. Available: <http://scidavis.sourceforge.net>
- [92] Zemax, Kirkland, WA, USA, "Sequential ui mode," in *OpticStudio 16.5 SP4 Help Files*. Kirkland: Zemax, 2017, pp. 182–184.
- [93] W. Witting, "Licht Und Physik - Lichttechnische Grundlagen," in *Licht. Sehen. Gestalten*. Basel, CH: Birkhäuser Verlag, 2014, ch. 2, pp. 49–154.
- [94] R. Dohlus, "Messung und Bewertung von Strahlung," in *Lichtquellen*. Berlin; München; Boston, MA, USA: de Gruyter, 2015, ch. 2, pp. 51–81.

- [95] R. R. Shannon, "Image analysis," in *The Art and Science of Optical Design*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997, ch. 4, pp. 265–333.
- [96] T. Li, H. Feng, Z. Xu, X. Li, Z. Cen, and Q. Li, "Comparison of different analytical edge spread function models for MTF calculation using curve-fitting," in *Proc. MIPPR 2009: Remote Sensing and GIS Data Processing and Other Applications*, H. Maître, H. Sun, B. Lei, and J. Feng, Eds., vol. 7498. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2009, p. 74981H.
- [97] Imatest, Boulder, CO, USA, "Sharpness: What is it and how is it measured?" in *Imatest Documentation*. Imatest LLC, 2019, abgerufen: 09.05.2019. [Online]. Available: <http://www.imatest.com/docs/sharpness/>
- [98] IDS, Obersulm, "Datenblatt ui-3013xc-c," 2015.
- [99] E. M. Granger and K. N. Cupery, "An optical merit function (sqf), which correlates with subjective image judgments," *Photographic Sci. and Eng.*, vol. 16, no. 3, pp. 221–230, 5-6 1972.
- [100] Imatest, Boulder, CO, USA, "Acutance and sqf (subjective quality factor)," in *Imatest Documentation*. Imatest LLC, 2019, abgerufen: 10.05.2019. [Online]. Available: <http://www.imatest.com/docs/sqf/>
- [101] A. Neyer, "Vorlesungsskript: Mikrostrukturtechnik I," Universität Dortmund, 2005.
- [102] W. Menz and P. Bley, "Optische Lithographie," in *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*, 1st ed. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 1993, ch. 5.6, pp. 157–164.
- [103] W.-S. Chang, K.-K. Yoon, J. Kim, B. Shin, and K.-H. Whang, "Micro-optic fabrication using laser ablation process," in *High-Power Laser Ablation IV*, C. R. Phipps, Ed., vol. 4760. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2002, pp. 4760–4760–10.
- [104] C. Liberale, G. Cojoc, P. Candeloro, G. Das, F. Gentile, F. D. Angelis, and E. D. Fabrizio, "Micro-optics fabrication on top of optical fibers using two-photon lithography," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 22, no. 7, pp. 474–476, 2010.
- [105] N. Chidambaram, R. Kirchner, R. Fallica, L. Yu, M. Altana, and H. Schiff, "Selective surface smoothing of polymer microlenses by depth confined softening," *Adv. Mater. Technol.*, vol. 2, no. 5, p. 1700018, 2017.
- [106] W. Jiang, "Diamond turning microstructure optical components," in *4th Int. Symp. on Adv. Opt. Manuf. and Testing Technol.*, S. Han, M. Kameyama, and X. Luo, Eds., vol. 7284. SPIE, 2009, pp. 7284 – 7284 – 6.
- [107] M. Mukaida and J. Yan, "Tool-servo driven diamond turning for structured surface," in *Micro and Nano Fabrication Technology*, J. Yan, Ed. Singapur: Springer Nature, 2018, ch. 7, pp. 215–244.

- [108] S. Klammt, H. Müller, and A. Neyer, "Advanced daylighting by micro structured components," in *Proc. 2nd PLDC*, Berlin, 2009.
- [109] C. Rytka, M. Jakubowsky, J. Werder, P. M. Kristiansen, A. Neyer, and M. Rawert, "Replication of two-sided optical micro- and nanostructures with high accuracy," präsentiert auf der PRN 2017, Aachen.
- [110] T. Senn, J. P. Esquivel, M. Lörger, N. Sabaté, and B. Löchel, "Replica molding for multilevel micro-/nanostructure replication," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 20, no. 11, p. 115012, 2010.
- [111] D. Wu, Y.-B. Zhao, S.-Z. Wu, Y.-F. Liu, H. Zhang, S. Zhao, J. Feng, Q.-D. Chen, D.-G. Ma, and H.-B. Sun, "Simultaneous efficiency enhancement and self-cleaning effect of white organic light-emitting devices by flexible antireflective films," *Opt. Lett.*, vol. 36, no. 14, pp. 2635–2637, 2011.
- [112] OSRAM Opto, Regensburg, "Chemical compatibility of LEDs," 2018, application Note.
- [113] Cree, Durham, UK, "Cree xlamp LEDs chemical compatibility," 2018, support Document.
- [114] Vossloh-Schwabe, Lüdenscheid, "Chemical incompatibilities affecting LEDs," 2013, application Note.
- [115] M. A. R. Meier, J. O. Metzger, and U. S. Schubert, "Plant oil renewable resources as green alternatives in polymer science," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 36, pp. 1788–1802, 2007.
- [116] A. R. Prado, A. G. Leal-Junior, C. Marques, S. Leite, G. L. de Sena, L. C. Machado, A. Frizera, M. R. N. Ribeiro, and M. J. Pontes, "Polymethyl methacrylate (pmma) recycling for the production of optical fiber sensor systems," *Opt. Express*, vol. 25, no. 24, pp. 30 051–30 060, 2017.
- [117] K. Sale, "Downward pressure on europe pmma prices amid higher asian imports," *ICIS News*, 2019, abgerufen: 26.03.2019. [Online]. Available: <https://www.icis.com/explore/resources/news/2019/01/28/10311748/downward-pressure-on-europe-pmma-prices-amid-higher-asian-imports/>
- [118] K. Minami, "Optical plastics," in *Handbook of Plastic Optics*, 2nd ed., S. Bäumer, Ed. Weinheim: Wiley, 2011, ch. 5, pp. 123–160.
- [119] K. Albrecht and T. Goldacker, "Polymethylmethacrylat," in *Kunststoffe*, 1st ed., W. Keim, Ed. Weinheim: Wiley, 2006, ch. 4.6, pp. 173–180.
- [120] M. Pfeffer, "Optomechanics of plastic optical components," in *Handbook of Plastic Optics*. Weinheim: Wiley, 2011, ch. 2, pp. 7–34.

- [121] K. Albrecht, M. Stickler, and T. Rhein, "Polymethacrylates," in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim: Wiley, 2013.
- [122] W. Kaiser, "Ester-Thermoplaste," in *Kunststoffchemie für Ingenieure*, 3rd ed. München: Carl Hanser Verlag, 2011, ch. 7, pp. 323–355.
- [123] S. Klammt, "Mikrostrukturierte Systeme zur Tageslichtlenkung," Ph.D. dissertation, TU Dortmund, 2013.
- [124] W. Menz, J. Mohr, and O. Paul, "Variationen und ergänzende Schritte des LIGA-Verfahrens," in *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*, 3rd ed. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005, ch. 8.6, pp. 382–394.
- [125] M. E. Schlesinger, M. J. King, K. C. Sole, and W. G. Davenport, "Collection and processing of recycled copper," in *Extractive Metallurgy of Copper*, 5th ed., M. E. Schlesinger, M. J. King, K. C. Sole, and W. G. Davenport, Eds. Oxford, UK: Elsevier, 2011, ch. 18, pp. 373–387.
- [126] LT Ultra Precis. Technol., Herdwangen-Schönach, "Angebot 41670284," 2016, schriftliches Angebot.
- [127] J. Arnold, "private Kommunikation," Apr. 2019, LT Ultra-Precis. Technol., Herdwangen-Schönach.
- [128] Wacker, München, *RTV-2 SILICONKAUTSCHUKE VERARBEITEN.*, 2007.
- [129] M. Schirmer, C. Kaiser, and D. Perseke, "Schutzlack," in *Resist Wiki*. Strausberg: Allresist GmbH, 2015, ch. 2.4, pp. 47–49, abgerufen: 28.08.2019. [Online]. Available: https://www.allresist.de/wp-content/uploads/2015/07/allresist_resistwiki_druckversion.pdf
- [130] M. Jakubowsky and A. Neyer, "Flache, durchsichtige und selbstleuchtende mikrostrukturierte Elemente," präsentiert auf der Jubiläumsfeier: 25 Jahre RIF Institut für Forschung und Transfer, Dortmund, 2015, Poster.
- [131] J. Werder, "Herstellung von lichtlenkenden Mikrostrukturen im Spritzgussverfahren," bachelor thesis, FHNW Fachhochschule Nordwestschweiz, Brugg-Windisch, CH, 2017.
- [132] W. Michaeli, S. Heßner, F. Klaiber, and J. Forster, "Geometrical accuracy and optical performance of injection moulded and injection-compression moulded plastic parts," *CIRP Ann.*, vol. 56, no. 1, pp. 545–548, 2007.
- [133] C. Rytka, "Replication of functional polymeric micro- and nanostructures," Ph.D. dissertation, TU Dortmund, 2016.

- [134] P. Muanchan and H. Ito, "Replication of micro-/nanostructures," in *Micro and Nano Fabrication Technology*, J. Yan, Ed. Singapur: Springer, 2018, pp. 607–634.
- [135] S. Kalveram, "Abgeformte polymere Mikrostrukturen für die optische Informationstechnik," Ph.D. dissertation, Universität Dortmund, 2001.
- [136] M. Maluck, "Replikationstechniken zur Herstellung einmodiger integriert-optischer Komponenten aus neuartigen und kommerziellen Polymeren," Ph.D. dissertation, Universität Dortmund, 2007.
- [137] M. Hof, "private Kommunikation," Aug. 2016, Jungbecker, Olpe.
- [138] —, "private Kommunikation," Jun. 2019, Jungbecker, Olpe.
- [139] S. Franssila, "Polymer microprocessing," in *Introduction to Microfabrication*, 2nd ed. Chichester, UK: Wiley, 2010, ch. 18, pp. 203–223.
- [140] N. Kooy, K. Mohamed, L. T. Pin, and O. S. Guan, "A review of roll-to-roll nanoimprint lithography," *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 9, no. 1, p. 320, 2014.
- [141] polyscale GmbH & Co. KG, "Lichtlenkende Prismen auf Folien und Platten," *LICHT*, vol. 9, pp. 64–65, 2015.
- [142] M. Jakubowsky and A. Neyer, "Abformtechnik von polymeren Mikrostrukturen zur Tageslichtumlenkung," in *Proc. VDI Wissensforum: 7. Fachkonferenz Kunststoffe in Optischen Systemen*, Berlin, 2017.
- [143] M. Bülters, "private Kommunikation," Apr. 2019, temicon, Dortmund.
- [144] L. Xue, R. Xing, and Y. Han, "Facile one-step fabrication of an undercut structure by solution dewetting on a water/ice mold," *The J. of Physical Chemistry C*, vol. 114, no. 21, pp. 9845–9849, 2010.
- [145] M. Fleger, "Polymerbasierte Mikrofluidsysteme mit integrierten optischen Komponenten," Ph.D. dissertation, TU Dortmund, 2008.
- [146] K. Jud, H. H. Kausch, and J. G. Williams, "Fracture mechanics studies of crack healing and welding of polymers," *J. Mater. Sci.*, vol. 16, no. 1, pp. 204–210, 1981.
- [147] W. Kaiser, "Bindungskräfte in makromolekularen Systemen," in *Kunststoffchemie für Ingenieure*, 3rd ed. München: Carl Hanser Verlag, 2011, ch. 2.3, pp. 64–73.
- [148] M. Jakubowsky, J. Werder, C. Rytka, P. M. Kristiansen, and A. Neyer, "Design, manufacturing and experimental validation of a bonded dual-component microstructured system for vertical light emission," *Microsyst. Technol.*, vol. 26, no. 6, pp. 2087–2093, 2020.

- [149] M. Jakubowsky and J. de Boer, "TALED-Fassadenintegrierte Tageslicht- und LED-Beleuchtung mittels Mikrooptiken," in *Proc. 2. Kongress ENERGIEWENDEBAUEN*, Berlin, 2019, pp. 52–53.
- [150] M. Jakubowsky, C. Hubschneider, A. Neyer, Y. Fang, and J. de Boer, "Microstructured light guiding plate for single-sided light emission as light source for room illumination," *Appl. Opt.*, vol. 58, no. 1, pp. 76–86, 2019.
- [151] M. Jakubowsky, A. Neyer, and H. Müller, "Microstructured façade elements for energy efficient office room illumination by sunlight combined with LED light," in *Proc. 5th SASEC*, Durban, ZA, 2018.
- [152] J. de Boer, L. Buchty, M. Bülters, M. Hof, C. Hubschneider, W. Jäger, M. Jakubowsky, M. Kraemer, H. Müller, M. Neander, and A. Neyer, "Energie- und kosteneffiziente, fassadenintegrierte Tageslicht- und LED-Beleuchtung mittels mikrooptischer Baukomponenten (Kurzname: TaLed) : Abschlussbericht : Laufzeit: 1. März 2016 - 28. Februar 2019," FhG-IBP, Stuttgart, Abschlussbericht, 2019.
- [153] FhG-IBP, Stuttgart, "Stand der Forschungsarbeiten der einzelnen Verbundpartner: Fraunhofer-Institut für Bauphysik," in *6. Statusbericht: TaLed*, 2019, ch. 2.2.5, pp. 19–20, unveröffentlicht.
- [154] DIN, Berlin, "DIN EN 12464-1," 2011.
- [155] ISO and CIE, Geneva, CH, "ISO 8995-1:2002 (CIE S 008/E:2001): Lighting of work places - part 1: Indoor," 2002.
- [156] C. Rytka, "private Kommunikation," Jan. 2020, FHNW, Brugg, CH.
- [157] P. R. Boyce, "Light and health," in *Human Factors in Lighting*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014, ch. 14, pp. 521–548.
- [158] —, "Lighting and work," in *Human Factors in Lighting*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014, ch. 4, pp. 115–161.
- [159] M. Weber, *Politik als Beruf*, 2nd ed. München und Leipzig: Verlag von Duncker & Humblot, 1926.
- [160] K. Bayertz and B. Beck, "Der Begriff der Verantwortung in der Moderne: 19.-20. Jahrhundert," in *Handbuch Verantwortung*, L. Heidbrink, C. Langbehn, and J. Loh, Eds. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2017, pp. 133–147.
- [161] H. Jonas, "Neue Dimensionen der Verantwortung," in *Das Prinzip der Verantwortung*, 2nd ed. Frankfurt a.M.: Suhrkamp Verlag, 1992, ch. 1 III, pp. 26–30.
- [162] IEEE, New York, NY, USA, "IEEE code of ethics," 1963.

- [163] VDI, Düsseldorf, "Ethische Grundsätze des Ingenieurberufs," 2002.
- [164] H. Jonas, "Die Pflicht zur Zukunft," in *Das Prinzip der Verantwortung*, 2nd ed. Frankfurt a.M.: Suhrkamp Verlag, 1992, ch. 2 IV, pp. 84–95.
- [165] ———, "Kann der Marxismus oder der Kapitalismus der Gefahr besser begegnen?" in *Das Prinzip der Verantwortung*, 2nd ed. Frankfurt a.M.: Suhrkamp Verlag, 1992, ch. 5 III, pp. 256–270.
- [166] UN, New York, NY, USA, "Paris agreement," 2015.
- [167] IEA, Paris, FR, "These lovely lamps: Lighting technologies and design," in *Light's Labour's Lost: Policies for Energy-efficient Lighting*, 2006, ch. 3, pp. 99–166.
- [168] OSRAM Opto, Regensburg, "Datenblatt duris e 3," 2016.
- [169] A. J. K. Phillips, P. Vidafar, A. C. Burns, E. M. McGlashan, C. Anderson, S. M. W. Rajaratnam, S. W. Lockley, and S. W. Cain, "High sensitivity and interindividual variability in the response of the human circadian system to evening light," *Proc. of the Nat. Acad. of Sci.*, vol. 116, no. 24, pp. 12 019–12 024, 2019.
- [170] LiTG, Berlin, "Hamburger Aufruf zur Zukunft Licht – Positionen für das Licht der Zukunft – Impulse der Großen Zukunftskonferenz Licht (ZK19)," 2019.
- [171] R. Wile, "Scientists say this simple little office hack will increase your productivity," *Money*, 2017, abgerufen am 12.06.2019. [Online]. Available: <http://money.com/money/4722772/office-lighting-productivity-red-blue-lights/>
- [172] E. Ayshford, "How a room's lighting shapes our decisions," *Kellogg Insight*, 2018, abgerufen: 12.06.2019. [Online]. Available: <https://insight.kellogg.northwestern.edu/article/how-lighting-affects-choices>
- [173] T. Longcore and C. Rich, "Ecological light pollution," *Front. Ecol. Environ.*, vol. 2, no. 4, pp. 191–198, 2004.
- [174] S. Carr-Wilson, E. Drachenberg, G. Freeman, R. Jain, R. Kotze, M. Lekan, S. Mehta, D. Moreno, D. Mihailova, B. Noll, Sandeep, S. S. Nandamuri, M. Tsagkari, and R. V. Tzeng, *Circle of Light. The impact of the LED Lifecycle*. Lund, SE: IIIIEE, 2016.
- [175] M. J. Scholand and H. E. Dillon, "Life-cycle assessment of energy and environmental impacts of LED lighting products, part 2: LED manufacturing and performance," PNNL, Richland, WA, USA, Res. Report, 2012.
- [176] PlasticsEurope AISBL, Bruxelles, BE, "Eco-profile dataset for poly methyl methacrylate (pmma)," 2015, abgerufen: 19.06.2019. [Online]. Available: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/eco-profiles>

- [177] Cefic, Bruxelles, BE, "Poly methyl methacrylate (pmma) – eco-profiles and environmental product declarations of the european plastics manufacturers," 2015.
- [178] L. Tähkämö, M. Bazzana, G. Zisis, M. Puolakka, and L. Halonen, "Life cycle assessment of a fluorescent lamp luminaire used in industry – a case study," *Lighting Res. & Technol.*, vol. 46, no. 4, pp. 453–464, 2014.
- [179] R. Jain, R. Kotze, and S. Mehta, "Manufacturing of LEDs: A take on the technology and its impacts," in *Circle of Light. The impact of the LED Lifecycle*. Lund, SE: IIIIEE, 2016, pp. 21–27.
- [180] P. C. Wieland, B. Raether, and O. Nuyken, "A new additive for controlled radical polymerization," *Macromol. Rapid Commun.*, vol. 22, no. 9, pp. 700–703, 2001.
- [181] R. Ciriminna and M. Pagliaro, "Industrial oxidations with organocatalyst tempo and its derivatives," *Organic Process Res. & Develop.*, vol. 14, no. 1, pp. 245–251, 2010.
- [182] IFA, Sankt Augustin, "GESTIS-Stoffdatenbank – Gefahrstoffinformationssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung," 2019, abgerufen: 18.06.2019. [Online]. Available: <https://www.dguv.de/ifa/gestis/gestis-stoffdatenbank>
- [183] Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA, "Tempo," 2012, Sicherheitsdatenblatt.
- [184] —, "2,2,6,6-tetramethyl-piperidin," 2015, Sicherheitsdatenblatt.
- [185] —, "Natrium-quecksilber-legierung," 2016, Sicherheitsdatenblatt.
- [186] —, "2-methyl-anthrachinon," 2018, Sicherheitsdatenblatt.
- [187] G. A. Olah, "Beyond oil and gas: The methanol economy," *Angew. Chem. Int. Ed.*, vol. 44, no. 18, pp. 2636–2639, 2005.
- [188] F. Asinger, "Herstellung von Synthesegas," in *Methanol – Chemie- und Energierohstoff: Die Mobilisation der Kohle*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1986, ch. 2, pp. 10–56.
- [189] J. Liu and J. Yu, "Toward greener and designed synthesis of zeolite materials," in *Zeolites and Zeolite-Like Materials*, B. F. Sels and L. M. Kustov, Eds. Amsterdam, NL: Elsevier, 2016, ch. 1, pp. 1–32.
- [190] P. Froehlich, "A sustainable approach to the supply of nitrogen," Parker Hannifin Corporation, Haverhill, MA, USA, 2013, abgerufen: 13.06.2019. [Online]. Available: <https://www.parker.com/literature/Balston%20Filter/IND/IND%20Technical%20Articles/PDFs/Sustainable%20Approach%20to%20N2%20Supply.pdf>

- [191] C. T. Wang and A. Sutulov, "Vanadium processing," in *Encyclopædia Britannica*. Chicago, IL, USA: Encyclopædia Britannica, 2016, abgerufen: 13.06.2019. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/technology/vanadium-processing>
- [192] K. Weissermel and H. Arpe, "Propene conversion products," in *Industrial Organic Chemistry*, 4th ed. Weinheim: Wiley, 2008, ch. 11, pp. 267–312.
- [193] —, "Benzene derivatives," in *Industrial Organic Chemistry*, 4th ed. Weinheim: Wiley, 2008, ch. 13, pp. 337–385.
- [194] D. Netzer and O. J. Ghalayini, "Improve benzene production from refinery sources." *Hydrocarbon Process.*, vol. 81, no. 4, pp. 71–78, 2002.
- [195] W. Posch, "Polyolefins," in *Applied Plastics Engineering Handbook*, ser. Plastics Design Library, M. Kutz, Ed. Norwich, NY, USA: William Andrew Publishing, 2011, ch. 3, pp. 23–48.
- [196] J. M. Pirie, "The manufacture of hydrocyanic acid by the andrussow process," *Platinum Metals Rev.*, vol. 2, pp. 7–11, 1958.
- [197] J. M. Modak, "Haber process for ammonia synthesis," *Resonance*, vol. 7, no. 9, pp. 69–77, 2002.
- [198] T. Hamacher, "Wasserstoff als strategischer Sekundärenergieträger," in *Wasserstoff und Brennstoffzelle: Technologien und Marktperspektiven*, J. Töpler and J. Lehmann, Eds. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2014, ch. 1, pp. 1–23.
- [199] H. Wiesenberger and J. Kircher, "Stand der Technik in der Schwefelsäureerzeugung im Hinblick auf die IPPC-Richtlinie," Umweltbundesamt Österreich, Wien, AT, Tech. Rep. M-137, 2001.
- [200] T. Heurich, "Untersuchungen zur Chemie transienter Phosphanoxyilverbindungen," Ph.D. dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2017.
- [201] D. Kampmann, G. Stuhlmüller, R. Simon, F. Cottet, F. Leroux, and M. Schlosser, "A large-scale low-cost access to the lithium 2,2,6,6-tetramethylpiperidide precursor," *Synthesis*, no. 6, pp. 1028–1029, 2005.
- [202] G. Sosnovsky and M. Konieczny, "Preparation of triacetoneamine, I," *Zeitschrift für Naturforschung B*, vol. 32, pp. 328–337, 1977.
- [203] R. Kemp and S. E. Keegan, "Calcium Chloride," in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim: Wiley, 2000, vol. 6, pp. 511–518.
- [204] G. Brauer, "Legierungen und intermetallische Verbindungen," in *Handbuch der Präparativen Anorganischen Chemie - Band 3*. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1981, ch. 4.

- [205] H.-J. Riedl and G. Pfeleiderer, "Production of hydrogen peroxide," Patent US 2,158,525, 1939.
- [206] H.-S. Bien, J. Stawitz, and K. Wunderlich, "Anthraquinone Dyes and Intermediates," in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim: Wiley, 2000, vol. 3, pp. 513–578.
- [207] P. M. Lorz, F. K. Towae, W. Enke, R. Jäckh, N. Bhargava, and W. Hillesheim, "Phthalic Acid and Derivatives," in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim: Wiley, 2007, vol. 27, pp. 131–180.
- [208] J. Fabri, U. Graeser, and T. A. Simo, "Xylenes," in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim: Wiley, 2000, vol. 39, pp. 643–663.
- [209] ———, "Toluene," in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim: Wiley, 2011, vol. 37, pp. 109–118.
- [210] K.-M. Roy, "Sulfones and Sulfoxides," in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim: Wiley, 2000, vol. 34, pp. 705–720.
- [211] C. Le Berre, P. Serp, P. Kalck, and G. P. Torrence, "Acetic acid," in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim: Wiley, 2014, pp. 1–34.
- [212] M. T. Musser, "Cyclohexanol and Cyclohexanone," in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim: Wiley, 2011, vol. 11, pp. 49–60.
- [213] W. C. Drinkard jun., "Verfahren zur Umwandlung einer monocyclischen aromatischen Verbindung in ein cyclisches Monoolefin mittels partieller Hydrierung," Patent DE2 221 137C2, 1995.
- [214] A. Sonnenberg, A. Chapagain, M. Geiger, and D. August, "Der Wasser-Fußabdruck Deutschlands," WWF Deutschland, Frankfurt a.M., Report, 2009.
- [215] S. Oberbeckmann, B. Kreikemeyer, and M. Labrenz, "Environmental factors support the formation of specific bacterial assemblages on microplastics," *Front. Microbiol.*, vol. 8, p. 2709, 2018.
- [216] E. Drachenberg, D. Mihailova, and S. S. Nandamuri, "Digging for truth," in *Circle of Light. The impact of the LED Lifecycle*. Lund, SE: IIIIEE, 2016, pp. 12–20.
- [217] M. Mansur and C. Russau, "Wenn die Stille kommt," *Lateinamerika Nachrichten*, no. 537, 2019.
- [218] D. O'Rourke and S. Connolly, "Just oil? the distribution of environmental and social impacts of oil production and consumption." *Annu. Rev. of Environ. & Resour.*, vol. 28, no. 1, pp. 587–617, 2003.

- [219] P. Sibaud, "Opening pandora's box: The new wave of land grabbing by the extractive industries and the devastating impact on earth," The Gaia Foundation, London, UK, 2012.
- [220] M. Huber, "Refined politics: Petroleum products, neoliberalism, and the ecology of entrepreneurial life," *J. of Amer. Stud.*, vol. 46, no. 2, pp. 295–312, 2012.
- [221] M. P. de Faria, "Mariana and brumadinho: repercussion of mining disasters on environmental health," *Revista Brasileira de Medicina do Trabalho*, vol. 17, no. s1, pp. 16–17, 2019.
- [222] P. Schulz and V. Leckebusch, "Nutzen statt Abfackeln von Erdölbegleitgas," 2013, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- [223] Global Methane Initiative, "U.s. government gmi accomplishments: 2011 annual report," Washington D.C., USA, 2011.
- [224] M. Dreher, "Übersicht zur Entwicklung der energiebedingten Emissionen und Brennstoffeinsätze in Deutschland 1990 - 2017," Deutsches Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Tech. Rep. CLIMATE CHANGE 00/2019, 2019.
- [225] L. Rüger, "Soziale Innovationen gut managen," *mundo*, vol. 22, pp. 29–33, 2015.
- [226] M. Jakubowsky, A. Neyer, and H. Müller, "Energy efficient room lighting by combined daylighting and LED lightguide elements integrated into building façades," in *Proc. 11th ABS*. Bern, CH: Advanced Building Skins GmbH, 2016, pp. 850–854.
- [227] A. Motamed, "Integrated daylighting and artificial lighting control based on high dynamic range vision sensors," Ph.D. dissertation, EPFL, Lausanne, CH, 2017.
- [228] A. Neyer and M. Jakubowsky, "TALED," in *RIF Jahresbericht 2014*. Dortmund: RIF, p. 13.
- [229] UNECE Inf. Service, Genf, CH, "GHS pictograms," 2019, abgerufen: 18.06.2019. [Online]. Available: <http://www.unece.org/trans/danger/publi/ghs/pictograms.html>
- [230] EK, Bruxelles, BE, "Verordnung (EG) nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates," 2008.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Skizzierter Grundriss der überbauten St. Kolumba Kapelle in Köln. Basierend auf [5]. Das Fenster der Kapelle hat keinen Zugang zu Tageslicht und wird durch auf dem Boden stehende Strahler beleuchtet. | 8 |
| 1.2 | Indirekte Beleuchtung durch einen transparenten Flächenstrahler integriert in die Gebäudefassade. Basierend auf [6]. | 9 |
| 1.3 | (a) Funktionsprinzip einer lichtleitenden Platte. Das Licht der LED wird an einer Stirnseite in die LGP eingekoppelt und durch Totalreflexion geführt. (b) Typischer Aufbau einer Hintergrundbeleuchtung in der Anzeigentechnologie mit einer LGP. Basierend auf [9]. | 10 |
| 1.4 | Prinzip des transparenten Flächenstrahlers bestehend aus LED und mikrostrukturierter LGP. Das eingekoppelte Licht der LED (orange) wird an Mikrozylindern ausgekoppelt. Dadurch, dass die Deckelfläche der Zylinder parallel zur LGP-Oberfläche liegt (rot) und die Strukturflanken senkrecht auf dieser Oberfläche stehen (violett) ist trotzdem eine ungestörte Durchsicht möglich (gelb). | 11 |
| 2.1 | Das LED-Licht wird an einer Stirnseite (hier links) in die LGP eingekoppelt. Dort wird es durch Totalreflexion an den Grenzflächen in der LGP geführt. Eingezeichnet ist der Grenzwinkel der Totalreflexion θ_c | 16 |
| 2.2 | Möglichkeiten der gezielten Lichtauskopplung aus lichtleitenden Platten: (a) Auskopplung durch Streuung an reflektierendem Material. (b) Auskopplung an Strukturen auf der Seite der gewünschten Auskopplung. (c) Umlenkung an Strukturen zur Auskopplung auf der Gegenseite. (d) Umlenkung und Auskopplung durch Strukturen auf beiden Seiten. . . | 17 |
| 2.3 | Anordnung der LED zur Lichteinkopplung vor der Stirnseite einer LGP. . | 18 |
| 2.4 | Punktlichtquelle vor einer LGP mit Winkeln zur Beschreibung des Lichtstrahls (a), Parameter zur Beschreibung der Position des Punktes (b) und den Grenzwinkeln des Winkelbereichs, der auf die LGP trifft (c), angelehnt an [16]. | 19 |

| | | |
|------|--|----|
| 2.5 | Winkelbereich des Lichts, das ausgehend von einer Punktlichtquelle auf die LGP trifft (orange), dargestellt in zwei Dimensionen. Ein Teil des Lichts strahlt an der LGP vorbei (gelb). | 20 |
| 2.6 | Der Akzeptanzwinkel θ_{\max} leitet sich vom Winkel der Totalreflexion θ_c ab. Er bestimmt unter welchen Winkeln Licht in der LGP geführt wird (orange) oder wieder auskoppelt (gelb). | 21 |
| 2.7 | Position der leuchtenden Fläche der LED (gelb) vor der Stirnseite der LGP (blau). | 23 |
| 2.8 | Normierte LVK eines Lambert-Strahlers. | 23 |
| 2.9 | Das Licht vor der LGP aus PMMA (a) wird bei der Einkopplung winkelabhängig reflektiert und durch Brechung wird dessen Ausbreitungswinkel geändert (b). Das Winkelspektrum wird gestaucht und damit die Strahlungsleistung auf einen kleineren Winkelbereich verteilt. Die Zacken in (b) beruhen auf Ungenauigkeiten durch Rundung in der numerischen Berechnung der Kurve. | 25 |
| 2.10 | Ideale lichtleitende Platte im Querschnitt. Das Licht wird von links eingekoppelt und ungestört unter dem Ausbreitungswinkel ϑ in der LGP geleitet bis es auskoppelt. | 25 |
| 2.11 | Absorption (schwarz) und Transmission (rot) in einer 8 mm dicken Probe des PMMA PLEXIGLAS Optical 0Z024. Der Bereich des sichtbaren Lichts (380 nm bis 750 nm) ist durch gestrichelte Linien gekennzeichnet. | 26 |
| 2.12 | An der rauen Oberfläche einer LGP können Lichtstrahlen ausgekoppelt werden (gestrichelt) oder so reflektiert werden, dass sie auf der gegenüberliegenden Seite auskoppeln (durchgezogen). | 27 |
| 2.13 | Dargestellt ist die relative Strahlungsintensität (orange) in einer LGP aus PMMA mit Mikrozyklindern aufgetragen über den Ausbreitungswinkel ϑ_x direkt nach der Einkopplung (0 mm) und nach einer Strecke von 100 mm. | 28 |
| 2.14 | Das Winkelspektrum (dargestellt als relative LVK in rot) des Lichts einer LED in der LGP (I) verkleinert sich durch die Auskopplung an Mikrostrukturen (II). Das Spektrum wird durch die Änderung der Ausbreitungswinkel an der rauen Oberfläche teilweise wieder aufgeweitet (III). Die LVK in Bereich III stellt lediglich eine Prinzipskizze dar. | 29 |
| 2.15 | Eine in x-Richtung stehende Welle mit der Ausbreitungsrichtung in z-Richtung in einer LGP zu drei verschiedenen Zeitpunkten t_{1-3} | 30 |
| 2.16 | Einseitige Sinusstörung der LGP. Basierend auf [62]. | 31 |
| 2.17 | Strahlenoptische Darstellung der Kopplung zweier Moden (schwarz und rot) an einer Sinusstörung. | 32 |

| | | |
|------|--|----|
| 2.18 | Parameter des gewellten Wellenleiters und der beiden Moden μ und ν , für die die Modenkopplung berechnet wird. | 34 |
| 2.19 | Leistung der gekoppelten, ungedämpften Moden μ und ν in einer LGP. Angeregt wird nur die Mode μ . Die Leistung wird durch die Sinusstörung zwischen den Moden periodisch hin und her übertragen. | 34 |
| 2.20 | Leistung der gekoppelten Moden μ (gedämpft durch Modenkopplung, schwarz) und ν (gedämpft durch Auskopplung, rot gestrichelt) in einer LGP. Angeregt wird nur die Mode μ . Die Leistung wird durch die Sinusstörung zwischen den Moden periodisch hin und her übertragen. Sie nimmt aber, auf Grund der Auskopplung aus der Mode ν (grün), in beiden Moden ab. Zum Vergleich ist die Leistung der gekoppelten Moden μ und ν im vollständig ungedämpften System schwarz gepunktet bzw. rot strich-gepunktet für den Anfang der LGP eingezeichnet. Die Entsprechung der Moden in der strahlenoptischen Betrachtung ist skizzenhaft dargestellt und mit den Leistungskurven verbunden. | 36 |
| 2.21 | Messaufbau zur Erfassung der ausgekoppelten Strahlungsleistung über die Länge einer LGP. Der Sensor misst durch eine Blende die ausgekoppelte Leistung. | 37 |
| 2.22 | Simulation (ohne Modenkopplung durch Rauheiten, grün) und Messung (schwarz-weiße Rauten) der ausgekoppelten Strahlungsleistung auf der strukturierten Seite einer LGP aus PDMS. Die Näherung der Daten verdeutlicht die stärkere Abnahme der simulierten Leistung (blau gepunktet) im Vergleich zur Messung (rot gestrichelt). | 37 |
| 2.23 | Der Lichtstrom in einer LGP wird an jeder Mikrostruktur mit dem Auskoppelfaktor η_a teilweise ausgekoppelt. Der Lichtstrom nimmt dadurch mit der Anzahl der passierten Mikrostrukturen ab. | 39 |
| 2.24 | Projektion der auskoppelnden Fläche einer Mikrostruktur in den LGP-Querschnitt in der x-y-Ebene. Die auskoppelnde Fläche und der Lichtstrom, der auf sie trifft, sind vom Ausbreitungswinkel der Lichtstrahlen abhängig. | 39 |

| | | |
|------|---|----|
| 2.25 | Darstellung des Winkelspektrums des Lichts in der LGP aus PMMA zusammen mit dem größtmöglichen Ausbreitungswinkel ϑ_c (a) und des ausgekoppelten Lichts (b) nach verschieden langem Weg durch die LGP. In der Darstellung der Winkelspektren als relative LVK (c) wird besonders deutlich, dass Lichtstrahlen, die sich unter einem großen Winkel ϑ_x ausbreiten, vor allem am Anfang der LGP ausgekoppelt werden. Solche mit kleinem Ausbreitungswinkel werden auch später noch ausgekoppelt. Denn diese Strahlen werden seltener reflektiert, als Strahlen die sich unter einem großen Winkel ausbreiten (d). | 41 |
| 2.26 | Strahlen werden an zu nah positionierte Mikrostrukturen mehrfach gebrochen. Die Strahlen werden entweder gedämpft (rot) oder auf der Rückseite ausgekoppelt (orange). Die Strahlen können auch gedämpft zurück in die LGP gelenkt und dort weiter durch Totalreflexion geführt werden (grün). In jedem Fall treten an den, vom Strahl passierten, Strukturen unerwünschte Reflexionen auf (gepunktet). | 42 |
| 2.27 | Simuliertes Winkelspektrum der geführten Lichtstärke vor (grün) und nach (schwarz) der Auskopplung an einem einzelnen Zylinder aus PMMA auf einer LGP, in der sich unter jedem geführten Winkel etwa der gleiche Lichtstrom ausbreitet. Die Lichtstärke ist relativ zum Mittelwert der Lichtstärke vor der Auskopplung (grün) aufgetragen. Die Differenz zwischen beiden Kurven ist die ausgekoppelte Lichtstärke. Die Bedeutung von ϑ_x ist strahlenoptisch skizziert. | 43 |
| 2.28 | Anordnung der Mikrozyylinder auf der LGP. | 43 |
| 2.29 | Simulierte Lichtauskopplung über die Länge einer LGP aus PMMA mit 50 μm -Mikrozyindern. Der ausgekoppelte Lichtstrom (schwarz) nimmt mit dem Abstand von der einkoppelnden Kante ab. Die Abnahme kann durch eine einfache natürliche exponentielle Abnahme (rot gestrichelt) gut angenähert werden. | 45 |
| 2.30 | Simulierte Lichtstromdichte auf der strukturierten Fläche einer LGP mit gleichmäßig angeordneten Mikrozyindern. Die Lichtstromdichte ist sehr inhomogen. In der Nähe der LEDs wird der größte Lichtstrom ausgekoppelt (rot/grün). | 45 |
| 2.31 | Geometrische Parameter der Verteilungsfunktion der Mikrostrukturen für eine homogene Lichtstromdichte auf der LGP in z-Richtung. Das Licht wird links eingekoppelt und an den Strukturen, die in z-Richtung auf der LGP dichter werden, ausgekoppelt. | 46 |

| | | |
|------|---|----|
| 2.32 | Absolute Position (rot) und Abstand (schwarz) der Mikrozyylinder in der optimierten Verteilung. Der Abstand der Mikrozyylinder nimmt mit steigendem Abstand von der einkoppelnden Kante in z-Richtung ab. | 47 |
| 2.33 | Simulierte, homogene Lichtstromdichte auf der strukturierten Fläche einer LGP mit Mikrozyindern in der berechneten Anordnung. Links sind in der Nähe der LEDs Hotspots zu erkennen. | 48 |
| 2.34 | Ausgekoppelter Lichtstrom aus der strukturierten Fläche einer LGP mit Mikrozyindern in der berechneten Anordnung über die Länge der LGP. Die Lichtauskopplung der LGP mit der optimierten Verteilung (blau gestrichelt) ist entlang der z-Richtung homogen. Der gesamte ausgekoppelte Lichtstrom ist bei der LGP mit regelmäßiger Anordnung (schwarz) höher. | 48 |
| 2.35 | Durch die Keilform der LGP ändert sich der Ausbreitungswinkel der Lichtstrahlen bei jedem Treffen auf die unstrukturierte Seite (unten). Dadurch werden Lichtstrahlen mit einem flachen Ausbreitungswinkel (orange) eher ausgekoppelt. Strahlen mit großem Ausbreitungswinkel können nicht mehr durch Totalreflexion geführt werden und koppeln an den Plattenoberflächen auf der strukturierten (blau) und unstrukturierten Seite (rot) aus, wenn sie nicht stattdessen auf eine Mikrostruktur treffen (grün). | 49 |
| 2.36 | Simulierte Lichtstromdichte auf der strukturierten Fläche einer keilförmigen LGP mit Mikrozyindern. Die Lichtstromdichte weist ein erkennbares Maximum um $z=120$ mm und in der Nähe der LEDs (links) auf. | 50 |
| 2.37 | Ausgekoppelter Lichtstrom aus der strukturierten Fläche von LGPs mit Mikrozyindern über die Länge der LGP. Die Lichtstromdichte der keilförmigen LGP (rot gepunktet) ist gleichmäßiger als eine nicht optimierte LGP (schwarz). Im Vergleich zur LGP mit der optimierten Verteilung (blau gestrichelt) wird ein höherer Lichtstrom weniger gleichmäßig ausgekoppelt. | 50 |
| 3.1 | Auskopplung von Licht an zylinderförmigen Mikrostrukturen durch Brechung an der Grenzfläche (a) und Änderung der Ausbreitungsrichtung des Lichts durch Totalreflexion und anschließende Auskopplung durch Brechung an hinterschnittenen, prismatischen Strukturen (b). | 53 |
| 3.2 | Grundsätzlicher Simulationsaufbau eines mikrostrukturierten Flächenstrahlers in Zemax OpticStudio (Detektoren nicht eingezeichnet). | 55 |
| 3.3 | LED-Modell mit den markierten Flächen: (a) Gehäuse, (b) Phosphor/Silikonschicht und (c) elektrische Anschlüsse. | 56 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.4 | 3D-CAD-Modell eines idealen (a) und hergestellten (b) Mikrozyinders mit einer Höhe von ca. 25 μm . Die hergestellte Struktur weicht vor allem in der Form der Flanke und entsprechend dem Radius der Deckelfläche von dem idealen Modell ab. | 58 |
| 3.5 | Baumstruktur der Simulation eines Lichtstrahls in Zemax OpticStudio, der mehrfach gespalten wird. Die Strahlenabschnitte werden als Segmente bezeichnet. Sie sind in der Reihenfolge nummeriert in der sie berechnet werden und bis zur zweiten Intersection zusätzlich mit dem Wort „Segment“ gekennzeichnet. Eine <i>Intersection</i> bezeichnet eine Ebene von Knotenpunkten. An dieser beginnt eine neue Generation von Kind-Strahlen. Basierend auf [90]. | 59 |
| 3.6 | Simulierter LOR eines Flächenstrahlers mit einer LGP aus PMMA mit 50 μm -Zylindern als schwarze Punkte aufgetragen über die Länge der LGP. Aus den ersten drei LOR-Werten (rot) wird eine Näherung für die Bestimmung des LOR nach dem letzten verwendeten Wert ($l_z > 300 \text{ mm}$) berechnet (schwarze Linie). | 61 |
| 3.7 | Simulierte zweidimensionale Lichtstärkeverteilungskurve eines Flächenstrahlers mit Mikrozyindern. Das LED-Licht wird von unten eingekoppelt (gelber Pfeil) und hauptsächlich auf der strukturierten Seite (links) ausgekoppelt. | 63 |
| 3.8 | Dreidimensionale Lichtstärkeverteilung eines mikrostrukturierten Flächenstrahlers (a) und einige Schnittebenen entlang φ (b). | 63 |
| 3.9 | Automatisierter Messaufbau zur Erfassung der LVK von mikrostrukturierten Flächenstrahlern. Der Rotationstisch fährt den Sensor um eine Seite des Flächenstrahlers. Die Strahlungsleistung, die aus dieser Seite auskoppelt, wird automatisch erfasst. Für die Vermessung der LVK der zweiten Seite wird der Strahler manuell gewendet und der Vorgang wiederholt. Die Messdaten werden als LVK gespeichert. Vorgänge sind <i>kursiv</i> gekennzeichnet. | 64 |
| 3.10 | Gemessene LVK eines mit 1 mm hohen Zylindern strukturierten Flächenstrahlers. Die Lichtauskopplung geschieht vorwiegend auf der strukturierten Seite (links). Die größte Lichtstärke koppelt unter einem Winkel von ca. 40° aus. | 65 |
| 3.11 | Definition des Auskoppelbereichs an einer LVK (blau). Er liegt zwischen den Punkten an denen die Lichtstärke 50 % der maximalen Lichtstärke (rote Linie) beträgt. Der Bereich ist gepunktet rot eingefasst. | 66 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.12 | Skizze einer Ulbrichtkugel zur Bestimmung des abgegebenen Lichtstroms einer Lichtquelle. Die Innenseite ist diffus reflektierend beschichtet. Der Sensor wird vor direkter Strahlung abgeschattet und misst die mittlere diffuse Beleuchtungsstärke der Lichtquelle. Basierend auf [94]. | 67 |
| 3.13 | Siemensstern. Zur Sternmitte nimmt die Dichte der Schwarz-Weiß-Wechsel (Linienpaare/Millimeter) zu. Die Segmente sind immer schwerer zu unterscheiden. | 69 |
| 3.14 | Aufnahme einer schrägen Kante (a) an der die einzelnen Leuchtdichteverläufe gemessen werden. Daraus wird die gemittelte, überabgetastete ESF bestimmt (b). Gleiche Positionen sind mit der gleichen Farbe gekennzeichnet. Die LSF ist die Ableitung der ESF (c). Durch Fourier-Transformation der LSF wird die MTF berechnet (d). | 70 |
| 3.15 | Skizze des automatisierten Messaufbaus zur Bestimmung der subjektiven Durchsicht durch Flächenstrahler. Das Licht aus der Lichtquelle rechts wird durch die zwei Linsen weiter kollimiert. Es trifft danach auf die Maske, den Flächenstrahler und zuletzt auf die Kamera. Die Position des Flächenstrahlers wird programmgesteuert verfahren. In jedem Verfahrensschritt werden automatisch drei Fotos mit der Kamera aufgenommen. Anhand der Fotos wird die MTF und daraus der SQF berechnet. Dieser wird zusammen mit der aktuellen Position des Flächenstrahlers gespeichert. Vorgänge sind <i>kursiv</i> gekennzeichnet. | 71 |
| 3.16 | CSF, die in der Software Imatest IT verwendet wird. Basierend auf [100]. | 72 |
| 3.17 | Maßstab zur Bewertung der Durchsicht durch den SQF. Basierend auf [100]. | 73 |
| 4.1 | Querschnitt durch die Abformung eines von <i>Jungbecker</i> heißgeprägten, ca. 1 mm hohen Zylinders (a). Die geneigte Flanke ist gut zu erkennen. In der CLSM-Aufnahme (b) ist die Deckelfläche des Zylinders und die Plattenoberfläche zu sehen. Die geneigte Flanke des Zylinders wird jedoch nicht aufgelöst (gut sichtbar an den Zacken im gelben Bereich). Der Messbereich des CLSM ist zudem zu klein, um die gesamte Struktur mit einer Messung zu erfassen (transparenter Bereich vorne). | 77 |
| 4.2 | Entwicklungsschema für mikrostrukturierte optische Systeme. | 78 |
| 4.3 | Absorption (schwarz) und Transmission (rot) im PDMS RT 601. Der Bereich des sichtbaren Lichts (380 nm bis 780 nm) ist durch gestrichelte Linien gekennzeichnet. | 79 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.4 | LGP durch Gießtechnik mit PDMS auf lithographisch strukturiertem Wafer hergestellt (a) und eine Seitenaufnahme der abgeformten Mikrozyylinder mit einer Höhe von 42 μm und einem Durchmesser von 50 μm (b) [16]. | 82 |
| 4.5 | Prozess zur lithographischen Herstellung eines Formwerkzeugs (ohne Backschritte). Basierend auf [16]. | 82 |
| 4.6 | Von <i>LT-Ultra</i> durch Diamantfräsen in Messing hergestelltes Formwerkzeug mit Kegelstümpfen (a) und dessen PDMS-Abformung (b). | 84 |
| 4.7 | Prozess zur mikromechanischen Herstellung des Formwerkzeugs mittels Diamantfräsen. | 84 |
| 4.8 | Gießprozess zur Herstellung eines Funktionsmusters. Basierend auf [16]. | 85 |
| 4.9 | Durch Gießen hergestellte LGP aus PDMS mit den Maßen 0,4 cm \times 10 cm \times 10 cm (a). Die Platte wird durch einen einfachen schwarzen Rahmen gehalten. Im Hintergrund ist durch die Platte eine bedruckte Tasse zu sehen. (b) zeigt eine seitliche Aufnahme von Zylindern auf der LGP. Sie sind 42 μm hoch und besitzen einen Durchmesser von 103 μm . [16] | 85 |
| 4.10 | Aufnahme des von <i>temicon</i> lithographisch gefertigten mikrostrukturierten Flächenstrahlers mit den Maßen 0,53 cm \times 10 cm \times 10 cm (a) [130]. (b) zeigt die CLSM-Aufnahme eines Zylinders aus Photolack auf der LGP. Er ist 43 μm hoch und besitzt einen Durchmesser von 52 μm . Die sehr steilen Flanken konnten nicht aufgenommen werden. | 87 |
| 4.11 | Prozess zur photolithographischen Herstellung des Protoypen. | 87 |
| 4.12 | Prägewerkzeug am INKA mit eingesetztem Formwerkzeug aus Messing (links). Der linke Teil des Prägewerkzeugs wird beim Spritzprägen gegen den rechten Teil gepresst, während das PMMA von rechts eingespritzt wird. | 89 |
| 4.13 | Prozessablauf des variothermen Spritzprägens mikrostrukturierter PMMA-Platten. | 89 |
| 4.14 | Durch variothermes Spritzprägen am INKA hergestellter Spritzling (a) und Querschnitt durch die PDMS-Abformung eines Kegelstumpfs auf dem Spritzling (b). Die strukturierter Fläche besitzt einen Durchmesser von 4,7 cm. Der Kegelstumpf ist 586 μm hoch und besitzt einen Basisdurchmesser von 1283 μm | 90 |
| 4.15 | Aufnahme einer von <i>Jungbecker</i> heißgeprägten LGP mit den Maßen 0,23 cm \times 15,5 cm \times 15,5 cm mit ca. 1 mm hohen Zylindern (a). Sie wurde für die Aufnahme in einer Metallhalterung eingespannt. (b) zeigt eine Mikroskopaufnahme des Querschnitts eines abgeformten Zylinders auf der LGP. Deutlich erkennbar ist dessen geneigte Flanke. | 91 |
| 4.16 | Prozess zum Heißprägen mikrostrukturierter PMMA-Platten. | 91 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.17 | Grundprozess des UV-Prägens. | 92 |
| 4.18 | UV-Präge-Verfahren, die bei <i>temicon</i> angewendet werden: Im Rolle-zu-Rolle-Verfahren (a) wird eine Folie mit Lack beschichtet, in den mit einer Prägewalze die Mikrostruktur geprägt wird. Durch gleichzeitige Belichtung vernetzt der Lack. Das Rolle-zu-Platte-Verfahren (b) verwendet eine Master-Folie um die Mikrostrukturen in eine Lackschicht auf einer Platte zu prägen. [142] | 92 |
| 4.19 | Aufnahme einer 0,3 cm×30 cm×60 cm LGP mit 28 µm hohen Zylindern hergestellt von <i>temicon</i> mittels Rolle-zu-Platte UV-Prägen. Eine 10 cm×10 cm Ecke der Platte (oben rechts) wurde für die Vermessung der Strukturen herausgesägt. | 93 |
| 4.20 | CLSM-Aufnahme eines Zylinders der von <i>temicon</i> UV-geprägten LGP. Er ist 28 µm hoch und besitzt einen Durchmesser von ca. 18 µm. | 93 |
| 4.21 | Prinzip der Verbindung von LGP und Mikrostrukturen durch Oberflächenmodifikation. | 94 |
| 4.22 | Verbinden von Mikrostruktur und LGP aus PMMA durch UV-Strahlung unterstütztes thermisches Bonden. | 95 |
| 4.23 | Querschnitt durch eine PDMS-Abformung einer LGP aus PMMA mit hinterschnittenen Mikrostrukturen, die mittels UV-Strahlung unterstütztem thermischen Bondens am INKA verbunden wurde. Die Verbindungsstelle ist rot markiert. <i>Adapted by permission from Springer Nature Customer Service Centre GmbH: [148], © Springer Nature 2020.</i> | 96 |
| 4.24 | Einordnung der Herstellungstechnologien in das Entwicklungsschema bezogen auf mikrostrukturierte Flächenstrahler zur Verwendung als fassadenintegrierte Leuchten. | 98 |
| 5.1 | Geometrie der idealen Zylinderstruktur (a) und ihre regelmäßige Anordnung auf der LGP (b). | 100 |
| 5.2 | LVK des simulierten Flächenstrahlers mit idealen Mikrozyklindern. Das Licht wird gerichtet auf der strukturierten Seite (links) ausgekoppelt. . . | 101 |
| 5.3 | Anordnung der Zylinder auf dem lithographisch gefertigten Prototypen mit 50 µm-Zylindern. | 103 |
| 5.4 | Die Strukturen sind auf dem von <i>temicon</i> lithographisch gefertigten Prototypen (a) von Nahem nicht zu erkennen [130]. Die Durchsicht wird kaum beeinträchtigt. Das Muster besitzt eine Kantenlänge von 100 mm. In der CLSM-Aufnahme eines 43 µm hohen Zylinders aus Photolack auf der LGP (b) ist die vertikale Flanke zuerkennen, die wegen dem geringen Flankenwinkel nicht an allen Stellen aufgelöst werden kann. | 103 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.5 | LVK des gemessenen, lithographisch hergestellten Prototypen (blau) und des simulierten, entsprechenden Referenzsystems (rot). Die Hauptauskopplungsrichtung stimmt überein. Mit der Auskopplung unter einem Winkel von 150° und auf der unstrukturierten Seite (blau, rechts) weicht der Prototyp vom Referenzsystem ab. | 104 |
| 5.6 | Schlieren auf dem von <i>temicon</i> lithographisch gefertigten Prototypen. Der breite, weiße Streifen in der Mitte der Aufnahme ist die Reflexion einer Lampe. Die Schlieren sind mit Pfeilen gekennzeichnet. Das periodische Muster sind Reflexionen an den Mikrozylindern. | 105 |
| 5.7 | Zylindergeometrie angepasst für das Heißprägen. Die Höhe, der Durchmesser und der Flankenwinkel werden für eine gute Endformbarkeit vergrößert. | 106 |
| 5.8 | Durch Heißprägen von <i>Jungbecker</i> gefertigter Prototyp mit einer Kantenlänge von 155 mm. Der vergrößerte Ausschnitt zeigt die Zylinder mit einem Durchmesser von $982\ \mu\text{m}$, welche von Nahem deutlich zu erkennen sind. | 107 |
| 5.9 | CLSM-Aufnahme mit vergrößerter Störung auf der Zylinderdecke (a) und Aufnahme des Querschnitts durch eine PDMS-Abformung (b) der von <i>Jungbecker</i> mittels Heißprägen gefertigten Zylinder. Die gute Endformung und die schräge Flanke sind in der Abformung gut zu erkennen. | 107 |
| 5.10 | CAD-Modell der von <i>Jungbecker</i> mittels Heißprägen hergestellten Mikrostruktur. | 108 |
| 5.11 | LVK des von <i>Jungbecker</i> durch Heißprägen hergestellten Prototypen (blau) im Vergleich mit der entsprechenden Referenzsimulation (rot) und der Simulation der CAD-Nachbildung (grün). Die Länge der LGPs beträgt $\ell_z=100\ \text{mm}$. Der Bereich der Auskopplung des gemessenen Musters ist im Vergleich zu den Simulationen verschoben und breiter. Zudem tritt eine rückseitige Auskopplung auf (blau, rechts). | 109 |
| 5.12 | Zylindergeometrie angepasst für das UV-Prägen. Höhe und Durchmesser werden reduziert und die Flanke geneigt. | 112 |
| 5.13 | Durch UV-Prägen von <i>temicon</i> industriell gefertigtes Muster mit den Abmessung $300\ \text{mm} \times 600\ \text{mm}$. Die zwei vergrößerten Ausschnitte verdeutlichen die gute Durchsicht. Angegeben ist dort der horizontale Abstand des jeweiligen Objekts zur LGP. Der Ausschnitt oben rechts wurde für die Messung herausgeschnitten. | 113 |
| 5.14 | CLSM-Aufnahme (a) eines Zylinders auf dem von <i>temicon</i> mittels UV-Prägen industriell gefertigten Musters und der Querschnitt (b) durch diese Aufnahme. Die Flanke ist geneigt und an den Kanten finden sich Radien. | 113 |

- 5.15 Einige Störstellen in der Lackschicht des von *temicon* UV-geprägten Musters verursachen eine streuende Auskopplung. 114
- 5.16 CAD-Modell der von *temicon* durch UV-Prägen hergestellten Mikrostruktur. 114
- 5.17 LVK des durch UV-Prägen von *temicon* industriell hergestellten Musters (blau) im Vergleich mit der entsprechenden Referenzsimulation (rot) und der Simulation der CAD-Nachbildung (grün) mit einer Länge von $\ell_z=100$ mm. Der Bereich der Auskopplung des gemessenen Musters ist im Vergleich zu den Simulationen leicht verschoben. Messung und CAD-Nachbildung weisen einen breiteren Auskoppelbereich als die Referenzsimulation auf. 115
- 5.18 Skizze des von *temicon* UV-geprägten industriell gefertigten Musters für die Anwendung als fassadenintegrierter Flächenstrahler. Bei halber Länge befindet sich eine Kante im Lack zwischen den beiden gleich strukturierten Bereichen. 116
- 5.19 Relative SQF der industriell gefertigten Muster für verschiedene Abstände und Ausrichtungen zur betrachtenden Person. Bei einem Abstand von 140 mm trat ein Fehler in der automatischen Kantenerkennung für das geneigte heißgeprägte Muster auf. Der Wert besitzt entsprechend keine Aussagekraft. 118
- 5.20 Streuung der Messwerte (Punkte) um den zur Bewertung verwendeten Mittelwert (Linie) für die industriell gefertigten Muster in unterschiedlichen Ausrichtungen. Zu beachten sind die unterschiedlich skalierten y-Achsen in (a), (b) und (c), (d) 119
- 5.21 Durchsicht durch das von *Jungbecker* heißgeprägte Muster. Das strukturierte Muster ist rot gepunktet markiert. Bei den Abständen 10 cm und 20 cm ist die Qualität der Durchsicht inakzeptabel, bei 30 cm schlecht und bei 40 cm ausreichend. 120
- 5.22 Durchsicht durch das von *temicon* UV-geprägte Muster in den Abständen 10 cm, 20 cm, 30 cm und 40 cm. Der strukturierte Bereich (rot gepunktet) ist etwas kleiner als die Platte (blau gestrichelt). Die Durchsicht ist bei jedem Abstand gut. 120
- 5.23 Aufbau des Scheibenverbunds mit integriertem Flächenstrahler. Die mikrostrukturierte LGP ist zwischen zwei Scheiben aus Fensterglas positioniert und am Rand von Isolationsmaterial eingefasst. Dort wo die Isolation die Vorder- und Rückseite der LGP berührt ist eine umlaufende Verspiegelung angebracht. An der unteren Stirnseite sind die LEDs positioniert und mit einer Hitzesenke verbunden. Basierend auf [151]. 123

| | | |
|------|--|-----|
| 5.24 | Simulierte LVK der industriell gefertigten Flächenstrahler integriert im Scheibenverbund (rot, grün) und freistehend (blau, violett). | 123 |
| 5.25 | Entwurf (a) und von <i>Durlum</i> und <i>Saint-Gobain</i> umgesetzte (b) Ankopplung der LEDs an die LGP. Durch den größeren Abstand der LEDs trifft weniger Licht auf die LGP. Ein Teil des LED-Lichts gelangt wegen der fehlenden Abdeckung in den Scheibenzwischenraum und trägt zu einer streuenden Auskopplung aus dem Scheibenverbund bei. | 125 |
| 5.26 | Von <i>temicon</i> UV-geprägter, industriell gefertigter Flächenstrahler integriert in einen Scheibenverbund von <i>Saint-Gobain</i> . Der Rahmen wurde geöffnet, um die Ankopplung der LED-Leiste von <i>Durlum</i> zu zeigen. Die Nahaufnahme der LGP-Kante und LED-Leiste ist rot gepunktet markiert. | 126 |
| 5.27 | Eingeschalteter, von <i>Jungbecker</i> heißgeprägter, industriell gefertigter Flächenstrahler integriert in einen Scheibenverbund von <i>Saint-Gobain</i> und angebracht in der geöffneten Ulbricht-Kugel am FhG-IBP. | 126 |
| 5.28 | Scheibenverbund mit von <i>Jungbecker</i> heißgeprägten, industriell gefertigten Flächenstrahlern, eingebaut im oberen Bereich einer Fassade am FhG-IBP. (a) LEDs sind ausgeschaltet, (b) LEDs sind eingeschaltet. | 127 |
| 5.29 | Vom FhG-IBP gemessene Beleuchtungsstärke auf der Tischebene über die Entfernung von der Fassade [153]. Bis zu einem Abstand von 2 Metern liegt die Beleuchtungsstärke über 300 lx. | 128 |
| 5.30 | Mikrostruktur zur horizontalen Lichtauskopplung im Querschnitt auf einer LGP mit Basisplatte (a). Das Licht wird in die LGP eingekoppelt und an der Mikrostruktur in die Basisplatte umgelenkt und ausgekoppelt. (b) zeigt die Struktur in einer perspektivischen Darstellung. | 130 |
| 5.31 | Anordnung der Kegelstümpfe zur horizontalen Lichtauskopplung auf der LGP. | 130 |
| 5.32 | Simulierte LVK des entwickelten Flächenstrahlers mit Kegelstümpfen. Das Licht wird hauptsächlich einseitig, horizontal ausgekoppelt. | 131 |
| 5.33 | Modifizierter Simulationsaufbau für den Prototypen zur horizontalen Lichtauskopplung. <i>Adapted by permission from Springer Nature Customer Service Centre GmbH: [148], © Springer Nature 2020.</i> | 132 |
| 5.34 | Aufnahme des am INKA gefertigten 50 mm×60 mm großen Prototypen für die horizontale Lichtauskopplung alleinstehend (a) und leuchtend, von der strukturierten Seite betrachtet (b). Jeder einzelne, verbundene Kegelstumpf ist zu erkennen. <i>Reprinted by permission from Springer Nature Customer Service Centre GmbH: [148], © Springer Nature 2020.</i> . | 133 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.35 | REM-Aufnahme der Mikrostrukturen am INKA vor dem Bonden (a) und Querschnitt durch eine PDMS-Abformung des fertigen Prototypen (b). Die Abweichung von der Form der Referenz ist rot markiert. <i>Adapted by permission from Springer Nature Customer Service Centre GmbH: [148], © Springer Nature 2020.</i> | 133 |
| 5.36 | LVK des vermessenen (blau) und simulierten Prototypen (grün) zur horizontalen Lichtauskopplung sowie der entsprechende Referenz (rot). | 134 |
| 5.37 | Anwendungsszenario des optimierten horizontalen Flächenstrahlers für indirekte Raumbelichtung. Basierend auf [6]. | 136 |
| 5.38 | Aufbau des Excel-Makros zur Berechnung der LVK der idealen Lichtquelle. <i>Adapted with permission from [150] © The Optical Society.</i> | 138 |
| 5.39 | Referenzraum für die berechnete, ideale Lichtquelle. <i>Adapted with permission from [150] © The Optical Society.</i> | 138 |
| 5.40 | LVK der vom FhG-IBP berechneten, idealen Lichtquelle für eine indirekte Raumbelichtung aus der Fassade. <i>Adapted with permission from [150] © The Optical Society.</i> | 139 |
| 5.41 | Perspektivisches CAD-Modell der optimierten Mikrostruktur für horizontale Abstrahlung (a) und ihre geometrischen Abmessungen im Querschnitt (b). Der Querschnitt der Hälfte der Struktur ist ein Ausschnitt der eingezeichneten, geneigten Ellipse (gepunktet). <i>Adapted with permission from [150] © The Optical Society.</i> | 140 |
| 5.42 | Anordnung der optimierten Mikrostruktur für horizontale Abstrahlung. | 140 |
| 5.43 | LVK des Flächenstrahlers mit optimierter Mikrostruktur zur horizontalen Abstrahlung im Vergleich mit der idealen LVK vom FhG-IBP. <i>Adapted with permission from [150] © The Optical Society.</i> | 141 |
| 5.44 | Aufbau der Simulation der Raumbelichtung. <i>Adapted with permission from [150] © The Optical Society.</i> | 142 |
| 5.45 | Am FhG-IBP simulierte Beleuchtungsstärke auf der Decke für: (a) ideale Lichtquelle vom FhG-IBP, (b) optimierter Flächenstrahler, (c) Flächenstrahler mit Mikrozylindern und (d) konventionelle Pendelleuchte. Die Leuchten sind Orange dargestellt. Die ideale Lichtquelle beleuchtet die Decke in Streifen gleicher Beleuchtungsstärke. Die Beleuchtungsstärke durch den optimierten Flächenstrahler und den Flächenstrahler mit Mikrozylindern nimmt mit steigender Entfernung von der Fassade ab. Die konventionelle Leuchtquellen erzeugen ein deutliches Maximum der Beleuchtungsstärke über jeder Pendelleuchte. <i>Adapted with permission from [150] © The Optical Society.</i> | 144 |

5.46 Am FhG-IBP simulierte Beleuchtungsstärke auf Tätigkeitshöhe für: (a) ideale Lichtquelle vom FhG-IBP, (b) optimierter Flächenstrahler, (c) Flächenstrahler mit Mikrozyllindern und (d) konventionelle Pendelleuchte. Die Leuchten sind Orange dargestellt.
 Die Beleuchtung durch die ideale Lichtquelle variiert kaum und hat ihr wenig ausgeprägtes Maximum in der Raummitte. Die Beleuchtungsstärke durch den optimierten Flächenstrahler und der Flächenstrahler mit Mikrozyllindern nimmt mit steigender Entfernung von der Fassade ab, wobei die Beleuchtung durch den optimierten Flächenstrahler weniger stark variiert. Die konventionellen Pendelleuchten weisen eine hohe Beleuchtungsstärke auf, die ausgehend von zwei Maxima zu den Wänden und der Fassade abnimmt. *Adapted with permission from [150] © The Optical Society.* . . . 145

5.47 Beleuchtungsstärke und deren Gleichmäßigkeit für die verschiedenen Lichtquellen und Messflächen (a) - (d). Die Richtwerte der Beleuchtungsstärke für Tätigkeiten (500 lx) und dessen Umgebung (300 lx) sind gestrichelt markiert. Für den Tätigkeitsbereich ist die geforderte Gleichmäßigkeit von 0,6 eingezeichnet. *Adapted with permission from [150] © The Optical Society.* 146

5.48 Beleuchtungsstärke über die Raumtiefe. Eingezeichnet ist der für die Messung definierte Tätigkeitsbereich (3,5 m, schwarz gestrichelt) und der Bereich, der mit dem optimierten Flächenstrahler ausreichend beleuchtet wird, um Tätigkeiten durchzuführen (2,8 m, grün gestrichelt). *Adapted with permission from [150] © The Optical Society.* 146

6.1 Eingesetzte Rohstoffe und Elemente in der Herstellung von MMA. 154

6.2 Eingesetzte Rohstoffe und Elemente in der Herstellung von TEMPO. 155

6.3 Gefahrenstoffkennzeichen in der Größe der Symbolfläche sortiert nach der Anzahl der Verwendung der entsprechend gekennzeichneten Stoffe in den Herstellungsschritten von PMMA. Die Prozentzahlen geben das Vorkommen zahlenmäßig an. 156

- 7.1 Anwendungsmöglichkeiten mikrostrukturierter Flächenstrahler zur Raumbeleuchtung:
- (a) Indirekte Beleuchtung durch einen transparenten Flächenstrahler integriert in die komplette Fassade. Basierend auf [6].
 - (b) Indirekte Beleuchtung durch einen Flächenstrahler integriert in den oberen Bereich einer Fassade. Basierend auf [6].
 - (c) Transparente Standleuchte zur Direkt-Indirekt-Beleuchtung. Basierend auf [149].
 - (d) Arbeitsplatz und Deckenleuchte zur direkten Beleuchtung. 165

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|---|-----|
| 2.1 | Systemparameter der Simulation des geführten und ausgekoppelten Winkelspektrums. | 40 |
| 2.2 | Systemparameter der Simulation zur Bestimmung des Auskoppelfaktors der LGP mit 50 μm -Mikrozyklindern. | 44 |
| 2.3 | Parameter der Näherung der Lichtauskopplung in Gleichung (2.49). . . . | 44 |
| 3.1 | Reflexion und Transmission an der Phosphorschicht der simulierten LED. Abgeleitet von [86]. | 57 |
| 4.1 | Herstellungstechnologien für mikrostrukturierte LGPs im Vergleich. . . . | 97 |
| 5.1 | Kennwerte und Abmessung des simulierten Flächenstrahlers mit idealen Mikrozyklindern. | 102 |
| 5.2 | Kennwerte und geometrische Abmessungen des von <i>temicon</i> lithographisch gefertigten Prototypen und dessen Referenz im Vergleich mit dem idealen, simulierten Flächenstrahler. | 105 |
| 5.3 | Kennwerte und geometrische Abmessungen des mittels Heißprägen von <i>Jungbecker</i> gefertigten Prototypen im Vergleich mit der CAD-Nachbildung und den Referenzsimulationen. | 108 |
| 5.4 | Kennwerte und geometrische Abmessungen des von <i>Jungbecker</i> mittels Heißprägen industriell gefertigten Musters mit einer Länge von 600 mm im Vergleich mit der CAD-Nachbildung und den Referenzsimulationen. . . | 111 |
| 5.5 | Kennwerte und geometrische Abmessungen des mittels UV-Prägen von <i>temicon</i> industriell gefertigten Musters mit einer Länge von 100 mm im Vergleich mit der CAD-Nachbildung und den Referenzsimulationen. . . . | 116 |
| 5.6 | Kennwerte und geometrische Abmessungen des mittels UV-Prägen von <i>temicon</i> industriell gefertigten Musters mit einer Länge von 600 mm im Vergleich mit der Simulation der CAD-Nachbildung und der Referenzen. . | 117 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.7 | Kennwerte der industriell gefertigten Flächenstrahler im Scheibenverbund (Messung nur am heißgeprägten Muster) im Vergleich zur Simulation der CAD-Nachbildungen im Scheibenverbund und den Simulationen und Messungen der freistehenden Muster. | 124 |
| 5.8 | Kennwerte der simulierten idealen Referenz des Flächenstrahlers mit Kegelstümpfen zur horizontalen Lichtauskopplung. | 131 |
| 5.9 | Kennwerte und geometrische Abmessungen des Prototypen zur horizontalen Lichtauskopplung und dessen Simulation sowie die der Referenzen. . | 135 |
| 5.10 | Kennwerte der LVK der vom FhG-IBP berechneten, idealen Lichtquelle für eine indirekte Raumbelichtung aus der Fassade. | 139 |
| 5.11 | Kennwerte des Flächenstrahlers mit optimierten Mikrostrukturen im Vergleich mit denen der idealen Lichtquelle vom FhG-IBP. | 141 |
| 5.12 | Anzahl der Punkte des Messgitters auf den Messflächen. | 142 |
| B.1 | Entsprechung von radiometrischen und photometrischen Größen und ihre Bezeichnung. | 169 |