

Mikrostrukturierte Systeme zur Tageslichtlenkung

der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der
Technischen Universität Dortmund
vorgelegte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften

von
Stephan Klammt
Dortmund

Dissertation in der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dortmund

Tag der mündlichen Prüfung: 04.07.2013

Referent: Prof. Dr.-Ing. Andreas Neyer
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Helmut Müller

Inhaltsverzeichnis

1	EINFÜHRUNG IN DIE BELEUCHTUNG MIT TAGESLICHT	1
1.1	Unterschiede zwischen Tageslicht und Kunstlicht	2
1.1.1	Tageslicht und Kunstlicht: Das Spektrum	2
1.1.2	Tageslicht und Kunstlicht: Die Beleuchtungsstärke	3
1.1.3	Tageslicht und Kunstlicht: Weitere Unterschiede	5
1.2	Vorteile der Beleuchtung mit Tageslicht	6
1.2.1	Vergrößerung des Wohlbefindens durch Tageslicht	6
1.2.2	Energieersparnis	7
1.2.3	Wirtschaftlichkeit	9
1.2.4	Verbesserte Raumausleuchtung	10
1.3	Das Beleuchtungskonzept	12
1.4	Struktur der Arbeit	13
2	STAND DER TECHNIK	15
2.1	Klassifizierung von Tageslichtsystemen	16
2.1.1	Klassifizierung: Bewegliche Systeme	16
2.1.2	Klassifizierung: Statische Systeme	18
2.1.3	Klassifizierung: transmittierend - reflektierend	19
2.2	Beweglich - reflektierend: Jalousien	20
2.3	Beweglich - transmittierend: Prismen-Jalousie	22
2.4	Statisch - reflektierend: Lightshelf	23
2.4.1	Mischform: Mikrospiegelarrays	23
2.5	Statisch - transmittierende Systeme	25
2.5.1	Statisch - transmittierend: holografisch-optische Elemente (HOE)	25
2.5.2	Statisch - transmittierend: Laser-Cut Panel	27
2.5.3	Statisch - transmittierend: Compound Parabolic Concentrators (CPC)	28
2.5.4	Statisch - transmittierend: Prismenoberlicht	30
2.5.5	Statisch - transmittierend: Lumitop	32

3	HERSTELLUNG	37
3.1	Herstellung von mikrostrukturierten Formwerkzeugen	39
3.1.1	Formdiamanten zur Profilierung von Formwerkzeugen	39
3.1.2	Mikrostrukturierte Formwerkzeuge: Materialwahl	40
3.1.3	„Fly-Cutting“ und Hobeln von Formwerkzeugen	41
3.2	Gießverfahren mit PDMS	43
3.2.1	Herstellungstechnik: Gießverfahren	43
3.2.2	Materialeigenschaften: PDMS	45
3.3	Heißprägeverfahren mit PMMA	47
3.3.1	Materialeigenschaften: PMMA	47
3.3.2	Herstellungstechnik: Heißprägeverfahren	47
3.4	Alternative Herstellungsverfahren	52
3.4.1	Rolle-zu-Rolle Verfahren	52
3.4.2	Strukturierung von Glas	54
3.5	Integration in die Verglasung	55
4	SIMULATION	59
4.1	Optische Grundlagen für die Strahlverfolgung	60
4.1.1	Veränderung der Ausbreitungsrichtung: Brechung und Reflexion	60
4.1.2	Aufspaltung der Strahlungsleistung: Fresnelsche Formeln	61
4.1.3	Beispiel: Strahlversatz durch eine Planplatte	63
4.2	Simulationssoftware	65
4.2.1	CAD-Software SolidWorks	65
4.2.2	Raytracing-Software ZEMAX	66
4.2.3	Datenverarbeitung mit MS Office Excel	68
4.2.4	Beispiel: Simulation einer Sägezahnstruktur	69
4.3	Simulationsergebnisse	73
4.3.1	Einseitig strukturierte Systeme	73
4.3.2	Zweiseitig strukturierte Systeme	76
5	STRUKTURQUALITÄT UND GONIOMETRIE	87
5.1	Strukturqualität der Prototypen	88
5.1.1	Gegossene PDMS-Elemente	88
5.1.2	Einseitig heißgeprägte PMMA-Elemente	89

5.1.3	Doppelseitig heißgeprägte PMMA-Elemente	92
5.2	Goniometrischer Messaufbau	96
5.2.1	Der Messaufbau	96
5.3	Goniometrische Messergebnisse	99
5.3.1	Einseitige Sägezahnstruktur aus PDMS	99
5.3.2	Doppelseitige Sägezahnstruktur aus PDMS	99
5.3.3	Doppelseitiges Basissystem aus PDMS	100
5.3.4	Lichtlenksystem aus PMMA	103
6	MODIFIKATIONEN UND OPTIMIERUNG	107
6.1	Überarbeitung der Strukturgeometrie	108
6.1.1	Beschreibung der Geometrieüberarbeitung	108
6.1.2	Auswirkungen auf das Lichtlenkverhalten	109
6.2	Selektiver Einsatz von Oberflächenrauheit	112
6.2.1	Experimentelle Bestimmung der Streuverteilung durch Oberflächenrauheit	112
6.2.2	Transfer der Streuverteilungen in ein Simulationsmodell	117
6.2.3	Einfluss der Rauheit auf die Lichtlenkcharakteristik	119
6.2.4	Selektivität der Oberflächenrauheit	122
6.3	Beleuchtung durch LED-Seiteneinkopplung	124
7	VERGLEICH: MIKROSTRUKTURIERTES SYSTEM - LUMITOP	129
7.1	Vergleich der Bauformen	130
7.2	Vergleich der lichtlenkenden Eigenschaften	132
7.2.1	Simulationen	132
7.2.2	Messungen	133
8	ZUSAMMENFASSUNG, AUSBLICK UND FAZIT	139
8.1	Zusammenfassung	139
8.2	Anknüpfungspunkte zur Weiterarbeit	142
8.2.1	Punkt 1: Produktion des Systems	142
8.2.2	Punkt 2: Integration der lichttechnischen Eigenschaften in Lichtplanungstools	143
8.2.3	Punkt 3: Erprobung in einem Musterraum	143
8.2.4	Punkt 4: Anpassung der Simulationsumgebung	144
8.3	Ideen für weitere Anwendungen	145

8.3.1	Einsatz als Lichtdecke	145
8.3.2	Verbesserung der Ausleuchtung in Gewächshäusern	146
8.3.3	Lichtkunst mit mikrostrukturierten Elementen	147
9	LITERATURVERZEICHNIS	149
9.1	Verwendete Literatur	149
9.2	Liste der eigenen Veröffentlichungen	158
A	ÜBERSICHT ÜBER GONIOPHOTOMETER	159
B	EXTERNE MESSUNGEN	162
B.1	Transmissionsgrad τ [%]	162
B.2	Lichtverteilungskurven	163

1 Einführung in die Beleuchtung mit Tageslicht

„Kann man das nicht etwas kleiner machen?“

Diesem einfachen Satz muss nicht immer eine besondere Bedeutung beiwohnen. Wenn er jedoch im Gespräch zweier Professoren fällt – der eine Fachmann für energieeffiziente Gebäudetechnik und der andere für Mikrostrukturtechnik – kann daraus eine interessante wissenschaftliche Arbeit erwachsen, in der ein Thema interdisziplinär bearbeitet wird. So ist jedenfalls das Thema dieser Arbeit entstanden.

Das Ziel des angesprochenen Miniaturisierungswunsches war ein sogenanntes „Tageslichtlenksystem“. Wie es bei interdisziplinärer Zusammenarbeit häufig der Fall ist, sind anfangs nicht allen Beteiligten sämtliche technische Anforderungen und Möglichkeiten bekannt. Daher wird zu Beginn dieser Arbeit eine kurze Einführung in die Thematik der Beleuchtung mit Tageslicht gegeben.

Zunächst werden die wichtigsten *Unterschiede zwischen Kunst- und Tageslicht* erläutert – auch im Hinblick auf ihre Wirkungsweisen auf den Menschen. Durch den geschickten Einsatz von Tageslicht bei der Raumbelichtung lassen sich einige *Vorteile* generieren. Daher wird anschließend die Energieersparnis, Wirtschaftlichkeit und eine höhere Zufriedenheit der Raumnutzer betrachtet. In einem nächsten Schritt wird erklärt, welches *Beleuchtungskonzept* Ausgangspunkt dieser Arbeit ist. Gleichzeitig werden die Anforderungen benannt, die ein Tageslichtsystem in diesem Zusammenhang erfüllen muss. Mit einem kurzen Überblick über die *Struktur dieser Arbeit* wird aufgezeigt, welche Schritte zur Entwicklung eines solchen Systems letztendlich notwendig sind.

1.1 Unterschiede zwischen Tageslicht und Kunstlicht

Um die Unterschiede zwischen Tages- und Kunstlicht zu erörtern, ist es zunächst sinnvoll und notwendig, sich mit ihrer Gemeinsamkeit – der Tatsache, dass es sich bei beiden um Licht handelt – auseinanderzusetzen. Aber was ist Licht eigentlich und inwieweit kann sich Licht von Licht überhaupt unterscheiden?

1.1.1 Tageslicht und Kunstlicht: Das Spektrum

Licht ist physikalisch betrachtet Strahlung und damit eine elektromagnetische Welle. Der wichtigste Kennwert einer elektromagnetischen Welle ist ihre Wellenlänge λ . Diese spezifiziert die Wirkung der Welle wesentlich, die unterschiedlicher kaum sein könnte. Gammastrahlung ($\lambda \approx 1 \text{ pm}$), die meist durch radioaktiven Zerfall entsteht, hat beispielsweise eine sehr kurze Wellenlänge, ebenso wie Röntgenstrahlung ($\lambda \approx 1 \text{ nm}$). Lange Wellenlängen werden hingegen im Rundfunk ($1 \text{ m} \leq \lambda \leq 1 \text{ km}$) eingesetzt. Die Gesamtheit aller elektromagnetischen Wellen wird als elektromagnetisches Spektrum bezeichnet, welches in Bild 1.1 skizziert ist.

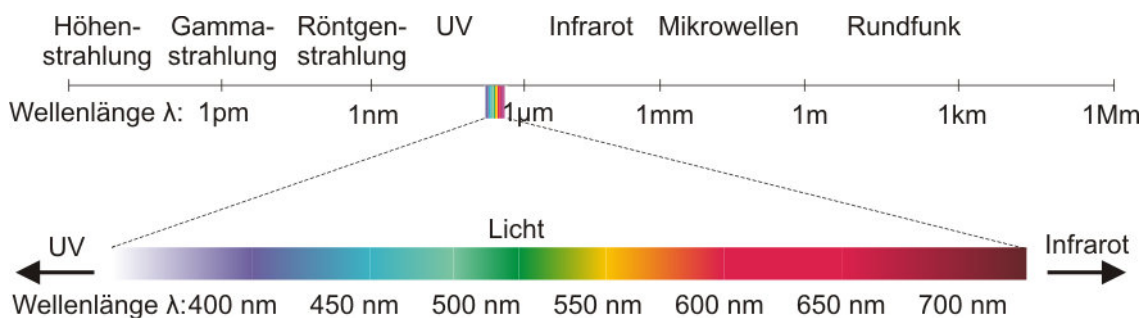


Bild 1.1: Ein Überblick über das elektromagnetische Spektrum. Der sichtbare Teil des Spektrums beschränkt sich auf die Wellenlängen von etwa 380 nm bis 780 nm und wird als „Licht“ bezeichnet.

Aus der Skizze wird deutlich, dass das Intervall „Licht“ nur einen verhältnismäßig kleinen Bereich umfasst. Die Wellenlängen des Lichts reichen von etwa 380 nm bis 780 nm , wobei mit ansteigender Wellenlänge die Farbe des Lichts von Violett über Blau, Grün, Gelb bis hin zu Rot wechselt. Licht ist also derjenige Teil des elektromagnetischen Spektrums, den der Mensch mit seinen Augen erfassen, also sehen kann.

Das Farbsehen des Menschen beruht auf der Anregung von drei Fotorezeptoren im Auge, den sogenannte Zapfen, die bei rotem, grünem oder blauem Licht ihre jeweils höchste Empfindlichkeit haben. Werden alle Zapfen gleichsam angeregt, so sieht der Mensch weißes Licht. Bei unterschiedlicher Anregung wird entsprechend eine Farbmischung gesehen.

Damit das vom Auge erfasste Licht als Weiß erkannt wird, muss daher nicht zwingend das gesamte Lichtspektrum gleichermaßen vorliegen. Es reicht aus, die Zapfen jeweils

im Bereich ihrer größten Empfindlichkeit anzuregen. Dieser Fakt wird bei einigen Lichtquellen dazu genutzt, um Energie zu sparen, indem nicht-sichtbare Teile des Spektrums nicht emittiert werden. Daraus resultieren charakteristische Emissionsspektren, wie sie in Bild 1.2 gezeigt werden.

Zu sehen sind die Spektren von Tageslicht, Glühlampe, weißer LED und einer Leuchtstofflampe im für das Auge sichtbaren Bereich. Das Tageslicht (a) weist einen Verlauf auf, der vom UV-Bereich her bis zu einem Maximum bei Blau-Grün ansteigt und dann leicht abfällt. Während bei der Glühlampe (b) die Emission mit zunehmender Wellenlänge linear ansteigt, wird bei der weißen LED (c) sehr gut die Technik und Auswirkung der Lumineszenzkonversion deutlich, bei der eine blaue LED Licht emittiert und damit einen fluoreszierenden Farbstoff anregt, der den übrigen Teil des Spektrums abstrahlt. Die Leuchtstofflampe (d) weist ein charakteristisches Profil mit einigen Peaks auf.

Trotz der deutlichen Unterschiede regen alle vier Spektren die Zapfen so an, dass der Mensch das Licht als „weißes Licht“ interpretiert, wenn auch mit einer unterschiedlichen Farbtemperatur. (Die Glühlampe würde z.B. wegen ihrer größeren Anteile im langwelligeren Bereich als „Warmweiß“ und die LED eher als „Kaltweiß“ empfunden werden).

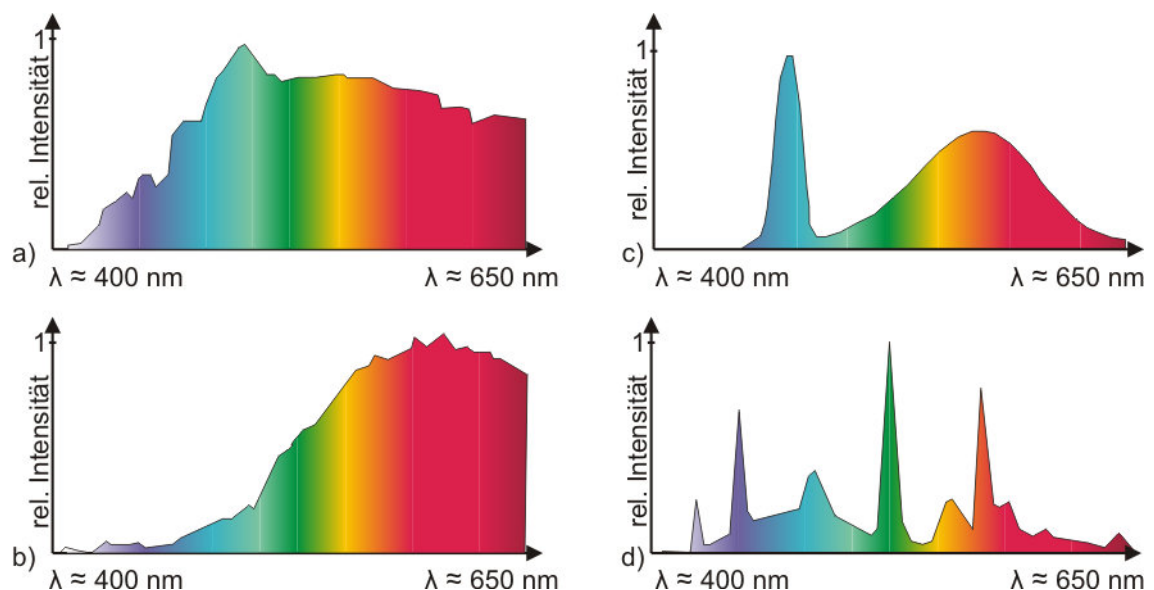


Bild 1.2: Spektren verschiedener Lichtquellen [Erc12]: Tageslicht (a), Glühlampe (b), weiße LED (c) und Leuchtstofflampe (d).

1.1.2 Tageslicht und Kunstlicht: Die Beleuchtungsstärke

Neben den verschiedenen Spektren gibt es auch hinsichtlich der Beleuchtungsstärke starke Unterschiede zwischen Kunst- und Tageslicht. Die Beleuchtungsstärke (E_V) wird

in der photometrischen Einheit Lux gemessen und gibt an, wie hell eine bestimmte Fläche ist.

An dieser Stelle sollen kurz die Begriffe Photometrie und Radiometrie erläutert werden: Die Radiometrie befasst sich allgemein mit der Messung von elektromagnetischer Strahlung und ist nicht auf einen bestimmten Wellenlängenbereich begrenzt. Die Photometrie befasst sich nur mit dem sichtbaren Teil des elektromagnetischen Spektrums und wird daher hauptsächlich bei der Lichttechnik angewendet. Mathematisch wird in der Photometrie das elektromagnetische Spektrum mit der sogenannten $V(\lambda)$ -Kurve gewichtet bzw. gefiltert. Die $V(\lambda)$ -Kurve (CIE 018.2-1983) beschreibt die Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges und hat ihr Maximum im grünen Spektralbereich (siehe Bild 1.3).

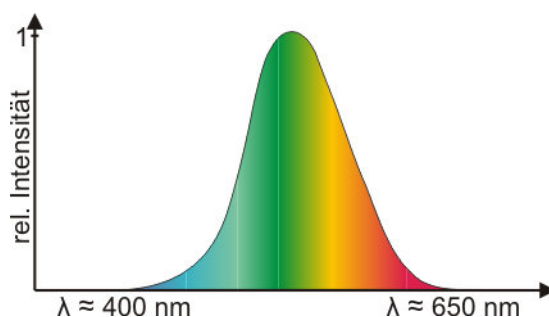


Bild 1.3: Die $V(\lambda)$ -Kurve (CIE 018.2-1983) beschreibt die Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges bei Tageslicht und dient als Gewichtungskurve für photometrische Größen.

Photometrische Größen (z.B. Lichtstrom, Lichtstärke oder Leuchtdichte) haben radiometrische Entsprechungen (Strahlungsleistung, Strahlungsintensität oder Strahldichte) die sich nur anhand der Gewichtung unterscheiden. Für Personen mit wenig Erfahrung in der Lichttechnik sind die radiometrischen Größen häufig einleuchtender, da sie über zugänglichere Einheiten verfügen. So ist die Entsprechung der Beleuchtungsstärke mit der Einheit [Lux] die Bestrahlungsstärke, die in der Einheit [W/m^2] gemessen wird, aber eben ohne Gewichtung auskommt.

Eine Kerze erreicht in einem Meter Entfernung einen Wert von $1\ lx$. Typische Beleuchtungsstärken, die mit Kunstlichtquellen in Büroräumen erzielt werden, liegen in der Größenordnung von rund $500\ lx$. Für mittelschwere Aufgaben wird beispielsweise eine Mindestbeleuchtungsstärke von nur $300\ lx$ definiert, ein Wert der deutlich zu niedrig angesetzt ist [Mue05]. Im Vergleich dazu hat direktes Tageslicht eine typische Beleuchtungsstärke von rund $100000\ lx$ und selbst bei bedecktem Himmel werden noch gut $20000\ lx$ erreicht – genügend Potenzial also, das für eine ausreichende Beleuchtung genutzt werden kann.

1.1.3 Tageslicht und Kunstlicht: Weitere Unterschiede

Einige Unterschiede sind so offensichtlich und allgemein bekannt, dass sie mitunter schon wieder übersehen werden. Dazu gehört zum Beispiel, dass das Tageslicht – wie der Name schon sagt – nur tagsüber verfügbar ist, während Kunstlicht rund um die Uhr eingeschaltet werden kann. Aus diesem Grund wird bei der Tageslichtplanung natürlich auch stets der Einsatz von Kunstlicht mit berücksichtigt.

Des Weiteren ist Tageslicht aufgrund der Erdrotation dynamisch. In Abhängigkeit vom Sonnenstand variieren Richtung, Beleuchtungsstärke und das Spektrum des Lichts. Das Wetter und die Bewölkung haben ebenfalls einen Einfluss auf die Dynamik. Kunstlicht weist diese Dynamik in der Regel nicht auf. Das erhöht zwar seine Planbarkeit, allerdings gibt es durchaus Bestrebungen mit Kunstlicht die Dynamik des Tageslichts nachzuahmen, um auf diese Weise eine anregende Wirkung beim Menschen zu erzielen.

1.2 Vorteile der Beleuchtung mit Tageslicht

Mit Kenntnis der Unterschiede zwischen Tages- und Kunstlicht können nun die sich daraus ergebenden Vorteile vorgestellt werden. Begonnen wird mit den Auswirkungen auf den Menschen, anschließend werden Faktoren wie Energieersparnis und Wirtschaftlichkeit betrachtet.

1.2.1 Vergrößerung des Wohlbefindens durch Tageslicht

Die Spektren aus Bild 1.2 werden alle als Weiß gesehen, was aufgrund ihrer Unterschiedlichkeit eigentlich erstaunlich ist. Allerdings muss hier betont werden, dass die gleiche Wirkung nur beim „Sehen“ liegt, im Sinne von „das Gehirn interpretiert die Anregung der Farbzapfen im Auge“. „Sehen können“ ist jedoch nicht die einzige Wirkung des Lichts auf den Menschen, so gibt es beispielsweise im Auge weitere Rezeptoren (Ganglionen), die zentral den zirkadianen Rhythmus steuern. Diese haben im Vergleich zu den für das Farbsehen verantwortlichen Zapfen eine deutlich erhöhte Sensitivität im kurzwelligen Bereich [Ber02]. Daher werden sie auch als „Blauer-Himmel-Detektor“ bezeichnet [Rea11]. Je nach Anregung wird von den Rezeptoren die Ausschüttung des Hormons Melatonin gesteuert, worüber Müdigkeit und Wachheit des Körpers beeinflusst werden.

Was hat das aber mit Tages- und Kunstlicht zu tun? Da der Mensch sich in Gebäuden vom Tageslicht abschottet, werden die oben angesprochenen Ganglionen tagsüber verhältnismäßig wenig angeregt. Durch den Einsatz von Kunstlicht werden bei Nacht ähnlich viele Reize wie tagsüber gesetzt, sodass zunehmend Störungen des zirkadianen Rhythmus beobachtet werden können, was sich zum Beispiel in Müdigkeit und Unkonzentriertheit ausdrückt. Durch eine Beleuchtung mit Tageslicht kann der menschliche Körper tagsüber einen hinreichenden Stimulus erhalten, um seinen zirkadianen Rhythmus zu stabilisieren [Rea11]. Die abendliche Beleuchtung sollte aufgabenbezogen selektiert werden, je nachdem ob Reize gesetzt werden sollen oder nicht. Hier ist erwähnenswert, dass bei gleicher Beleuchtungsstärke das Licht weißer LEDs einen 17fach höheren Einfluss auf den zirkadianen Rhythmus hat als das Licht von Leuchtstofflampen. Der positive Einfluss eines geregelten Tag-Nacht-Rhythmus auf den menschlichen Körper wird eindrucksvoll daran deutlich, dass sich Frühgeborene, die diesen Rhythmus über eine Lichtsteuerung vermittelt bekommen, sich in jeder Hinsicht deutlich besser entwickeln, als solche, die einem gleichförmigen Licht ausgesetzt werden [Mil95].

Der Einfluss des Lichts auf die Stimmung des Menschen wurde ebenfalls erforscht und nachgewiesen. Eine zentrale Rolle bei diesem Nachweis spielt die sogenannte Winterdepression (engl. seasonal-affective-disorder, SAD). Ein erstes Indiz für den Einfluss von Licht auf diese Form der Depression ist, dass sie wesentlich verbreiteter in nördlichen Regionen, also in Zonen mit ausgeprägten Wintern und weniger Tageslicht auftritt

[Ros90]. Ein weiteres Indiz ist, dass die erfolgreichste Behandlungsform dieser Krankheit die Bestrahlung mit sehr hellem Licht ist ($> 10000 \text{ lx}$), das dem Tageslicht ähnelt [Lew82].

Die niedrigen Beleuchtungsverhältnisse in den meisten Gebäuden sind sicherlich nicht für jede Depression oder schlechte Stimmung verantwortlich, sie werden jedoch ihren Teil dazu beitragen. Die Erhöhung der Helligkeit eines Raumes durch die Nutzung von Tageslicht kann die Stimmung sogar in einer medizinisch relevanten Weise heben.

Die Dynamik des Lichts wurde als weiterer Unterschied zwischen Tages- und Kunstlicht ausgemacht. Kunstlicht wird häufig flächig eingesetzt und erzeugt gleichförmige, fast monotone Lichtverhältnisse, die frei von stimulierenden Reizen sind. Tageslicht erzeugt mit seiner natürlichen Dynamik (wechselnde Lichtverhältnisse) einen eben solchen Reiz, der auf den Menschen stimulierend und belebend wirkt [Tre11]. Aus diesem Grund wird manchmal auch bei Kunstlicheinsatz eine künstlich programmierte Dynamik erzeugt, um ebenfalls stimulierende Reize zu setzen.

Die veränderlichen Tageslichtverhältnisse erzeugen zwischen Mensch und Außenwelt eine Verbindung. Der Mensch kann unbewusst – beispielsweise anhand von Sonnenstand und Helligkeit – auf die Tageszeit oder auf die Wetterverhältnisse schließen, auch wenn keine direkte Durchsicht nach außen vorliegen sollte. Diese zusätzlichen Informationen über Raum und Zeit lösen im Menschen ein Gefühl von Orientierung und Sicherheit aus [Tre11].

Studienergebnisse haben gezeigt, dass Menschen sich grundsätzlich in einem hellen Raum wohler fühlen als in einem dunklen Raum [Boy03, Sch06]. Dies ist auch der Öffentlichkeit bewusst. Räume mit Zugang zu Tageslicht gelten als attraktiver und es wird allgemein akzeptiert, für diese höhere Mieten zu verlangen. Der Mensch sehnt sich nach Tageslicht [Tre11, Boy09] und die Verfügbarkeit oder das Ausbleiben des solchen hat einen entscheidenden Einfluss auf sein Wohlbefinden.

1.2.2 Energieersparnis

Neben den biologischen Faktoren gibt es auch technische Fakten, die für Tageslichtsysteme sprechen. Einer davon ist die zu erwartende Energieersparnis. Insbesondere vor dem Hintergrund der globalen Erwärmung ist dieser Aspekt nicht hoch genug zu bewerten, auch wenn das Thema „Klimawandel“ von Manchem einfach nur ignoriert wird.

Der von den Vereinten Nationen eingesetzte Weltklimarat (*IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change*) betont in seinen Sachstandsberichten immer wieder aufs Neue, dass es einen Klimawandel gibt und seine Geschwindigkeit zudem erheblich unterschätzt wird. Der immer stärker ansteigende Energiebedarf der Menschheit wird zum größten Teil durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe gedeckt, wodurch eine große

Menge klimafeindlicher Gase freigesetzt wird, die den Treibhauseffekt verstärken. Der aktuelle Sonderbericht des IPCC kommt zu dem Schluss, dass selbst bei einem sofortigen Entgegenlenken und der Senkung des globalen CO₂ Ausstoßes um 30 % bis 60 % (im Vergleich zum Jahr 2000) sich bis zum Jahr 2050 die globale Temperatur um 2,4° C bis 2,8° C erhöhen wird [IPC12]. Diesen Berichten ist umso mehr Bedeutung beizumessen, da in ihnen quasi nur das absolute Minimum wiedergegeben wird, auf das sich die ca. 800 beteiligten Autoren und Experten einigen konnten [Hoh11].

Dass eine solch immense Verringerung des CO₂-Ausstoßes nicht mit einem einzigen Kraftakt vollbracht werden kann, sondern ein Prozess mit vielen Schritten ist, liegt auf der Hand. Vor diesem Hintergrund ist es kein Wunder, dass das Einsparen von Energie und der effiziente Umgang mit ihr, ein wichtiges Thema in vielen verschiedenen Bereichen ist, so auch in der modernen Lichttechnik.

Die *International Energy Agency* hat in ihrem Bericht „*Lights Labour Lost*“ [IEA06] das Thema Licht und Energie umfassend bearbeitet und ebenso zahlreiche wie wichtige Daten herausgearbeitet. Unter anderem heißt es dort, dass im Jahr 2005 rund 19 % der weltweit erzeugten elektrischen Energie für Beleuchtungszwecke verwendet wurde. Die Erzeugung dieses Stroms kostete 234 Mrd. US-Dollar und verursachte die Emission von rund 1900 Mio. Tonnen CO₂. Diese Zahlenwerte sind so groß, dass man sie schwer erfassen kann. Es reicht aber zu realisieren, dass selbst kleine Einsparungen im niedrigen Prozentbereich global betrachtet einen Gegenwert von mehreren Milliarden US-Dollar und vielen Millionen Tonnen CO₂ haben.

Gewerbliche und öffentliche Gebäude haben einen Anteil von rund 45 % am insgesamt genutzten Licht. In durchschnittlichen Bürogebäuden wird rund 30 % bis 40 % der gesamten verbrauchten Energie für Beleuchtungszwecke aufgewendet [IEA10]. Durch den geschickten Einsatz von Tageslicht kann dieser Bedarf reduziert werden und zwar ganz einfach indem versucht wird, den Kunstlicheinsatz zu reduzieren. Das Tageslicht erzeugt die Grundbeleuchtung und wird punktuell oder bei Dunkelheit mit Kunstlicht ergänzt.

In verschiedenen Studien wurde untersucht, wie groß die Einsparungen durch den Tageslicheinsatz tatsächlich sind. Dabei wurden stets Energieeinsparungen nachgewiesen, deren genaue Höhe allerdings variiert – von 15 % [Ehl00] über 35 % [Ala11] bis zu 80 % [Bod02]. Die Hauptgründe für diese erheblichen Unterschiede liegen vermutlich in den speziellen örtlichen Gegebenheiten und in der jeweiligen Gebäudenutzung. Nichtsdestotrotz liegt selbst der niedrigste ermittelte Wert im zweistelligen Bereich. Bei verbreitetem Einsatz von Tageslichtsystemen dürfte sich ein Mittelwert im mittleren zweistelligen Bereich ergeben. Legt man einen Wert von etwa 30 % zugrunde, so ließen sich jährlich rund 250 Mio. Tonnen CO₂ einsparen, wenn allein in öffentlichen und Bürogebäuden verstärkt auf Tageslichtbeleuchtung gesetzt werden würde.

1.2.3 Wirtschaftlichkeit

Reine Energieersparnis und die „Rettung der Welt“ sind zwar gute Gründe für die Tageslichtnutzung, jedoch sind die meisten Entscheidungsträger keine reinen Idealisten, sondern sind in ihrer Planung (auch) an wirtschaftliche Kalkulationen gebunden. Daher ist es gut, dass Tageslichtsysteme auch auf wirtschaftlicher Seite überzeugende Argumente bieten.

Tageslicht, selbst wenn es von der Sonne kostenlos zur Verfügung gestellt wird, kommt nicht zum Nulltarif an seinen Bestimmungsort im Gebäude. Die Tageslichtplanung ist komplexer, zeitaufwendiger und demzufolge auch teurer als die Planung mit Kunstlicht, da viele zusätzliche Kriterien berücksichtigt werden müssen. Faktoren wie die geographische Lage, die klimatischen Verhältnisse, aber auch die umliegende Bebauung oder die Fensterausrichtung machen die Tageslichtverhältnisse eines Gebäudes einzigartig [Tre11], wodurch die Anwendung eines simplen Baukastenprinzips nicht möglich ist. Die Montage spezieller Systeme, wie zum Beispiel einer lichtlenkenden Verglasung, bedeutet ebenfalls einen zusätzlichen finanziellen Aufwand, sodass sich insgesamt eine erhöhte Grundinvestition in das Gebäude ergibt.

Höhere Kosten sind aus wirtschaftlicher Sicht natürlich ein Schreckgespenst. Sie werden aber in diesem Fall dadurch mehr als relativiert, dass die Baukosten bei der Betrachtung des gesamten Lebenszyklus⁴ eines Gebäudes weniger als 20 % der Gesamtkosten ausmachen [IEA10]. Die Betriebskosten eines Gebäudes liegen also effektiv um ein Vielfaches höher als die Baukosten, lassen sich jedoch durch den Einsatz energieeffizienter Tageslichtsysteme merklich senken. Somit amortisieren sich die Mehrkosten durch den Einsatz von Tageslichttechnik alleine durch eingesparte Energiekosten [Ehl00, Mue05].

Da die Nachfrage nach fossilen Brennstoffen weiter ansteigt und deren Verfügbarkeit sinkt, ist davon auszugehen, dass die Energiekosten zunehmend steigen werden. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie erwartet, dass in Deutschland auch aufgrund der Energiewende und der damit verbundenen verstärkten Produktion von Strom aus erneuerbaren Energien der Strompreis mittelfristig deutlich steigen wird [BMW12]. Vor diesem Hintergrund werden zukünftige Energieersparnisse auch aus wirtschaftlicher Sicht noch attraktiver.

Ein weiterer äußerst spannender Gesichtspunkt bei der Tageslichtnutzung ist die Möglichkeit der Steigerung der Produktivität. Durch diese könnte sich letztendlich ein deutlich größerer wirtschaftlicher Vorteil ergeben als durch die reine Energiekostensenkung. Die Produktivitätssteigerung selbst ist leicht feststellbar, allerdings ist der Nachweis schwierig, dass die Nutzung des Tageslichts auch die tatsächliche Ursache dafür ist. Ende der 90er Jahre wurden daher in den USA mehrere groß angelegte Studien zu diesem Thema durchgeführt.

Eine Studie wertete die Umsätze von 100 Filialen einer Einzelhandelskette aus [HMG99a]. Sämtliche Filialen waren nahezu identisch aufgebaut und unterlagen vergleichbaren Konditionen hinsichtlich Verkaufsfläche oder Standort. Sie unterschieden sich quasi nur in ihrer Beleuchtung: 66 Filialen verfügten über Dachfenster und somit über Tageslichtbeleuchtung und 34 nicht. Die Auswertung ergab, dass die Geschäfte mit Tageslichtnutzung im Schnitt um 40 % höhere Umsätze aufwiesen. Die Kunden beschrieben in Interviews die Geschäfte mit Dachfenstern als offener, sauberer und insgesamt freundlicher und nahmen deshalb im Schnitt sogar weitere Anfahrtswege für den Einkauf auf sich. Auch die Mitarbeiter waren zufriedener. Interessant ist an dieser Stelle auch, dass so gut wie niemand den genauen Grund für seine Einschätzung nennen konnte. Die Dachfenster sind von den meisten Kunden nicht einmal bewusst wahrgenommen worden.

Eine zweite Studie, die ebenfalls in den USA durchgeführt wurde, untersuchte die Lernerfolge von 21000 Schülern [HMG99b]. Dazu wurden 2000 Klassenräume auf ihre Tageslichtausleuchtung hin untersucht und in fünf Kategorien eingeteilt. Es zeigte sich, dass Schüler, deren Klassenräume die höchste Tageslichtversorgung aufwiesen, deutlich bessere Ergebnisse bei jährlichen Lernstandserhebungen erzielten im Vergleich zu denjenigen, die in Räumen der niedrigsten Tageslichtkategorie unterrichtet wurden. Die Studie kam zu dem Schluss, dass durch das Tageslicht die Schüler um 26 % besser lesen konnten und um 19 % besser in Mathematik waren¹. Die Gründe für die besseren Lernerfolge sahen die Forscher im erhöhten Wohlbefinden der Schüler. Im Einzelnen deckten sich die Argumente mit denjenigen aus Kapitel 1.2.1. Ergänzend wurde vermutet, dass sich die Konzentrationsfähigkeit der Schüler verbessert, wenn sie weniger durch das Flackern von Kunstlichtquellen gestört werden.

Diese Produktivitätsvorteile sind natürlich nicht eins zu eins auf andere Bereiche oder bestimmte Gebäude übertragbar. Allerdings wird der mögliche wirtschaftliche Vorteil, der mit einer Produktivitätssteigerung einhergeht, von der IEA auf 10 bis 100 Mal höher eingeschätzt, als die finanziellen Vorteile, die sich nur durch die Energiekostensenkung ergeben [IEA06]. Bei einer Produktivitätssteigerung von nur 0,5 % würde sich ein Tageslichtsystem bereits nach 3 Jahren amortisieren [Sch06].

1.2.4 Verbesserte Raumausleuchtung

Am Lehrstuhl für klimagerechte Architektur der TU Dortmund wurde in Musterbüros überprüft, ob sich mit lichtlenkenden Fassaden die Raumausleuchtung verbessern lässt

¹ Da diese Werte zunächst angezweifelt wurden, wurde die Studie anschließend drei weitere Jahre erneut ausgewertet [HMG02], um andere Gründe für die Lernstandsunterschiede auszuschließen. Dazu wurden zum Beispiel Faktoren wie die Qualität der Lehrer, das demografische Umfeld oder Details wie die Aussicht aus den jeweiligen Fenstern berücksichtigt. Diese Neuauswertung führte zu dem Resultat, dass der Lernstandsvorteil durch Tageslicht im Schnitt bei rund 21 % liegt.

[Mue05]. Dazu wurde die Raumausleuchtung bei Nutzung verschiedener Sonnenschutzvorrichtungen und Lichtlenksysteme messtechnisch erfasst.

In drei Räumen wurden die Fenster mit einer konventionellen Jalousie, einer lichtlenkenden Jalousie, bei der der obere Teil der Lamellen so eingestellt werden kann, dass das Licht in den Raum gelenkt wird, und ein lichtlenkendes Oberlicht (Lumitop, siehe auch Kap. 3), welches in Kombination mit einer konventionellen Jalousie verwendet wird (Bild 1.4 (a)), ausgestattet. Gemessen wurde die Beleuchtungsstärke in Höhe der Arbeitsebene in Abhängigkeit von der Raumtiefe. Die Messung erfolgte mittags an einem Sommertag, bei direkt einfallendem Tageslicht, wobei die verschiedenen Vorrichtungen jeweils so eingestellt wurden, dass das direkte Sonnenlicht im unteren Teil des Fensters nach außen reflektiert wird, um Blendung zu vermeiden. Die Ergebnisse sind in (b) dargestellt.

Durch die Abschattung mit der konventionellen Jalousie wird bereits nahe am Fenster die empfohlene Mindestbeleuchtungsstärke von 300 lx (DIN EN 12464) unterschritten. Bei Verwendung der lichtlenkenden Jalousie wird ab etwa 3 m Raumtiefe dieser Wert unterschritten. In beiden Fällen ist folglich der Einsatz künstlicher Beleuchtung notwendig. Demgegenüber steht die deutlich höhere Beleuchtungsstärke, die mit dem Lichtlenksystem erzielt wird. In der Nähe des Fensters werden über 1000 lx erreicht und auch bei einer Raumtiefe von 5 m bleibt eine ausreichende Beleuchtungsstärke erhalten. Die Verbesserung der Raumausleuchtung durch Nutzung von Tageslichtlenksystemen konnte somit nachgewiesen werden.

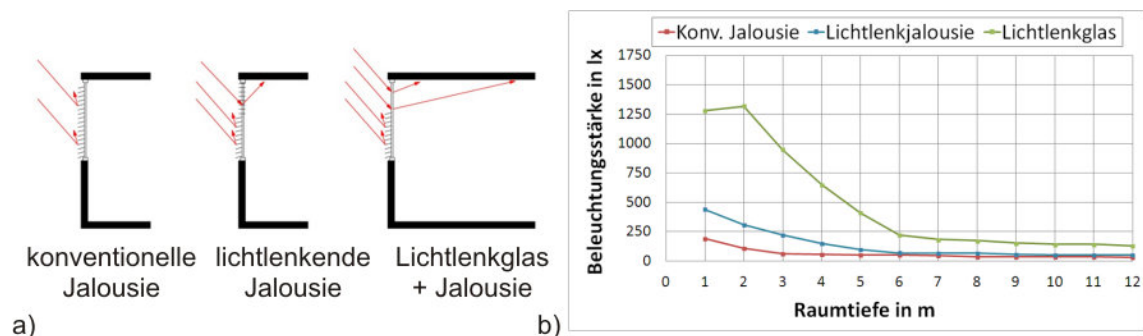


Bild 1.4: Vergleich der Beleuchtungsstärken in einem Büroraum in Dortmund für drei Tageslicht- / Sonnenschutzsysteme: a) Konventionelle Jalousie, Jalousie mit lichtlenkenden Lamellen im oberen Bereich und lichtlenkendes Glas im oberen mit Jalousie im unteren Bereich. b) Beleuchtungsstärke über den Fensterabstand am 6.7., 12 Uhr, Verschattung geschlossen [Mue05].

1.3 Das Beleuchtungskonzept

Die obigen Vorteile der Tageslichtbeleuchtung können im Rahmen diverser Konzepte genutzt werden, wobei jedes Konzept andere Anforderungen an ein Lichtlenksystem stellt.

In dieser Arbeit wird das Konzept der Tageslicht*lenkung* verfolgt, welches auch unter dem Begriff „sunlighting“² bekannt ist. Bild 1.5 (a) zeigt den Querschnitt eines Raumes, der mit diesem Beleuchtungskonzept ausgeleuchtet wird: Die Fassade des Raumes wird direkt vom Sonnenlicht beleuchtet. Im Bereich des Oberlichts des Fensters befindet sich ein Lichtlenksystem, welches das einfallende Licht in die Tiefe des Raumes an die Decke lenkt. Dort wird es diffus gestreut und leuchtet damit den Raum optimal aus.

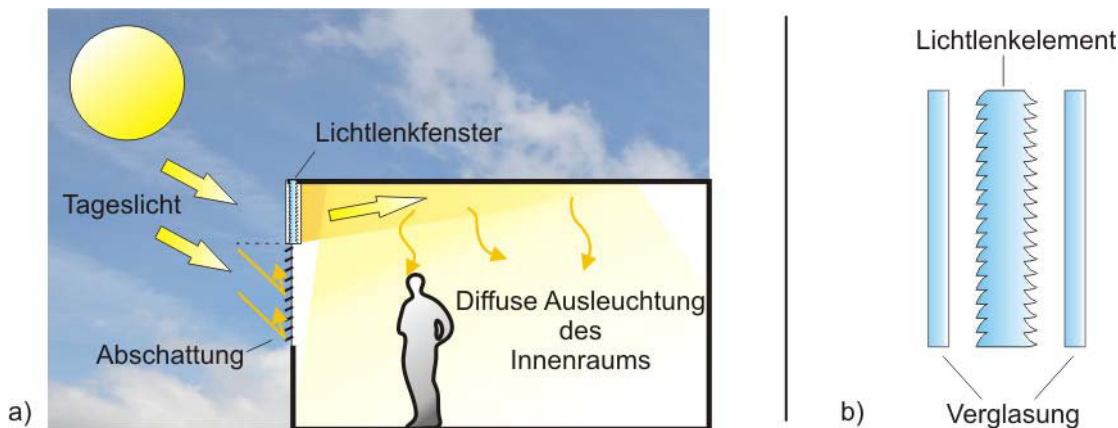


Bild 1.5: a) Prinzip der Beleuchtung eines Raumes mit Hilfe eines Tageslichtlenksystems. b) Das lichtlenkende System befindet sich als Mittelscheibe in einer Dreischeibenverglasung.

Da das System oberhalb der Sichtlinie der Raumnutzer eingebaut wird und der untere Bereich des Fensters bei Bedarf mit Jalousien abgeschattet werden kann, werden die Raumnutzer vor etwaiger Blendung geschützt. Das lichtlenkende Element ersetzt die mittlere Scheibe einer Dreischeibenverglasung (b), wodurch es gut vor äußeren Einflüssen geschützt wird. Ebenfalls arbeitet das System vollkommen passiv. Es sind keine defektanfälligen Aktoren oder Sensoren vorhanden. Abgesehen von der üblichen Fensterreinigung ist also keine spezielle Wartung erforderlich.

² Manchmal wird auch der Begriff „daylighting“ verwandt. „Sunlighting“ bezieht sich gezielt auf die Nutzung direkten Sonnenlichts, während daylighting vorwiegend den Einsatz diffusen Tageslichts bezeichnet.

1.4 Struktur der Arbeit

Die folgende Arbeit beschreibt die Entwicklung des mikrostrukturierten Lichtlenksystems für dieses Beleuchtungskonzept. In Kapitel 2 wird zunächst ein Überblick über den *Stand der Technik* der Tageslichtbeleuchtung gegeben. Dieser soll aufzeigen, wie andere Forschungsgruppen dieser Thematik begegnen, welche Vor- und Nachteile die in diesem Zusammenhang entwickelten Technologien bieten und welche Schlüsse man daraus ziehen kann.

Die eigentliche Entwicklungsarbeit wird in den Kapiteln 3 und 4 vorgestellt. Hier werden die in Frage kommenden *Herstellungsprozesse* analysiert und dem Leser Kenntnisse über Prozess- und Werkstofftechnik übermittelt. Anknüpfend daran werden die *Simulationen* beschrieben, mit denen eine geeignete und technologisch umsetzbare Lichtlenkconfiguration identifiziert wurde.

Im Forschungsprozess erfolgte anschließend die Erprobung des Herstellungsprozesses und des simulierten Layouts. Es wurden zahlreiche Prototypen hergestellt, deren Qualität optisch untersucht wurde. Ihre lichtlenkenden Eigenschaften wurden mit Hilfe eines goniometrischen Messaufbaus ermittelt und charakterisiert. Die *Untersuchungsergebnisse* befinden sich in Kapitel 5.

Auf Grundlage aller gewonnenen Erkenntnisse werden in Kapitel 6 *optionale Möglichkeiten zur Systemmodifikation* aufgeführt, angefangen bei bedarfsorientierten Veränderungen der Lichtlenkeigenschaften bis hin zum innovativen Einsatz als Kunstlichtquelle.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden dann alle Ergebnisse in einem eigenen Kapitel (Kap. 7) einem *direkten Vergleich* mit einem etablierten Referenzsystem unterzogen.

Abschließend folgen eine *Zusammenfassung und ein Ausblick* (Kap. 8). Es werden Empfehlungen für die mögliche Weiterarbeit gegeben, um die Chancen für einen Markterfolg der Entwicklung zu erhöhen.

2 Stand der Technik

Es gibt zahlreiche Möglichkeiten die vielfältigen Vorteile der Tageslichtbeleuchtung zu nutzen. Dies ist auch erforderlich, denn wie bereits erwähnt sind die Voraussetzungen in jedem Gebäude einzigartig [Tre11]. Ein Lichtplaner wird also zu Beginn seiner Planung eine vollständige Tageslichtanalyse durchführen, auf deren Basis er sein Konzept erstellt. Dazu wird er eine Reihe von Fragestellungen klären, zum Beispiel: In welchem Klima befindet sich das Gebäude? Wie sind Gebäude- und Raumgeometrie beschaffen? Wozu wird jeder einzelne Raum genutzt und welche Beleuchtungsstärke wird dort benötigt? Wie groß sind die Fenster und wie sind sie ausgerichtet? Wie groß ist der Tageslichtfaktor unter Berücksichtigung von umliegender Bebauung und dem Sonnenverlauf? Zu welchen Zeiten kann das Tageslicht genutzt werden und wann muss vor Blendung geschützt sowie Kunstlicht hinzugeschaltet werden?

Bereits diese grundlegenden Fragen machen deutlich, dass es nicht ein einzelnes System geben kann, mit dem alle Tageslichtkriterien gleichermaßen gelöst werden können. Ein Lichtplaner bedient sich also aus einem Fundus an Konzepten und Systemen, die er funktionspezifisch miteinander kombiniert.

In diesem Kapitel sollen nun einige dieser Systeme, die dem Planer als Werkzeug dienen, vorgestellt werden. Es wird jedoch keine vollständige Auflistung angestrebt, vielmehr soll ein Überblick gegeben werden, welche Konzepte und Ansätze es gibt und in welche Klassen man Tageslichtsysteme (Kap. 2.1) daher unterteilen kann. Aus jeder Klasse wird exemplarisch ein System hervorgehoben. Systeme, die dem hier vorgestellten, mikrostrukturierten System ähneln, werden hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile detaillierter untersucht (Kap. 2.5).

2.1 Klassifizierung von Tageslichtsystemen

Eine umfangreiche Übersicht mit Beschreibungen sehr vieler Tageslichtsysteme befindet sich im „Source Book on Daylighting Systems and Components“ [IEA00], welches im Rahmen eines internationalen Projekts der International Energy Agency angefertigt wurde und den Stand der Tageslichttechnik im Jahr 2000 hervorragend abbildet. Eine ebenfalls hilfreiche Übersicht bietet ein Skriptum des Fachgebiets Lichttechnik der TU Berlin zum Thema „Beleuchtungsplanung mit Tageslicht“ [Kaa06]. Dort findet sich auch eine eingängige, anschauliche und systematische Klassifizierung aller Systeme (siehe Bild 2.1). Bericht und Skriptum dienen als Grundlage für dieses Kapitel und werden um einige Entwicklungen ergänzt, die in den letzten Jahren neu hinzugekommen sind.

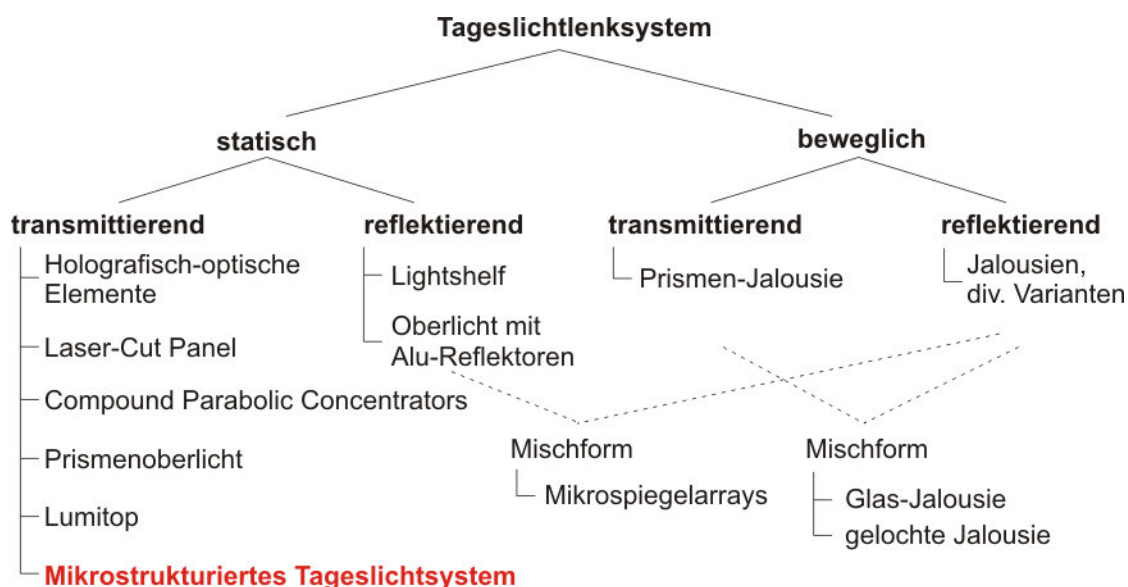


Bild 2.1: Klassifizierung von Tageslichtlenksystemen (Bild erstellt in Anlehnung an [Kaa06]).

2.1.1 Klassifizierung: Bewegliche Systeme

Für den Planer am bedeutsamsten ist die Unterscheidung eines Tageslichtsystems in beweglich oder statisch.

Bewegliche Systeme haben grundsätzlich den Vorteil, dass sie auf das vorliegende Tageslichtangebot eingestellt werden können und sind daher prinzipiell dazu geeignet bei einem Überangebot an Licht dieses durch Abschattung zu reduzieren oder bei bedecktem Himmel eine möglichst hohe Transmission zu ermöglichen. Allerdings führen falsch eingestellte Systeme auch zu Blendung oder zu einer unzureichenden Raumausleuchtung. Aus diesem Grund ist die Frage der optimalen Einstellung essentiell für die Funktionalität eines beweglichen Systems. Einige Konzepte setzen auf die automatisierte Verstellung, andere auf eine manuelle Steuerung und wälzen dieses Problem,

auch aus Kostengründen, einfach auf den Raumnutzer ab. Beides hat seine Vor- und Nachteile.

Die Automatisierung erfordert in jedem Falle den Einsatz zusätzlicher Technik. Ein typisches Regelsystem kann wie folgt ausgelegt sein: Ein Sensor misst die Helligkeit im Raum und sendet den Wert an einen Regler. Dieser vergleicht ihn mit einem Sollwert und im Falle einer größeren Abweichung wird einem Stellmotor signalisiert, das bewegliche System so zu verstellen, dass die Lichtverhältnisse wieder dem Sollwert entsprechen. Andere Systeme bestimmen die Position der Sonne und führen die optisch wirksamen Elemente entsprechend nach. Ein kritischer Punkt bei allen geregelten Systemen ist stets die Frage, ob die gemessenen Sensorwerte überhaupt mit den Bedürfnissen der Raumnutzer korrespondieren. Naturgemäß variieren diese Bedürfnisse, der Eine mag es schließlich gerne etwas heller, der Andere eben nicht. So kommt es vor, dass das System aus der subjektiven Sicht des Raumnutzers stets „falsch“ eingestellt wird. Sollte nun ein Raumnutzer nicht die Möglichkeit einer manuellen Kontrolle über das System haben, so wird er sich vom System gegängelt fühlen. Das führt dann zu einer Unzufriedenheit, die so intensiv werden kann, dass der Raumnutzer das System sabotiert, indem er beispielsweise Sensoren abklebt oder Motoren stilllegt [Sha09].

Bewegliche Tageslichtsysteme, die nur auf manuelle Justierung ausgelegt sind, haben meistens eine entscheidende Schwachstelle: den Raumnutzer. Der typische Raumnutzer hat in Regel nicht die Absicht seine Arbeit laufend zu unterbrechen, um das Tageslichtsystem zu optimieren. Häufig fehlt ihm auch das nötige Wissen dazu. Zudem ist das Tageslichtangebot auch nicht immer eindeutig in die Zustände „bedeckt“ oder „sonnig“ unterscheidbar. Bei wechselnden Lichtverhältnissen, zum Beispiel aufgrund von Wolken, müsste der Raumnutzer sehr häufig nachjustieren, was er wohl ziemlich bald resigniert aufgeben würde. Die einfache und sinnvolle Lösung in diesem Fall: maximale Abschattung und Einschalten von Kunstlicht.

Die bisher angesprochenen Schwierigkeiten treten selbst bei der Nutzung voll funktionsfähiger Systeme auf. Bewegliche Tageslichtsysteme haben aber prinzipiell eine erhöhte Ausfallwahrscheinlichkeit, da Drehpunkte und Gelenke einen stärkeren Verschleiß aufweisen als starre Bauteile. Die höhere Komplexität durch die Automatisierung birgt ebenfalls ein höheres Ausfallrisiko, erst recht wenn der Raumnutzer die Technik sabotiert. So ist die volle Funktionalität mit geräuschlosen Verstellvorgängen längst nicht immer garantiert. In einigen Fällen können schlecht gewartete Systeme letztendlich dazu führen, dass ständig wechselnde Lichtverhältnisse, surrende Motoren, quietschende Jalousien, die vielleicht sogar unschön verklemmt sind, den Raumnutzer schlichtweg nur noch nerven. Er wird dann sicherlich lieber ganz auf die Nutzung der Tageslichtbeleuchtung verzichten.

Vorteile beweglicher Systeme:

- Variabilität: Abschattung bei Direktlicht, ansonsten hohe Transmission und Lichtlenkung
- Durchsicht bei Nichtgebrauch

Nachteile beweglicher Systeme:

- Nachführung zwingend erforderlich
- Automatisierte Regelvorgänge können stören
- Hoher Wartungsbedarf

2.1.2 Klassifizierung: Statische Systeme

Statische Lichtlenksysteme werden starr verbaut. Sie verändern ihre Position und Ausrichtung nach der Montage nicht mehr. Aus diesem Grund sind sie meist sehr stabil oder besonders gut geschützt vor äußeren Einflüssen, sodass sie wenig Wartung bedürfen. Da keine aktive Verstellung des Systems unternommen wird, sind die Wechsel der Lichtverhältnisse nur vom natürlichen Tageslichtangebot abhängig. Solange keine erheblichen Beeinträchtigungen des Nutzers durch das Tageslicht auftreten, werden die statischen Tageslichtsysteme meist gar nicht bewusst wahrgenommen.

Die fehlende Nachführung der Systeme führt dazu, dass sie nicht auf einen bestimmten Arbeitspunkt hin optimiert werden können. Sie müssen also so konzipiert werden, dass sie für jedes Lichtangebot stets hinreichende Eigenschaften aufweisen. Zudem muss darauf geachtet werden, dass zu keinem Zeitpunkt ein kritischer Zustand auftritt, durch den beispielsweise der Raumnutzer stark geblendet werden würde.

Statische Systeme gehen daher hinsichtlich ihres Lichtlenkverhalten immer einen Mittelweg, der in Abhängigkeit von den Tageslichtverhältnissen mal mehr oder weniger effizient ausfällt. In ihrer Funktionsweise sind sie deutlich weniger flexibel als bewegliche Systeme und können nicht vom Raumnutzer beeinflusst werden. Ihre Anwendung bedarf daher eines besonders genauen Konzepts seitens des Lichtplaners.

Vorteile statischer Systeme:

- Keine Nachführung notwendig
- Unauffällige Wirkungsweise
- Geringer Wartungsaufwand

Nachteile statischer Systeme:

- Keine Optimierung für einen bestimmten Arbeitspunkt möglich
- Lichtlenkeigenschaften beruhen auf Kompromissen
- Anwendung ist eng an ein Konzept gebunden

2.1.3 Klassifizierung: transmittierend - reflektierend

Ein weiteres Klassifizierungsmerkmal für Tageslichtsysteme ist die Technik der Lichtbeeinflussung. Transmittierende Systeme bestehen aus transparenten Elementen, die das Licht bei seinem Weg mittels Brechung und Totalreflexion¹ lenken. Reflektierende Systeme nutzen spiegelnde Flächen zur Lichtlenkung.

In der Regel sind transmittierende Systeme heller, da Streulicht das System weitestgehend ungehindert durchdringt und in den Raum gelangt. Mit reflektierenden Systemen lässt sich eine größere Abschattung erzielen.

In Verbindung mit den oben genannten Merkmalen beweglich und statisch ergeben sich insgesamt vier Gruppen von Tageslichtsystemen (siehe Bild 2.1). Aus jeder Gruppe wird im Folgenden ein System exemplarisch vorgestellt.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte mikrostrukturierte Tageslichtsystem wird fest im Oberlichtbereich eingebaut und ist daher statisch. Da es das Licht transmittiert und mit Hilfe von Totalreflexion und Brechung seinen Weg ändert, ist es transmittierend. Demnach gehört es zur Gruppe der statisch - transmittierenden Systeme, der in dieser Arbeit besondere Betrachtung geschenkt wird. Die Systeme dieser Gruppe werden auf ihre Vor- und Nachteile hin gesichtet, sodass auf dieser Basis die Einschätzung gegeben werden kann, ob für ein mikrostrukturiertes System Entwicklungsbedarf besteht und auf welche Punkte bei seiner Entwicklung besonders geachtet werden sollte.

Neben den hier klassifizierten Systemen gibt es noch weitere Tageslichtsysteme, die beispielsweise mit Sonnenkollektoren und Faserleitungen oder mit Spiegelsystemen das Sonnenlicht in Räume transportieren. Da sich ihre Technologie sehr stark von der hier vorgestellten unterscheidet, ist eine nähere Untersuchung nicht von Interesse.

¹ Als Totalreflexion bezeichnet man die verlustfreie Reflexion von elektromagnetischen Wellen an der Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlicher optischer Dichte. Im Zusammenhang mit der Strahlverfolgung wird die Totalreflexion in Kapitel 4 genauer erläutert.

2.2 Beweglich - reflektierend: Jalousien

Die Klasse der beweglich - reflektierenden Systeme wird dominiert von Jalousien. Sie sind wohl auch das bekannteste und am weitesten verbreitete System zur Regulierung des Tageslichts. Jalousien gibt es in vielen verschiedenen Varianten, die sich hinsichtlich ihrer Ausführung stark unterscheiden. Der primäre Verwendungszweck von Jalousien ist der Sonnenschutz. Einige Spezialjalousien haben aber auch die Tageslichtlenkung und -nutzung als Ziel.

Da die Technologie jedem bekannt sein dürfte, benötigen konventionelle Jalousien an dieser Stelle keiner umfangreichen technischen Beschreibung. Wichtigstes Kennzeichen sind ihre meist aus Aluminium bestehenden, leicht gewölbten Lamellen, die so in Schnüre eingehängt werden, dass sie im oberen Teil des Fensters aufgestapelt sind und über die gesamte Höhe der Verglasung herabgelassen werden können. Durch den variablen Anstellwinkel der Lamellen werden Sonnenschutz und Durchsicht durch das Fenster beeinflusst.

Jalousien können für die Außenanwendung, für den Innenraum oder für die Anbringung im Scheibenzwischenraum vorgesehen werden, was Auswirkungen auf Parameter wie Breite oder Oberflächenbeschaffenheit (z.B. eloxiert, lackiert oder verspiegelt) hat. Die jeweilige Anbringungsvariante bietet einige Vor- und Nachteile: Außenjalousien, die sogenannten Raffstores, sind im Gegensatz zu Innenjalousien dazu geeignet die thermischen Einflüsse auf den Innenraum zu begrenzen. Jedoch werden sie auch deutlich stärker beansprucht, da sie den Witterungseinflüssen ausgesetzt sind. Sie müssen daher robuster ausgelegt werden und bedürfen einer Führungsschiene, um sie vor Beschädigung durch Wind zu schützen. Im Scheibenzwischenraum angebrachte Jalousien sind sehr gut vor Witterungseinflüssen geschützt, allerdings behindert diese Kapselung im Falle eines Defekts die schnelle und einfache Reparatur bzw. Wartung.

Die Bewegung von Jalousien kann manuell oder mittels Motor erfolgen, vereinzelt werden auch vollständige Regelsysteme verwendet. Für Systeme mit Jalousien gelten daher die gleichen Problempunkte, wie sie allgemein für bewegliche Systeme gelten (siehe 2.1.1).

Neben den konventionellen Jalousien gibt es auch Spezialjalousien, die hinsichtlich der Parameter Blendschutz, Durchsicht oder verbesserte Raumausleuchtung optimiert sind. Bei diesen Weiterentwicklungen verfügen die Aluminiumlamellen über Sonderformen, die sich von der üblichen Wölbung unterscheiden und die in Abhängigkeit vom Sonnenstand, das Tageslicht reflektieren oder transmittieren. Bild 2.2 zeigt eine Jalousie mit sogenannten RetroLux-Lamellen [Koe10], die das Licht hoher Sonnenstände nach außen reflektieren und das Licht flacher Sonnenstände an die Raumdecke lenken. Diffuses Licht wird ebenfalls weitestgehend transmittiert. Bei dieser Anordnung liegt die senkrechte Durchsicht bei etwa 76 %.

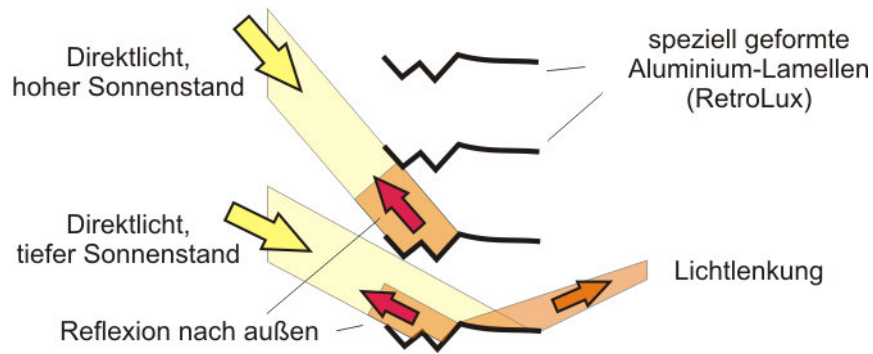


Bild 2.2: Die speziell geformten Aluminiumlamellen einer Lichtlenkjalousie (RetroLux) reflektieren das Licht hoher Sonnenstände nach außen und lenken das Licht tiefer Sonnenstände an die Raumdecke um (Bild erstellt in Anlehnung an [Koe10]).

Eine Mischform zwischen beweglich - transmittierend und beweglich - reflektierend bilden gelochte Jalousien, bei denen ein Teil des Tageslichts durch in die Lamellen gestanzte Löcher unbeeinflusst in den Raum transmittiert wird. Auf diese Weise soll die Beleuchtungsstärke, die oftmals bei konventionellen Jalousien als zu niedrig erachtet wird, global erhöht werden.

2.3 Beweglich - transmittierend: Prismen-Jalousie

Die Klasse der beweglich - transmittierenden Tageslichtsysteme hat nur einen einzelnen Vertreter: die Prismen-Jalousie. Diese verfügt über besonders breite Glaslamellen (ca. 20 cm bis 30 cm breit), die auf der Unterseite mit einer Prismenstruktur versehen sind. Licht, das senkrecht zur Oberfläche in die Lamelle eintritt, wird von der umseitigen Prismenstruktur mittels Totalreflexion zurück nach außen gelenkt (siehe Bild 2.3 (a)). Diffuses Licht verändert bei der Transmission durch die Lamelle zwar seinen Weg, gelangt aber noch zu rund 60 % in den Innenraum.

Bild 2.3 (b) zeigt die Prismen-Jalousie in der Außenanwendung. Hier wird deutlich, dass die Glaslamellen nicht nur einen Sonnenschutz bieten, sondern ebenfalls dazu geeignet sind, diffuses Licht aus sehr hohen Himmelsrichtungen einzufangen und in den Innenraum zu lenken, wodurch sich letztendlich die Gesamtbeleuchtung erhöht. Das System kann mit einer (perforierten) Jalousie, die im Innenraum angebracht ist, kombiniert werden, um die Lenkung des transmittierten Lichts zu optimieren. Dies ist oftmals erforderlich, da der transparente Sonnenschutz der Prismen-Jalousie nicht ausreicht und das transmittierte Licht als zu hell und blendend empfunden wird [Kaa06].

Ein Vorteil der Prismen-Jalousie ist, dass selbst bei geschlossenem Sonnenschutz eine gewisse Sichtverbindung nach außen erhalten bleibt. Von Nachteil ist, dass die Lamellen stetig der Sonne nachgeführt werden müssen und dass nur bei regelmäßiger und häufiger Reinigung die effiziente Funktionsweise gewährleistet bleibt.

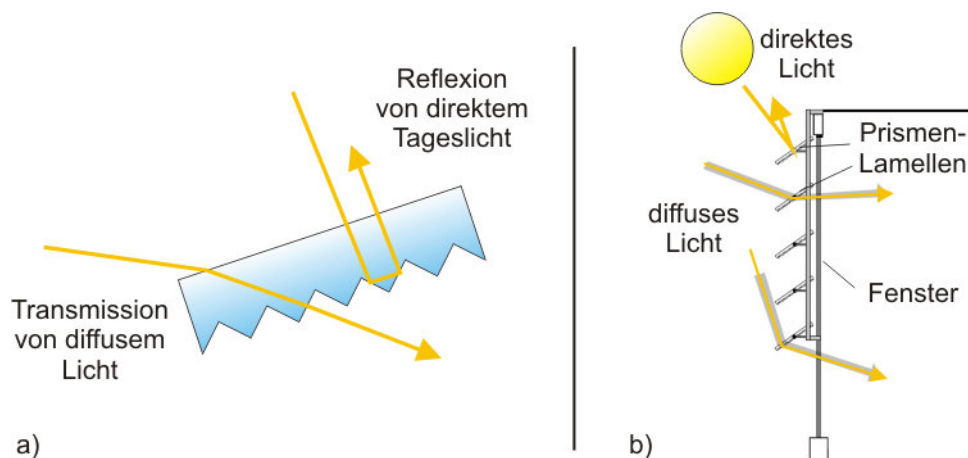


Bild 2.3: a) Funktionsweise der Prismen-Jalousie: Senkrecht einfallendes Licht wird von den Prismen nach außen reflektiert. b) Anwendungsbeispiel: Die Prismenlamellen werden der Sonne so nachgeführt, dass sie senkrecht zu ihr stehen und damit das direkte Tageslicht reflektieren. Diffuses Licht wird durch die Prismen transmittiert (Bild erstellt in Anlehnung an [Kaa06]).

2.4 Statisch - reflektierend: Lightshelf

Lightshelves sind in etwa horizontal ausgerichtete flache Elemente, die oberhalb der Kopfhöhe im Außenbereich eines Fensters fest angebracht werden. Von dort aus reflektieren sie das Sonnenlicht in den Raum und schatten gleichzeitig den unteren Teil der Verglasung ab (siehe Bild 2.4). Den Lightshelves ähnelnde Vorrichtungen wurden bereits zur Zeit der Pharaonen in Ägypten eingesetzt [IEA00].

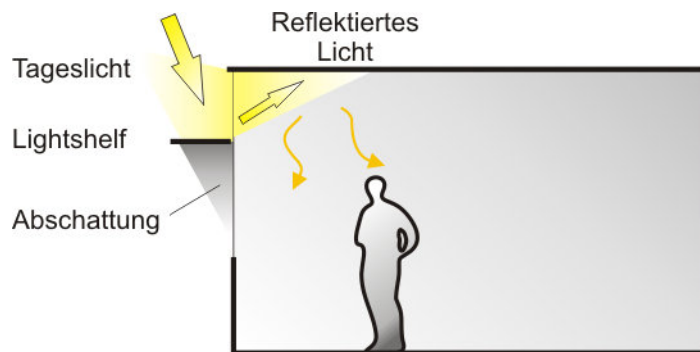


Bild 2.4: Lightshelves sind horizontal ausgerichtete Elemente, die oberhalb der Kopfhöhe angebracht werden und das Sonnenlicht in den Raum spiegeln. Der unterhalb des Lightshelfs befindliche Teil der Verglasung wird dabei abgeschattet.

Wegen ihrer Bauform sollten Lightshelves bereits zum Zeitpunkt der Planung der Fassade berücksichtigt werden, um sie in die Architektur zu integrieren. Zudem sollte die Form und genaue Ausrichtung eines Lightshelfs auf jeden einzelnen Raum angepasst werden, um ein optimales Beleuchtungsergebnis zu erzielen. Nachträglich installierte Lightshelves würden einem Gebäude einen ungewohnten und vermutlich unschönen Anblick verleihen.

Der Einsatz von Lightshelves lohnt sich nur in Gebieten mit einem besonders hohen Angebot an direktem Tageslicht, da sie bei bedecktem Himmel die Beleuchtungssituation signifikant verschlechtern [IEA00].

2.4.1 Mischform: Mikrospiegelarrays

Eine interessante, jedoch technologisch äußerst aufwendige Anwendung sind Mikrospiegelarrays.

Mikrospiegelarrays bestehen aus vielen metallischen Spiegeln mit einer Fläche von jeweils etwa $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ die feldförmig auf einem Glassubstrat angeordnet sind (siehe Bild 2.5 (a)). In Abhängigkeit des Tageslichtangebots können die Spiegel elektrostatisch angewinkelt werden und somit das einstrahlende Licht an die Raumdecke lenken oder nach außen reflektieren [Vie09]. Für das bloße Auge des Menschen sind die

einzelnen Spiegel und ihre Auslenkung nicht erkennbar. Sichtbar ist einzig eine unterschiedlich starke Trübung der Scheibe.

Da die mikroskopischen Spiegelflächen zwar bewegt werden, das makroskopische Element, auf welchem sie sich befinden jedoch starr angebracht wird, stellen Mikrospiegelarrays eine Mischklasse zwischen beweglich und statisch dar.

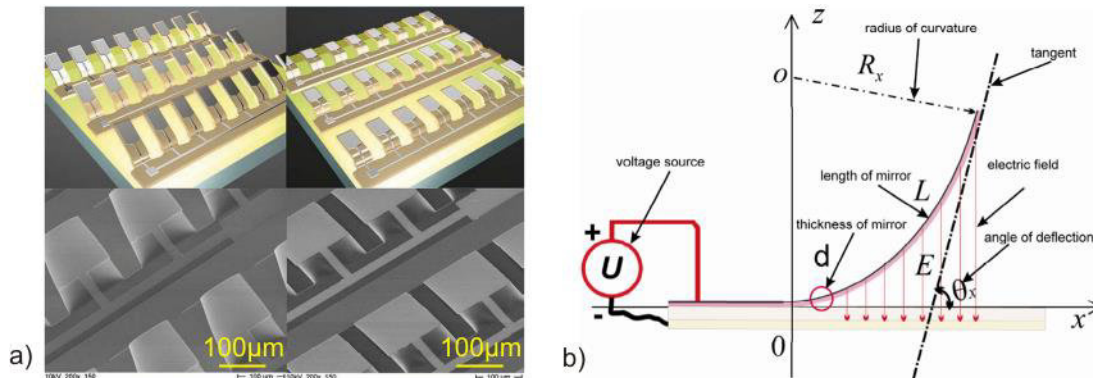


Bild 2.5: a) Aufnahmen von Mikrospiegelarrays (Bild aus [Vie09]). b) Physikalisches Prinzip der Auslenkung: Das elektrostatische Feld zwischen Spiegelelektrode und transparenter ITO-Schicht bewirkt die Auslenkung (Bild aus [Li09]).

Die Mikrospiegeltechnologie entstammt der Anwendung im Projektor (sog. digital micromirror device, DMD) bei der jeder Spiegel jeweils für die Beleuchtung eines einzelnen Bildpunktes bzw. Pixels verantwortlich ist. Das physikalische Prinzip der Auslenkung wird in Bild 2.5 (b) dargestellt: Die metallischen Spiegel und die ITO-Schicht bilden Elektrode und Gegenelektrode. Durch Anlegen eines elektrischen Feldes zwischen den Elektroden wird der Spiegel ausgelenkt. ITO (Indiumzinnoxid) ist ein halbleitender Stoff, der aufgrund seiner hohen Transparenz im sichtbaren Bereich häufig für Displaytechnologien eingesetzt wird.

Im Gegensatz zur Projektoranwendung sollen die Spiegel beim Tageslichtsystem nicht einzeln, sondern feldweise ausgelenkt werden. Auf diese Weise gestaltet sich die Ansteuerung einfacher und kostengünstiger.

Dennoch ist der Herstellungsprozess im Vergleich zu anderen Tageslichtanwendungen äußerst komplex. Die Spiegel selbst bestehen aus einer dünnen Metallfolie die lithografisch strukturiert und mit Opferschichttechnik freigestellt wird. Im gesamten Herstellungsprozess werden insgesamt fünf Depositionsschritte und drei Fotolithografie-schritte benötigt. Demzufolge ist die kostengünstige Herstellung im Fensterformat derzeit noch nicht möglich [Vie09].

2.5 Statisch - transmittierende Systeme

Das in dieser Arbeit entwickelte mikrostrukturierte Lichtlenksystem gehört der Gruppe der statisch - transmittierenden Systeme an. Daher werden aus dieser Gruppe mehrere Technologien vorgestellt und bewertet.

2.5.1 Statisch - transmittierend: holografisch-optische Elemente (HOE)

Verfahren, die den Wellencharakter des Lichts ausnutzen, werden unter dem Begriff „Holografie“ zusammengefasst. Ein Beispiel dafür ist der Beugungseffekt, den Licht an sogenannten holografischen Gittern, also sehr engen Linien deren Abstand kleiner oder gleich der Wellenlänge λ des Lichts ist, erfährt. Holografisch-optische Elemente (HOE) nutzen diesen Beugungseffekt um Licht zu lenken.

Die Herstellung der holografischen Gitter geschieht in einem Lithografieverfahren. Ein Glassubstrat wird mit einer dünnen Metallschicht versehen und mit einer Fotolackschicht maskiert. Das Licht eines Belichters wird mit einem teildurchlässigen Spiegel aufgeteilt und so auf dem Substrat wieder zusammengeführt, dass ein Gangunterschied zwischen den Lichtwellen entsteht. Dieser führt zu einem linienförmigen Interferenzmuster in der Lackschicht. Nach der Entwicklung liegt daher das darunterliegende Metall linienförmig frei und kann geätzt werden. Abschließend wird eine Schutzfolie auf das Gitter laminiert.

In einem anderen Herstellungsverfahren dient eine von einer Polymerfolie getragene dichromatische Gelatineschicht als HOE. Träger und HOE-Schicht werden gemeinsam zwischen zwei Glasscheiben laminiert, sodass sie vor Umwelteinflüssen geschützt werden [Roe04, Wag04].

Die resultierenden Gitter sind äußerst dünn, sodass nur der eigentliche Träger (das Glassubstrat) die Dicke des Systems definiert, was einer der Vorteile von HOEs ist. Ein weiterer Vorteil ist, dass eine Durchsicht durch das System möglich ist.

Bild 2.6 (a) zeigt ein Abschattungssystem auf Basis eines HOE. Das direkt einfallende Sonnenlicht wird durch die Beugung auf eine Reflektorschicht gelenkt, die das Licht nach außen spiegelt. Diffuse Lichtanteile gelangen an den Reflektoren vorbei ins Rauminnere. Im Bild ist der Fall für senkrecht einfallendes Tageslicht dargestellt, bei dem der optimale Wirkungsgrad erreicht wird. Trifft das Licht nicht senkrecht zur Oberfläche ein, so wird es zwar dadurch stärker gebeugt, dass es eine niedrigere Gitterkonstante „sieht“ [Eic93], allerdings reicht dieser Effekt nicht dazu aus, den ungünstigeren Lichteinfall vollständig zu kompensieren. Damit benötigen HOEs also eigentlich eine Nachführung, damit die Effizienz des Systems nicht sinkt.

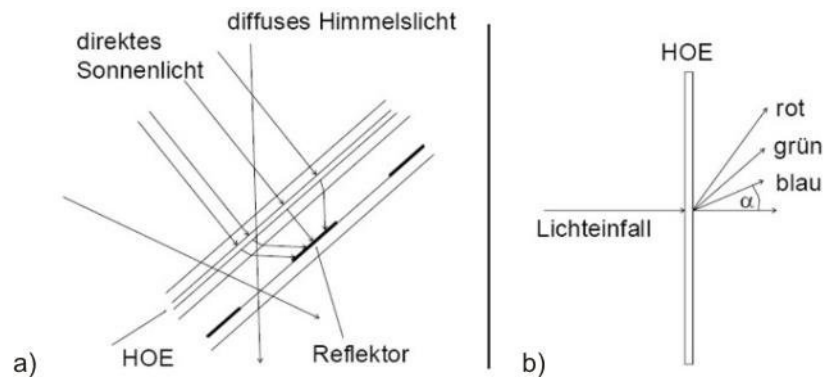


Bild 2.6: a) Das holografisch-optische Element (HOE) lenkt direktes Sonnenlicht auf einen Reflektor, während diffuses Licht durch die Platte transmittiert wird. b) Die Beugung am HOE ist abhängig von der Wellenlänge, sodass einfallendes (weißes) Tageslicht in seine farbigen Bestandteile aufgespalten wird (Bilder erstellt in Anlehnung an [Kaa06]).

Somit ist der Lichtlenkwirkungsgrad eine Schwachstelle der HOE. Simulationen und experimentelle Erprobungen zur Beurteilung der Lichtlenkeffizienz zeigten mit einem Anteil von rund 35 % nach oben gelenkten Lichts eher schwache Ausbeuten [Pap96]. Da die Beugung am optischen Gitter stark von der Wellenlänge abhängt, wird das weiße Licht in seine farbigen Bestandteile aufgespalten (siehe Bild 2.6 (b)), sodass sich Regenbogeneffekte im Rauminnern ergeben. Maßnahmen, um diesen Effekt zu reduzieren, führen zu einer weiteren Verschlechterung des Wirkungsgrads auf einen Wert von rund 15 %.

Bei Langzeitversuchen zeigten sich Probleme mit der Haltbarkeit der HOE [Sto01]. Durch Versagen der Lamination des Gitters korrodierte beispielsweise das Metall. Die HOE sahen dadurch nicht nur angelaufen und unschön aus, sondern waren ebenso funktionslos. Der durch den Herstellungsaufwand recht hohe Preis verlängert die Liste der Nachteile.

Eine interessante Anwendung ist die Kombination der HOE mit Solarzellen. Hierbei wird der Reflektor aus Bild 2.6 (a) durch eine Solarzelle ersetzt, sodass die Abschattung nicht durch Reflexion sondern durch Absorption erfolgt, die in Energiegewinnung umgesetzt wird [Kue99].

Vorteile der holografisch-optischen Elemente:

- Dünne Bauweise
- Durchsicht möglich

Nachteile der holografisch-optischen Elemente:

- Teurer Herstellungsprozess
- Niedriger Lichtlenkwirkungsgrad
- Regenbogeneffekte
- Geringe Haltbarkeit

2.5.2 Statisch - transmittierend: Laser-Cut Panel

Die sogenannten Laser-Cut Panel (LCP) wurden Anfang der 90er-Jahre in Australien entwickelt und werden von dort aus auch kommerziell vertrieben [Edm93]. Es handelt sich dabei um Platten aus Acrylglas², die wie der Name schon sagt mit einem Laser mit horizontalen Schlitzern versehen werden.

Bei der Transmission durch ein LCP trifft das Licht auf einen der Schlitz und wird an diesem durch Totalreflexion in Richtung Raumdecke umgelenkt. Flach einfallendes Licht hat eine niedrigere Wahrscheinlichkeit auf einen Schlitz zu treffen. Es ist so weniger von der Umlenkung betroffen als das Licht hoher Sonnenstände.

Bild 2.7 zeigt zwei Platten mit unterschiedlichen Laserschnitten, die beide Patentveröffentlichungen entnommen wurden [Edm91, Edm06]. Beim Originallayout von 1991 (a) wird eine Platte horizontal geschnitten und dann mit einer unbearbeiteten Platte verklebt, um das System als vollständigen Fensterersatz nutzen zu können. Bei der 15 Jahre später patentierten Weiterentwicklung (b) werden zwei Platten jeweils schräg geschnitten und so miteinander verklebt, dass sich die Lichtlenkung verbessert.

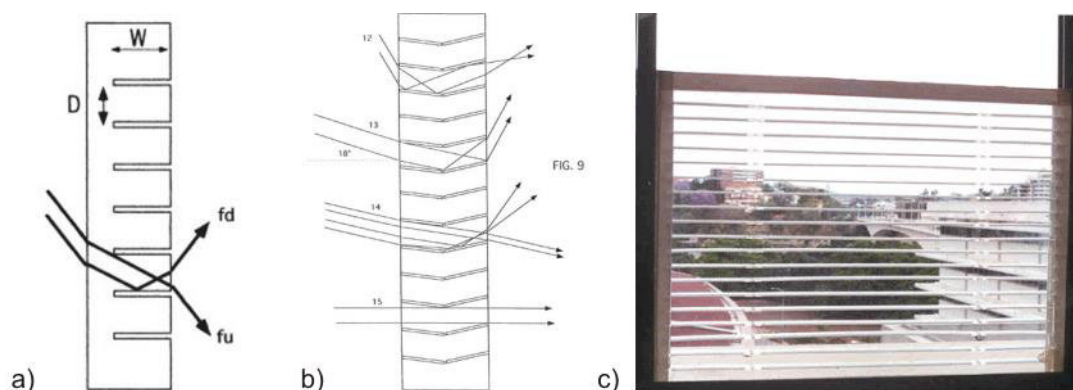


Bild 2.7: Schnittvarianten der Laser-Cut Panel von 1991 (a) und der Weiterentwicklung von 2006 (b). Im Fenstermodell wird die Durchsicht durch ein LCP demonstriert (c) (Bild (a) aus [Edm91], Bild (b) aus [Edm06], Bild (c) aus [Edm93]).

Die Lichtlenkung gelingt nicht für jeden Strahl, wie es die exemplarisch eingezeichneten Strahlen belegen. Eine selbst durchgeführte simulatorische Überprüfung der LCP ergab, dass eine erkennbare Lichtlenkung, bei der deutlich mehr Licht nach oben als nach unten gelenkt wird, nur bei sehr hohen Sonnenständen gelingt. Sonnenstände von 50° oder höher sind in Australien zwar deutlich verbreiteter als in Mitteleuropa, dennoch gelangen selbst unter diesen Konditionen noch sehr viele Strahlen ungelenkt in den Raum. Die Lichtlenkung ist also recht ineffizient. Dies liegt vor allem an der Nut-

² Die eigentliche Bezeichnung von Acrylglas ist Polymethylmethacrylat, kurz PMMA. PMMA ist ein transparenter, thermoplastischer Kunststoff und findet Anwendung in unzähligen Einsatzgebieten. Eine genaue Materialbeschreibung befindet sich in Kapitel 3.3.

zung des Laserschneidens, da sich damit nur einfache, gerade Schlitze herstellen lassen, mit denen sich nur unter optimalen Voraussetzungen gute Lichtlenkeigenschaften ergeben. Ungünstige Sonnenstände führen häufig zu einer sehr schlechten Performance.

Die LCP haben weitere Nachteile, die sich negativ auf die lichtlenkenden Eigenschaften auswirken: Ein umlaufender Rand der PMMA-Platte bleibt unbearbeitet, der damit nicht zur Lichtlenkung beiträgt. Durch die flächige Verklebung reduziert sich die Gesamttransmission. In PMMA geschnittene Laserschlitze haben stets eine hohe Rauheit (in der Regel $> 1 \mu\text{m}$ [DeW10]), wodurch sich die gerichtete Umlenkung verschlechtert.

Ein Vorteil der LCP ist die gute Durchsicht, wie das Modellfenster in Bild 2.7 (c) zeigt. Unter optimalen Umständen und je nach Himmelsituation lässt sich mit LCP das natürliche Licht um etwa 10 % bis 30 % steigern [Kaa06].

Die weiterentwickelte Version des LCP-Systems aus Bild 2.7 (b) ist kommerziell in Australien verfügbar (Solartran Pty Ltd, Brisbane). Der Preis für das lichtlenkende Element liegt bei rund 200 AU\$ (australische Dollar) je Quadratmeter, was etwa 160 € entspricht (Stand: September 2012).

Vorteile der Laser-Cut Panel:

- Kommerzielle Verfügbarkeit
- Durchsicht möglich
- Verhältnismäßig günstig

Nachteile der Laser-Cut Panel:

- Erkennbare Lichtlenkung nur bei sehr hohen Sonnenständen
- Niedriger Wirkungsgrad

2.5.3 Statisch - transmittierend: Compound Parabolic Concentrators (CPC)

Die Compound Parabolic Concentrators (CPC) bestehen wie die Laser-Cut Panel ebenfalls aus einer transparenten PMMA-Platte, die jedoch nicht geschnitten, sondern auf einer Seite mit Mikrostrukturen versehen wird. Namensgebend für die CPC ist zum einen der parabelförmige Querschnitt der Mikrostrukturen und zum anderen die Tatsache, dass sich das Licht in Richtung des Parabelscheitels konzentriert, was beides in Bild 2.8 zu sehen ist.

Bild 2.8 (b) zeigt exemplarisch den Verlauf eines Strahlbündels in einem CPC. Durch die Parabelform verdichtet sich das Licht im Bereich der Strukturkappen und wird zudem nach oben umgelenkt. Der Einfallswinkel des Strahlbündels liegt knapp unterhalb des sogenannten Akzeptanzwinkels, über dem die Strahlen nicht mehr transmittiert, sondern nach außen reflektiert werden. Der Akzeptanzwinkel liegt in Abhängigkeit von der Parabelform bei etwa 30° [Bue03].

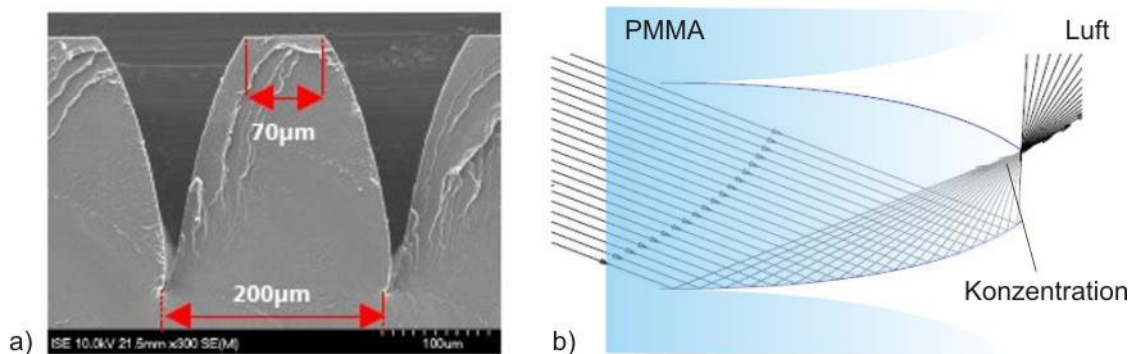


Bild 2.8: a) Aufnahme einer Compound Parabolic Concentrator Struktur (CPC) mit dem Raster-elektronenmikroskop (REM) (Bild aus [Nit03]). b) Der Strahlverlauf zeigt die Konzentration der Strahlen am Strukturscheitel. Höhere Sonnenstände oberhalb des sog. Akzeptanzwinkels ($\sim 30^\circ$) werden nach außen reflektiert (Bild erstellt in Anlehnung an [Nit03]).

Durch diese tageslichttechnische Charakteristik werden CPC also vorwiegend als Schutz vor dem Licht einer hoch stehenden Sonne eingesetzt. Im Vergleich zu konventionellen Jalousien erfolgt eine Erhöhung der Beleuchtungsstärke durch die Transmission von diffusem Licht und flach einfallendem Direktlicht. CPC-Systeme werden häufig als zu hell empfunden, da sie nicht genügend Licht umlenken oder nach außen reflektieren und damit keinen ausreichenden Blendschutz bieten. Um die Sonnenschutzfunktion zu verstärken, besteht die Möglichkeit die Kappen der Parabelstrukturen in einem PVD-Verfahren³ selektiv zu metallisieren.

Nach dieser Behandlung gelangt nur noch diffuses Licht in den Raum, welches durch die parabelförmigen Flanken der Strukturen dringt. Das Tageslicht wird damit auf einen Wert von rund 15 % abgeschattet [Nit03]. Die zuvor vorhandene Durchsicht, die bei senkrechter Sicht bei etwa 30 % gelegen hat, wird durch die Metallisierung verhindert.

Die feinen Strukturen der CPCs werden nicht direkt in jeder einzelnen PMMA-Platte erzeugt, sondern mit einem Hilfsmittel, einem sogenannten Formwerkzeug übertragen. Der technische und zeitliche Aufwand der Strukturgenerierung beschränkt sich damit auf das Formwerkzeug, welches dazu genutzt wird seine Struktur, bzw. das Negativ davon in die PMMA-Platte „zu stempeln“. Diese wirtschaftliche Replikationstechnik ist mit dem in dieser Arbeit genutzten Herstellungsverfahren vergleichbar und wird detailliert in Kapitel 3.2 beschrieben.

Die Strukturen der Negativ-Form können entweder in einem Präzisionsfräsverfahren oder mit Hilfe von Lithografie erzeugt werden [Kuc02]. Bei der Frästechnik wird das geschliffene Profil eines Formdiamanten in Metall gefräst, um das Formwerkzeug Linie für Linie zu strukturieren. Diese Technik wird ebenfalls später beschrieben (Kap. 3.3).

³ Ein PVD-Verfahren (physical-vapour deposition) ist ein vakuumbasiertes Beschichtungsverfahren.

Im Lithografieverfahren wird wie bei der Herstellung holografisch-optischer Elemente während der Belichtung gezielt eine Interferenz erzeugt, die die parabolische Form im Fotolack bewirkt. Da die Stabilität des Lacks nicht den während des Prägens auftretenden Kräften standhält, wird die Lackstruktur mit einem Galvanikprozess in widerstandsfähigeres Material, zum Beispiel Nickel, übertragen.

Die Herstellung und Untersuchung der CPC erfolgte unter anderem am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg.

Vorteile der Compound Parabolic Concentrators:

- Wirtschaftliche Replikationstechnik
- Restdurchsicht möglich (aber nur bei Verzicht auf Metallisierung)

Nachteile der Compound Parabolic Concentrators:

- Lichtlenkung nur bei flachen Sonnenständen
- Für Sonnenstände höher als 30° primäre Verwendung als Sonnenschutz

2.5.4 Statisch - transmittierend: Prismenoberlicht

Prismenoberlichter bestehen wie Laser-Cut Panel und CPCs aus transparenten Acrylglasplatten. Sie sind auf einer Seite mit prismatischen Strukturen versehen, sodass sie in der Literatur auch als Prismenplatten oder Mikroprismenarrays bezeichnet werden.

Die Lichtlenkung geschieht wie bei anderen Systemen über Totalreflexion, jedoch werden in diesem Fall nicht Laserschnitte oder parabelförmige Strukturen genutzt, sondern prismatische, wie sie in Bild 2.9 (a) zu sehen sind. Die grundsätzliche Geometrie eines Prismas kann variieren, womit eine Beeinflussung der lichtlenkenden Eigenschaften möglich ist. Da bei eng nebeneinander liegenden Prismen keine Durchsicht nach außen möglich ist, werden sie bevorzugt im oberen Teil der Verglasung als Oberlicht eingesetzt.

Prismenoberlichter wurden umfassend am Fraunhofer ISE in Freiburg untersucht. Das Lichtlenkverhalten dieser Strukturen wird als „saisonal“ bezeichnet [Nit03, Nit07] und das zugehörige Transmissionsdiagramm (b) verdeutlicht, was das bedeutet: Hohe Sonnenstände mit Einfallswinkeln größer 40° werden nach außen reflektiert, niedrige Sonnenstände werden transmittiert. Mit diesem Transmissionsverhalten eignen sie sich dazu, im Winter möglichst viel Licht und Wärmestrahlung in den Raum zu lassen und die nur im Sommer vorkommenden hohen Sonnenstände zur Reduzierung von Wärmelasten zu reflektieren. Eine Grundhelligkeit bleibt dadurch erhalten, dass diffuses Streulicht ebenfalls transmittiert wird.

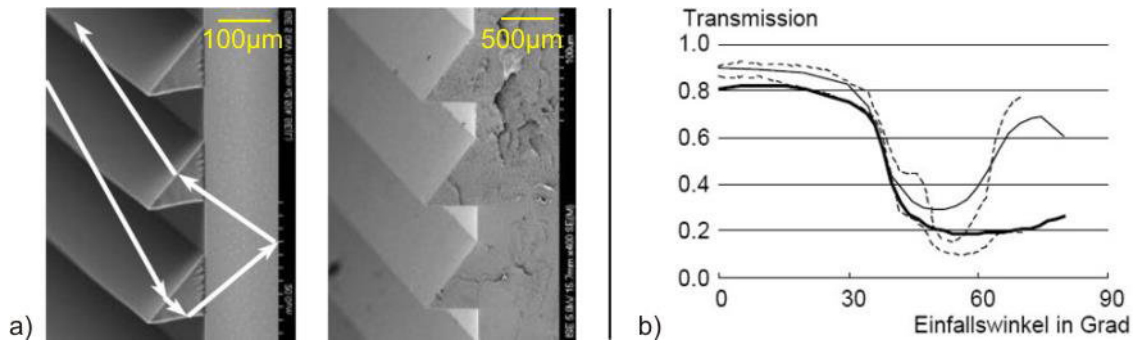


Bild 2.9: a) REM-Aufnahmen von Mikroprismen eines Prismenoberlichts (Bild aus [Nit03]). b) Zugehörige „saisonale“ Transmissionskurve: Niedrige Sonnenstände werden transmittiert, hohe reflektiert (Bild aus [Nit07]).

Für prismatische Strukturen kommen mit Interferenzlithografie und Präzisionsfräsverfahren die gleichen Herstellungstechniken zur Anwendung wie bei den CPC. Am ISE wurden mit dem Interferenzlithografie-Verfahren üblicherweise Strukturen auf einer Fläche von $15 \times 15 \text{ cm}^2$ erzeugt. Allerdings soll die Strukturierung auch auf einer Fläche von $60 \times 80 \text{ cm}^2$ möglich sein. Für größere Replikationen müsste ein Step-and-Repeat-Verfahren genutzt werden, in dem die Strukturen mit einem kleinen Stempel schrittweise nebeneinander auf eine große Fläche übertragen werden, um so ein großes Formwerkzeug zu erzeugen [Bue03].

In Bild 2.10 (a) wird ein weiterentwickeltes Prismenlayout gezeigt, welches auf Grundlage von Simulationen hinsichtlich seiner Transmissionseigenschaften optimiert wurde [Nit07]. Wie man sieht, ist die Geometrie der optimierten Struktur nicht mehr rein prismatisch, sondern in weiten Teilen abgerundet. Zudem befindet sich die Struktur auf der Innenraumseite der Platte. Bemerkenswert ist, dass sich das optimierte Transmissionsdiagramm (b) nun erheblich vom obigen unterscheidet. Im Gegensatz zu den saisonalen Vorrichtungen wird hier für alle Lichteinfälle eine hohe Transmission mit gleichzeitiger Lichtlenkung nach oben angestrebt, was dem Beleuchtungskonzept dieser Arbeit entspricht.

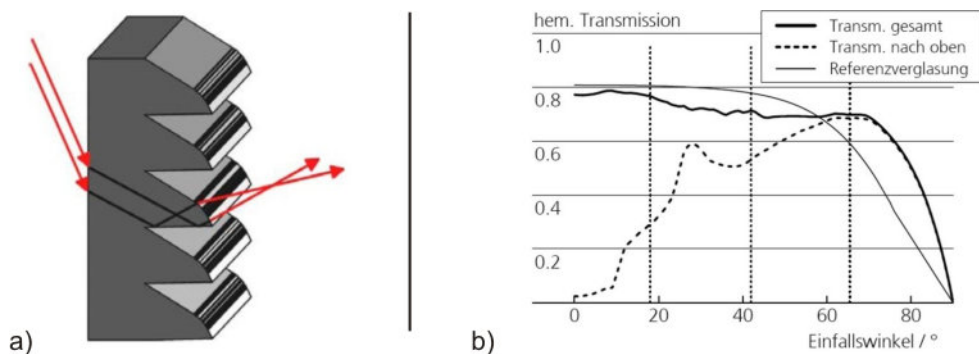


Bild 2.10: a) Vom Fraunhofer ISE optimiertes Prismenlayout. b) Das zugehörige Transmissionsdiagramm zeigt, dass eine Lichtlenkung nach oben angestrebt ist (Bilder aus [Nit07]).

Das simulierte Transmissionsdiagramm zeigt, dass mit dieser Struktur zwar große Anteile nach oben gelenkt werden können, allerdings gelangen bei mittleren Sonnenständen doch erhebliche Anteile nach unten. So wird bei einem Winkel von 40° rund 20 % des Lichts nicht nach oben umgelenkt. Dieser Anteil ist für eine lichtlenkende Vorrichtung zu groß, sodass dieses System vermutlich blenden würde. Die Umsetzung und Erprobung des Simulationsmodells erfolgte bislang nicht.

Aktuell befasst sich auch eine Gruppe der Tsing Hua Universität (Taiwan) mit prismatischen Lichtlenksystemen. In den bislang vorgestellten Ergebnissen [Hoc10, Hoc11] werden Strukturformen gezeigt, die von einem prismenförmigen Diamantfräser zweimal unter leicht gekippten Winkeln gefräst wurden, womit sich eine etwas komplexere prismatische Struktur ergibt. Als Abformmaterial wurde ein hybrides organisch-anorganisches Material gewählt, welches flüssig auf die Struktur gegossen und anschließend mit UV-Licht ausgehärtet wird. Organisch-anorganische Materialien sind um ein Vielfaches teurer als ein Standardmaterial wie PMMA – ein großflächiges System wäre daher quasi unbezahlbar.

Die Ergebnisse der an diesen Systemen vorgenommenen Untersuchungen zeigten, dass die lichtlenkenden Eigenschaften bislang noch nicht sonderlich effizient sind. Durch die Nutzung einfacher prismatischer Geometrien gibt es stets bestimmte Sonnenstände, unter denen die Lichtlenkung nicht die gewünschte Effizienz erreicht. In Kapitel 4.2 werden die Probleme prismatischer Strukturen bei der Lichtlenkung näher beleuchtet.

Vorteile der Prismenoberlichter:

- Wirtschaftliche Replikationstechnik
- Freiheitsgrade in der Prismengeometrie erlauben vielfältige Lichtlenkcharakteristiken...

Nachteile der Prismenoberlichter:

- ...die nicht dazu geeignet sind, das erforderliche breite Band an Sonnenständen zuverlässig zu lenken
- Für Sonnenstände höher als 40° (Geometrieabhängig) primäre Verwendung als Sonnenschutz
- Keine Durchsicht möglich

2.5.5 Statisch - transmittierend: Lumitop

Lumitop ist ein Lichtlenksystem, welches kommerziell von Saint-Gobain-Glas vertrieben wird und das gleiche Lichtlenkungskonzept verfolgt wie das mikrostrukturierte System.

Bild 2.11 (a) zeigt den Querschnitt durch ein Lumitop-System: Im Scheibenzwischenraum befinden sich übereinander gestapelte Acrylglasprofile, die ähnlich wie ein Licht-

wellenleiter das Licht an die Raumdecke lenken. Durch die Kapselung im Scheibenzwischenraum sind die Profile gut vor äußeren Einflüssen geschützt.

Die Acrylprofile haben eine Breite von über 11 mm und eine Höhe von rund 3 mm. Damit ist ein Lumitop-Oberlicht nicht nur relativ klobig und schwer, sondern es werden schon bei einer Höhe von 30 cm bereits 100 Acrylstäbe benötigt, die übereinander gestapelt werden müssen. Das Aufstapeln während der Montage ist ein besonders arbeitsintensiver Vorgang, da die Profile nicht verkantet oder verwindet eingelegt werden dürfen, um das Aussehen nicht zu beeinträchtigen. Damit thermische Spannungen keine irreversiblen Schäden verursachen, benötigen sie genügend Raum zur Ausdehnung. Daher werden die Acrylstäbe nur lose in seitliche Schienen eingelegt. Dies birgt den Nachteil, dass die Fenster mit besonderer Sorgfalt behandelt werden müssen, da sonst die losen Profile verrutschen und sich dabei unschön verkanten. Insgesamt ist der mechanische Aufbau also nicht besonders vorteilhaft und durch seine Komplexität zudem teuer.

Bild 2.11 (b) zeigt als Anwendungsbeispiel zwei Büroräume des Spherion-Bürogebäudes in Düsseldorf, die mit Lumitop beleuchtet werden. Im unteren Bild erkennt man anhand des Schattenwurfs der Säule an der Raumdecke die Lichtlenkung bis tief in den Raum.

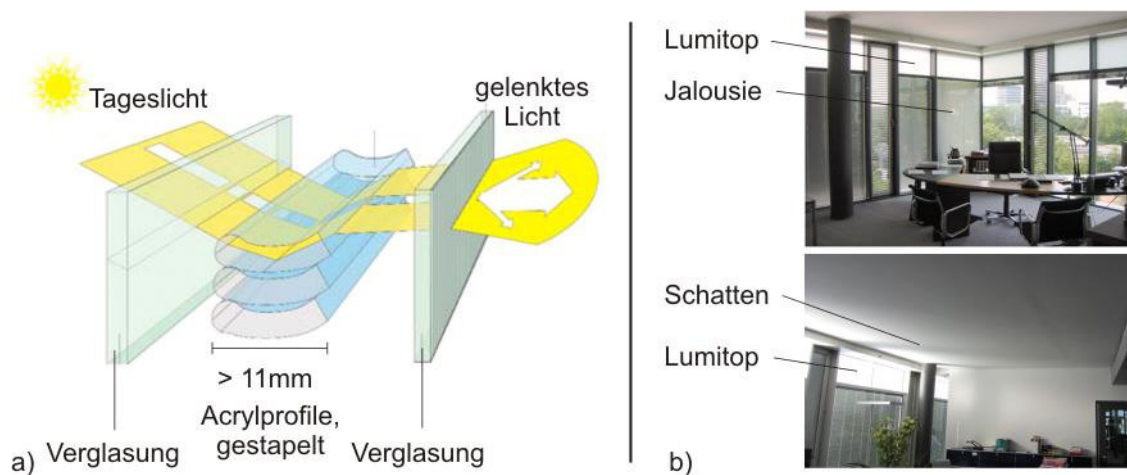


Bild 2.11: a) Querschnitt durch ein Lumitop-Oberlicht: im Scheibenzwischenraum befinden sich die übereinander gestapelten, lichtlenkenden Acrylprofile (Bild erstellt in Anlehnung an [SGG06]). b) Anwendungsbeispiel: Spherion Bürogebäude, Düsseldorf, Deilmann Koch Architekten (Bild aus [Mue05]). Im unteren Bild zeigt sich anhand des Schattenwurfs der Säule die Lichtlenkung bis tief in den Raum.

Lumitop hat gute lichtlenkende Eigenschaften. Der Großteil des einfallenden Direktlichts wird für ein breites Band an Sonnenständen blendfrei an die Raumdecke gelenkt. Obwohl der untere Teil der Verglasung durch eine Jalousie abgeschattet wird, sind Büroräume, die mit Lumitop ausgeleuchtet werden, bei Direktlicht wunderbar hell. Die

Raumnutzer erfreuen sich an der angenehmen Helligkeit ohne das lichtlenkende Oberlicht bewusst wahrzunehmen. Sie sind sich der Quelle des Lichts also nicht im Klaren. Lumitop erfüllt somit hervorragend die für das lichtlenkende Beleuchtungskonzept notwendigen Anforderungen und kann in dieser Hinsicht als Referenz für das mikrostrukturierte System dienen.

In Kapitel 7 wird daher ein direkter Vergleich zwischen Lumitop und dem mikrostrukturierten System vorgenommen. Dies soll der Überprüfung dienen, ob mit der Entwicklung des mikrostrukturierten Systems ein Mehrwert geschaffen wurde.

Vorteile von Lumitop:

- Gute lichtlenkende Eigenschaften
- Kommerzielle Verfügbarkeit

Nachteile von Lumitop:

- Unvorteilhafter mechanischer Aufbau
- Teurer Herstellungsprozess
- keine Durchsicht möglich

Fazit

Der Überblick über den derzeitigen Entwicklungsstand bei Tageslichtsystemen hat gezeigt, dass es insgesamt eine Vielzahl an Herangehensweisen an das Thema Tageslichtbeleuchtung gibt. Das Konzept, mit einem Oberlicht möglichst viel direktes Licht an die Raumdecke zu lenken und damit den Raum auszuleuchten, wird dabei hauptsächlich mit Systemen aus der statisch - transmittierenden Gruppe verfolgt, zu der auch das hier vorgestellte mikrostrukturierte System gehört.

Die Untersuchung dieser Klasse zeigte, dass holografisch-optische Elemente, Laser-Cut Panel, Compound Parabolic Concentrators und Prismenoberlichter hinsichtlich ihrer Lichtlenkeigenschaften nicht dazu in der Lage sind, das Licht aus einem breiten Band an Sonnenständen an die Raumdecke zu lenken und gleichzeitig ausreichenden Blendenschutz zu gewährleisten. Aus diesem Grund wird der Verwendungszweck teilweise auch als „saisonal“ bezeichnet, womit ausgedrückt wird, dass hohe, im Sommer vorkommende Sonnenstände abgeschattet werden und tiefe, im Winter vorkommende Sonnenstände transmittiert werden. Ob diese Funktion tatsächlich gewünscht ist oder ob sie vielmehr nur der Begrenztheit der Möglichkeiten entspringt, sei an dieser Stelle offengelassen.

Lumitop ist das einzige System, das für ein vorwiegend lichtlenkendes Beleuchtungskonzept geeignete lichtlenkende Eigenschaften aufweist. Es kann diesbezüglich in dieser Arbeit als Vorbild für die Systementwicklung dienen. Sein unvoreilhafter mechanischer Aufbau, bei dem zahlreiche Acrylprofile im Scheibenzwischenraum übereinander gestapelt werden müssen, macht es allerdings sehr breit und teuer.

Es zeigt sich also, dass durchaus Bedarf an einer Neuentwicklung besteht, in der Lichtlenkeigenschaften ähnlich denen des Lumitop-Systems mit einer vorteilhaften Bauform kombiniert werden. Mit einem solchen System könnte vor allem ein Kostenvorteil entstehen, der eine höhere Verbreitung begünstigen würde. Das mikrostrukturierte Lichtlenksystem könnte genau diese Anforderungen erfüllen.

3 Herstellung

Das hier vorgestellte Lichtlenksystem soll nicht nur funktional effizient, sondern auch wirtschaftlich produzierbar sein. Daher kommen nur Herstellungsverfahren in Betracht, in der die Lichtlenkvorrichtung über eine Formübertragung von einem Formwerkzeug oder Prägemaster ihre Strukturen erhält und nicht direkt strukturiert wird. Weiterhin kommen nur Verfahren in Frage, mit denen eine großflächige Mikrostrukturierung von transparenten Materialien möglich ist. Damit die Lichtlenkvorrichtung ein homogenes Erscheinungsbild hat, muss die Geometrie der Strukturen über die gesamte strukturierte Fläche von gleicher Güte sein, was hohe Anforderungen an den Herstellungsprozess stellt.

Geeignete Prozesse sind beispielsweise das Gieß- und das Heißprägeverfahren, bei denen die Formwerkzeuge eine flache Bauform haben und die Strukturen in einer Ebene vorliegen (siehe Bild 3.1). Da in diesen Replikationsprozessen der Prägemaster in der Regel die gleiche Größe wie das spätere Produkt hat und für die Abformung eine gewisse Verweilzeit im Werkzeug von Nöten ist, eignen sich diese Prozesse nur für mittlere Produktionsstückzahlen.

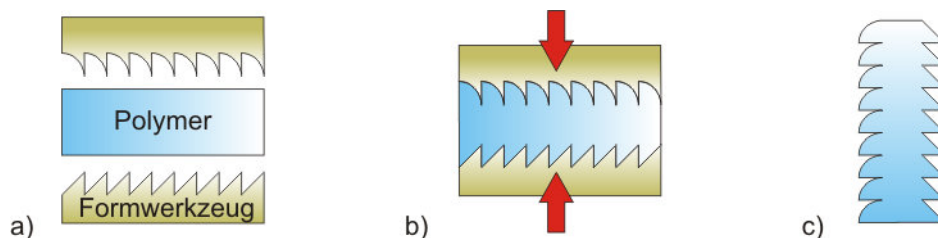


Bild 3.1: Replikationsprozess: a) Formwerkzeuge beinhalten die Strukturen in negativer Form. b) Die Strukturen werden in ein formbares Material (häufig Kunststoff) übertragen. c) Das Produkt wird entformt und verfügt über die gewünschte Struktur.

Für hohe bis sehr hohe Stückzahlen eignen sich vor allem kontinuierliche Replikationsverfahren, bei denen die Strukturen auf einer Prägetrommel vorliegen und dazu genutzt werden, vor allem Folien zu strukturieren.

In diesem Kapitel sollen die möglichen Herstellungsverfahren näher erläutert werden. Da für eine hochwertige Formübertragung die Qualität der Prägemaster entscheidend ist, wird zunächst die *Strukturierung des Formwerkzeugs* (Kap. 0) erörtert.

Anschließend folgt eine Beschreibung des *Gießverfahrens* (Kap. 3.2), mit dem in den Laborversuchen Prototypen aus Silikon erstellt wurden. Der anschließende Transfer auf eine großflächige Replikationstechnik wurde hauptsächlich von der *Karl Jungbecker*

GmbH & Co. KG vollzogen, die großformatige Acrylglasprofile im *Heißprägeverfahren* hergestellt haben (Kap. 3.3).

Anschließend werden *alternative Herstellungsverfahren* wie das Rolle-zu-Rolle Verfahren und die Strukturübertragung in Glas vorgestellt (Kap. 3.4), die in dieser Arbeit zwar nicht zur Anwendung kamen, aber zu einem späteren Zeitpunkt von großem Interesse sein könnten.

Im letzten Abschnitt werden verschiedene Möglichkeiten aufgezeigt, die mikrostrukturierte *Lichtlenkvorrichtung in die Verglasung zu integrieren* (Kap. 3.5).

3.1 Herstellung von mikrostrukturierten Formwerkzeugen

Unabhängig von der gewählten Abformtechnik – ob Gießverfahren oder Heißprägen – muss zunächst ein Formeinsatz erzeugt werden, der die gewünschten Strukturen in komplementärer Form aufweist. Da bei der Abformung neben den gewünschten Strukturen ebenfalls alle Fehler und Defekte des Werkzeugs in das Formteil übertragen werden, ist eine hohe Werkzeuggüte von besonderer Bedeutung, um eine systematische Fehlervervielfältigung zu vermeiden.

Etablierte Verfahren zur Herstellung mikrostrukturierter Formwerkzeuge sind das Präzisionsfräsverfahren und das Hobelverfahren. In beiden wird die Kontur eines exakt geschliffenen Diamanten in das metallische Werkzeug übertragen. Wie das geschieht und was zu beachten ist, soll im Folgenden beschrieben werden.

3.1.1 Formdiamanten zur Profilierung von Formwerkzeugen

Die Formdiamanten, die zur Erzeugung der Strukturen benötigt werden, werden anhand einer geometrischen Beschreibung von einer darauf spezialisierten Firma geschliffen. In dieser Arbeit lieferte die niederländische Firma *Contour-Tooling* die Formdiamanten. Bild 3.2 zeigt exemplarisch die Geometriedefinition der Linsenseite des mikrostrukturierten Lichtlenksystems und verdeutlicht damit das Schleifen einer komplexen Geometrie. Zunächst wird die Spitze des Diamanten, dessen Körper grau markiert ist, mit einem Radius von $354\ \mu\text{m}$ versehen (a). Da allerdings nicht diese Kontur erwünscht ist, sondern die des eingezeichneten 60° -Kreisausschnitts, werden $92\ \mu\text{m}$ des Diamanten seitlich abgeschliffen. Somit entsteht an der Spitze eine Form mit einer Höhe und Breite von $250\ \mu\text{m}$ und einem Radius von $354\ \mu\text{m}$ (b). In (c) ist ein Foto des nach diesen Angaben geschliffenen Diamanten zu sehen.

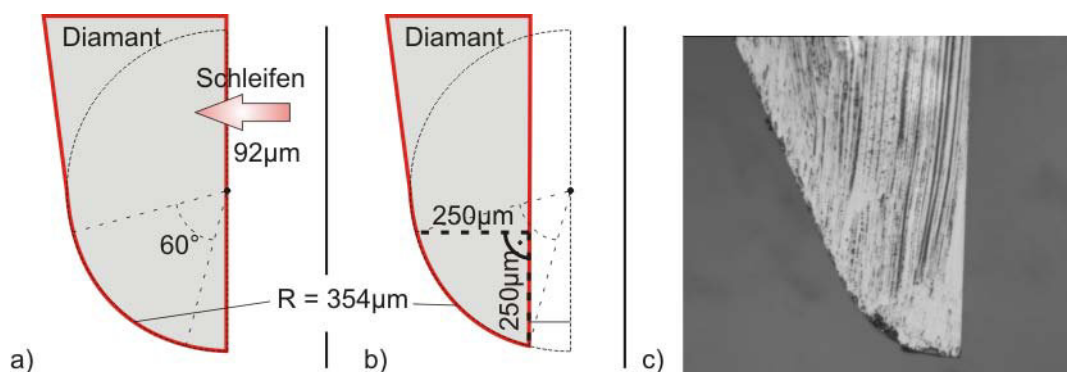


Bild 3.2: a + b) Geometriedefinition des Strukturdiamanten für die Linsenseite des Lichtlenksystems. c) Foto des entsprechend geschliffenen Diamanten.

Wie man diesem Beispiel entnehmen kann, können Diamanten auch grundsätzlich in komplexe mikroskopische Formen geschliffen werden. Allerdings bedeutet das nicht,

dass die Herstellung von Freeform-Diamanten¹ möglich ist. Die Winkel von Prismenspitzen werden mit einer hohen Genauigkeit von $0,02^\circ$ gefertigt. Krümmungsradien können hingegen nur mit einer Toleranz von 10 % geschliffen werden. Bereits zum Zeitpunkt der Strukturdefinition sollten Abrundungen der Spitze eingeplant werden, da „unendlich“ spitze Diamanten zwar so gut es geht gefertigt werden können, diese beim Fräsvorgang aber leicht und unkontrolliert abbrechen.

3.1.2 Mikrostrukturierte Formwerkzeuge: Materialwahl

Mikrostrukturierte Prägwerkzeuge müssen hitzebeständig und robust sein und sollten sich möglichst leicht strukturieren lassen. Als geeignete Werkstoffe kommen daher nur Metalle in Frage. Am häufigsten werden mikrostrukturierte Formwerkzeuge aus Messing, Neusilber² oder Stahl mit einer Nickel-Phosphor Beschichtung verwendet [Kla08].

Messing ist von den genannten Materialien das kostengünstigste. Da es recht weich ist und sich leicht strukturieren lässt, bricht der Formdiamant während des Strukturierungsvorgangs nicht so schnell ab. Die geringe Härte führt ebenfalls dazu, dass sich an den Strukturen Grate bilden, die jedoch während der ersten Abformungen zusammen mit den geprägten Werkstücken abgetragen werden. Insgesamt verschleifen Messingformwerkzeuge recht schnell, sodass mit ihnen nur eine begrenzte Anzahl an Prägevorgängen (ca. 100 bis 200) möglich ist. Messing wird aus den genannten Gründen häufig zur Herstellung von Demonstratoren und Prototypen genutzt, um relativ kostengünstig neue Anwendungen zu testen.

Das derzeit bestgeeignete Material für mikrostrukturierte Formwerkzeuge ist Stahl mit einer Nickel-Phosphor Beschichtung [Kla08]. Die Nickel-Phosphor Schicht lässt sich nahezu gratfrei strukturieren und ist besonders langlebig und robust. Die Beschichtung des Stahleinsatzes geschieht galvanisch. Da diese Spezialgalvanik nur von wenigen Dienstleistern angeboten wird, ist sie teuer. Der Einsatz lohnt sich folglich erst, wenn eine hohe Anzahl an Abformungen geplant ist. Neusilber liegt hinsichtlich Eigenschaften und Kosten zwischen den anderen beiden Werkstoffen.

Die für die Laborversuche genutzten Formwerkzeuge wurden vom Fraunhofer Institut für Produktionstechnik (IPT) in Aachen gefertigt. Mit den Formwerkzeugen sollten nur Abdrücke im Gießverfahren mit PDMS durchgeführt werden. Aus diesem Grund wurde mit Messing die kostengünstigste Materialvariante gewählt, da keine nennenswerten Verschleißerscheinungen zu erwarten waren.

¹ Ein „Freeform-Diamant“ ist ein Diamant, dessen Kontur vollkommen frei gestaltet wurde und geometrisch nicht (einfach) zu beschreiben ist.

² Neusilber ist eine Legierung aus Kupfer, Nickel und Zink.

3.1.3 „Fly-Cutting“ und Hobeln von Formwerkzeugen

Bevor ein Formwerkzeug strukturiert werden kann, muss es präzise plangefräst werden. Anschließend wird das Profil des Diamanten in den Formeinsatz übertragen. Dazu stehen zwei Techniken zur Verfügung: zum einen das sogenannte „Fly-Cutting“ Verfahren und zum anderen ein Hobel- oder Stoßverfahren [Dav03, Bre04].

Üblicherweise ist „Fly-Cutting“ eine Technik, in der ein rotierender Fräser dazu verwendet wird, eine Fläche plan zu fräsen. Beim Planfräsen steht die Rotationsachse des Fräasers senkrecht zur bearbeitenden Oberfläche. Um das Profil des Diamanten in den Formeinsatz übertragen zu können, muss hierbei allerdings mit Hilfe eines Adapters die Achse des Fräasers so um 90° gekippt, dass sie parallel zur Oberfläche steht, wie in Bild 3.3 (a) dargestellt.

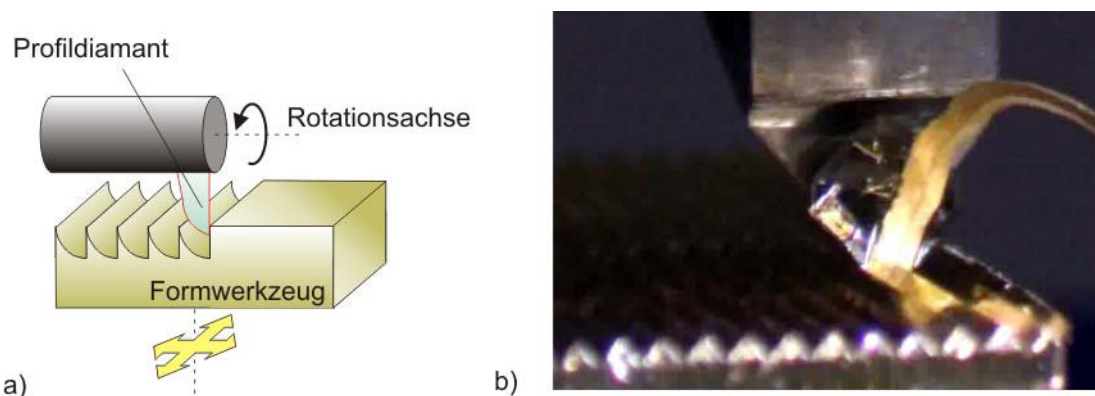


Bild 3.3: Mikrostrukturierung des Formeinsatzes: a) Beim Fly-Cutting verläuft die Rotationsachse des Diamanten parallel zur zu strukturierenden Oberfläche, sodass das Profil des Diamanten in den Formeinsatz übertragen wird. b) Foto des Hobelverfahrens: Der V-förmige Diamant hebt einen Span ab (Bild aus [Kug12b]).

Je nach Diamantgeometrie und Dichte der zu fräsenden Linien, kann mit einem einzelnen Profildiamanten eine Fläche von etwa 1 m^2 im Fly-Cutting Verfahren strukturiert werden. Der Fräsvorgang dauert mehrere Tage, da jede Linie mehrfach mit zunehmender Tiefe gefräst wird, um die entstehenden Kräfte auf den Diamanten zu begrenzen.

Beim Hobelverfahren wird der Diamant über bzw. durch das Material gehobelt und hebt dabei einen Span ab. Bei diesem Verfahren wird die Solltiefe ebenfalls schrittweise erzielt. Jede Grube wird also mehrfach gehobelt. Im Vergleich zum Fly-Cutting Verfahren wirken während des Hobelns höhere Kräfte auf Formwerkzeug und Diamant. Daher ist die Oberflächengüte etwas geringer und es wird für die Strukturierung einer gleich großen Fläche etwa das Fünf- bis Sechsfache an Diamanten benötigt [Kla08]. Bild 3.3 (b) zeigt einen Diamanten während des Hobelverfahrens. Der abgehobene Span ist gut zu erkennen.

Bild 3.4 zeigt Aufnahmen eines vom Fraunhofer IPT erstellten Messing-Formeinsatzes. Die Strukturen mit Abmessungen von $250\ \mu\text{m}$ (Höhe und Breite) wurden auf einer Fläche von $100 \times 100\ \text{mm}^2$ im Fly-Cutting Verfahren erzeugt. Der Fly-Cutter benötigte für die 400 Linien mehr als 24 Stunden Bearbeitungszeit. Die komplementären Formen der Linsen- und der Sägezahnstrukturen sind in den Vergrößerungen erkennbar.

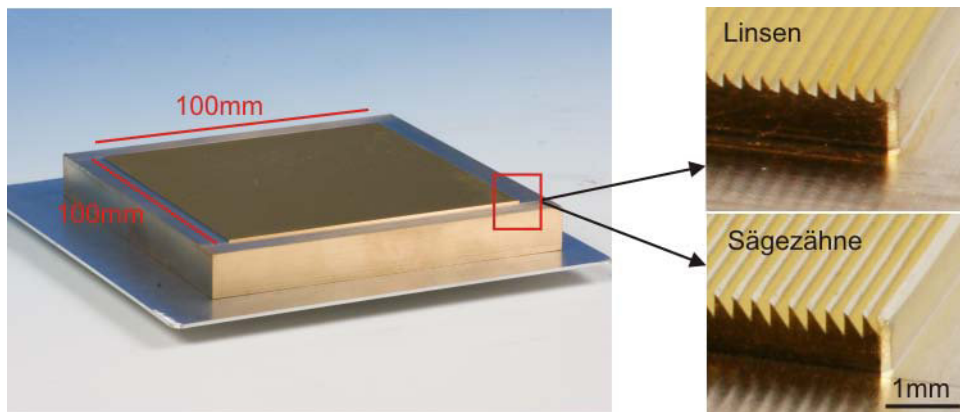


Bild 3.4: Im Fly-Cutting Verfahren strukturiertes Formwerkzeug aus Messing mit einer strukturierten Fläche von $100 \times 100\ \text{mm}^2$. Der Linienabstand beträgt je $250\ \mu\text{m}$.

3.2 Gießverfahren mit PDMS

Elastische Silikone (PDMS) haben den besonderen Vorteil, dass sie sich rückstandslos und ohne Kraftaufwand aus den wertvollen Prägemastern herauslösen lassen. Außerdem ergeben sich mit ihnen im Vergleich zu anderen Replikationsprozessen auch ohne umfangreiche Parameteroptimierung hervorragende Abformresultate. Zur Prototypenherstellung im Laborverfahren eignet sich daher hervorragend das Gießverfahren mit PDMS.

3.2.1 Herstellungstechnik: Gießverfahren

Wie bereits erwähnt, benötigen Replikationsprozesse – und somit auch das Gießverfahren – ein Formwerkzeug, welches die erforderlichen Strukturen der Vorder- oder Rückseite des Lichtlenkelements als Negativ aufweist. Die strukturierte Fläche des Formwerkzeugs wird eins zu eins in die Replikation übertragen. In den durchgeführten Laborversuchen wurden die oben beschriebenen Messingformen mit einer strukturierten Fläche von $100 \times 100 \text{ mm}^2$ benutzt.

Bild 3.5 zeigt schematisch die Herstellung einer Lichtlenkvorrichtung unter Nutzung des Gießverfahrens: Das zweikomponentige PDMS wird angerührt und auf die mikrostrukturierten Formen gegossen (a). Durch seine recht hohe Viskosität hat es eine etwa honigähnliche Konsistenz, verteilt sich dennoch gut auf der Form und bildet bei planer Ausrichtung des Prägemasters eine gleichmäßig dicke Schicht mit sehr glatter Oberfläche. Durch die Materialmenge und die Höhe eines zuvor erstellten Gießbrands, der das Abfließen des PDMS verhindert, wird die Materialdicke festgelegt. In der Regel wurde eine Materialdicke von ca. 1 mm bis 2 mm je Seite hergestellt. Etwaige eingeschlossene Luftblasen werden durch Evakuierung im Exsikkator entfernt.

Die Aushärtung des Materials erfolgt bei 70° C (b). Durch die thermische Einwirkung wird der Vernetzungsvorgang im Material beschleunigt, sodass dieser Prozessschritt weniger als eine Stunde benötigt. Anschließend wird das PDMS vom Werkzeug gelöst. Durch seine elastischen Eigenschaften gelingt dies leicht und rückstandsfrei.

Die beiden einseitig strukturierten PDMS-Elemente werden anschließend an den Rückseiten kleberlos verbunden, indem die strukturlosen Oberflächen mit einem Sauerstoffplasma „aktiviert“ werden (c). Durch das Sauerstoffplasma wird die niederenergetische und hydrophobe Polymeroberfläche angeätzt und es bilden sich funktionelle polare Sauerstoffgruppen [Luo00, Par04, Cai08].

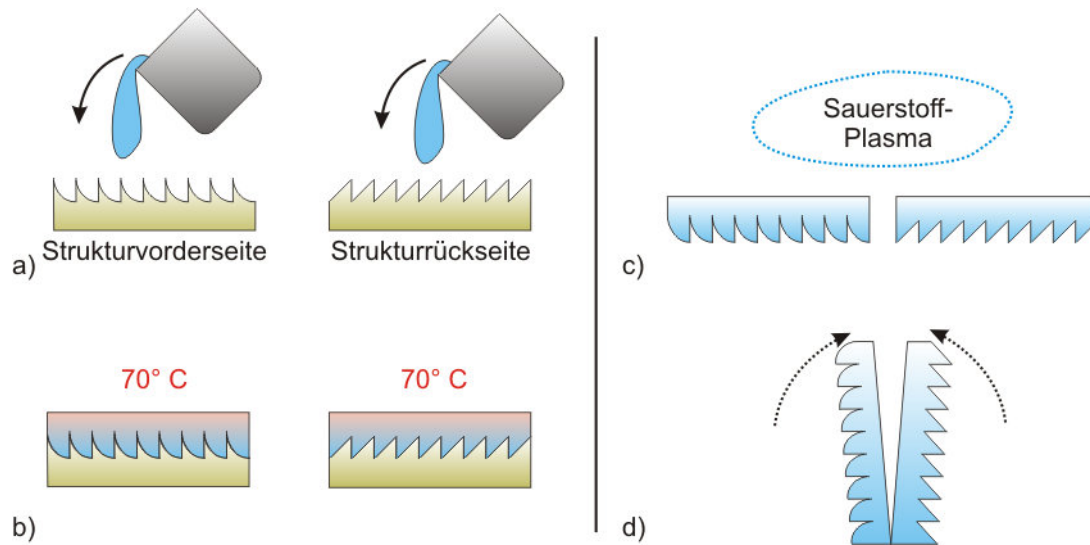


Bild 3.5: Herstellungstechnik Gießverfahren: a) Das PDMS wird auf die Gießformen gegossen. b) Unter Wärmeeinfluss (70°C) vernetzt das PDMS. c) Beide Seiten werden entformt und plasmaaktiviert. d) Plasmabonding: Die Seiten lassen sich kleberlos verbinden.

Werden nun die beiden aktivierten Rückseiten übereinander gelegt und mit leichtem Druck zusammengeführt, so bilden sich kovalente Bindungen zwischen den Oberflächen, die die Seiten fest miteinander verbinden (d). Dieser Vorgang wird auch „Plasmabonding“ genannt. Vereinfacht kann man sich vorstellen, dass die Polymerketten durch die Plasmabehandlung zeitweise aufgerissen werden und sich durch das Zusammenpressen die Molekülketten beider Seiten miteinander verbinden.

Die Festigkeit der Verbindung hängt stark von den Prozessparametern ab. So sind insbesondere die Behandlungsdauer und die Plasmaleistung optimierungsbedürftige Kriterien, die schon bei relativ geringen Abweichungen zu starken Schwankungen bei der Festigkeit des Bondings führen [Bha05, Edd08]. Bei der hier benutzten Anlage (*μEtch RIE 80* der Firma Oxford) wurden mit einer Leistung von 60 W und einer Behandlungsdauer von 45 s gute Resultate erzielt. Der Prozessdruck lag bei 50 mTorr ($\cong 0,066\text{ mBar}$).

In Bild 3.6 ist der Querschnitt eines Prototyps zu sehen, der mit dem oben beschriebenen Prozess und den Messingformen des Fraunhofer IPT hergestellt wurde. Die Strukturen haben hinsichtlich Höhe und Tiefe Abmessungen von ca. $250\ \mu\text{m}$. Der sogenannte „Pitchabstand“, mit dem der Abstand zwischen sich wiederholenden Linien bezeichnet wird, beträgt ebenfalls $250\ \mu\text{m}$. Die gezeigte Probe hat eine Dicke von ca. 2 mm .

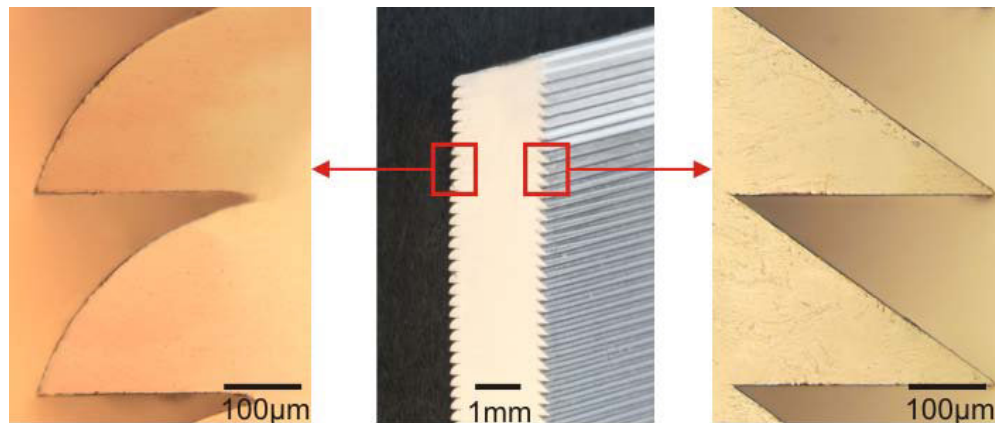


Bild 3.6: Querschnitt einer gebondeten Lichtlenkvorrichtung aus PDMS. Die Vergrößerungen zeigen linsenförmige Strukturen auf der lichtzugewandten Seite und Sägezahnstrukturen auf der Innenraumseite.

3.2.2 Materialeigenschaften: PDMS

Für das Gießverfahren wurde mit *Elastosil*[®] RT 601 von Wacker-Chemie [Wac98] ein hochtransparentes PDMS (Polydimethylsiloxan; Silikon) verwendet. Mit diesem wurden am Arbeitsgebiet Mikrostrukturtechnik bereits umfangreiche Erfahrungen gesammelt und es konnte für verschiedene Technologien erfolgreich verwendet werden [Kop07, Rab07, Cai08, Fle08].

Elastosil[®] RT 601 ist ein zweikomponentiges, additionsvernetzendes Silikon. „Zweikomponentig“ bedeutet, dass ein flüssiges Basismaterial mit einer zweiten Komponente verrührt wird und das Gemisch anschließend aushärtet. Das Basismaterial besteht aus einem Silikonpolymer, genauer beschrieben aus einer Kette von Dimethylsiloxanen ($[\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{O}]_n$) und einem Platinkatalysator. Die zweite Komponente enthält den sogenannten Vernetzer. Dieser sorgt dafür, dass Brücken zwischen den Dimethylsiloxanketten des Basismaterials gebildet werden. Die Brückenbildung zwischen den Ketten verringert ihre Beweglichkeit was sich in der Materialaushärtung ausdrückt. Bei Raumtemperatur benötigt dieser Vorgang ca. 24 Stunden, bei 70° C nur 1 Stunde [Wac00].

Das zweite Adjektiv „additionsvernetzend“ bedeutet hier, dass der Vernetzer selbst die Brücke bildet. Er wird „chemisch addiert“ und damit in das Polymergefüge eingebaut. Das hat den Vorteil, dass es keine chemischen Nebenprodukte oder Lösungsmittel gibt, die dem ausgehärteten Material entweichen müssen. Deshalb ist ein Schrumpf des Materials quasi zu vernachlässigen, somit weist das Material hervorragende Replikationseigenschaften auf [Wac00]. Da PDMS zur Gruppe der Elastomere gehört, begünstigen die elastischen Eigenschaften die leichte und rückstandslose Entformung des ausgehärteten Materials aus dem Prägemaster.

Elastosil[®] RT 601 hat einen optischen Brechungsindex von $n_{RT601} = 1,4095$ (bei 25° C) und ist optisch hoch transparent. Die Transmission τ von Wellenlängen zwischen 400 nm bis 700 nm liegt bei einer Schichtdicke von 10 mm bei etwa 88 % [Wac98].

Obwohl sich PDMS sehr gut zur Herstellung von Prototypen eignet, ist sein Einsatz im Lichtlenksystem zunächst nicht vorgesehen. Einem großflächigen PDMS-Abdruck fehlt es an mechanischer Stabilität. Es wären also zusätzliche Stütz- oder Trägerelemente erforderlich, um es stabil in der Verglasung zu fixieren. Zudem sind der vergleichsweise hohe Materialpreis von mehr als 65 €/kg (Stand: Juli 2012, Mengenrabatte unberücksichtigt) und die relativ lange Prozessdauer für eine kostengünstige Produktion nicht wünschenswert.

3.3 Heißprägeverfahren mit PMMA

Um auch größere Flächen strukturieren zu können, wurde im Anschluss an die Erprobung der Lichtlenkvorrichtung im Labormaßstab ein Technologietransfer vom Gieß- zum Heißprägeverfahren durchgeführt. Da am Arbeitsgebiet keine geeigneten Maschinen zur Verfügung stehen, wurde mit der Karl Jungbecker GmbH & Co. KG, Olpe (im Folgenden kurz Jungbecker) ein Hersteller gefunden, der geeignete Lichtlenkvorrichtungen im Maßstab $1500 \times 400 \text{ mm}^2$ produzieren kann – eine Größe, die ausreichend für die Bestückung von Oberlichtern ist.

Jungbecker ist auf das Heißprägen von PMMA-Elementen spezialisiert und strukturiert die benötigten Formwerkzeuge selbst.

3.3.1 Materialeigenschaften: PMMA

PMMA (Polymethylmethacrylat, Acrylglas oder auch Plexiglas™) ist ein glasähnlicher Kunststoff, der bei Raumtemperatur eine hohe mechanische Stabilität aufweist. Als Thermoplast verliert PMMA bei Überschreiten der sogenannten Glasübergangs- oder Erweichungstemperatur T_g (hier: $T_g \approx 110^\circ \text{ C}$) seine Steifigkeit, erweicht und ist dann formbar. Durch Abkühlung nimmt die Festigkeit wieder zu und die eingeprägte Form bleibt erhalten. Mit einer Dichte von $\rho_{\text{PMMA}} = 1,19 \text{ g/cm}^3$ ist PMMA deutlich leichter als Glas ($\rho_{\text{Glas}} \approx 2,5 \text{ g/cm}^3$) und zudem erheblich bruchfester.

Der Brechungsindex von PMMA beträgt $n_{\text{PMMA}} = 1,492$ und der Lichttransmissionsgrad τ beträgt 92 % (gemäß ISO 13468-1, -2) bei einer Schichtdicke von 2 mm [Evo11].

Jungbecker benutzt zur Herstellung der Lichtlenkelemente die Sorte Plexiglas™ 7N, ein transparentes Standard-PMMA der Firma Röhm. Der Quadratmeterpreis von gegossenem PMMA mit einer Dicke von 5 mm liegt bei ca. 25 - 30 €/m² (Stand: April 2012). Mit einem Preis von weniger als 5 €/kg ist PMMA also deutlich günstiger als transparentes PDMS.

3.3.2 Herstellungstechnik: Heißprägeverfahren

3.3.2.1 Einseitiges Heißprägen

Die exakten Prozessparameter sind ein wohlgehütetes Geheimnis eines jeden Herstellers. Da Jungbecker die Prägung der Lichtlenkelemente vorgenommen hat, sind demzufolge die Prozessparameter nicht im Detail bekannt. Dennoch sollen im Folgenden einige wichtige und allgemeingültige Prozessfaktoren vorgestellt werden, die unter anderem der Veröffentlichung „Hot Embossing: theory and technology of microreplication“ von Worgull [Wor09] entnommen wurden.

Wie Bild 3.7 zeigt, lässt sich ein Heißprägeprozess grundsätzlich in vier Hauptprozessschritte unterteilen:

1. Positionieren und Aufheizen der unstrukturierten PMMA-Platte bis zur Prägetemperatur
2. Prägen der Platte unter kontrollierten Druck- und Temperaturverhältnissen
3. Abkühlen des Formwerkzeugs auf eine Entformungstemperatur unter Beibehaltung des Prägedrucks
4. Öffnen des Werkzeugs und Entformung des geprägten Elements

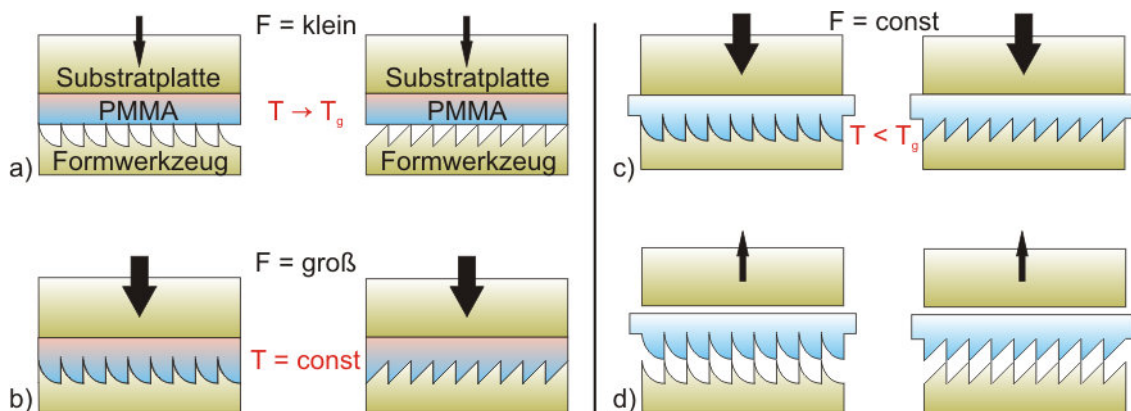


Bild 3.7: Herstellungstechnik Heißprägeverfahren: Aufheizen (a), Prägen (b), Abkühlen (c) und Entformen (d).

Während des ersten Schrittes wird eine unstrukturierte PMMA-Platte an der Substratplatte fixiert und zum Formwerkzeug ausgerichtet. Substratplatte und PMMA werden dann langsam mit einer Geschwindigkeit von etwa 1 mm/min an den Formeinsatz herangefahren und mit leichtem Druck ($\sim 100 \text{ N}$) in dieser Position fixiert. Um Oxidationsprozesse zu vermeiden, die bei hohen Temperaturen verstärkt auftreten, und um das gleichmäßige Ausfüllen kleinster Kavitäten zu erleichtern, wird die Prozesskammer evakuiert. Während der kontrollierten Aufheizphase werden der Formeinsatz und das PMMA auf eine Temperatur knapp oberhalb der Glasübergangstemperatur T_g (hier ca. 110° C) erhitzt. Dies muss homogen über die gesamte Fläche erfolgen, damit beim Prägen nicht fehlerhafte Geometrien aufgrund eines örtlich variierenden Fließverhaltens erzeugt werden.

Im zweiten Prozessschritt werden die Strukturen geprägt. Die Temperatur wird dabei konstant gehalten und mit hohem Druck ($\sim 40 \text{ kN}$) wird das erweichte PMMA in die Strukturen des Formwerkzeugs gepresst. Die Prägemaschine muss eine sehr hohe Steifheit aufweisen, damit auch auf großer Fläche ein gleichmäßiger Druck erzeugt werden kann. Gleiches gilt für das Formwerkzeug, welches sich nicht durchbiegen darf. Luft-einschlüsse in den Kavitäten werden zu diesem Zeitpunkt durch das Vakuum

verhindert. Nach einer mehrere Minuten dauernden Haltezeit, beginnt die Kühlphase, in der das Material in der eingepägten Form wieder aushärtet.

Mit Erreichen der Entformungstemperatur (ca. 80°C) wird die Prägekammer belüftet und das Werkzeug geöffnet. Falls die Entformung Kraft erfordert, kann eine während des Prägens rund um den Formeinsatz entstandene Randwulst dazu genutzt werden, das geprägte Element herauszulösen. Einen entscheidenden Einfluss auf die Entformbarkeit hat die Strukturgeometrie. Vor allem hinterschnittene Strukturen können die geprägte PMMA-Platte in einer Weise im Formwerkzeug verankern, dass sie nicht mehr beschädigungsfrei herausgelöst werden können. Die Entformung kann auch durch eine große Oberflächenrauheit erschwert werden.

Bei der Mikrostrukturierung im Heißprägeverfahren müssen alle Prozessparameter durchgängig überwacht und geregelt werden, um ein gutes Prägebild zu erreichen. Bei der Prozessoptimierung muss ein Kompromiss zwischen bester Prägequalität und hoher Prozessgeschwindigkeit gefunden werden. Mit einer Verringerung der Prozessdauer können in gleicher Zeit mehr Platten geprägt werden, was die Wirtschaftlichkeit des Endprodukts verbessert.

3.3.2.2 Verbindung einseitig geprägter Lichtlenkelemente

Mit dem oben beschriebenen Verfahren wurden großflächige PMMA-Platten mit Abmessungen von $1500\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ einseitig strukturiert. Die geprägten Platten wurden mit ihren Rückseiten aneinander gelegt und in passende Aluminiumprofile geklemmt. Der dabei entstandene Luftspalt und Brechzahlspung wurde durch die Hinzugabe von Silikonöl reduziert (siehe Bild 3.8 (a)).

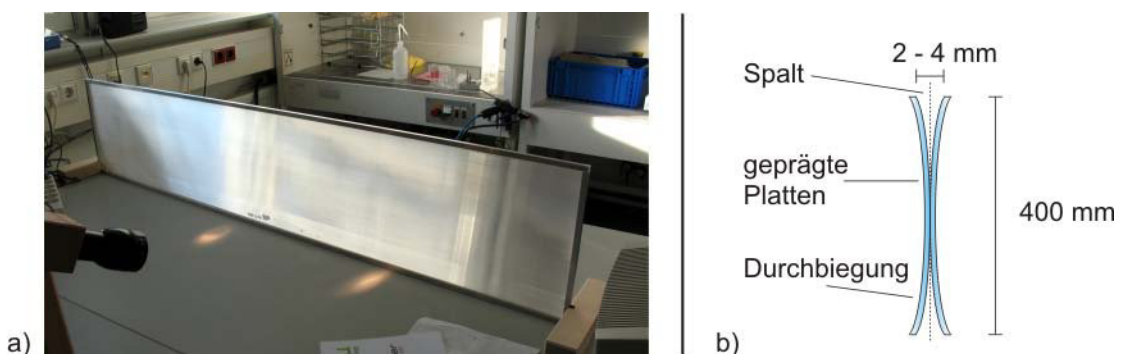


Bild 3.8: a) Im Heißprägeverfahren hergestellter Demonstrator mit Abmessungen von $1500\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ (Demonstrator hergestellt durch die Firma *Karl Jungbecker GmbH & Co. KG*). b) Die Durchbiegung der Platten bewirkt einen Spalt von bis zu 4 mm .

Mit diesem Demonstrator konnte die erwartete Lichtlenkfunktionalität bestätigt werden. Allerdings zeigte sich, dass die Platten nach der Herstellung über ihre Höhe eine Durchbiegung aufwiesen, die ohne Klemmung einen Spalt von bis zu 4 mm erzeugt hätte (b). Die Klemmung in die Aluminiumprofile reduzierte das Spaltmaß zwar

deutlich, allerdings wurde dennoch eine große Menge Silikonöl benötigt, um den Spalt zu füllen. Dieses floss mit der Zeit jedoch wieder ab, weshalb sich die Proben letztendlich nicht als langzeitstabil erwiesen.

Weitere Elemente wurden von Jungbecker mit einem speziellen transparenten Kleber verbunden, mit dem eine stabile Verbindung erzielt werden konnte. Allerdings zeigten sich in den Randbereichen der Platten, wo aufgrund der Durchbiegung die größten Spannungen auftreten, unregelmäßige Klebeflächen mit Luftpneinschlüssen. Diese sahen nicht nur unschön aus, sondern verringerten auch die Lichtlenkeffizienz.

Beim Verkleben von zwei Platten werden hohe Anforderungen, sowohl an den Klebstoff als auch an die technische Ausführung gestellt. Der Kleber selbst muss hochtransparent sein und darf auch nach langer Zeit und direkter Sonneneinstrahlung weder eintrüben noch an Klebkraft verlieren. Weiterhin sollte seine optische Brechzahl mit der von PMMA übereinstimmen ($n_{PMMA} = 1,492$), um den Strahlengang des Lichts nicht zu beeinflussen.

Bei der Prozessierung muss der Klebstoff blasenfrei aufgebracht werden und darf unter keinen Umständen in den strukturierten Bereich gelangen. Gleichzeitig müssen die Strukturen beider Platten exakt zueinander ausgerichtet sein, da selbst kleine Rotationsfehler ein unschönes Erscheinungsbild des Systems verursachen können. Das Verkleben von zwei Platten stellt somit einen zusätzlichen und vor allem kritischen Prozessschritt dar, der nach Möglichkeit vermieden werden sollte. Dies gelingt zum Beispiel mit einem Verfahren, bei dem beide Strukturseiten gleichzeitig in ein einzelnes PMMA-Element geprägt werden.

3.3.2.3 Doppelseitiges Heißprägen

Das doppelseitige Heißprägen erfolgt analog zum oben beschriebenen einseitigen Prozess. Wichtigster Unterschied ist, dass die Substratplatte durch ein zweites Formwerkzeug ausgetauscht wird. Da das PMMA beim einseitigen Prägeprozess nicht notwendigerweise von der Substratplatte her beheizt werden muss, sollte ein Heizelement nachgerüstet werden. Andernfalls kann sich an den beiden Strukturseiten ein unterschiedliches Fließverhalten ergeben, wodurch die Gleichmäßigkeit der Abformqualität sinkt.

Weiterhin ist es sinnvoll beide Formwerkzeuge lateral und axial zueinander auszurichten (siehe Bild 3.9 (a)). Die in dieser Arbeit entwickelten Strukturen wurden zwar so ausgelegt, dass bei einer Fehlausrichtung kein Effizienzverlust bei der Lichtlenkung auftritt, allerdings kann das Erscheinungsbild der Vorrichtung beispielsweise durch Moiré-Effekte³ beeinträchtigt werden. Bild 3.9 (b) zeigt den Querschnitt eines beidseitig geprägten Lichtlenksystems aus PMMA.

³ Probleme, die durch mangelnde thermische Kontrolle und fehlerhafte Ausrichtung aufgetreten sind, werden in Kapitel 5 besprochen.

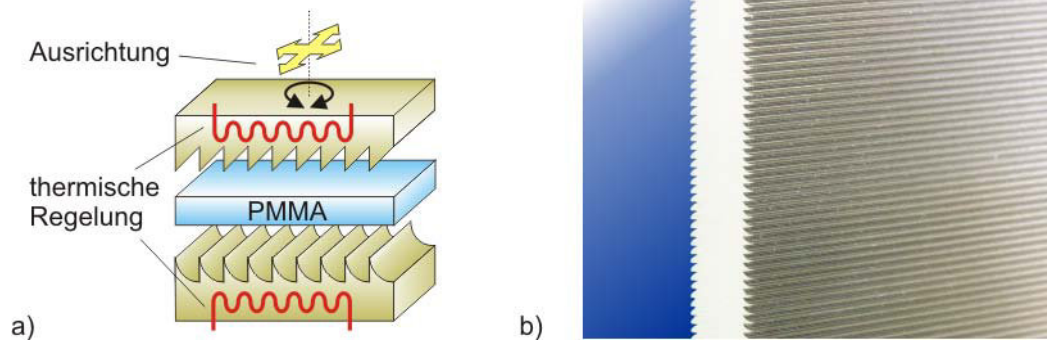


Bild 3.9: a) Beim beidseitigen Prägen sollten beide Formwerkzeuge beheizt und lateral sowie axial zueinander ausgerichtet werden. b) Doppelseitig geprägte Platte mit Strukturen von $500\ \mu\text{m}$.

3.4 Alternative Herstellungsverfahren

Das Gießverfahren kann gut bei der Herstellung von Prototypen zum Einsatz kommen während sich das Heißprägeverfahren zur Fertigung von Lichtlenkelementen aus Kunststoff von mittleren Stückzahlen eignet. Im Folgenden sollen ergänzend das Rolle-zu-Rolle Verfahren und die Prägung von Glas beschrieben werden. Beide Verfahren sind dank ihrer enormen Wirtschaftlichkeit oder ihrer Vorteile hinsichtlich des Glasbaus vor allem für die weiterführende Arbeit mit mikrostrukturierten Systemen von Interesse.

3.4.1 Rolle-zu-Rolle Verfahren

Ein Nachteil des Heißpräge- und Gießverfahrens ist die relativ lange Prozesszeit, die dadurch entsteht, dass die Formstücke lange im Werkzeug verweilen und zeitaufwendige Temperierschritte durchlaufen. Beim Rolle-zu-Rolle Verfahren wird ein kontinuierlicher Strukturierungsprozess genutzt, mit dem sich Produktionskapazität und Wirtschaftlichkeit deutlich erhöhen lassen.

Wie der Name bereits sagt, wird im Prozess von Rolle zu Rolle gearbeitet: Das Ausgangsmaterial ist eine unstrukturierte und aufgerollte Kunststoffolie. Im Prozess wird sie kontinuierlich abgerollt und mit Hilfe einer Struktur- bzw. Prägewalze strukturiert. Anschließend wird das fertige Produkt wieder aufgerollt. Zwei Varianten dieses Prozesses sind in Bild 3.10 schematisch dargestellt: Die Strukturierung im Heißprägeverfahren (a) und die Strukturierung einer UV-härtenden Lackschicht (b).

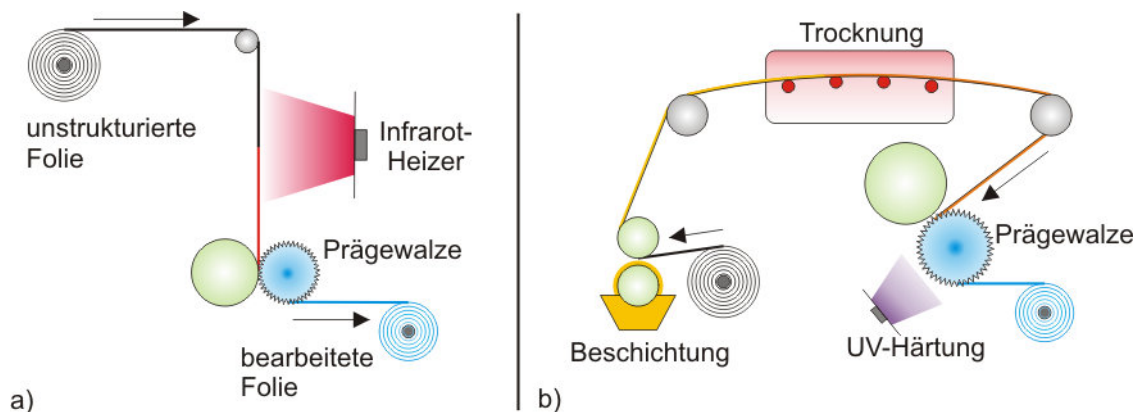


Bild 3.10: Rolle-zu-Rolle Verfahren: a) Rollen-Heißprägeverfahren: Die Folie wird mit einem Infrarot-Heizelement erweicht und dann von einer Prägewalze strukturiert. b) UV-Prägeverfahren: Eine Trägerfolie wird mit UV-härtendem Lack beschichtet, getrocknet und dann auf der Prägewalze strukturiert. Durch UV-Belichtung härten die Strukturen aus (Bilder erstellt in Anlehnung an [Nad10]).

Beim Heißprägeverfahren (a) wird eine unstrukturierte Polymerfolie mit einem Heizstrahler auf seine Prägetemperatur erhitzt, sodass sie erweicht. Das erweichte Material

wird dann mit Hilfe der Prägewalze und einer Konterwalze strukturiert und gleichzeitig kontrolliert heruntergekühlt, damit sich die Strukturen verfestigen.

Bei der Folienbeschichtungstechnik (b) wird eine Trägerfolie mit UV-härtendem Lack beschichtet und in einer Trockenkammer getrocknet. Dadurch bekommt der Lack die richtige Fließfähigkeit, um mit der Prägewalze strukturiert zu werden. Um eine Deformierung der Strukturen zu verhindern, kann die UV-Härtung noch auf der Prägewalze erfolgen.

In der Literatur findet man zahlreiche Varianten dieser Prozesse, die sich hinsichtlich Folienverlaufs, Position der einzelnen Walzen, zusätzlichen Temperierschritten oder auch der Materialwahl voneinander unterscheiden [Nen06, Wor08, Ngs09, Nad10, Vel10].

Die große Herausforderung beim Rolle-zu-Rolle Verfahren ist stets, die Strukturen innerhalb kürzester Zeit zu formen und diese Form direkt zu festigen. Hier ist eine genaue thermische Kontrolle enorm wichtig, da Zugkräfte ebenso wie Oberflächenspannungen zu warme und damit auch zu weiche Strukturen wieder verformen. Eine zu starke Kühlung hingegen würde den Formungs- und Entformungsvorgang auf der Prägewalze stören.

Für eine kontinuierliche Strukturierung im Rollenverfahren eignen sich vor allem linienförmige Strukturen, wie sie beim mikrostrukturierten Lichtlenksystem vorliegen. Da mit zunehmender Strukturtiefe mehr Material geformt und gehärtet werden muss, liegt die momentan mögliche Strukturierungstiefe bei etwa $100\ \mu\text{m}$ bis $150\ \mu\text{m}$ (Stand: Anfang 2012). Allerdings besteht ein großes Forschungsinteresse an diesem Thema, sodass hinsichtlich Abformgenauigkeit und maximaler Strukturtiefe laufend Fortschritte gemeldet werden.

Mit dem Rolle-zu-Rolle Verfahren können mehrere Meter Material pro Minute mit einer Struktur versehen werden und eine nahezu endlose Folie erstellt werden. Der einzig begrenzende Faktor ist die Breite der Walzen. Derzeit ist es möglich mit Trommeldrehmaschinen⁴ mehr als $2\ \text{m}$ breite Walzen mit Mikrostrukturen zu versehen [Kug12a], sodass ausreichend breite Folien herstellbar sind, um selbst größte Oberlichter mit Lichtlenkelementen zu bestücken.

⁴ Trommeldrehmaschinen nutzen ein Drehverfahren: Die unstrukturierte Walze wird langsam gedreht und die Kontur eines Formdiamanten wird analog zum oben beschriebenen Hobelverfahren (Abschnitt 3.1.3) in die Walze gehobelt.

3.4.2 Strukturierung von Glas

Die Zusammenführung verschiedener Materialien in einem System wirft stets die Frage der Kompatibilität auf. Bei der Integration eines Lichtlenkelements aus Kunststoff in ein Fenster müssen beispielsweise unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten beachtet werden, um Spannungen im Material zu verhindern, die Beschädigungen wie Verformung oder Rissbildung hervorrufen. Die PMMA-Platte sollte demnach „schwimmend“ verbaut werden. Weiterhin können chemische Reaktionen auftreten, die eine Eintrübung oder ein Beschlagen des Fensterinnenbereiches zur Folge haben.

Für den Hersteller der Verglasung wäre demnach eine Lichtlenkvorrichtung aus Glas wünschenswert, da er damit der Problematik unterschiedlicher Materialsysteme aus dem Weg gehen kann. Wenn er in der Lage ist das lichtlenkende Glaselement selbst herzustellen, bedeutet das einheitliche Materialsystem für ihn auch einen wirtschaftlichen Vorteil, da er nicht auf den Zukauf eines PMMA-Elements vom Kunststoffspezialisten angewiesen wäre.

Der Strukturierungsprozess von Glas kann prinzipiell mit dem Heißprägen von PMMA verglichen werden. Allerdings sind die Prozessbedingungen schwieriger zu kontrollieren [Hsu09, Ede10], was vor allem an der erheblich höheren Glasübergangstemperatur T_g liegt, die je nach Glasart bei rund $450^\circ C$ liegt. Eine typische Entformungstemperatur liegt bei etwa $300^\circ C$, wodurch eine deutlich höhere Temperaturdifferenz zwischen Prägen und Entformung entsteht. Die Temperaturdifferenz von $150^\circ C$ bewirkt einen stärkeren Schrumpfeffekt, der leicht zu Spannungen und Rissbildung führen kann, insbesondere da Glas in dieser Hinsicht deutlich fragiler ist als PMMA. Derzeit können Mikrostrukturen mit einer Tiefe von rund $50 \mu m$ in Glas geprägt werden (Stand: März 2012).

Die linienförmigen Mikrostrukturen stellen für das Glas eine Sollbruchstelle dar. Daher ist bei Verarbeitung und Lagerung eine besondere Sorgfalt erforderlich, um Glasbruch zu vermeiden.

3.5 Integration in die Verglasung

Durch die verschiedenen Herstellungsprozesse ist es möglich das Lichtlenksystem auf unterschiedliche Weise in die Verglasung zu integrieren.

Bild 3.11 (a) zeigt den konventionellen Einbau der Lichtlenkvorrichtung in ein separates Oberlichtfenster mit Dreischeibenverglasung. Das in der Skizze farbig gekennzeichnete Lichtlenkelement ersetzt dabei die mittlere Scheibe. Diese Verglasungsvariante hat den Vorteil, dass nur das Oberlicht eine Spezialverglasung ist und der untere Teil des Fensters unabhängig vom Lichtlenksystem mit einer Standardverglasung versehen werden kann. Im Zuge von Sanierungen könnten vorhandene Oberlichter separat und mit geringem Aufwand durch Lichtlenkoberlichter ersetzt werden. Der breite Rahmen zwischen Oberlicht und Hauptfenster gilt jedoch zunehmend als Nachteil, da der Raum durch ihn abgeschattet wird und er für manche Architekten als „optisch unschön“ oder unmodern gilt.

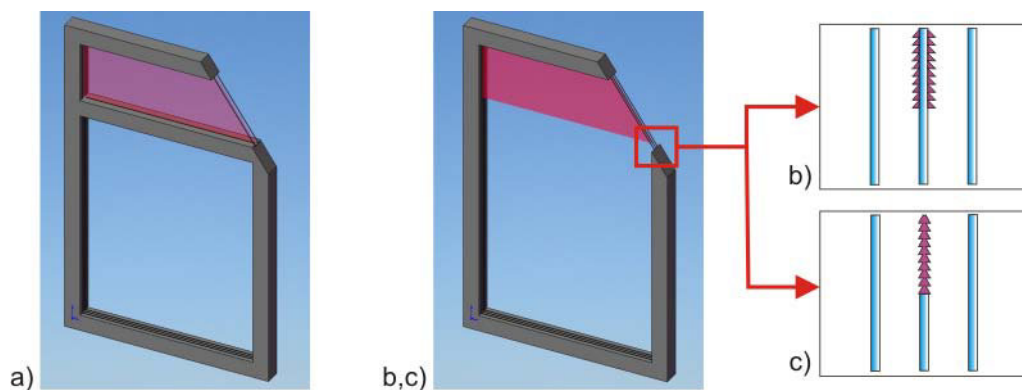


Bild 3.11: Integration der Lichtlenkvorrichtung in ein Fenster: a) Als Mittelscheibe in einem separaten Oberlichtfenster. b) Als laminierte Folie im oberen Teil einer Mittelscheibe. c) Als auf Stoß gestellte Vorrichtung unmittelbar über der normalen Mittelscheibe.

Die Integrationsvarianten (b) und (c) bieten daher optisch attraktive Alternativen ohne störenden Rahmen, der das Fenster teilt. In (b) werden mikrostrukturierte Folien im oberen Bereich des Fensters von beiden Seiten auf die Mittelscheibe laminiert. In (c) wird ein mechanisch stabiles Lichtlenkelement entweder direkt auf die untere Mittelscheibe gestellt oder mittels kleiner Halterungen knapp oberhalb von ihr fixiert. Für Variante (c) wäre ein Lichtlenkelement aus Glas vorteilhaft, da sich damit ein einheitliches Materialsystem ergibt. Bei direkt aufeinander stehenden Scheiben würden die unterschiedlichen Materialeigenschaften ansonsten besonders deutlich werden.

Bild 3.12 zeigt exemplarisch eine am Fenster angebrachte mikrostrukturierte Folie. Diese besteht aus etwa $1,5\text{ mm}$ dickem PDMS und haftet wie eine Adhäsionsfolie kleberlos auf Glas. Als Gießform wurde eine strukturierte PMMA-Platte benutzt.

Da sich das abgebildete Fenster nicht öffnen lässt, wurde nur die Innenraumseite des Fensters mit Folie versehen, wodurch die Effizienz der Lichtlenkung eingeschränkt wird. Der optische Gesamteindruck entspricht allerdings demjenigen einer beidseitig aufgetragenen Folie.

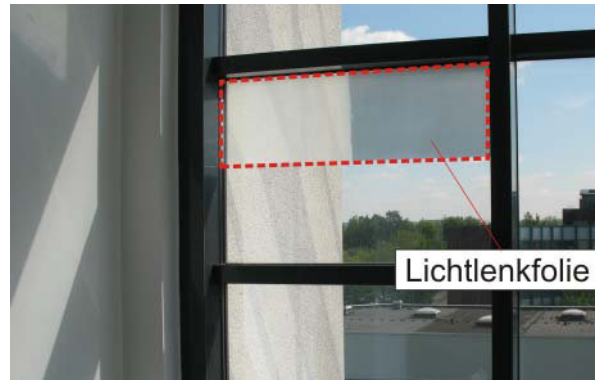


Bild 3.12: Auf die Verglasung laminierte Lichtlenkfolie aus PDMS. Die Folie haftet wie Adhäsionsfolie kleberlos auf der Scheibe.

Fazit

In diesem Kapitel wurde anhand der vorgestellten Herstellungsverfahren und Möglichkeiten der Integration in die Verglasung, vor allem eines ganz deutlich: Das mikrostrukturierte Lichtlenksystem ist außerordentlich flexibel!

Es kann mit mindestens vier verschiedenen Herstellungsprozessen produziert werden, wovon zwei – das Gieß- und das Heißprägeverfahren – auch ausgiebig erprobt wurden. Beide Verfahren benötigen flächige Formwerkzeuge, deren Eigenschaften die Größe und Qualität der Lichtlenkelemente bestimmen. Für die Suche nach einer für die Lichtlenkung geeigneten Struktur muss berücksichtigt werden, dass grundsätzlich nur linienförmige Strukturen in Frage kommen. Deren Profil kann aber annähernd frei variiert werden, sofern sie geometrisch definierbar sind und keine Hinterschneidungen aufweisen. Ansonsten könnten die Formdiamanten nicht geschliffen oder geprägte Elemente nicht aus der Form gelöst werden.

Das Gieß- und das Heißprägeverfahren eignen sich zur Fertigung von Prototypen und zur Produktion von mittleren Stückzahlen. Andere Verfahren, wie das Rolle-zu-Rolle Verfahren, kommen ebenfalls für das Lichtlenksystem in Frage und bieten das Potenzial der wirtschaftlich enorm vorteilhaften Massenproduktion.

Der Einbau des Systems in die Verglasung ist ebenfalls auf verschiedene Weise möglich: Als konventionelles, separates Oberlicht oder auch als Variante, bei der nur der obere Teil einer Scheibe beansprucht wird und somit eine Verglasung ohne störenden Querbalken entsteht.

Die große Flexibilität des mikrostrukturierten Systems wird dazu führen, dass sich sicherlich eine Nische für einen Markteinstieg findet. Diese kann als Ausgangspunkt für eine weitere Marktdurchdringung dienen.

4 Simulation

Computersimulationen sind seit Jahren das zentrale Werkzeug bei der Entwicklung komplexer Systeme, auch optischer Systeme. Mit ihrer Hilfe kann bereits vor der Herstellung kostspieliger Prototypen eine Einschätzung über die Performanz eines Systems getroffen werden, wodurch Schwachstellen offenbart und vermieden werden können. Zusätzlich kann so auch Zeit gespart werden. In dieser Arbeit wurden Computersimulationen dazu eingesetzt eine optische Konfiguration aufzufinden, die die Anforderungen des zentralen Lichtlenkkonzepts erfüllt und mit den in Kapitel 3 genannten Herstellungsvarianten produziert werden kann.

In diesem Kapitel soll das angewendete Simulationsverfahren erläutert und die Schritte, die zur Identifikation der Lichtlenkkonfiguration geführt haben, vorgestellt werden.

Zunächst werden die für die Strahlverfolgung wichtigsten optischen Zusammenhänge beschrieben, da hier – wie bei allen Simulationsverfahren – grundlegende *physikalische Gesetze* zur Anwendung kommen (Kap. 4.1). Dann werden die *wichtigsten verwendeten Softwareprodukte* beschrieben (Kap. 4.2), mit denen die geometrischen Objekte erstellt (CAD¹-Programm), die Strahlverfolgung durchgeführt (Raytracing) und die Ergebnisse ausgewertet und aufbereitet wurden (Datenverarbeitung).

Die aus hunderten Einzelergebnissen gewonnenen Erkenntnisse werden in den *Simulationsergebnissen* zusammengefasst (Kap. 4.3). Hier wurden einige grundlegende Zusammenhänge und Basis-Designregeln herausgearbeitet, die bei der Konstruktion eines Lichtlenksystems dieser oder ähnlicher Art zu berücksichtigen sind.

¹ CAD: computer aided design; deutsch: rechnerunterstütztes Konstruieren.

4.1 Optische Grundlagen für die Strahlverfolgung

Ein optisches Strahlverfolgungsprogramm macht prinzipiell nichts anderes als physikalische Gesetzmäßigkeiten und Wirkungen auf einen Lichtstrahl zu berechnen und diesen Vorgang für sehr viele Strahlen zu wiederholen. Für die Simulation sind Position und Ausbreitungsrichtung \underline{k} sowie die Größe seiner Strahlungsleistung Φ_e [W] die wichtigsten Basisinformationen über den Strahl [Ped02, Bor80].

4.1.1 Veränderung der Ausbreitungsrichtung: Brechung und Reflexion

Breitet ein Strahl sich außerhalb von Materie aus, so geschieht dies verlustfrei und mit Lichtgeschwindigkeit c . Trifft der Strahl bei seiner Ausbreitung auf eine optische Grenzfläche, so wird er in einen transmittierten und reflektierten Teil gespalten, deren jeweilige Richtung und Strahlungsleistung anhand der optischen Materialeigenschaften berechnet wird. An einer glatten Oberfläche wird der reflektierte Strahlteil gerichtet reflektiert, indem Einfallswinkel und Ausfallswinkel übereinstimmen ($\alpha = \alpha_r$, siehe Bild 4.1 (a)). Die Ausbreitungsrichtung \underline{k}_t des transmittierten Lichtstrahls wird mit dem snelliusschen Brechungsgesetz bestimmt:

$$N_1 \sin \alpha = N_2 \sin \beta \quad 4.1$$

Der Winkel α ist der Winkel zum Lot des einfallenden Strahls und Winkel β der Winkel zum Lot des gebrochenen Strahls. N_1 und N_2 bezeichnen die optischen Brechzahlen in komplexer Form, die für nicht-absorbierende (bzw. wenig-absorbierende) Materialien auf ihre Realteile n_1 und n_2 reduziert werden können, was in diesem Fall zulässig ist.

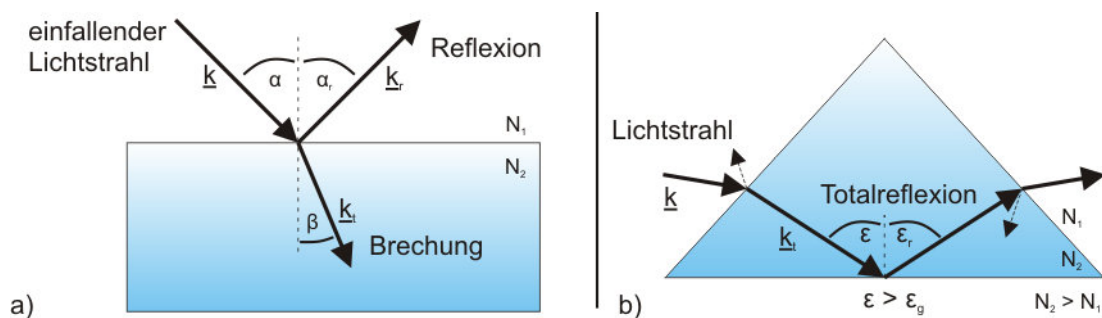


Bild 4.1: a) Brechung eines Lichtstrahls an einer optischen Grenzfläche. b) Totalreflexion am Boden eines Prismas.

In Bild 4.1 (b) wird der Spezialfall der Totalreflexion am Verlauf eines Strahls durch ein Prisma verdeutlicht. Der Strahl trifft unter einem verhältnismäßig großen Winkel ϵ

auf die Bodenfläche des Prismas. Dadurch tritt er nicht aus dem optisch dichteren Medium aus, sondern wird vollständig reflektiert. Diese vollständige Reflexion, die als Totalreflexion bezeichnet wird, ist für Strahlen, deren Winkel ε größer als der Grenzwinkel der Totalreflexion ε_g ist, möglich. Der Grenzwinkel der Totalreflexion ε_g lässt sich ebenfalls mit dem snelliusschen Brechungsgesetz berechnen und hängt damit von den optischen Brechzahlen der Medien ab:

$$\varepsilon_g = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad 4.2$$

Brechung und Totalreflexion sind die wichtigsten physikalischen Vorgänge beim mikrostrukturierten Lichtlenksystem und werden zur Umlenkung des einfallenden Sonnenlichts genutzt.

4.1.2 Aufspaltung der Strahlungsleistung: Fresnelsche Formeln

Die quantitative Berechnung der Strahlungsleistung des transmittierten bzw. reflektierten Teilstrahls ist mit den sogenannten Fresnelschen Formeln möglich [Bor80]. Bevor diese zur Anwendung kommen, sollte noch einmal hervorgehoben werden, dass Licht eine elektromagnetische Welle ist. Als solche hat sie eine magnetische und eine elektrische Komponente, die senkrecht zueinander und senkrecht zum Ausbreitungsvektor \underline{k} schwingen, wie es in Bild 4.2 (a) zu sehen ist.

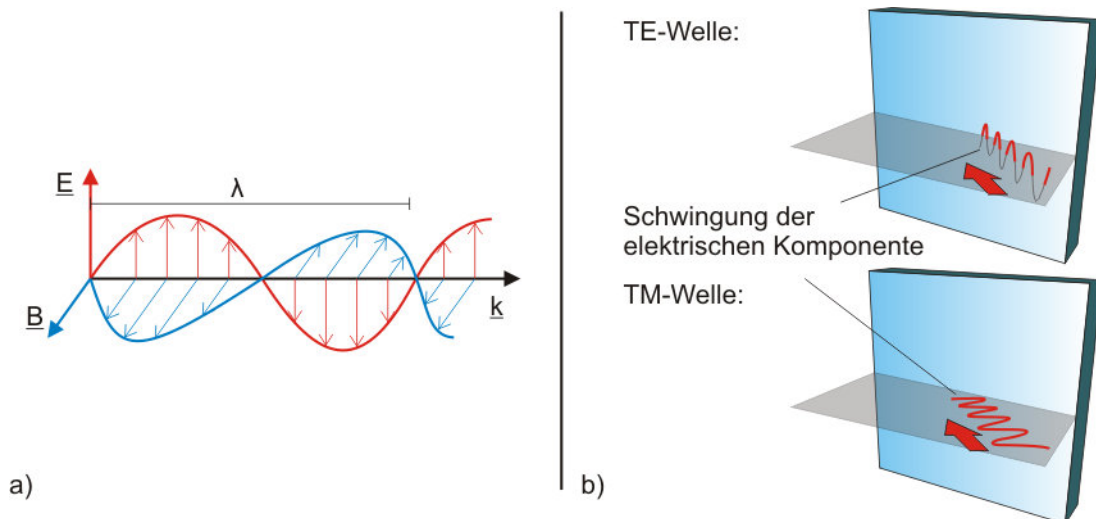


Bild 4.2: a) Licht ist eine elektromagnetische Welle und verfügt über eine elektrische und eine magnetische Komponente, die senkrecht zueinander schwingen. b) Polarisation: Bei einer TE-Welle schwingt die elektrische Komponente senkrecht zur Einfallsebene. Bei einer TM-Welle parallel.

Die Schwingrichtung der elektrischen Komponente, die sogenannte Polarisation, ist für die Berechnung der Strahlungsleistung eine wichtige Komponente. Es gibt zwei Spezialfälle: die senkrechte und die parallele Polarisation. Eine senkrecht polarisierte Welle wird auch TE-Welle (transversal-elektrisch) genannt, da die elektrische Komponente senkrecht zur Einfallsebene schwingt, wie es in Bild 4.2 (b) oben gezeigt wird. Eine parallel polarisierte, sogenannte TM-Welle (transversal-magnetisch), schwingt so, dass die elektrische Komponente und die Einfallsebene parallel zueinander liegen (Bild 4.2 (b), unten).

Die Fresnelschen Formeln unterscheiden diese beiden Fälle: So werden mit den Formeln 4.3 und 4.4 die Amplitudenkoeffizienten t_s des transmittierten Anteils und r_s des reflektierten Teils für eine TE-Welle berechnet.

Fresnelsche Formeln für eine TE-Welle:

$$t_s = \frac{2N_1 \cos \alpha}{N_1 \cos \alpha + \frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}} N_2 \cos \beta} \quad 4.3$$

$$r_s = \frac{N_1 \cos \alpha - \frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}} N_2 \cos \beta}{N_1 \cos \alpha + \frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}} N_2 \cos \beta} \quad 4.4$$

Fresnelsche Formeln für eine TM-Welle:

$$t_p = \frac{2N_1 \cos \alpha}{\frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}} N_2 \cos \alpha + N_1 \cos \beta} \quad 4.5$$

$$r_p = \frac{\frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}} N_2 \cos \alpha - N_1 \cos \beta}{\frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}} N_2 \cos \alpha + N_1 \cos \beta} \quad 4.6$$

Diese Formeln lassen sich häufig vereinfachen. Für Dielektrika gilt, dass die magnetische Permeabilität beider Medien $\mu_{r1} = \mu_{r2} = 1$ und die Absorption im Material sehr klein ist. Formel 4.7 und 4.8 zeigen diese Vereinfachungen für eine TE-Welle.

Fresnelsche Formeln für Dielektrika (TE-Welle):

$$t_s = \frac{2n_1 \cos \alpha}{n_1 \cos \alpha + n_2 \cos \beta} \quad 4.7$$

$$r_s = \frac{n_1 \cos \alpha - n_2 \cos \beta}{n_1 \cos \alpha + n_2 \cos \beta} \quad 4.8$$

Mit diesen Werten kann nicht direkt die Strahlungsleistung ermittelt werden, da es sich um Amplitudenkoeffizienten handelt. Diese können jedoch in Leistungskoeffizienten überführt werden, was für TE- und TM-Welle gleichermaßen geschieht:

$$T_{s,p} = \frac{n_2 \cos \beta}{n_1 \cos \alpha} \cdot (t_{s,p})^2 \quad 4.9$$

$$R_{s,p} = (r_{s,p})^2 \quad 4.10$$

4.1.3 Beispiel: Strahlversatz durch eine Planplatte

Um zu verdeutlichen, wie aufwendig eine Systemanalyse von Hand wäre, soll nun exemplarisch die Rechnung für die Transmission eines einzelnen Lichtstrahls durch eine Planplatte aus PMMA vorgeführt werden. Wie Bild 4.3 zeigt, trifft der Strahl unter einem Winkel von $\alpha_1 = 45^\circ$ ein und hat eine Strahlungsleistung Φ_e von 1 W. Die Rechnung wird für eine TE- und für eine TM-Welle durchgeführt, da Tageslicht in der Regel eine zufällige Polarisation aufweist.

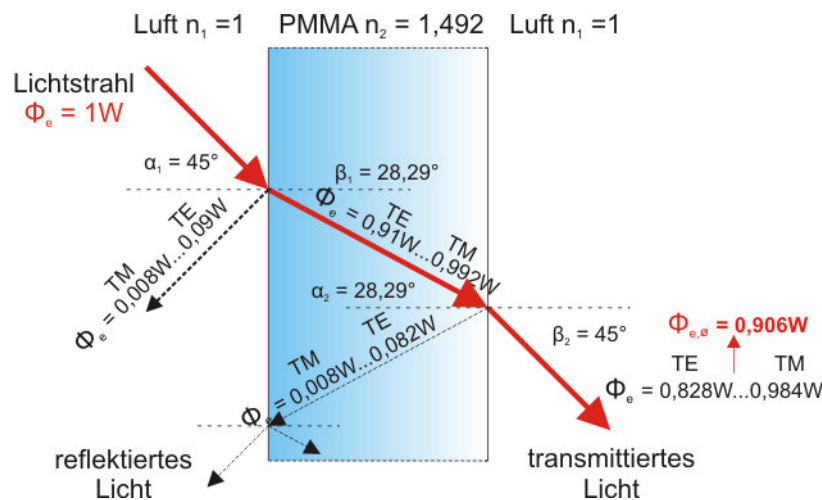


Bild 4.3: Transmission eines Strahls durch eine Planplatte: An jeder Grenzfläche wird der Lichtstrahl in seinen reflektierten und transmittierten Anteil geteilt.

An der ersten Grenzfläche teilt sich der Strahl. Der Winkel des gebrochenen Strahls β_1 beträgt $\beta_1 = 28,29^\circ$ (Formel 4.1). Der andere Teil wird unter $\alpha_r = 45^\circ$ gerichtet reflektiert.

Die Amplitudenkoeffizienten an der ersten Grenzfläche ergeben sich für eine TE-Welle zu (Formel 4.7 und 4.8):

$$t_s = \frac{2 \cdot \cos 45^\circ}{\cos 45^\circ + 1,492 \cdot \cos 28,29^\circ} = 0,6998$$

$$r_s = \frac{\cos 45^\circ - 1,492 \cdot \cos 28,29^\circ}{\cos 45^\circ + 1,492 \cdot \cos 28,29^\circ} = -0,3$$

Das negative Vorzeichen beim reflektierten Strahl bedeutet eine Phasendrehung um 180° . Für eine TM-Welle ergeben sich Amplitudenkoeffizienten von $t_p = 0,7306$ und $r_p = 0,09$.

Der zugehörige Leistungskoeffizient für den transmittierten Anteil der TE-Welle beträgt (Formel 4.9):

$$T_{s,1} = \frac{1,492 \cdot \cos 28,29^\circ}{\cos 45^\circ} \cdot (0,6998)^2 = 0,91$$

Somit hat der transmittierte Anteil der TE-Welle nach der ersten Grenzfläche im PMMA eine Leistung von $\Phi_{e,t,TE} = 0,91 \text{ W}$. Analog werden die übrigen Werte für den reflektierten Strahl ($\Phi_{e,r,TE} = 0,09 \text{ W}$, Formel 4.10) und für die TM-Welle berechnet ($\Phi_{e,t,TM} = 0,992 \text{ W}$ und $\Phi_{e,r,TM} = 0,008 \text{ W}$).

Nach der zweiten Grenzfläche hat der im Bild rot markierte Strahl eine Strahlungsleistung von $\Phi_{e,TE} = 0,828 \text{ W}$ bzw. $\Phi_{e,TM} = 0,984 \text{ W}$. Nimmt man aufgrund der zufälligen Polarisation das arithmetische Mittel, so ergibt sich $\Phi_{e,\emptyset} = 0,906 \text{ W}$.

Die manuelle Berechnung für einen einzelnen Strahl ist selbst in diesem trivialen Fall bereits recht aufwändig. Es ist naheliegend, dass ein komplexer Körper, in dem viele Strahlen auf unterschiedliche Geometrien fallen, nicht mehr sinnvoll von Hand analysierbar ist. Ein optisches Strahlverfolgungsprogramm übernimmt daher diese Berechnungen, geht aber prinzipiell nach dem obigen Verfahren vor.

Simulationsprogramme bieten neben der Berechnung des grundlegenden optischen Strahlverlaufs auch weitere Funktionen um Material- und Oberflächeneigenschaften mit in die Rechnung einzubeziehen. So können beispielsweise Dispersion, Oberflächenstreuung, Volumenstreuung oder Materialabsorption bei Bedarf in die Simulation eingebunden werden, vorausgesetzt die Materialeigenschaften sind hinreichend bekannt.

4.2 Simulationssoftware

Wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, besteht die Lichtlenkvorrichtung aus einem transparenten Körper, dessen Oberfläche so mikrostrukturiert ist, dass eintreffendes Tageslicht durch Brechung und Totalreflexion in Richtung Raumdecke umgelenkt wird.

Um diesen Vorgang zu untersuchen, werden in der Simulation mindestens drei Dinge benötigt: ein Körper, der mit lichtlenkenden Strukturen versehen ist, eine positionierbare Lichtquelle, die Strahlen in Richtung des Körpers emittiert, und ein Detektor, der erfasst, wo der Weg der Lichtstrahlen letztendlich endet.

Für den Simulationsprozess ergeben sich also folgende drei Schritte:

1. Definition der Geometrie
2. Strahlverfolgung
3. Auswertung der Ergebnisse

Die eigentliche Simulationsarbeit wird während der Strahlverfolgung geleistet. Diese wurde mit *ZEMAX*, einem Programm zur Simulation allgemeiner optischer Systeme, durchgeführt. Da es bereits häufig am Arbeitsgebiet eingesetzt werden konnte, wurde es auch hier verwendet. *ZEMAX* bietet zwar die Möglichkeit Geometrien zu definieren und Daten auszuwerten, allerdings stößt man bei diesen Funktionen schnell an Limitationen, da der eigentliche Fokus der Software auf dem Raytracing ruht. Daher wurden mit *SolidWorks* als CAD-Programm und *MS Office Excel* zur Datenauswertung ergänzende Softwareprodukte benutzt.

4.2.1 CAD-Software SolidWorks

SolidWorks ist ein professionelles 3D-CAD-Programm und wird dank seiner universellen Einsetzbarkeit in Unternehmen und Betrieben aus den unterschiedlichsten Fachbereichen, von Maschinenbau bis zum Konsumgüterdesign, verwendet. Im Vergleich zu den in *ZEMAX* integrierten Programmfunktionalitäten, bietet *SolidWorks* deutlich umfangreichere und komfortablere Möglichkeiten, dreidimensionale Körper am Computer zu erstellen und zu bearbeiten. Aus diesen Gründen wurden die für das Lichtlenksystem in Frage kommenden Strukturen mit *SolidWorks* konstruiert und als STEP- oder IGES-Objekt exportiert. STEP und IGES sind herstellerunabhängige Datenformate für den Austausch von CAD-Informationen und können von *ZEMAX* gelesen und als geometrische Objekte in die Simulation integriert werden².

Bild 4.4 zeigt exemplarisch einen Screenshot von *SolidWorks* während der Konstruktionsphase. Beim Datenaustausch erwies es sich als zweckmäßig einzelne

² Seit Anfang 2012 gibt es eine *ZEMAX*-Programmversion, die den direkten Objektaustausch mit *SolidWorks* ermöglicht.

Strukturen in kleinen Bausteinen (z.B. zehn übereinander liegende Linsen einer Seite) zusammenzufassen und zu exportieren, da damit schnell und einfach neue Systemkombinationen erstellt werden konnten. Zudem verursachte die Verarbeitung mittelgroßer Objektdateien in *ZEMAX* die wenigsten Fehler.

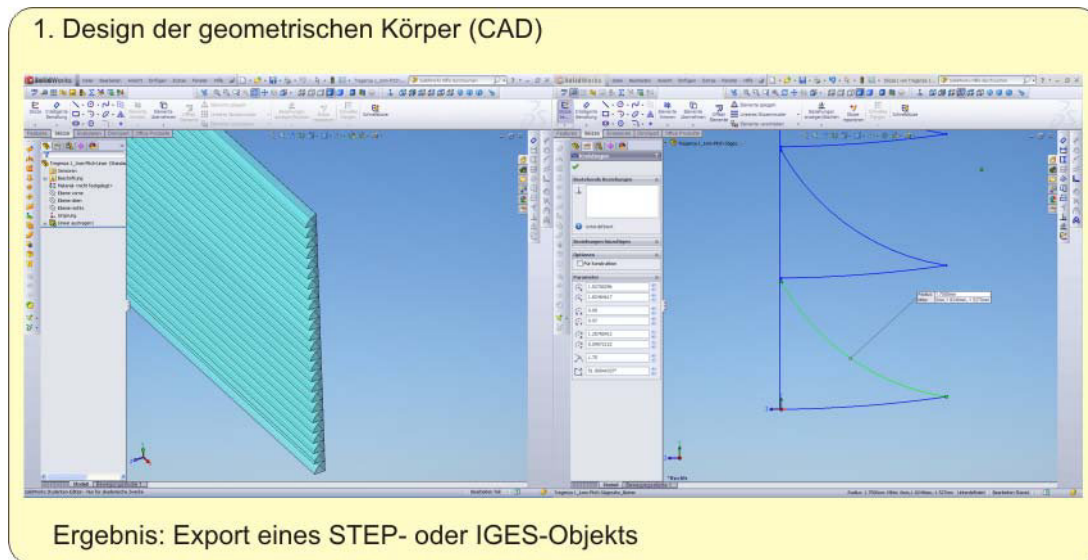


Bild 4.4: Screenshot der CAD-Software SolidWorks.

4.2.2 Raytracing-Software ZEMAX

*ZEMAX*³ (siehe Bild 4.5) ist ein allgemeines Werkzeug zur Untersuchung optischer Systeme. Es bietet zwei unterschiedliche Modi der Strahlverfolgung: den sequentiellen und den nicht-sequentiellen Modus. Der sequentielle Modus wird häufig zum Design von Linsen und anderen optischen Elementen verwendet und ist dadurch gekennzeichnet, dass jedes Element nur einmal und in einer definierten Reihenfolge von einem Strahl durchlaufen wird. Im nicht-sequentiellen Modus hingegen können Objekte auch mehrfach von einem Strahl durchlaufen werden. Für die hier durchgeführten Simulationen wurde der nicht-sequentielle Modus benutzt.

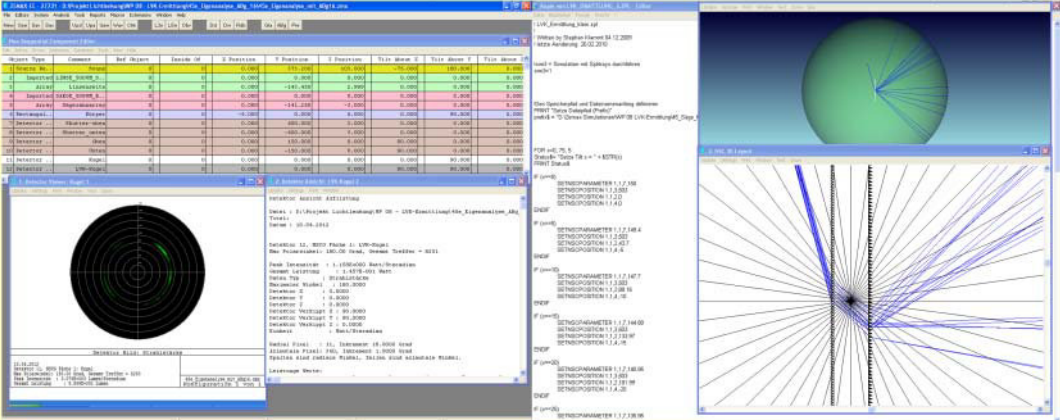
Die optische Strahlverfolgung funktioniert grundsätzlich wie im Beispiel 4.1.3 vorgeführt. Die durchgeführten Simulationen wurden mit mindestens 100000 Strahlen gestartet und es wurde stets die Option gewählt, dass die an den Grenzflächen geteilten Strahlen getrennt voneinander weiterverfolgt wurden. Der Weg der (Teil-) Strahlen wurde so lange weiterverfolgt bis er an einem Detektor durch Absorption oder durch Unterschreiten einer Mindestleistung (10^{-6} der Startleistung) endete.

Bei allen folgenden Raytracing-Bildern ist zu beachten, dass aus Gründen der Übersichtlichkeit nur derjenige Teilstrahl eines gestarteten Strahls abgebildet ist, der beim

³ *ZEMAX* ist keine Abkürzung, sondern der Name des Hundes des Softwareentwicklers.

Splitting die höhere Leistung aufweist. In Bild 4.3 ist das der rot markierte Pfeil. Da die internen Kalkulationen auch die Leistung der nicht eingezeichneten Strahlen berücksichtigen, können Differenzen zwischen Raytracing-Bild und zugehörigem Zahlenwert auftreten. Das einfache Abzählen der Strahlen im Bild liefert also kein belastbares Ergebnis.

2. Simulation / Raytracing
Eingabe:
Import des STEP- oder IGES-Objekts und Integration in die Simulationsumgebung



Ergebnis: Matrix mit Energieverteilung in Abhängigkeit der Raumrichtung

Bild 4.5: Screenshot des Raytracing-Programms *ZEMAX*.

Die Konstruktion der Simulationsumgebung orientierte sich an den in der Literatur üblichen Standards [IEA99]. Da die Entwicklung für mitteleuropäische Lichtverhältnisse durchgeführt und vornehmlich der azimuthal senkrechte Lichteinfall untersucht wurde, konnten einige Änderungen vorgenommen werden, durch die mit weniger Simulationen aussagekräftigere Ergebnisse erzielt wurden.

Bild 4.6 zeigt das Schema der Simulationsumgebung. Die Lichtlenkvorrichtung hat eine Höhe von 30 cm und befindet sich im Koordinatenursprung. Sie wird über ihre ganze Höhe von einer rechteckigen Lichtquelle beleuchtet, die azimuthal senkrecht zur Vorrichtung steht. Die emittierten Strahlen sind parallel und zufällig polarisiert. Ein kugelförmiger Detektor mit einem Durchmesser von 1 m , dessen Mittelpunkt sich ebenfalls im Ursprung befindet, umschließt System und Lichtquelle. Er absorbiert sämtliche emittierte Leistung mit einer vertikalen Ortsauflösung Δ von 1° . Die Leistung, die innerhalb der Halbkugel von $-90^\circ < \theta_2 < 90^\circ$, also auf die rechte Hälfte des Detektors fällt, wird als transmittiert bewertet, die übrige Leistung als reflektiert.

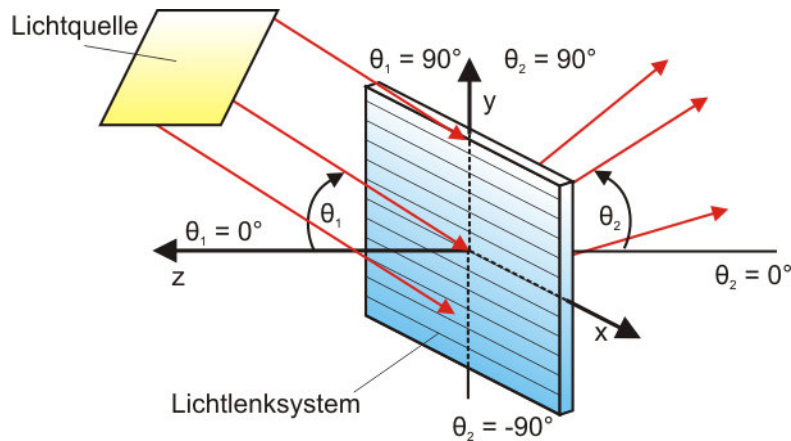


Bild 4.6: Koordinatensystem der Simulationsumgebung.

Ein erstelltes Makro speichert nach einem Simulationsschritt die Ergebnismatrix des Detektors, positioniert die Lichtquelle um und startet eine neue Simulation mit 100000 Strahlen. Die Lichtquelle wird in Schritten von 5° horizontal verstellt, sodass insgesamt der Winkelbereich $0^\circ \leq \theta_1 \leq 75^\circ$ in 16 Simulationen untersucht wird.

4.2.3 Datenverarbeitung mit MS Office Excel

Die Möglichkeiten zur Auswertung der generierten Datenmatrizen mit ZEMAX sind stark eingeschränkt. Da für jedes Lichtlenksystem 16 Datenmatrizen (für jeden Höhenwinkel θ_1 eine Matrix) berücksichtigt werden müssen, wird mit einem externen Datenverarbeitungsprogramm gearbeitet. Hier wurde *MS Office Excel* (siehe Bild 4.7) benutzt.

Die Datenmatrizen werden importiert, geeignet bearbeitet und anschließend werden damit anschauliche Transmissionsdiagramme und Lichtverteilungskurven erstellt. Wie diese Diagramme aussehen und welche wichtigen Informationen sie transportieren wird am besten im folgenden Beispiel deutlich, bei dem eine einfache Standardstruktur exemplarisch untersucht wird.

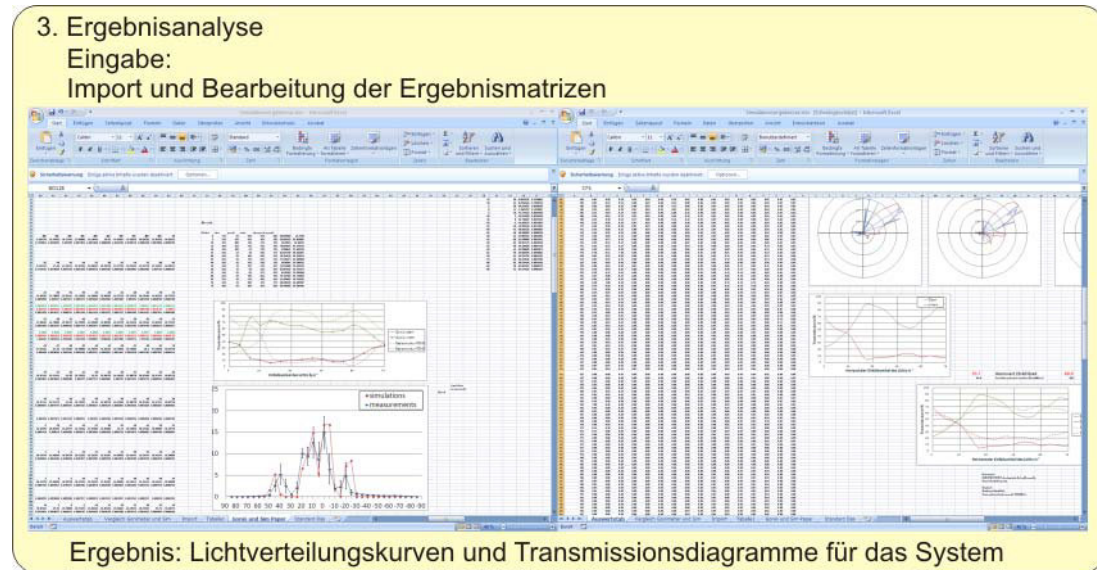


Bild 4.7: Screenshot von *MS Office Excel*: Excel wurde zur Datenaufbereitung und zur Erstellung von Diagrammen genutzt.

4.2.4 Beispiel: Simulation einer Sägezahnstruktur

Im Folgenden soll die Untersuchung einer einfachen prismatischen Vorrichtung vorgeführt werden. Die Vorrichtung habe Sägezähne mit einem Pitchabstand von $500 \mu\text{m}$ und einen Winkel von 35° an der Spitze.

Zu Beginn wird mit *SolidWorks* die Geometrie eines einzelnen Sägezahns definiert, der dann vervielfacht wird, sodass ein Objekt mit einer Höhe von 10 mm entsteht. Dieses wird anschließend als STEP- oder IGES-Objekt exportiert und von *ZEMAX* importiert. Es steht dann dem Simulationsprogramm als Strukturbaustein zur Verfügung, wie es in Bild 4.8 zu sehen ist.

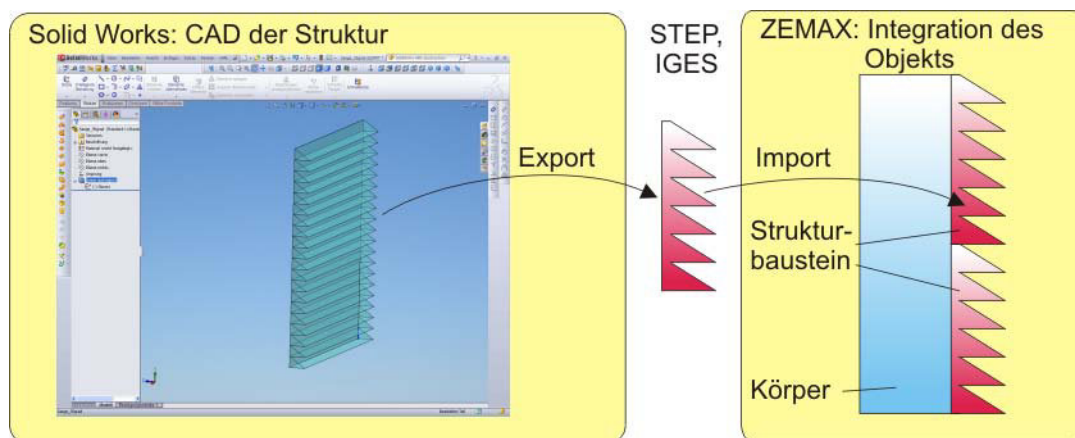


Bild 4.8: CAD der Struktur in *SolidWorks* und Integration des Objekts in *ZEMAX*. Aus Körper und Strukturbausteinen wird das zu simulierende System zusammengesetzt.

In der Simulationsumgebung wird aus mehreren dieser Strukturbausteine und einem Körper ein Lichtlenksystem konstruiert. Da für Körper und Strukturbausteine das gleiche Grundmaterial definiert wird, verschmelzen sie zu einem Gesamtobjekt. In diesem Beispiel wird PMMA als Material gewählt.

Nach der Einrichtung der Simulationsumgebung wird ein Makro gestartet, das die einzelnen Simulationen startet, die zugehörige Positionierung der Lichtquelle von $0^\circ \leq \theta_1 \leq 75^\circ$ vornimmt und das Speichern der Zwischenergebnisse steuert.

In Bild 4.9 sind Strahlverteilungen für die Lichteinfälle $\theta_1 = 15^\circ$, 30° , 45° und 60° dargestellt. Zur Verdeutlichung des Strahlverlaufs wird nur ein schmales Strahlbündel mit einer Breite von etwa vier Strukturen gezeigt. Es ist gut erkennbar, dass das eintreffende Strahlbündel bei der Transmission durch das System meist in ein bis zwei Richtungen aufgespalten wird. In (a) und (b) verlassen alle Strahlen das System unterhalb der Horizontalen und in (c) und (d) wird das Licht nach oben umgelenkt.

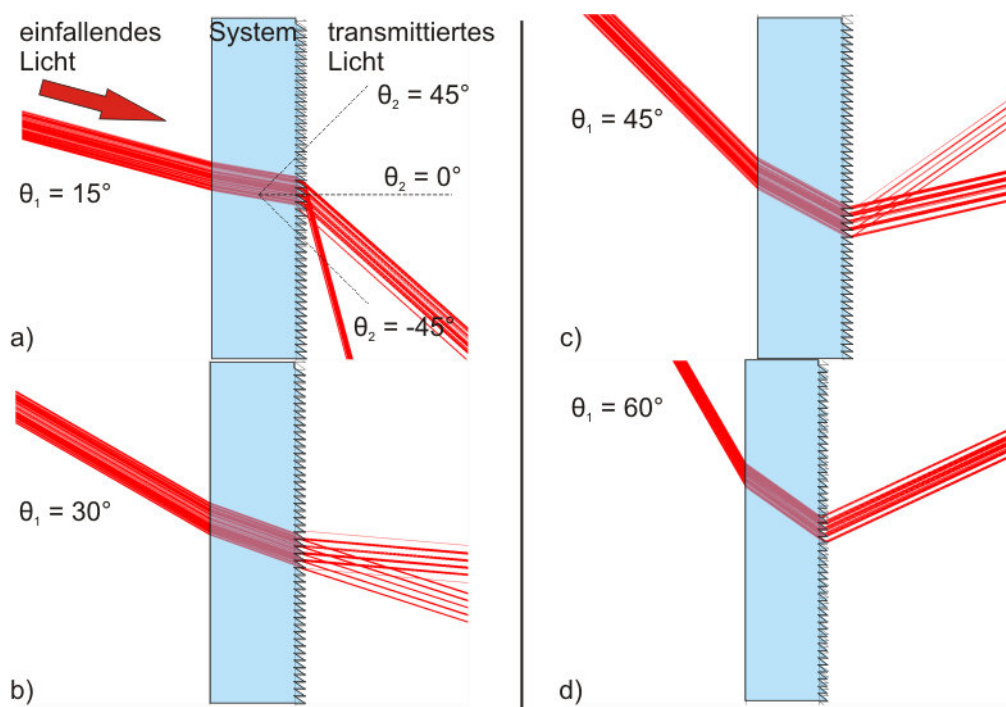


Bild 4.9: Strahlverteilung für ein Sägezahnsystem für Lichteinfälle von $\theta_1 = 15^\circ$, 30° , 45° und 60° .

Diese Form der Analyse kann nur einen stichprobenhaften Einblick in das Lichtlenkverhalten des Systems gewähren. Um eine genauere Bewertung vornehmen zu können, werden die 16 Datenmatrizen, die vom Kugeldetektor erfasst und vom Makro gespeichert wurden, in *MS Office Excel* importiert und ausgewertet. Die am häufigsten erstellten Diagramme sind in Bild 4.10 abgebildet und zeigen das Ergebnis für die Sägezahnstruktur.

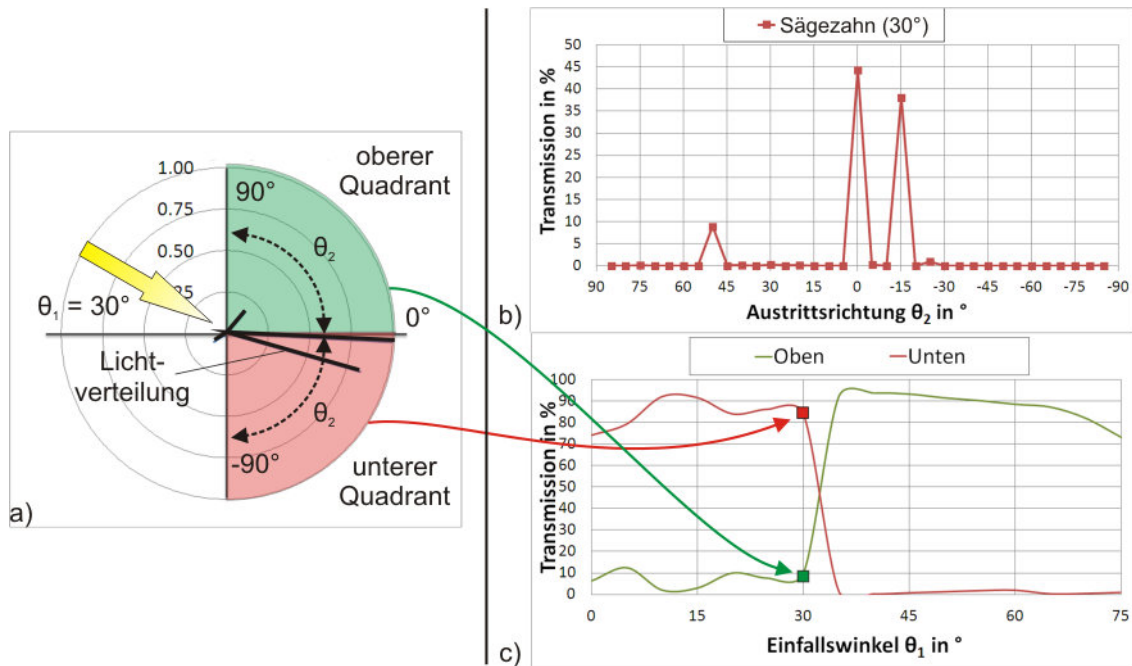


Bild 4.10: Überblick über die wichtigsten Diagramme: a) Lichtverteilungsdiagramm in Polardarstellung mit Normierung auf den Peakwert für $\theta_1 = 30^\circ$. b) Darstellung der Lichtverteilung im Liniendiagramm für $\theta_1 = 30^\circ$. c) Transmissionsdiagramm mit Transmission (in %) in Abhängigkeit vom Einfallswinkel θ_1 .

Das Abstrahlverhalten des Lichtlenksystems für genau einen Lichteinfall θ_1 (hier $\theta_1 = 30^\circ$) ist in den Lichtverteilungsdiagrammen in (a) und (b) dargestellt. Diagramm (a) ist ein auf den Peakwert normiertes Polardiagramm mit einer Auflösung von 1° , was der Auflösung des Kugeldetektors aus ZEMAX entspricht. In der Literatur wird auch häufig das Liniendiagramm aus (b) genutzt [And03, Klal2a], welches eine Auflösung von $\Delta = 5^\circ$ aufweist. Dieses eignet sich für den Abgleich mit goniometrischen Messungen, die in der Regel ebenfalls eine Auflösung von 5° haben. In diesem Fall sind in beiden Diagrammen zwei dominante Peaks sichtbar, die ebenfalls im Raytracing-Bild erkennbar waren (Bild 4.9 (b)).

Die Umrechnung auf die 5° -Auflösung in Diagramm (b) bewirkt, dass der höchste Peak bei $\theta_2 = 0^\circ$ liegt und damit nicht mehr eindeutig nach „oben“ oder „unten“ zugeordnet werden kann. Die höhere Auflösung des Polardiagramms und auch das Raytracing-Bild zeigen hingegen, dass das Licht eindeutig unterhalb der Horizontalen austritt. Diese Problematik muss bei der Bewertung der niedrigauflösenden Diagramme beachtet werden.

Das Diagramm in (c) wird „Transmissionsdiagramm“ genannt und basiert auf den Ergebnissen von allen sechzehn Simulationen und zeigt für $0^\circ \leq \theta_1 \leq 75^\circ$, wie groß der Anteil des „nach oben“ und „nach unten“ gelenkten Lichts ist [Nit07]. Es ist bestens dazu geeignet sich einen schnellen Überblick über das gesamte Lichtlenkverhalten eines Systems zu verschaffen. Wie in Bild 4.10 (a) markiert ist, wird die Transmissionsseite der Lichtverteilung (die rechte Kreishälfte) in zwei Quadranten unterteilt. Im grün

markierten Quadranten „oben“ wird die Strahlungsleistung von $0^\circ < \theta_2 \leq 90^\circ$ integriert, während im rot markierten Quadranten „unten“ von $-90^\circ < \theta_2 < 0^\circ$ integriert wird. Im abgebildeten Fall werden für den Lichteinfall $\theta_1 = 30^\circ$ etwa 85 % der Leistung nach unten und 10 % nach oben transmittiert, die übrige Leistung wird reflektiert. Diese beiden Werte sind im Transmissionsdiagramm entsprechend eingezeichnet.

Anhand des Transmissionsdiagramms lässt sich für die Sägezahnstruktur also die Aussage treffen, dass damit das Licht aus Sonnenständen $\theta_1 \geq 35^\circ$ nahezu vollständig an die Raumdecke gelenkt wird. Tiefere Sonnenstände werden hingegen fast gar nicht nach oben gelenkt, sodass hier eine starke Beeinträchtigung des Raumnutzers aufgrund von Blendung entstehen kann.

Anhand der Lichtverteilungsdiagramme wird deutlich, dass sich nahezu die gesamte transmittierte Strahlungsleistung in ein oder zwei eng begrenzte Raumrichtungen ausbreitet, weshalb die damit beleuchteten Oberflächen sehr hell sein werden. Hier wäre eine Winkelaufweitung des Lichts wünschenswert, um den starken Hell-Dunkel-Kontrast zu reduzieren.

Dieser Mangel und das insgesamt vorliegende Transmissionsverhalten führen also insgesamt dazu, dass sich dieses prismatische Beispielsystem als ungeeignet für das Lichtlenkkonzept erweist.

4.3 Simulationsergebnisse

Mit dem Simulationsverfahren wurden zunächst einseitig und anschließend doppelseitig strukturierte Systeme untersucht. Die wichtigsten Beobachtungen, die zur schrittweisen Entwicklung einer geeigneten Lichtlenkkonfiguration geführt haben, werden im Folgenden vorgestellt.

4.3.1 Einseitig strukturierte Systeme

Insgesamt wurde eine Vielzahl verschiedener Geometrien für den Einsatz als Lichtlenkstruktur in Betracht gezogen. Da bei der Geometriewahl stets die Herstellbarkeit beachtet wurde, wurden Hinterschneidungen und zu große Aspektverhältnisse⁴ vermieden, um Probleme bei der Abformung zu vermeiden. Einige exemplarische Geometrien sind in Bild 4.11 dargestellt. Die meisten erwiesen sich allerdings als ungeeignet, da der Anteil an (nahezu-) horizontalen Flächen bei ihnen zu gering ist. Diese werden jedoch für die Totalreflexion und damit zur Lichtlenkung benötigt.

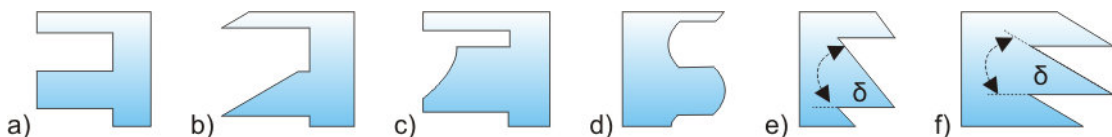


Bild 4.11: Beispiele einseitiger Strukturen: a - d) Der Abstand zwischen den Strukturen hat keinen positiven Einfluss auf die Lichtlenkung. e, f) Sägezahnstrukturen erweisen sich als viel versprechender Ansatz für die weitere Strukturoptimierung.

Die Systeme (a) bis (d) weisen große Lücken zwischen den Strukturen auf, die keinerlei positiven Einfluss auf das Lichtlenkverhalten haben und daher verringert werden sollten. Da die Verkleinerung des Abstands allerdings das Aspektverhältnis an dieser Stelle vergrößert, ist dies nicht in beliebigem Umfang möglich. Die Maximierung der horizontalen Fläche wird also zwangsläufig zu Sägezahnstrukturen, die auch als Mikroprismen bezeichnet werden, führen, wie sie in (e) und (f) zu sehen sind. Hier führt eine Verkleinerung des Strukturabstands gleichermaßen zu einer Verringerung der Strukturtiefe. Sofern die Geometrie der Spitze also unverändert bleibt, wird sich das Aspektverhältnis nicht verändern.

4.3.1.1 Einseitig strukturierte Systeme: Sägezähne

Lichtlenksysteme mit Sägezahnstrukturen auf einer Plattenseite lassen sich einfach über den Winkel δ an der Spitze des Sägezahns charakterisieren. Dieser hat sowohl Einfluss auf den Pitchabstand, als auch auf das Aspektverhältnis und stellt damit die einzige

⁴ Das Aspektverhältnis ist das Verhältnis aus Strukturtiefe und lateraler Ausdehnung. Eine Struktur mit $500 \mu\text{m}$ Breite und $500 \mu\text{m}$ Tiefe hat also ein Aspektverhältnis von 1.

Variable bei der Geometriedefinition dar, wenn eine maßstabsgetreue Skalierung unberücksichtigt bleibt.

Ist der Winkel δ groß, so haben die Strukturen einen großen Abstand und eine geringe horizontale Fläche (siehe Bild 4.11 (e)). Mit spitzer werdendem Winkel δ verkleinert sich der Pitchabstand und die lichtlenkende Fläche nimmt zu. Der begrenzende Faktor ist hier wieder das Aspektverhältnis, das bei einer sehr spitzen Geometrie stark anwächst. Weiterhin zeigten die Simulationen, dass ein sehr spitzer Sägezahn die Auskopplung aus dem System behindert, da austretende Strahlen zunehmend in den nächsthöheren Sägezahn wieder eintreten und letztendlich nach außen reflektiert werden. Ein Winkel von $\delta = 35^\circ$ erwies sich als guter Kompromiss zwischen möglichst großer horizontaler Fläche, einem akzeptablen Aspektverhältnis von $1,4$ und geeigneter Lichtauskopplung. Eine Verglasung mit einer Grundfläche von einem Quadratmeter hat mit dieser Struktur eine horizontale Fläche von insgesamt $1,4 \text{ m}^2$, die mittels Totalreflexion das Licht umlenkt.

Es zeigte sich, dass Systeme mit Sägezähnen auf der Außenseite sich generell eher zur Lenkung flach einfallenden Lichts eignen und solche mit Strukturen auf der Innenraumseite für hohe Sonnenstände geeignet sind. Bild 4.12 belegt diesen Zusammenhang mit den Transmissionsdiagrammen zweier Systeme, die die gleichen Sägezahnstrukturen ($\delta = 35^\circ$) im einen Fall auf der Innen-, und im anderen Fall auf der Außenseite aufweisen. Mit Strukturen auf der Innenseite (durchgezogene Graphen) zeigt sich ein klarer Wechsel der Lichtlenkcharakteristik bei etwa $\theta_i \geq 35^\circ$. Für Strukturen auf der Außenseite (gestrichelte Graphen) ergibt sich ein umlenkendes Verhalten vorwiegend bei flachen Sonnenständen. Dieses ist im Vergleich zur anderen Konfiguration eher unbeständig, wie der Einbruch bei $\theta_i = 60^\circ$ bestätigt.

Dieses Verhalten wurde an sehr vielen prismatischen Systemen beobachtet. Sie neigen also unter manchen Sonnenständen dazu, drastisch das Lichtlenkverhalten zu wechseln, was zu erheblicher Blendung führen kann.

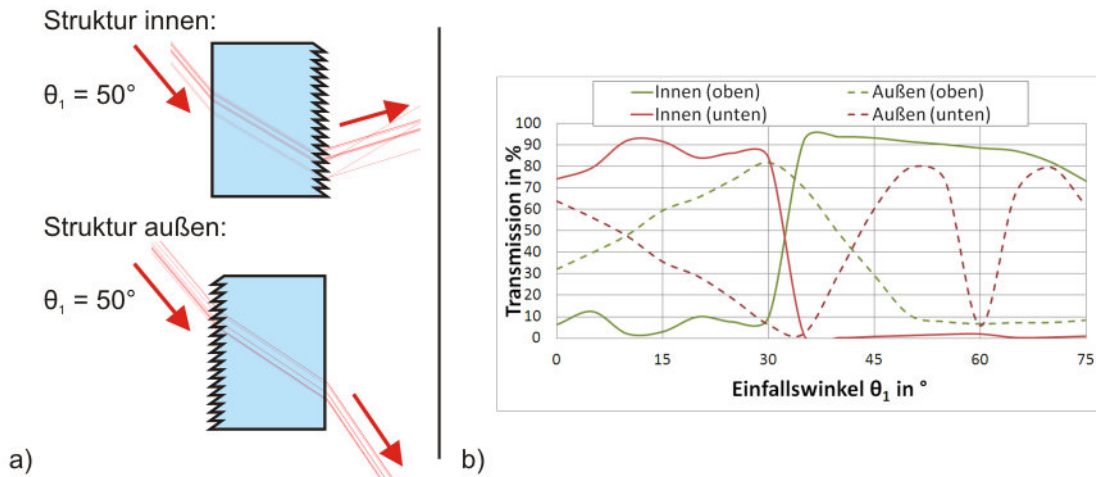


Bild 4.12: Lichtlenkung durch Mikroprismen: a) oben: Prismen auf der Innenseite lenken das Licht hoher Sonnenstände (durchgezogene Linie). a) unten: Prismen auf der Außenseite lenken eher flaches Sonnenlicht (gestrichelte Linie). b) Zugehöriges Transmissionsdiagramm.

Die weitere Analyse der Sägezahnstrukturen konzentrierte sich auf die Auswirkungen von Parameteränderungen auf das Transmissionsverhalten. Ausgehend von der als guten Ansatz identifizierten Sägezahnstruktur ($\delta = 35^\circ$) wurden der Winkel δ und die Brechzahl n variiert. Es zeigte sich, dass mit diesen Parametern der Wechsellpunkt der Lichtlenkcharakteristik nach rechts oder links verschoben werden kann, wie es in Bild 4.13 gezeigt ist. Die Verschiebung zu höheren Sonnenständen wird mit Vergrößerung der optischen Brechzahl n oder durch einen spitzeren Winkel δ erzielt. Eine niedrigere Brechzahl oder ein stumpferer Winkel verursachen die Verschiebung in die Gegenrichtung.

Wünschenswert wäre natürlich eine deutliche Verschiebung zu flacheren Sonnenständen. Dies lässt sich aber nicht allein mit Parameteränderungen realisieren, da größere Änderungen die Form der Transmissionskurve verändern und damit kein eindeutiges Transmissionsverhalten mit einem klaren Wechsellpunkt mehr vorliegt.

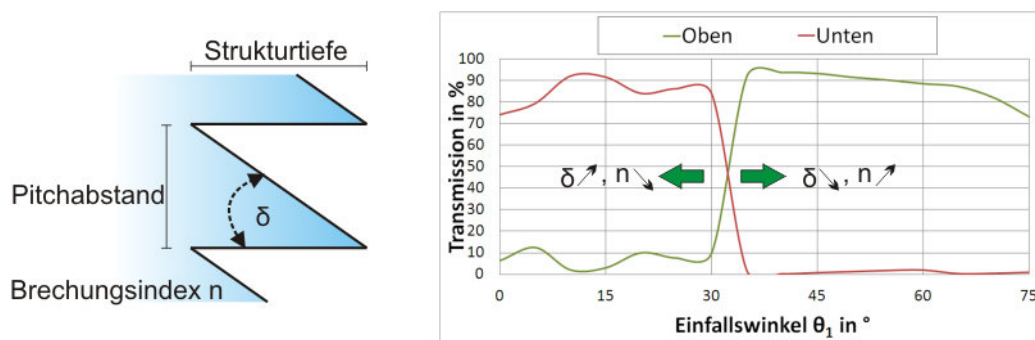


Bild 4.13: Auswirkung einer Parameteränderung der Mikroprismen auf das Transmissionsdiagramm. Leichte Veränderungen der optischen Brechzahl n oder des Winkels δ bewirken eine Verschiebung des Wechsellpunkts im Transmissionsverhalten.

Warum aber werden flache Sonnenstände vom Sägezahn nicht umgelenkt? Die im Bild 4.14 dargestellten Strahlgänge können eine Antwort liefern: In (a) ist ein Lichteinfall von $\theta_I = 15^\circ$ zu sehen, der sich im Prisma aufgrund der Brechung auf einen Winkel von rund 10° verringert. Trifft das Licht unter diesem Winkel auf die schräge Prismenfläche, so wird es dort nicht ausgekoppelt, sondern nach unten totalreflektiert.

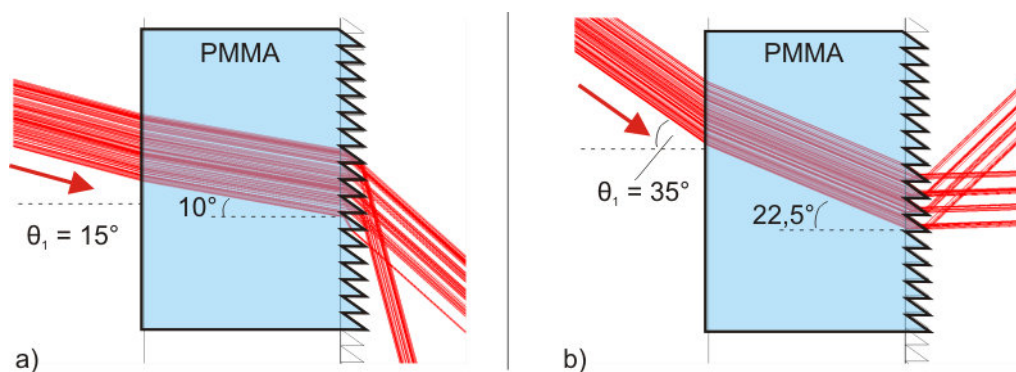


Bild 4.14: a) Flach einfallende Strahlen werden von den Prismen nach unten totalreflektiert. b) Ab einem Winkel von etwa $22,5^\circ$ im PMMA lenken die Prismen das Licht nach oben.

Der Wechsel der Lichtlenkcharakteristik für dieses System liegt bei etwa $\theta_I = 35^\circ$, wie im Beispiel oben festgestellt wurde. Der entsprechende Strahlverlauf in (b) zeigt, dass die Strahlen innerhalb des Systems unter einem Winkel von etwa $22,5^\circ$ verlaufen und dadurch, unabhängig ob sie auf die horizontale oder schräge Fläche treffen, nach oben umgelenkt werden. Erwähnenswert ist, dass obwohl sich der Sonnenstand θ_I um 20° erhöht, aufgrund der Brechung sich im PMMA nur eine Veränderung von $12,5^\circ$ einstellt. Ein optisch weniger dichtes Medium kann daher flache Lichteinfälle eher umlenken, da dieser Effekt weniger stark ausfällt.

Man könnte das Transmissionsverhalten des Prismen-Systems also auch damit beschreiben, dass für eine Lichtlenkung nach oben im PMMA (!) ein Winkel von ca. $22,5^\circ$ vorliegen muss.

4.3.2 Zweiseitig strukturierte Systeme

Wie im vorhergehenden Abschnitt gezeigt werden konnte, kann mit einer einfachen einseitigen Strukturierung kein Lichtlenksystem konstruiert werden, mit dem zuverlässig alle relevanten Sonnenstände ($15^\circ \leq \theta_I \leq 65^\circ$) an die Raumdecke gelenkt werden können.

Allerdings wurde deutlich, dass eine Sägezahnstruktur mit einem Winkel von 35° an der Spitze zuverlässig Licht umlenkt, sofern die Prismen unter einem Winkel von mindestens $22,5^\circ$ beleuchtet werden. Diese Bedingung kann entweder dadurch erfüllt

werden, dass der Sonnenstand 35° übersteigt, oder aber dadurch, dass eine Struktur auf der Außenseite den Strahlverlauf anpasst.

Das Licht könnte also auch bei niedrigeren Sonnenständen gelenkt werden, wenn die lichtzugewandte Seite des Systems so strukturiert werden würde, dass die Lichtstrahlen im PMMA auf einem steileren Pfad verliefen.

4.3.2.1 Systeme mit Mikroprismen

Als erste Herangehensweise eignen sich – wiederum wegen ihrer Einfachheit – Mikroprismen. Bild 4.15 (a) zeigt, dass mit Mikroprismen (Winkel $\delta = 35^\circ$) auf der lichtzugewandten Seite horizontales Licht unter einem Winkel von $21,5^\circ$ das Lichtlenksystem durchläuft. Bei einer unstrukturierten Fläche würde dies erst ab einem Sonnenstand von $\theta_I = 33,5^\circ$ geschehen (b).

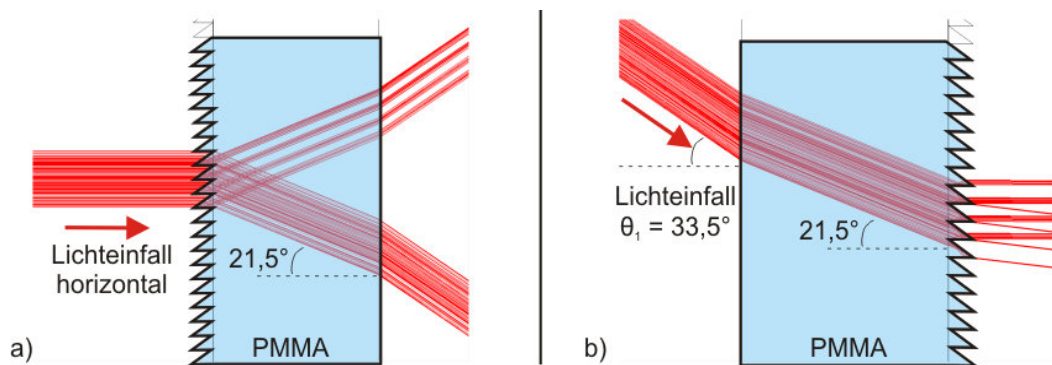


Bild 4.15: Durch Mikroprismen (Winkel $\delta = 35^\circ$) an der lichtzugewandten Seite (a) verlaufen horizontale Lichtstrahlen im PMMA-Körper wie bei einem Sonnenstand von $\theta_I = 33,5^\circ$ ohne Strukturierung (b).

Im Bild wird auch deutlich, dass das eintreffende Strahlbündel an der ersten Struktur aufgeteilt wird und somit nicht das gesamte Licht auf den gewünschten steileren Pfad gelenkt wird. Da beide Strahlteile an der zweiten Strukturseite nochmals aufgeteilt werden, ergeben sich somit mindestens vier Strahlpfade durch das Lichtlenksystem, die alle nach oben gerichtet sein sollten. Dies ist nicht immer für alle Sonnenstände möglich und so ergibt sich häufig die Situation, dass eine Änderung der Geometrie zur Optimierung der Lichtverteilung für einen bestimmten Sonnenstand, eine Verschlechterung für einen anderen bedeutet.

In Bild 4.16 ist ein Transmissionsdiagramm für ein System mit zwei 35° -Mikroprismen abgebildet. Das Übertragungsverhalten konnte durch die beidseitige Strukturierung für flache Winkel erheblich verbessert werden. Allerdings ist im Gegenzug eine erhöhte Blendung für $\theta_I = 40^\circ$ und $\theta_I = 60^\circ$ zu befürchten, da dort jeweils rund 25 % des Lichts nicht nach oben gelenkt werden.

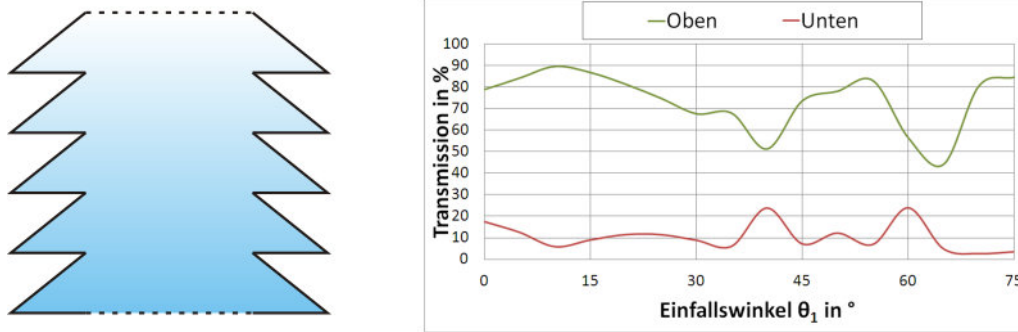


Bild 4.16: Durch die Strukturierung der Außenseite verbessert sich die Lichtlenkung bei flachen Sonnenständen. Allerdings entsteht bei anderen Lichteinfällen ein kritisches Verhalten, wie bei $\theta_1 = 40^\circ$ und $\theta_1 = 60^\circ$.

Ein weiteres Problem von Mikroprismensystemen – welches aus den Simulationen nicht direkt deutlich wird – ist, dass die Ausrichtung beider Strukturseiten zueinander sehr wichtig für die Lichtlenkcharakteristik ist. Die obigen Strahlverläufe zeigten, dass das Licht gebündelt auf wenigen Wegen das System durchläuft. Ein perfekt ausgerichtetes System kann genau auf diese Wege eingestellt werden und somit das Licht lenken. Allerdings können bereits kleine Abweichungen zu einer Verschiebung eines Pfads führen, sodass auf einmal ein Strahlbündel nicht umgelenkt wird, sondern Blendung verursacht.

Bild 4.17 verdeutlicht dieses Problem für einen lateralen Versatz Δ : Die Strukturgeometrien der Systeme (a) und (b) sind identisch, allerdings sind die Strukturseiten von (b) zueinander um den lateralen Versatz Δ verschoben. Dies hat die Konsequenz, dass der Lichtpfad nicht wie in (a) zur horizontalen Fläche führt, sondern zur angewinkelten Fläche, wodurch das Licht nicht nach oben umgelenkt wird. Da diese Systeme aus *Mikroprismen* bestehen, kann bereits ein sehr kleiner Versatz von weniger als einem Zehntel Millimeter eine solche Störung bewirken.

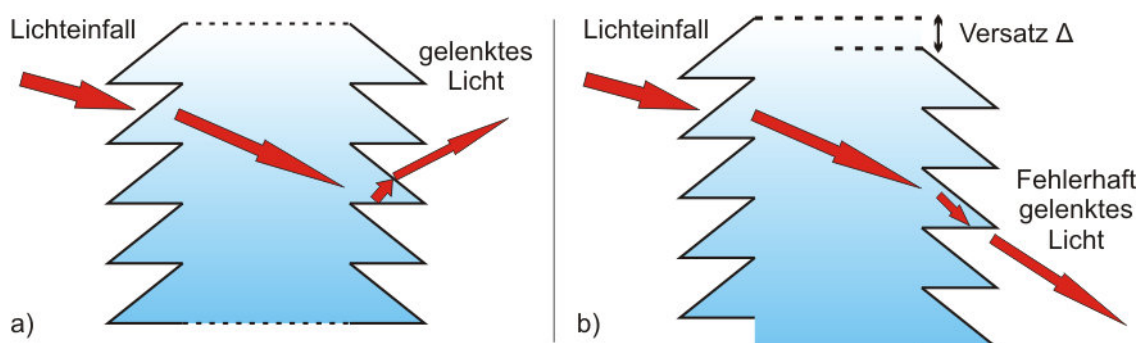


Bild 4.17: Nachteile reiner Mikroprismensysteme: Obwohl System (a) und (b) gleich strukturiert sind, bewirkt ein lateraler Versatz Δ , dass das Licht nicht nach oben gelenkt wird.

Eine erste Herangehensweise an dieses Problem wäre, mittels strenger Fertigungstoleranzen sämtliche Abweichungen von der Sollgeometrie zu eliminieren. Das wäre allerdings nicht nur unmöglich und unermesslich teuer, es wäre sogar sinnlos. Die Problematik kann nicht mit einer höheren Genauigkeit behoben werden, da es neben dem gezeigten lateralen Versatz noch eine Reihe weiterer Gesichtspunkte gibt, die eine Änderung des Strahlverlaufs bewirken können:

- Die Strukturen wurden fehlerhaft abgeformt und weichen von der Sollgeometrie ab.
- Die strukturierte Platte ist nicht planparallel.
- Thermische Ausdehnung verändert die Geometrie.
- **Die Sonne scheint nicht azimutal senkrecht auf das System.**

Alle Punkte sind alltäglich auftretende Gegebenheiten, aber insbesondere der letzte Punkt zeigt, dass selbst höchste Produktionsanforderungen nicht ausreichen werden, um ein rein prismatisches Lichtlenksystem zu konstruieren, welches frei von kritischen Strahlverläufen ist.

4.3.2.2 Systeme mit Linsengeometrie

Das grundlegende Problem der reinen Mikroprismensysteme ist nicht, *dass* es kritische Strahlverläufe gibt, sondern, dass das Licht auf zu wenigen Pfaden verläuft, weshalb die kritischen Verläufe unmittelbar eine hohe Blendungsintensität bedeuten.

Ein Lösungsansatz ist daher, das eintreffende Licht im Winkel aufzuweiten und zu durchmischen, womit eine Entkopplung beider Strukturseiten erreicht wird. Das Licht trifft dann unter einer Vielzahl von Winkeln auf die zweite Strukturseite, was eine Optimierung auf bestimmte Strahlwege obsolet macht. So gibt es zwar häufiger nicht-umgelenkte Strahlverläufe, doch sind diese weniger kritisch, da sie eine erheblich niedrigere Intensität haben.

Die Winkelaufweitung bzw. Streuung des parallel einfallenden Lichts geschieht mit gewölbten Strukturen, wie sie zum Beispiel Zylinderlinsen aufweisen. Einfache konvexe Zylinderlinsen bündeln zunächst das Licht, bevor es hinter dem Fokus gestreut wird, wie es in Bild 4.18 zu sehen ist. Eine Beobachtung ist, dass der mittlere und untere Teil der Linse das Licht nicht wie gewünscht auf einen steileren Weg, sondern in eine ungünstige, horizontale Richtung lenken. Zudem verfügt die Linse nicht über eine horizontale Fläche, mit der das Licht bereits an der ersten Strukturseite umgelenkt wird, was vor allem bei hohen Sonnenständen wichtig ist.

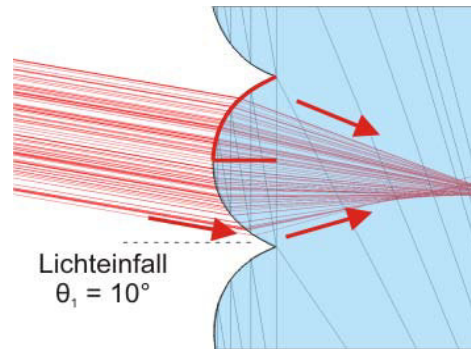


Bild 4.18: Der mittlere und untere Teil der Linse bricht das Licht auf einen ungünstigen, horizontalen Weg.

Hier zeigten Simulationen, dass der im Bild rot markierte, obere Teil der Zylinderlinse genügt, um das Licht hinreichend aufzuweiten. Gleichzeitig weist diese Teillinse eine zur Totalreflexion geeignete horizontale Fläche auf.

Zahlreiche Simulationen wurden zur Auffindung einer geeigneten Linsengeometrie durchgeführt. Die Optimierung führte zu der in Bild 4.19 (a) markierten Geometrie. Ein wichtiges Merkmal des Querschnitts ist, dass der Radius des Kreisbogens größer ist als Pitchabstand und Strukturtiefe und es sich um einen Kreisausschnitt von 60° handelt. Damit verläuft die Tangente an der Strukturspitze nicht vertikal. Stattdessen weist sie eine Neigung um 15° auf, wodurch Licht, das in diesem Bereich in die Struktur eintritt, auf einen steileren Winkel im PMMA gelenkt wird. Dies ist im Vergleich zu einem einfachen Viertelkreis oder zur oberen Hälfte einer Zylinderlinse vor allem für flache Sonnenstände ein immenser Vorteil. Da Pitchabstand und Strukturtiefe übereinstimmen, beträgt das Aspektverhältnis der Struktur 1.

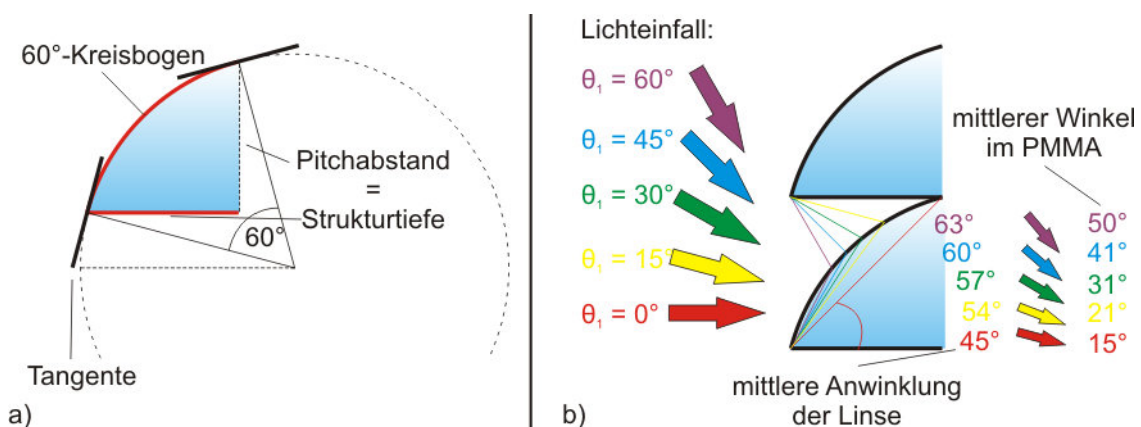


Bild 4.19: a) Querschnitt der linsenförmigen Struktur: Es handelt sich um einen 60° -Kreisbogen, bei dem Pitchabstand und Strukturtiefe übereinstimmen. b) Da sich übereinanderliegende Strukturen abschatten, trifft das Licht entsprechend des Sonnenstands auf einen unterschiedlich geneigten Teil der Linse.

Ein Nebeneffekt der Linsengeometrie ist in Bild 4.19 (b) dargestellt: Übereinanderliegende Linsen schatten sich in einer Weise ab, dass steiler einfallendes Licht zunehmend nur die Spitze der Linse beleuchtet. Dadurch trifft flaches Licht im Schnitt auf eine deutlich stärker geneigte Fläche als das Licht hoher Sonnenstände. Zum Beispiel trifft horizontales Licht (im Bild rot markiert) im Schnitt auf eine Fläche, die um 45° angewinkelt ist, während Licht mit $\theta_l = 30^\circ$ (grün markiert) im Mittel auf eine 57° -Fläche trifft. Das hat die Auswirkung, dass flaches Licht stärker im Winkel angepasst wird als steiles Licht. Dies ist durchaus erwünscht, da das insgesamt umzulenkende Winkelspektrum im PMMA eingegrenzt und damit die Konstruktion des Systems erleichtert wird.

Das Resultat der Strukturauffindung ist somit das System aus Bild 4.20. Die erste Strukturseite weist die genannte Linsengeometrie auf und die zweite Strukturseite die 35° -Sägezahngeometrie. Das Bild zeigt das Transmissionsdiagramm dieses Systems, für den Fall, dass es aus PMMA besteht (durchgezogene Linien), und für den Fall, dass es aus PDMS besteht (gestrichelte Linien). Beide Varianten lenken das Licht für einen breiten Bereich an Sonnenständen gut in Richtung Raumdecke um und begrenzen den Anteil des Lichts, das unterhalb die Horizontale fällt, in der Summe auf rund 10% .

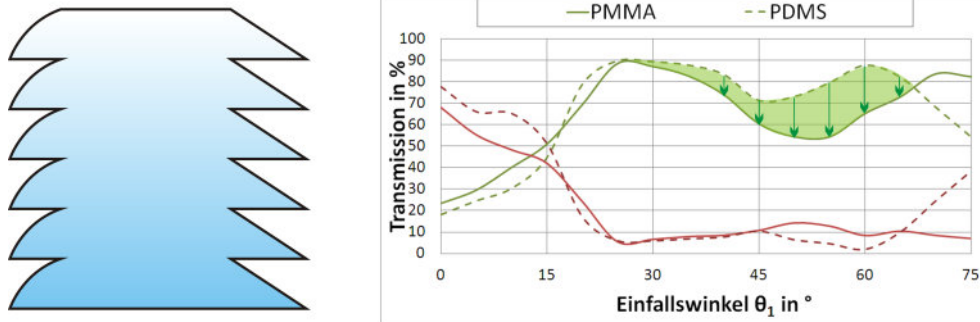


Bild 4.20: Transmissionsdiagramm des Lichtlenksystems mit PMMA oder PDMS als Grundmaterial. Mit PMMA wird das Licht höherer Sonnenstände verstärkt nach außen reflektiert.

Das PMMA-System weist für höhere Sonnenstände (im Diagramm grün markiert) bei der Lichtlenkung nach oben einen Einbruch auf. Der Anteil des gelenkten Lichts sinkt beispielsweise bei einem Lichteinfall von $\theta_l = 55^\circ$ von rund 80% auf 55% . Die betroffenen Sonnenstände treten vorwiegend im Sommer oder nur zur Mittagszeit auf und somit zu Zeiten die eine sehr hohe Tageslichtintensität aufweisen. Damit wird sich die Abschattung nicht als großer Helligkeitsverlust auswirken, sie könnte sich sogar als vorteilhaft erweisen.

Das arithmetische Mittel des transmittierten und nach oben umgelenkten Lichts für die Lichteinfälle von $15^\circ \leq \theta_l \leq 65^\circ$ beträgt für PDMS 79% und für PMMA 69% .

Bild 4.21 zeigt exemplarisch die Strahlverläufe durch das oben konstruierte Lichtlenksystem für die Sonnenstände $\theta_l = 15^\circ$, 30° , 45° und 60° . Das System in (a) besteht aus PMMA und das System in (b) aus PDMS. Wie sich bereits im Transmissionsdiagramm gezeigt hat, wird die Mehrheit der Strahlen nach oben umgelenkt. Die Strahlverläufe für die Sonnenstände $\theta_l = 45^\circ$ und 60° zeigen den Grund für den Effizienzeinbruch des PMMA-Systems: Eintreffende Strahlen werden an der zweiten Strukturseite nicht in den Innenraum ausgekoppelt sondern zurück nach außen gelenkt. Dieser Effekt tritt mit PDMS in deutlich abgeschwächter Form auf.

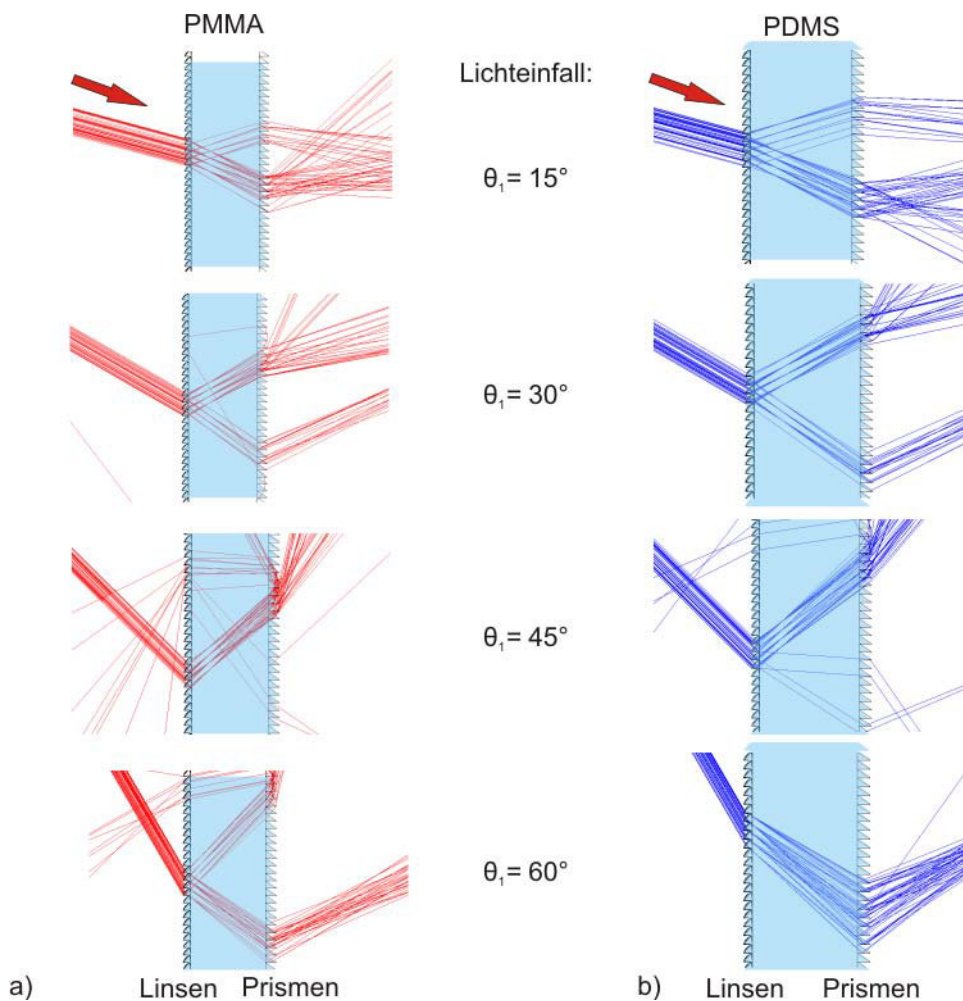


Bild 4.21: Strahlverläufe für $\theta_l = 15^\circ$, 30° , 45° und 60° in einem Lichtlenksystem aus PMMA (a) und PDMS (b).

4.3.2.3 Strukturskalierung und minimale Plattenstärke

Bild 4.22 (a) zeigt erneut einen Strahlverlauf durch ein Lichtlenksystem. In diesem Bild ist ersichtlich, dass das Licht von der Linsenseite zunächst fokussiert wird und anschließend – so wie es gewünscht ist – gestreut auf die Prismenseite fällt.

Bei einigen Simulationen und Messungen wurde ein stark schwankendes, oszillierendes Lichtlenkverhalten im Transmissionsdiagramm beobachtet, wie es in (b) gezeigt ist. Die Fehlersuche ergab, dass der Grund für dieses Verhalten eine zu knapp bemessene Plattenstärke ist. Die von den Linsen erzeugten Foki liegen in diesem Fall so nah an den Sägezahnstrukturen, dass die Lichtbündel nicht aufgeweitet und gestreut, sondern fokussiert bzw. nahezu fokussiert auf die Prismenstrukturen treffen. Durch den wechselnden Sonnenstand wandern diese Foki über die zweite Strukturseite, wo sie dann entweder umgelenkt werden, oder eben nicht. Die Foki entsprechen also klar definierten Pfaden, wie sie bei rein prismatischen Systemen beobachtet und als Nachteil erkannt wurden.

In (b) ist ebenfalls das Lichtlenkverhalten für das gleiche System mit hinreichender Materialstärke eingezeichnet. Wie erwartet, tritt in diesem Fall das oszillierende Verhalten nicht auf. Ebenfalls ist zu erkennen, dass die Oszillation bei flachen Einfallswinkeln eine größere Amplitude hat, was daran liegt, dass die Foki in diesen Fällen näher an der zweiten Strukturseite liegen. Bei steilen Einfallswinkeln verläuft das Licht in der Platte weniger horizontal und die Foki liegen nah an der ersten Strukturseite.

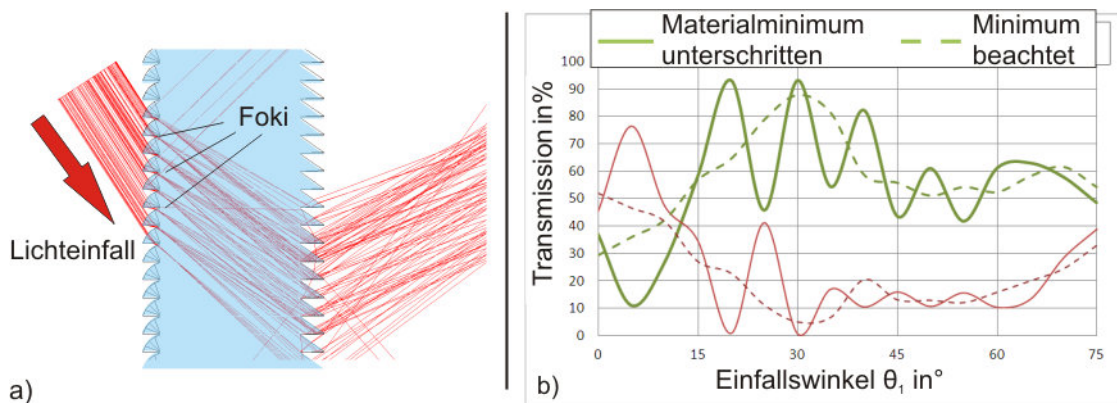


Bild 4.22: a) Durch die Linsen wird das Licht erst fokussiert und dann aufgeweitet. b) Transmissionsdiagramm zweier Lichtlenksysteme, die sich nur in der Materialdicke unterscheiden. Eine zu geringe Materialstärke provoziert ein oszillierendes Verhalten.

Das oszillierende Verhalten kann also vermieden werden, indem eine Mindestmaterialstärke definiert wird, mit der sichergestellt wird, dass der Fokus näher an den Linsen als an den Sägezähnen liegt. Da die grundsätzliche Geometrie des Basislichtlenksystems in diesem Kapitel definiert wurde, bestimmt der Pitchabstand direkt den Wölbungsradius der Linse und damit ihre Brennweite. Es kann also eine direkte (lineare) Beziehung zwischen Pitchabstand der Linsenstrukturen und resultierender Mindestmaterialdicke hergestellt werden, die im Diagramm in Bild 4.23 gezeigt ist.

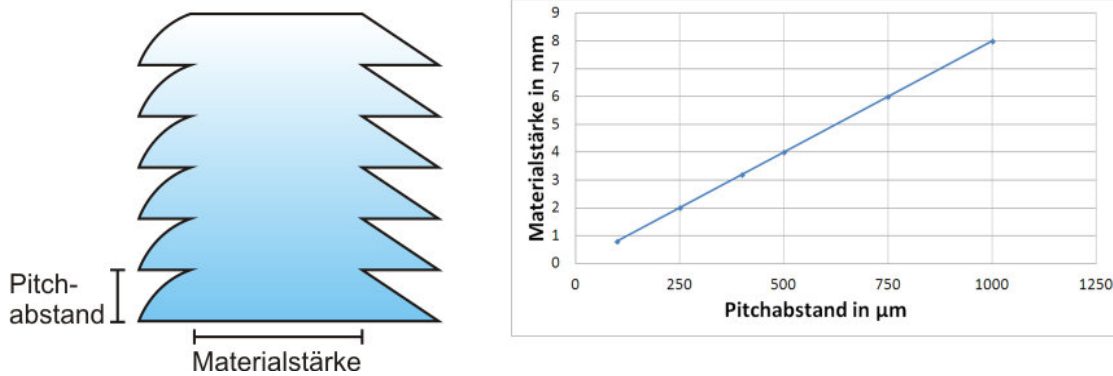


Bild 4.23: Empfohlene Mindestmaterialdicke für das Basislichtlenksystem aus PMMA. Es zeigt sich ein linearer Zusammenhang.

Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass für eine hinreichende Durchmischung des Lichts, bei einem PMMA-System mit $500 \mu\text{m}$ -Strukturen, der Abstand zwischen der Linsen- und Prismenseite wenigstens 4 mm betragen sollte.

Eine Strukturskalierung des hier entwickelten Systems ist unter Berücksichtigung der Mindestdicke sowohl als Verkleinerung, als auch als Vergrößerung möglich. Die simulierten Transmissionsdiagramme der Systeme mit Strukturabmessungen von $100 \mu\text{m}$, $250 \mu\text{m}$, $500 \mu\text{m}$ und $1000 \mu\text{m}$ zeigten unter Berücksichtigung der Mindestdicke identische Übertragungsverhalten.

Es muss allerdings beachtet werden, dass Fehler in der Regel nicht in gleicher Weise skaliert werden, sodass Formabweichungen, wie z.B. Abrundungen bei großen Strukturen geringere Auswirkungen haben, als bei kleinen Strukturen. Ebenso ist die Strukturierung eines Formwerkzeugs für kleinere Strukturen aufwendiger, da mehr Linien gefräst oder gehobelt werden müssen.

Fazit

Die Simulationen erwiesen sich wie erwartet als wichtiges Hilfsmittel zur Beurteilung von Strukturen und zum Auffinden geeigneter Strukturkombinationen für das Lichtlenksystem.

Mikroprismen bzw. Sägezahnstrukturen, die sich auf der Innenseite einer Platte befinden, eignen sich zur Lenkung von Licht aus mittleren und hohen Sonnenständen. Durch die Kombination mit linsenförmigen Strukturen auf der Außenseite der Platte kann der Einsatzbereich auch auf flache Sonnenstände ausgeweitet werden, sodass sich ein System ergibt, welches für das angestrebte Lichtlenkkonzept geeignet erscheint.

Grundsätzlich können die Strukturen in ihrer Größe skaliert werden. Es muss jedoch beachtet werden, dass große Strukturen nur mit dicken Platten genutzt werden können, da sich ansonsten ein oszillierendes Lichtlenkverhalten ergibt, welches grundsätzlich nicht erwünscht ist. Zum Beispiel benötigen $500\ \mu\text{m}$ -Strukturen einen Abstand von rund $4\ \text{mm}$ zwischen Linsen- und Prismenseite, weshalb die zu prägende PMMA-Platte eine Dicke von mindestens $5\ \text{mm}$ haben sollte. Damit scheinen $500\ \mu\text{m}$ -Strukturen für die Herstellung gut geeignet zu sein, da eine $5\ \text{mm}$ -Platte eine hohe mechanische Stabilität aufweist und ein Formwerkzeug mit vertretbarem Aufwand strukturiert werden kann.

5 Strukturqualität und Goniometrie

Die beiden vorangegangenen Kapitel haben gezeigt, welche Strukturkombination für ein Lichtlenksystem geeignet ist und wie sie in Kunststoff erzeugt werden kann. Um die Herstellungsverfahren zu erproben und die Strukturkombinationen auf ihre Eignung zu überprüfen, wurde eine Reihe von Prototypen hergestellt. Das Gießverfahren wurde zur Herstellung von PDMS-Prototypen im Laborformat verwandt, während großformatige PMMA-Prototypen im Heißprägeverfahren erzeugt wurden.

In diesem Kapitel soll anhand von optischen und experimentellen Untersuchungen die Frage beantwortet werden, ob die Lichtlenkcharakteristik eines physischen Lichtlenksystems mit der seines virtuellen Gegenstücks übereinstimmt. Dazu werden zunächst die *Strukturqualität und die Oberflächenbeschaffenheit der Prototypen* (Kap. 5.1) untersucht. Anschließend erfolgt eine *Bewertung der lichtlenkenden Eigenschaften*, die mit einem goniometrischen Messaufbau durchgeführt wurde (Kap. 5.2). Die Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung und die Zusammenhänge zwischen Strukturqualität und Lichtlenkcharakteristik werden in den *Ergebnissen* diskutiert (Kap. 5.3).

5.1 Strukturqualität der Prototypen

Bei der Bestimmung der Strukturqualität wird vor allem überprüft, wie exakt die Geometrie der Prototypen mit der Sollgeometrie übereinstimmt und welche Oberflächenbeschaffenheit vorliegt. Beide Aspekte sollten einen signifikanten Einfluss auf die Lichtlenkeigenschaften des Systems haben.

Die Abformgenauigkeit wurde grundsätzlich anhand von Querschnitten bestimmt, die am Mikroskop vermessen wurden. Es wurden stets Proben an mehreren Systemen und an unterschiedlichen Positionen entnommen. Die Oberflächenbeschaffenheit wurde mit einem Weißlichtinterferometer (*Veeco NT-1000* von Wyko) analysiert. So konnten die Art und Anzahl von Oberflächendefekten bewertet werden. Als weiterer Kennwert wurde die mittlere Rauheit R_a bestimmt.

Die Untersuchung der Prototypen lässt sich in drei Gruppen unterteilen: in PDMS-Prototypen, die im Gießverfahren im Labor hergestellt wurden, in einseitig heißgeprägte PMMA-Prototypen, die von Jungbecker hergestellt wurden und in doppelseitig geprägte Prototypen, die ebenfalls von Jungbecker strukturiert wurden.

5.1.1 Gegossene PDMS-Elemente

Die PDMS-Elemente wurden mit den am Fraunhofer IPT strukturierten Fly-Cutting Formwerkzeugen hergestellt (siehe Kapitel 3). Die Werkzeuge wurden also auf einer Fläche von $100 \times 100 \text{ mm}^2$ mit Strukturen mit Abmessungen von $250 \mu\text{m}$ hinsichtlich Höhe und Breite versehen.

5.1.1.1 Abformgenauigkeit

Die Bestimmung der Geometrie wurde direkt an Querschnitten aus PDMS durchgeführt. Die Lichtlenkelemente wurden zur mikroskopischen Untersuchung also zerschnitten.

Es wurde unabhängig von Probe und Ort stets eine nahezu gleiche Geometrie beobachtet, die mit der Sollgeometrie hervorragend übereinstimmt. Vor allem die Sägezahnstruktur, die in Bild 5.1 (b) zu sehen ist, erreicht eine Abformqualität von höchster Güte und weist Abweichungen von weniger als 2 % auf. Die Prismenspitze ist mit einem Radius von weniger als $3 \mu\text{m}$ hervorragend ausgebildet. Die Linsenseite (a) ist von vergleichbarer Qualität, allerdings weist sie etwas größere Abweichungen vom Sollwert bei der Strukturtiefe (ca. $273 \mu\text{m}$ statt $250 \mu\text{m}$) und beim Linsenradius (ca. $342 \mu\text{m}$ statt $354 \mu\text{m}$) auf. Des Weiteren wurde ein leichter Knick in der Bodenfläche beobachtet.

Die gemessene Abformgenauigkeit liegt innerhalb der Toleranzen die *Contour-Tooling* bei der Fertigung der Formdiamanten garantiert. Die Toleranz bei der Fertigung des Linsenradius‘ beträgt beispielsweise $\pm 10 \%$, womit der Radius grundsätzlich zwischen $319 \mu\text{m}$ und $389 \mu\text{m}$ liegen dürfte. Der erzielte Radius von $342 \mu\text{m}$ ist also zufriedenstellend.

Insgesamt ist die Strukturübertragung bei den PDMS Prototypen also hervorragend gelungen.

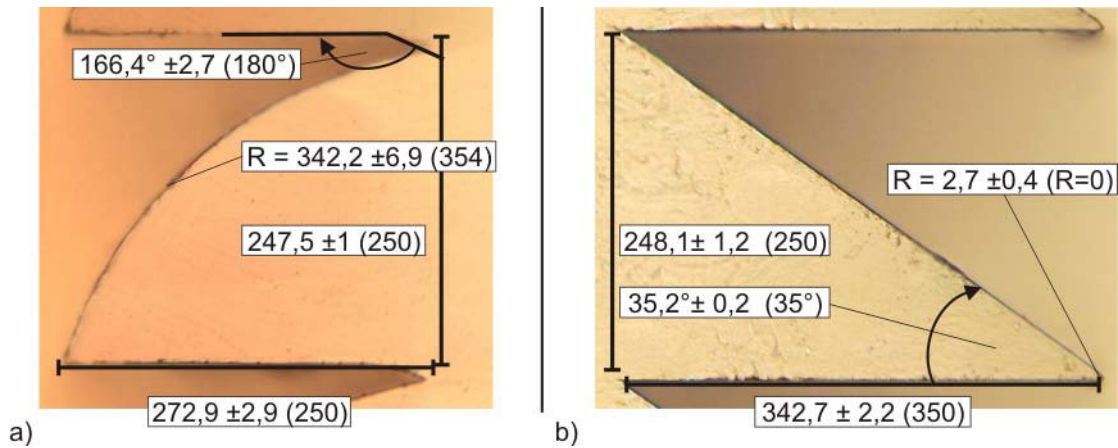


Bild 5.1: Querschnitte von im Gießverfahren hergestellten PDMS Lichtlenkstrukturen (Linsen- (a) und Prismenseite (b)). Alle Messwerte in [μm]. Die Werte in Klammern geben die Sollwerte an.

5.1.1.2 Oberflächenrauheit

Die Untersuchung der Oberflächenbeschaffenheit zeigte keine besonderen Auffälligkeiten. Größere Defekte oder spezifische Kratzermuster, die auf die Herstellung zurückführbar wären, wurden nicht beobachtet. Bild 5.2 zeigt beispielhaft die Oberfläche einer untersuchten PDMS-Probe. Alle gemessenen Flächen waren ausgesprochen homogen und wiesen einen mittleren Rauheitswert im Bereich von $R_a = 25 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$ auf. Die Oberfläche ist also insgesamt sehr glatt und von höchster optischer Qualität.

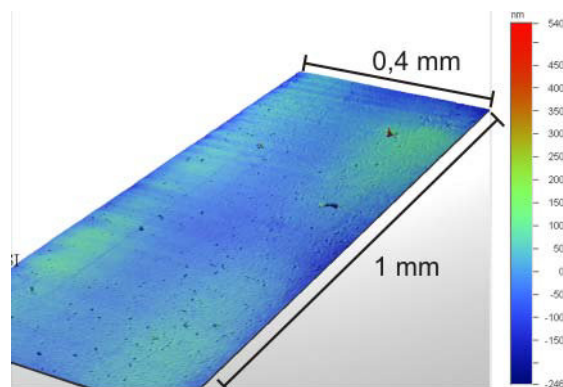


Bild 5.2: Interferometermessung einer PDMS-Probe: Die Fläche zeigt homogene Rauheitswerte von $R_a \approx 25 \text{ nm}$.

5.1.2 Einseitig heißgeprägte PMMA-Elemente

Das großformatige Heißprägen erfolgte bei Jungbecker. Die PMMA-Elemente wurden auf einer Fläche von $1500 \times 400 \text{ mm}^2$ mit Strukturen von $500 \mu\text{m}$ versehen. Erste Ele-

mente wurden auch mit einer Höhe von 300 mm gefertigt, da während der Strukturierung des Formwerkzeugs ein Diamant beschädigt wurde.

Jungbecker ist auf das Heißprägen von PMMA-Elementen spezialisiert und strukturiert eigenständig die benötigten Formwerkzeuge im Hobelverfahren.

5.1.2.1 Abformgenauigkeit

Die Abformgenauigkeit der heißgeprägten PMMA Lichtlenkelemente sollte vorwiegend zerstörungsfrei bestimmt werden. Daher wurden die benötigten Querschnitte aus Abformungen mit einem additionsvernetzenden Polysiloxan gewonnen, dessen Abformtreue deutlich oberhalb der Messgenauigkeit liegt. Die Zuverlässigkeit dieser Methode wurde anhand einiger direkt am PMMA durchgeführter Vergleichsmessungen überprüft und bestätigt.

An den PMMA-Prototypen wurden Abweichungen von den Sollwerten festgestellt, die sich inhomogen auf den einzelnen Proben verteilen. Einige Oberflächenbereiche erreichten die gewünschte Sollgeometrie, an anderen Stellen wurden stärkere Formverzerrungen beobachtet. Die ausführliche, systematische Untersuchung vieler Probenquerschnitte zeigte eine Ortsabhängigkeit des Fehlerbilds (siehe Bild 5.3).

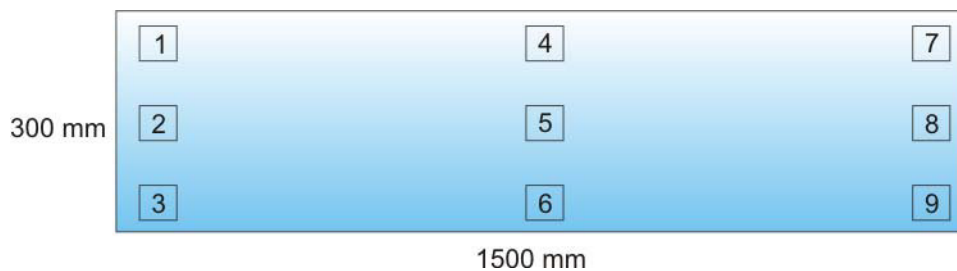


Bild 5.3: Positionen der Probenentnahme auf dem Lichtlenkelement.

Bild 5.4 (a) und (c) zeigen Querschnitte, die gut mit der Sollgeometrie übereinstimmen und an den Probenpositionen sieben und vier entnommen wurden. Die beiden anderen Querschnitte (b) und (d) zeigen Fehlerbilder, wie sie – so oder in ähnlicher Form – an diversen Positionen beobachtet wurden. Auffällig sind die Stufen in der Bodenfläche und die Abrundung der Prismenspitze.

Die Strukturen wiesen bis zu drei Stufen mit einer Höhe von bis zu $25\ \mu\text{m}$ auf. Die Stufenform konnte über mehrere Proben einem festen Ort zugeordnet werden.

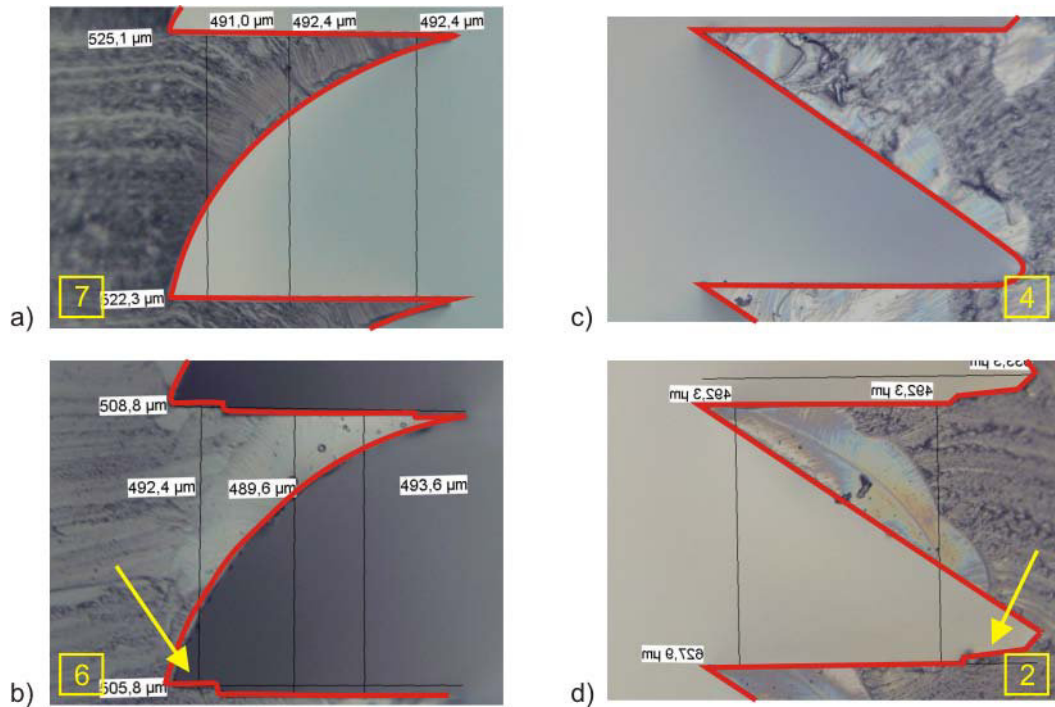


Bild 5.4: Querschnitte der heißgeprägten PMMA-Elemente: in Abhängigkeit von der Position (gelbe Nummerierung) wurden stufenförmige Formabweichungen beobachtet.

Die Abrundung der Prismenspitze war örtlich unterschiedlich ausgeprägt. Der Radius der schwankte zwischen ca. $20 \mu\text{m}$ bis $55 \mu\text{m}$ und konnte nicht festen Positionen zugeordnet werden.

Insgesamt wurden also einige wenige Formabweichungen beobachtet, die dem anspruchsvollen Produktionsprozess geschuldet sind. Dennoch wird eine insgesamt gute Strukturqualität erreicht, die für den Einsatz im Lichtlenksystem geeignet ist.

5.1.2.2 Oberflächenrauheit

Die Qualität der Oberfläche wurde anhand von Interferometermessungen bestimmt – Bild 5.5 zeigt exemplarische Aufnahmen für eine Bodenfläche (a) und eine angewinkelte Fläche (b) eines Prismas. In beiden Bildern sind Kratzspuren längs der Hobelrichtung sichtbar. Weiterhin sind in (a) Kratzer senkrecht zur Hobelrichtung und in (b) wellenförmige Oberflächendeformationen zu beobachten.

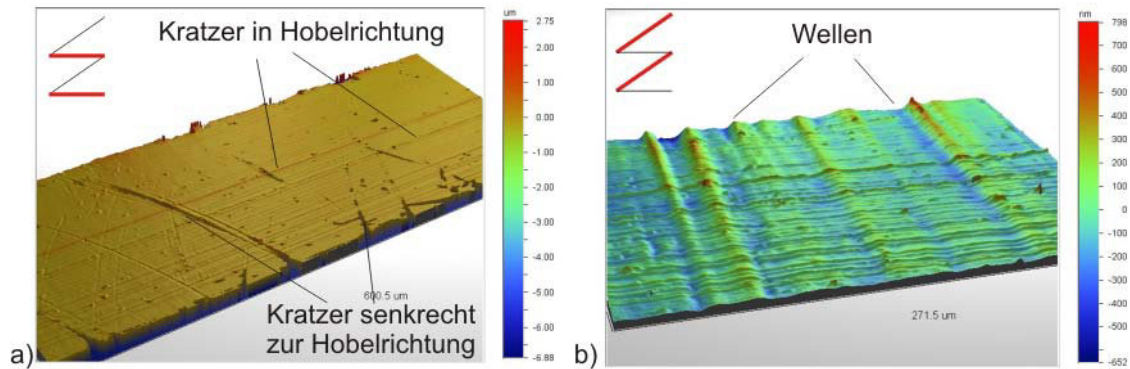


Bild 5.5: Messungen mit dem Weißlichtinterferometer an PMMA-Prototypen: a) Kratzer längs und senkrecht zur Hobelrichtung. b) Wellenförmige Oberflächendeformationen.

Die gemessene mittlere Rauheit war stärker gestreut als bei den PDMS-Prototypen und insgesamt etwas größer, da die Defekte und Wellen den Rauheitswert örtlich merklich beeinflussen. Die Bodenfläche des Sägezahns hat eine Rauheit von $R_a = 120 \pm 30 \text{ nm}$ und die angewinkelte Fläche einen Wert im Bereich von $R_a = 85 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$. Diese Oberflächenrauheit ist mit dem bloßen Auge kaum von einer perfekt glatten Oberfläche unterscheidbar. Damit haben die PMMA-Prototypen eine gute optische Qualität.

5.1.3 Doppelseitig heißgeprägte PMMA-Elemente

Wie in Kapitel 3 festgestellt wurde, ist es wünschenswert, beide Strukturseiten in einem Schritt zu prägen, um auf die Verklebung beider Seiten verzichten zu können. Jungbecker erprobte dieses besonders anspruchsvolle Herstellungsverfahren auf einer Fläche von $1500 \times 400 \text{ mm}^2$ mit verschiedenen Strukturvarianten, die eine Größe von $500 \mu\text{m}$ oder $510 \mu\text{m}$ hatten. Die Gründe für die verschiedenen Strukturen werden später erläutert.

5.1.3.1 Abformgenauigkeit

Die Untersuchungen ergaben, dass jeweils die Struktur einer Plattenseite gut übertragen wurde und der Sollgeometrie entsprach und die der anderen Plattenseite Verformungen aufwies. Bild 5.6 zeigt Aufnahmen zweier Proben. In (a) ist die Sägezahnseite verformt und in (b) die Linsenseite. Weiterhin zeigt sich in (b), dass die Sägezahnstruktur leicht gekippt in das Formwerkzeug übertragen wurde.

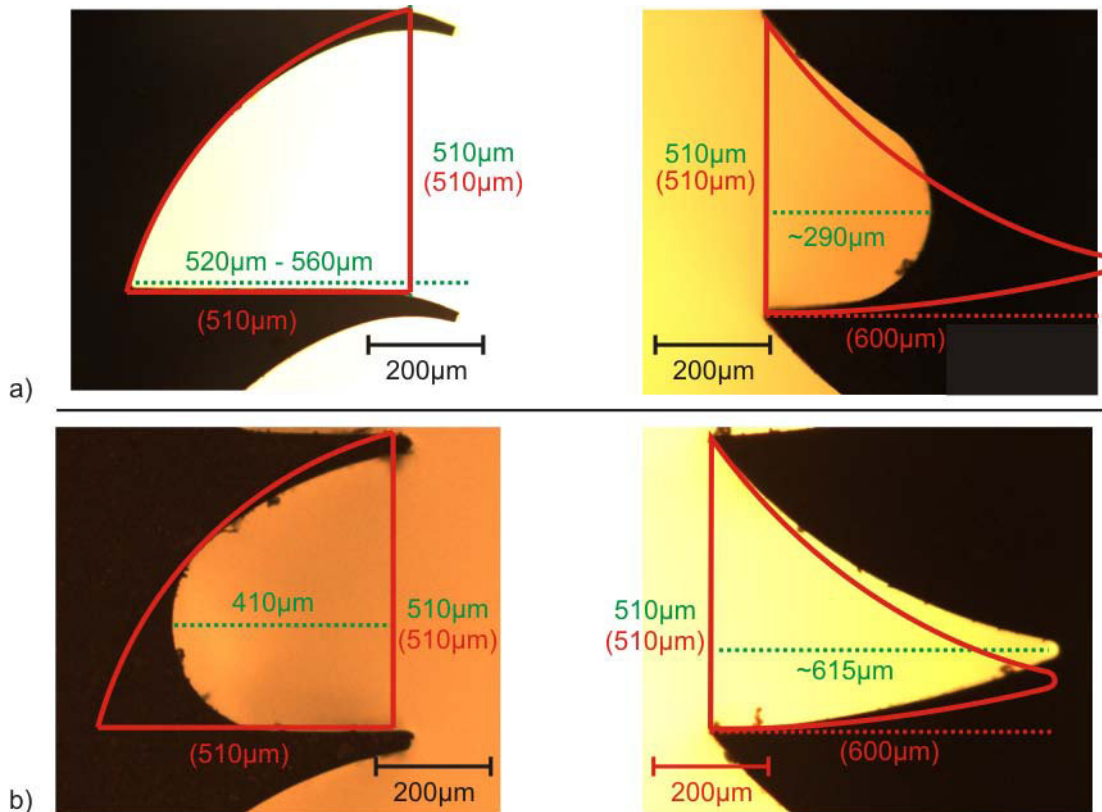


Bild 5.6: Querschnitte doppelseitig geprägter PMMA-Strukturen: (a) Verformung der Sägezahnseite. (b) Verformung der Linsenseite. Die angestrebte Sollgeometrie und die Sollmaße sind rot gekennzeichnet.

Diese Geometrieabweichungen führen zu einer Beeinträchtigung der Lichtlenkfunktionalität, was auch von den lichttechnischen und simulatorischen Untersuchungen bestätigt wurde. Jede doppelseitig geprägte Probe wies eine einzigartige Geometrie und Lichtlenkeigenschaft auf. Da sie damit nicht mit den anderen Ergebnissen vergleichbar sind, wird an dieser Stelle auf die Darstellung der Einzelergebnisse verzichtet.

Um funktionstüchtige Lichtlenkelemente in einem einzelnen Prägeschritt strukturieren zu können, sind also noch Anpassungen am Herstellungsprozess erforderlich.

5.1.3.2 Oberflächenrauheit

An den meisten gemessenen Flächen zeigten sich im Vergleich zu den einseitig geprägten Elementen bessere Rauheitswerte, die im mittleren zweistelligen Bereich lagen. Bild 5.7 zeigt Strukturquerschnitte und Rauheitswerte, die an den entsprechenden Flächen ermittelt wurden.

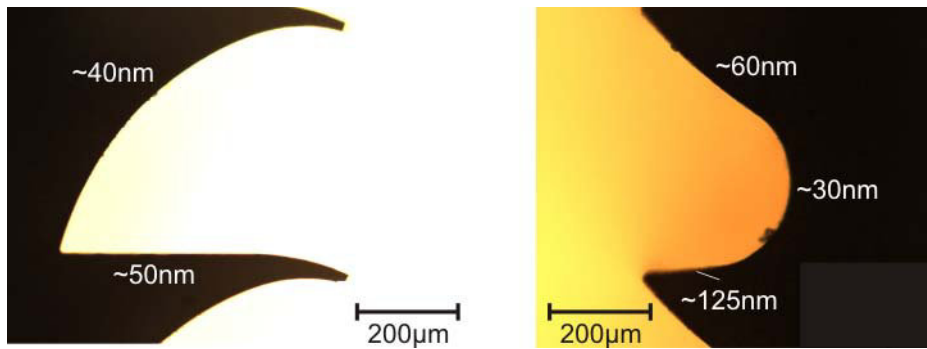


Bild 5.7: Mittlere Rauheit R_a an doppelseitig geprägten Platten: Bis auf die Bodenfläche des Sägezahns haben alle Flächen eine Rauheit R_a im mittleren zweistelligen Bereich.

An der Bodenfläche des Sägezahns wurde eine vergleichsweise hohe Rauheit mit Werten von über 100 nm gemessen. Diese ist allerdings nicht auf flächig ausgebreitete Oberflächenunregelmäßigkeiten zurückführbar, sondern auf einige dort befindliche tiefe Defekte, wie sie in Bild 5.8 (a) zu sehen sind. Die Teilbereiche der Bodenfläche ohne Defekte weisen eine Rauheit von ca. 40 nm auf und liegen damit in der Größenordnung der übrigen Flächen.

Die gemessenen Elemente haben also eine Oberfläche von hoher optischer Güte.

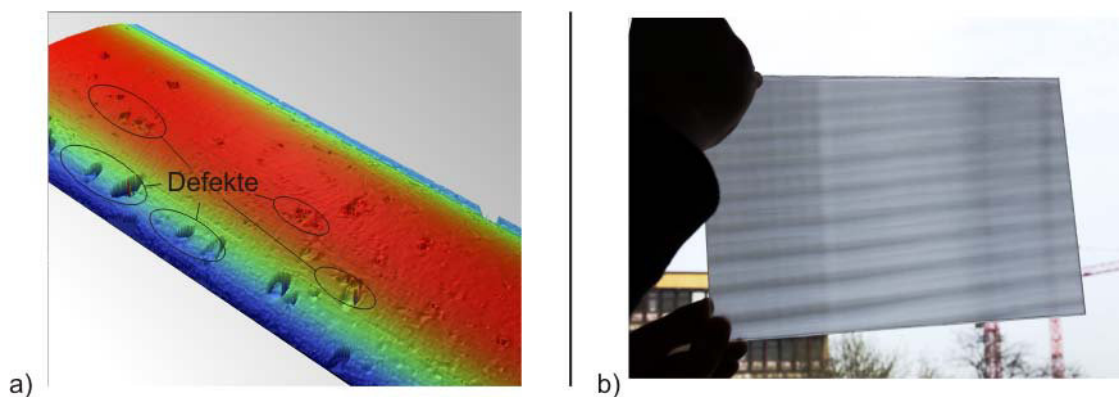


Bild 5.8: a) Ergebnis einer Interferometer-Messung: Die erhöhte Rauheit des Sägezahnbodens ($> 100\text{ nm}$) ist einzelnen, tiefen Defekten zuzuordnen. b) Moiré-Effekt an einem Lichtlenksystem (System hergestellt durch die Firma *Karl Jungbecker GmbH & Co. KG*).

5.1.3.3 Weitere Beobachtungen

Bild 5.8 (b) zeigt ein Foto einer doppelseitig geprägten Platte, bei der ein streifenförmiges Hell-Dunkel-Muster leicht schräg über die Platte verläuft. Dieses Muster entsteht durch einen Moiré-Effekt, der durch einen unterschiedlichen Pitchabstand zwischen Vorder- und Rückseite ($500\ \mu\text{m}$ und $510\ \mu\text{m}$) hervorgerufen wird. Mit dem verschiedenartigen Pitchabstand wurde eine bessere Durchmischung des Lichts angestrebt, um so kritische Strahlverläufe abzumildern. Der negative Einfluss auf das optische Gesamtbild führte dazu, dass diese Idee nicht weiter verfolgt wurde.

Das Linienmuster verläuft schräg, weil eine Strukturseite axial verdreht geprägt wurde. Dies hat allerdings keinen Einfluss auf die Lichtlenkcharakteristik und wäre ohne Moiré-Muster vermutlich gar nicht aufgefallen.

5.2 Goniometrischer Messaufbau

Die Aufgabe eines Goniophotometers ist die quantitative Erfassung einer Lichtverteilung. Dazu muss ein Lichtbündel aus einer definierten Raumrichtung die Probe beleuchten und die erzeugte Lichtverteilung muss von einem Detektor örtlich erfasst werden. Es wird grundsätzlich unterschieden in eine transmittierte und eine reflektierte Verteilungsfunktion, die in der Literatur als *Bidirectional Transmission (bzw. Reflection) Distribution Function*, abgekürzt *BTDF* (bzw. *BRDF*) bezeichnet werden.

Die Messungen in dieser Arbeit dienen vor allem der Untersuchung der transmittierten Lichtverteilung, also der BTDF, da das reflektierte Licht nicht für die Raumbeleuchtung verwertbar und die genaue Verteilung daher nicht von Belang ist. Die goniometrische Vermessung einer einzelnen Probe muss unter verschiedenen Lichteinfällen wiederholt werden, damit das Lichtlenkverhalten unter verschiedenen Sonnenständen untersucht werden kann.

Das Erfassen einer BTDF ist eine komplexe Aufgabe, da in Abhängigkeit der Ausrichtung der Lichtquelle der gesamte Halbraum hinter der Probe mit möglichst hoher Auflösung erfasst werden soll. Für diese Aufgabe gibt es derzeit keinen verbindlichen Messstandard oder eine einheitliche und kommerziell erhältliche Messtechnik. Daher sind an diversen lichttechnischen Einrichtungen individuelle Messaufbauten entstanden, die sich erheblich voneinander unterscheiden. In Anhang A befindet sich eine Übersicht und Beschreibung einiger Goniophotometer. An dieser Stelle reicht es allerdings festzuhalten, dass die Aufbauten so groß sind, dass sie teilweise einen ganzen Raum einnehmen und die unabhängig voneinander ermittelten Messwerte sich dennoch um bis zu 12,5 % unterscheiden.

5.2.1 Der Messaufbau

Der kurze Einblick in die Goniometertechnik zeigt, dass unterschiedliche Messmethoden möglich und legitim sind. Die eigenen goniometrischen Messungen können also nur näherungsweise eine Überprüfung der Simulationsergebnisse ermöglichen, da selbst große und aufwendige Messaufbauten nicht vollkommen zuverlässige Ergebnisse liefern. Da in dieser Arbeit nicht die Verbesserung der Goniophotometertechnik im Vordergrund steht, sondern die Entwicklung eines Lichtlenksystems, wurde der Messaufbau so ausgelegt, dass eine zügige Überprüfung der Lichtlenkeigenschaften und ein einfacher Abgleich mit den Simulationsergebnissen möglich ist, ohne dabei den Anspruch auf eine Allgemeingültigkeit der Ergebnisse zu erheben.

In Kapitel 4 erwies es sich als zweckmäßig die Lichtlenksysteme nur für azimutal senkrechte Lichteinfälle zu untersuchen, da sich damit die Problemstellung auf eine zweidimensionale Anordnung reduziert, die erheblich einfacher analysiert und diskutiert werden kann. Bei den goniometrischen Messungen ist diese Maßnahme von noch grö-

berem Vorteil, da die Messung von einer Halbkugel, auf einen Halbkreis reduziert wird, wodurch mit einfachen Mitteln ein zweckmäßiger und mechanisch stabiler Messaufbau erstellt werden kann. Die Proben müssen allerdings die Bedingungen erfüllen, dass ihre Geometrie nicht den Lichtweg in azimuthaler Richtung beeinflusst und, dass sie eine hinreichend glatte Oberfläche aufweisen. Damit soll sichergestellt werden, dass das gesamte Licht in der Messebene liegt und vom Detektor erfasst wird.

In Bild 5.9 ist der Messaufbau schematisch dargestellt. Als Lichtquelle dient ein Helium-Neon Laser mit einer Wellenlänge von $\lambda = 633 \text{ nm}$. Die Linsenoptik weitet den Strahl auf einen Durchmesser von 3 mm auf, was einem Vielfachen der Strukturgröße entspricht (Pitchabstand $250 \mu\text{m}$ bzw. $500 \mu\text{m}$). Der Lichtstrahl trifft im Bereich der senkrechten Mittelachse des Probenstischs auf das Lichtlenksystem, welches den punktförmigen Querschnitt des Strahls aufgrund der linsenförmigen Strukturen zu einer Linie aufweitet.

Ein optischer Leistungsdetektor scannt die Linie halbkreisförmig und erfasst die örtliche Strahlungsleistung Φ_e . Die Öffnungsweite des Detektors und der Abstand zur Probe sind so bemessen, dass eine Winkelauflösung von $\Delta\theta_2 = 5^\circ$ gegeben ist. Probenstisch und Detektor haben eine gemeinsame Drehachse.

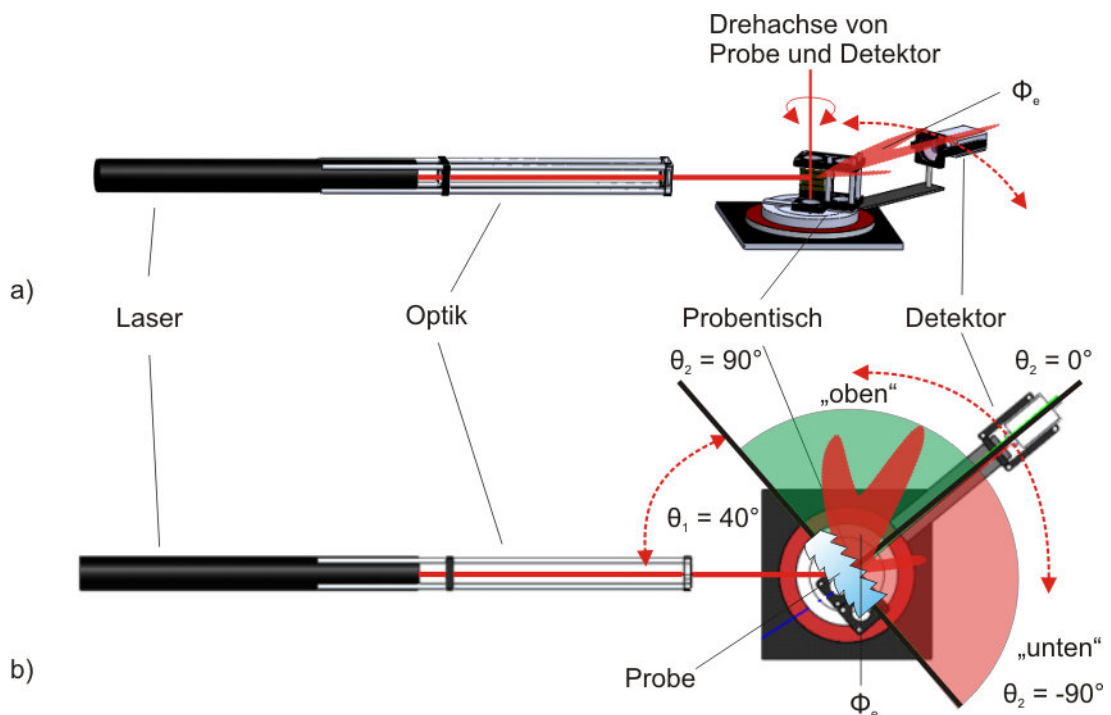


Bild 5.9: Goniometrischer Messaufbau in isometrischer Ansicht (a) und Aufsicht (b): Der Laserstrahl wird optisch aufgeweitet, kollimiert und beleuchtet die Probe azimuthal senkrecht. Ein optischer Leistungsmesser erfasst die Lichtverteilung hinter der Probe (Bilder erstellt in Anlehnung an [Ouy10]).

Nach dem Scan eines Halbkreises wird die Probe um $\Delta\theta_I = 5^\circ$ gedreht und der Vorgang wiederholt. Auf diese Weise werden die Lichteinfälle von $\theta_I = 0^\circ$ bis $\theta_I = 75^\circ$ gemessen. Der vorliegende Messaufbau wurde nicht automatisiert, weshalb die manuelle Messung einer Probe etwa 3 Stunden benötigt.

Mit den so erfassten Daten können dann Lichtverteilungsdiagramme für spezifische Lichteinfälle θ_I und Transmissionsdiagramme für $0^\circ \leq \theta_I \leq 75^\circ$ erstellt werden, wie sie auch zur Auswertung der Simulationen benutzt wurden.

5.3 Goniometrische Messergebnisse

Insgesamt wurde eine Vielzahl von Messungen an diversen prismatischen und linsenförmigen Strukturen durchgeführt. Die Strukturseiten wurden sowohl einzeln, als auch in verschiedenen doppelseitigen Kombinationen untersucht. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und Vergleichbarkeit werden in diesem Abschnitt nur die Ergebnisse der Strukturen diskutiert, die auch in Kapitel 4 behandelt wurden. Folglich können die Messergebnisse direkt den Simulationsergebnissen gegenübergestellt werden.

5.3.1 Einseitige Sägezahnstruktur aus PDMS

Die Simulationen ergaben, dass eine Sägezahnstruktur mit einem Winkel $\delta = 35^\circ$ an der Spitze eine gute Ausgangsgeometrie für die weitere Optimierung ist, da sie vor allem hohe Sonnenstände mit hoher Effizienz lenkt.

Wie das Transmissionsdiagramm aus der goniometrischen Vergleichsmessung in Bild 5.10 belegt, wird dieses Resultat bestätigt. Die Kurven von Simulation und Messung für die Sägezahnstruktur aus PDMS stimmen sehr gut überein, nur die genaue Position des Wechsellpunkts der Lichtlenkcharakteristik ist um etwa 5° verschoben. Der Grund dafür liegt bei der Lichtverteilung für $\theta_1 \approx 30^\circ$, in der sich die Leistungspeaks nahezu senkrecht zum Lichtlenksystem im Bereich von $\theta_2 = 0^\circ$ befinden (siehe Bild 4.10). Dadurch kann eine geringe Geometrieabweichung, ein Justierfehler bei der Messung oder einfach die unterschiedliche Messauflösung (Simulation $\Delta_{\theta_2} = 1^\circ$, Messung $\Delta_{\theta_2} = 5^\circ$) für die Differenz verantwortlich sein.

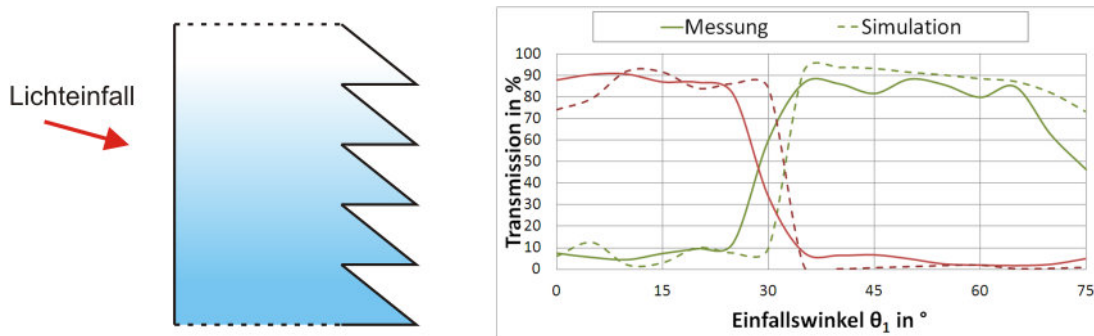


Bild 5.10: Vergleichsmessung an einer einseitigen Sägezahnstruktur aus PDMS. Das Transmissionsdiagramm zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung.

5.3.2 Doppelseitige Sägezahnstruktur aus PDMS

Zur Verbesserung der Lichtlenkung für kleine Einfallswinkel θ_1 erwies es sich als vorteilhaft eine doppelseitig Strukturierung zu verwenden. Entsprechende Systeme, welche beidseitig mit Mikroprismen (jeweils $\delta = 35^\circ$) versehen sind, wurden aus PDMS hergestellt und untersucht.

Das Transmissionsdiagramm in Bild 5.11 zeigt wieder eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung und bestätigt damit die Simulationsergebnisse. Besonders gut sind die für dieses System charakteristischen Einbrüche bei $\theta_1 = 40^\circ$ und bei $\theta_1 = 60^\circ$ erkennbar.

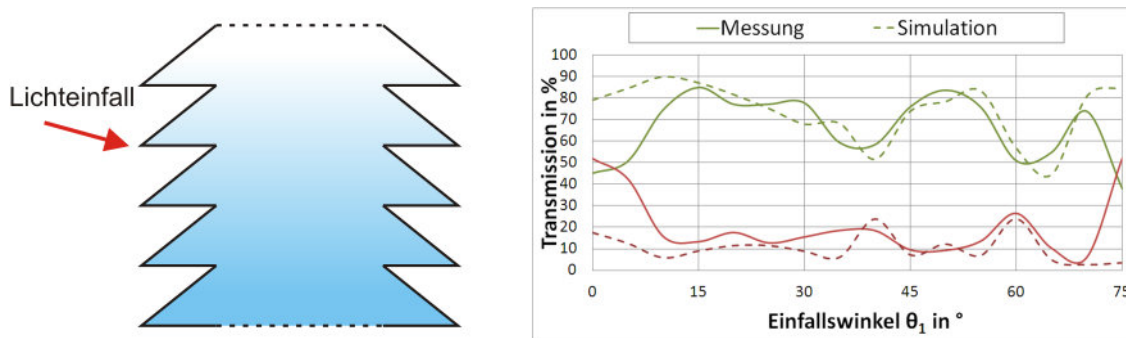


Bild 5.11: Vergleichsmessung an einer doppelseitigen Sägezahnstruktur ($\delta = 35^\circ$) aus PDMS. Das Transmissionsdiagramm zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung.

5.3.3 Doppelseitiges Basissystem aus PDMS

Da rein prismatische Systeme empfindlich auf Veränderungen des Strahlverlaufs reagieren, wurde auf der lichtzugewandten Seite eine linsenförmige Struktur als besonders vorteilhaft identifiziert. Da diese Geometriekombination ein geeignetes Lichtlenksystem darstellt, wird in diesem Fall neben dem Transmissionsdiagramm auch die Lichtverteilung für spezifische Einfallswinkel θ_1 untersucht.

5.3.3.1 Transmissionsdiagramm

Das Transmissionsdiagramm in Bild 5.12 zeigt wieder einen Vergleich zwischen Simulation und Messung. In diesem Fall basiert die Kurve für die Messungen auf der Untersuchung von zehn PDMS-Systemen, die mit den Strukturen des Basissystems versehen wurden. Sie können sich herstellungsbedingt hinsichtlich Strukturausrichtung und Materialdicke jedoch leicht voneinander unterscheiden.

Es zeigt sich wiederum eine gute qualitative Übereinstimmung. Allerdings wurde bei diesen Messungen festgestellt, dass die Lichtlenkung nach oben etwa 10 % bis 15 % niedriger liegt als erwartet. Dies liegt vermutlich daran, dass die Linsengeometrie etwas stärker vom Sollwert abweicht, als es bei den einfachen Prismen der Fall ist. Die Fertigung eines komplexen Formdiamanten ist nur mit einer höheren Toleranz möglich.

Eine weitere Beobachtung ist die geringe Standardabweichung zwischen den Messungen, die mit einer Ausnahme im Bereich von 2 % bis 3 % liegt. Wird berücksichtigt, dass die beiden Strukturseiten nur mit Augenmaß und von Hand zusammengeführt wurden, zeigt sich damit, dass auch ohne genaue Ausrichtung beider Seiten, eine nahezu

gleiche Lichtlenkperformance erzeugt werden konnte. Die Herstellung konnte mit der Linsenstruktur also deutlich vereinfacht und zuverlässig durchgeführt werden.

Im Mittel werden von den PDMS-Systemen rund 66 % des von $15^\circ \leq \theta_1 \leq 65^\circ$ einfallenden Lichts nach oben umgelenkt. Die Simulationsergebnisse ließen als Mittelwert eine Transmission von bis zu 79 % für dieses System erwarten. Hier wird das volle Potenzial also noch nicht ausgeschöpft.

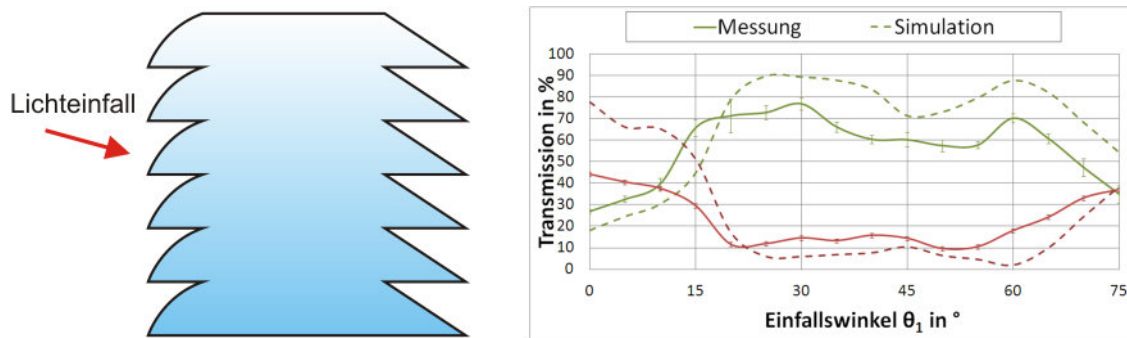


Bild 5.12: Vergleichsmessungen an Basissystemen aus PDMS: Simulation und Messung stimmen qualitativ gut überein. Die Standardabweichung ist gering

5.3.3.2 Lichtverteilungsdiagramme

Ein noch detaillierterer Vergleich zwischen Simulation und Messung kann mit der Auswertung der Lichtverteilungsdiagramme für spezifische Lichteinfallswinkel θ_1 durchgeführt werden. In Bild 5.13 sind die Lichtverteilungen für $\theta_1 = 15^\circ$, 30° , 45° und 60° abgebildet.

In allen vier Diagrammen decken sich beide Verteilungskurven jeweils hervorragend. Die gemessenen Peaks sind etwas kleiner und schmaler, womit ihre integrierte Leistung etwas geringer ist, was nach Auswertung des Transmissionsdiagramms allerdings zu erwarten war. Ihre Position stimmt aber mit der Erwartung überein.

Aus den Verteilungsdiagrammen lässt sich auch die Form der Lichtverteilung ablesen. In der späteren Anwendung bedeuten einzelne Peaks, dass sich das Licht in die entsprechende Raumrichtung relativ gebündelt ausbreitet und an der Raumdecke einen Lichtstreifen bildet. Bei einem Lichteinfall von $\theta_1 = 45^\circ$ (c) liegen die Peaks bei etwa $\theta_2 = 70^\circ$ und $\theta_2 = 55^\circ$, woraus sich schließen lässt, dass das Licht recht steil umgelenkt wird und sich damit nah am Fenster zwei helle Streifen an der Raumdecke befinden. Dieses Ergebnis ist nicht optimal, da eine Lenkung tiefer in den Raum mit etwa $15^\circ \leq \theta_2 \leq 30^\circ$ und eine geringere Streifenbildung wünschenswert wäre. Für die anderen Lichteinfälle sind die Ergebnisse besser, da das Licht erheblich tiefer in den Raum gelangt.

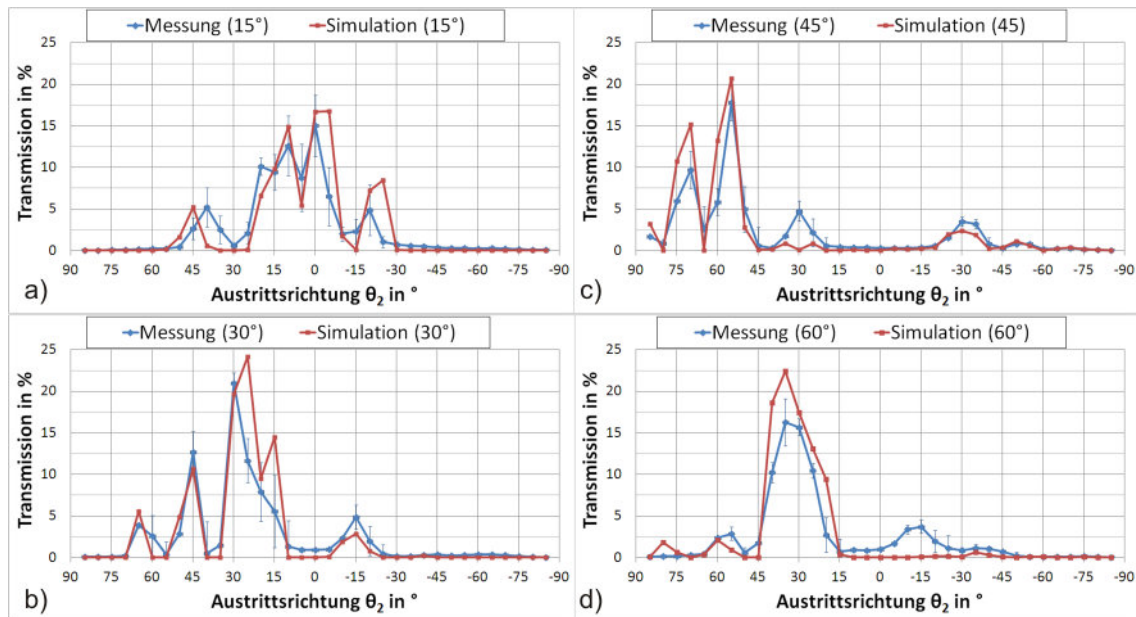


Bild 5.13: Lichtverteilungskurven für PDMS-Systeme und Einfallswinkel von $\theta_1 = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ (a-d). Messung (blaue Kurven) und Simulationsergebnis (rote Kurven) zeigen eine gute Übereinstimmung.

An dieser Stelle muss hervorgehoben werden, dass die Simulation auf einem *idealen* System basiert, welches eine perfekte Geometrie hat, keine Oberflächenrauheit aufweist und auch kein Licht absorbiert. Die Messungen wurden an einem *realen* System durchgeführt. Zwischen den beiden Ergebnissen liegen also zahlreiche Zwischenschritte:

- Die ideale Geometrie wurde in zwei Konturdiamanten geschliffen,
- mit den Diamanten wurden zwei Formwerkzeuge gefräst,
- im Gießverfahren wurden PDMS-Abdrücke erstellt,
- die Abdrücke wurden gebondet,
- die Messung wurde mit dem Goniometer durchgeführt.

Alle Zwischenschritte führen natürlich mehr oder minder stark zu einer Veränderung der Lichtverteilung. Dass die Ergebnisse dennoch so hervorragend übereinstimmen, belegt, dass der in dieser Arbeit vorgenommene Schritt mit einer Linsengeometrie die Fehlertoleranz zu erhöhen, überaus erfolgreich war. Es existiert also ein zuverlässiger Herstellungsprozess mit dem das vorgeschlagene Basissystem in guter Qualität gefertigt werden kann.

Die Messungen verifizieren ebenfalls die Ergebnisse der Simulationen. Es kann also auf Simulationsbasis das Verhalten eines spezifischen Lichtlenksystems beurteilt werden und es ist möglich, dieses mit vergleichbaren Eigenschaften zu fertigen.

5.3.4 Lichtlenksystem aus PMMA

Im Gegensatz zu den Lichtlenksystemen aus PDMS wurden die PMMA-Systeme im Großformat und von Jungbecker gefertigt.

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnisse beruhen auf Messungen an Lichtlenksystemen, deren Strukturseiten separat strukturiert wurden¹ und anschließend mit einem Silikonöl verbunden wurden, um den Brechzahlssprung am Luftspalt zu reduzieren. Im Rahmen der Untersuchung der Strukturqualität (siehe 5.1.2) wurden an den heißgeprägten Lichtlenkelementen einige Geometrieabweichungen festgestellt.

5.3.4.1 Transmissionsdiagramme

Bild 5.14 zeigt das Transmissionsdiagramm eines Lichtlenksystems aus PMMA. Die Messkurve beruht auf einem System, welches die Sollgeometrie gut erfüllt. Im Vergleich zum Simulationsergebnis zeigt sich wieder eine qualitative Übereinstimmung. Wie schon bei den PDMS-Systemen beobachtet, wird der simulierte Idealwert vom physischen System nicht ganz erreicht. Als Transmissionswert zwischen $\theta_i = 15^\circ$ und $\theta_i = 65^\circ$ wurde im Mittel ein Wert von 61 % gemessen, während mit der Simulation ein Wert von 69 % ermittelt wurde. Damit ergibt sich auch beim PMMA-System ein Verbesserungspotenzial von einigen Prozent.

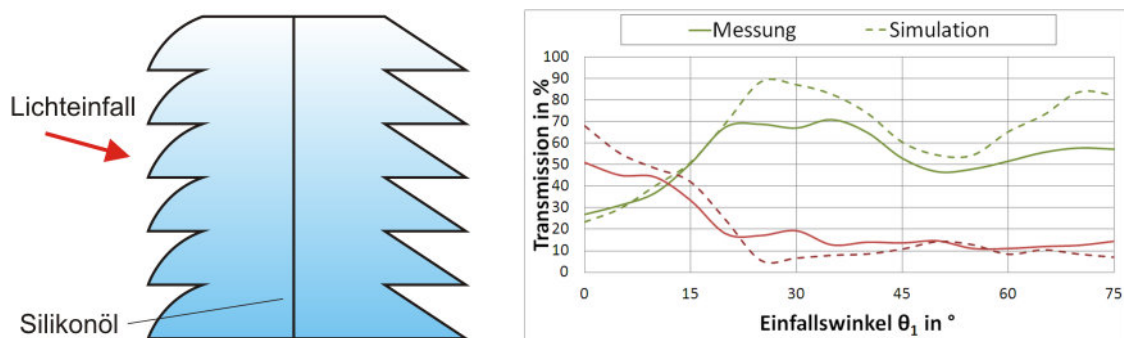


Bild 5.14: Vergleichsmessung an einem Basissystem aus PMMA: Der Messung liegt ein System zugrunde, das die Sollgeometrie nahezu erfüllt.

Weitere Messungen wurden an Proben durchgeführt, deren Strukturgeometrie etwas stärker von der Sollgeometrie abwich. Dazu wurden gezielt Proben untersucht, an denen Formabweichungen festgestellt wurden. Die ermittelten Transmissionskurven unterscheiden sich erwartungsgemäß stärker von der simulierten Kurve, wie Bild 5.15 zu entnehmen ist.

Im Vergleich zu den PDMS-Proben, ist die Standardabweichung vom Mittelwert in diesem Falle größer. Die exemplarisch eingezeichneten Messkurven verdeutlichen mögli-

¹ Die doppelseitig geprägten Elemente wiesen zu große Geometriedifferenzen auf, sodass aus den goniometrischen Messungen keine nützlichen Informationen gewonnen werden konnten.

che Kurvenverläufe. Trotz der Differenzen weist das Übertragungsverhalten aller Proben dennoch eine vergleichbare Charakteristik auf. Kritische Ausreißer, die das System für den Praxiseinsatz untauglich machen würden, wurden nicht beobachtet.

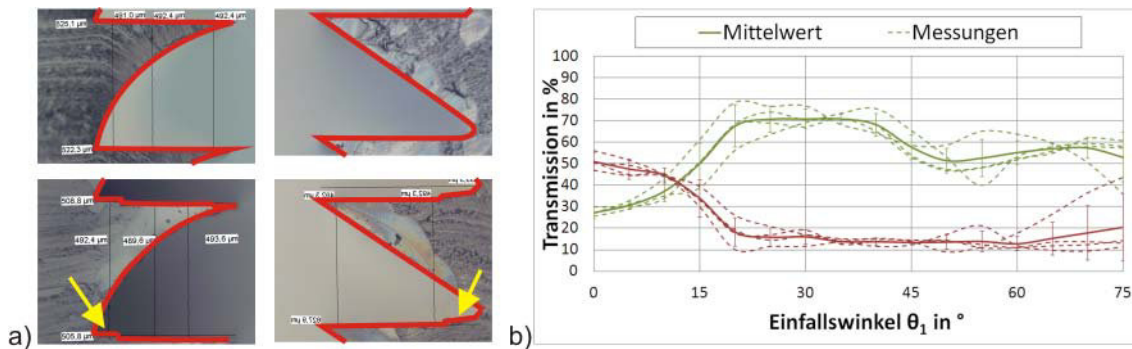


Bild 5.15: a) PMMA-Systeme mit und ohne Formabweichungen. b) Transmissionsdiagramme verschiedener Basissysteme aus PMMA.

5.3.4.2 Lichtverteilungsdiagramme

Die Lichtverteilungsdiagramme für diskrete Lichteinfälle θ_1 ermöglichen wieder einen genaueren Einblick in das Übertragungsverhalten. Bild 5.16 zeigt die Lichtverteilungen am PMMA-System für $\theta_1 = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ und 60° .

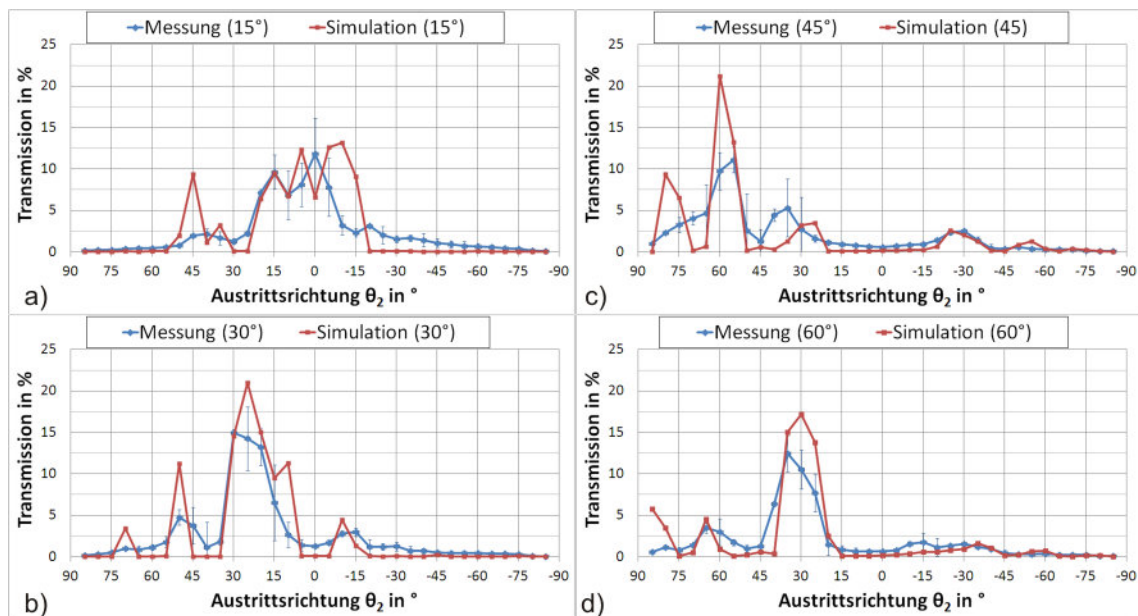


Bild 5.16: Lichtverteilungskurven für PMMA-Systeme und Einfallswinkel von $\theta_1 = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ (a-d). Messung (blaue Kurven) und Simulationsergebnis (rote Kurven) zeigen eine grundsätzlich gute Übereinstimmung.

Es sind wieder deutliche Übereinstimmungen zwischen Simulation und Messung erkennbar, vor allem hinsichtlich der Position der einzelnen Peaks. Die simulierten Lichtverteilungen weisen spitzere, höhere und insgesamt diskretere Peaks auf, als die gemessenen Verteilungen, deren Peaks flacher sind und an den Flanken auslaufen.

Hauptgrund für diese Beobachtung wird neben den unterschiedlichen Geometrien, die hier gemittelt werden, auch die Oberflächenrauheit der PMMA-Proben sein. Diese liegt im Bereich von $R_a \approx 100 \text{ nm}$ und wird sicher zu einer Streuung des Lichts beitragen. In der Simulation wird die Rauheit nicht berücksichtigt, weshalb die Peaks entsprechend diskreter ausgeprägt sind.

Werden erneut die Kurven der PDMS-Proben betrachtet (Bild 5.13), so sind auch dort auslaufende Flanken zu beobachten, die der Rauheit ($R_a \approx 25 \text{ nm}$) entsprechend aber weniger stark abgeflacht sind.

5.3.4.3 Demonstration der Lichtverteilung

Alle bisherigen Diagramme gaben zahlreiche Informationen über die Lichtlenkeigenschaften des mikrostrukturierten Systems und seiner einzelnen Elemente. Dennoch sind diese Diagramme nur unzureichend dazu geeignet, das tatsächliche Aussehen einer Lichtverteilung zu veranschaulichen. Aus diesem Grund wird in Bild 5.17 ein Lichtverteilungsdiagramm in Polardarstellung (a) dem Foto einer mit einer Taschenlampe am mikrostrukturierten PMMA-System erzeugten Lichtverteilung gegenübergestellt.

Die Umlenkung des Lichts wird sehr schön für den Einfallswinkel von $\theta_i = 35^\circ$ deutlich. Es sind sehr gut die Übereinstimmungen zwischen Diagramm und realer Lichtverteilung erkennbar. Die einzelnen Peaks des Diagramms sind in der realen Verteilung miteinander verbunden, was neben der Oberflächenrauheit auch am breiteren Öffnungswinkel der Lichtquelle liegt, wodurch einzelne Peaks sich überlappen und verschmelzen. Die hier gezeigte Lichtlenkcharakteristik ist nahezu optimal und sollte nach Möglichkeit für alle Lichteinfälle erreicht werden.

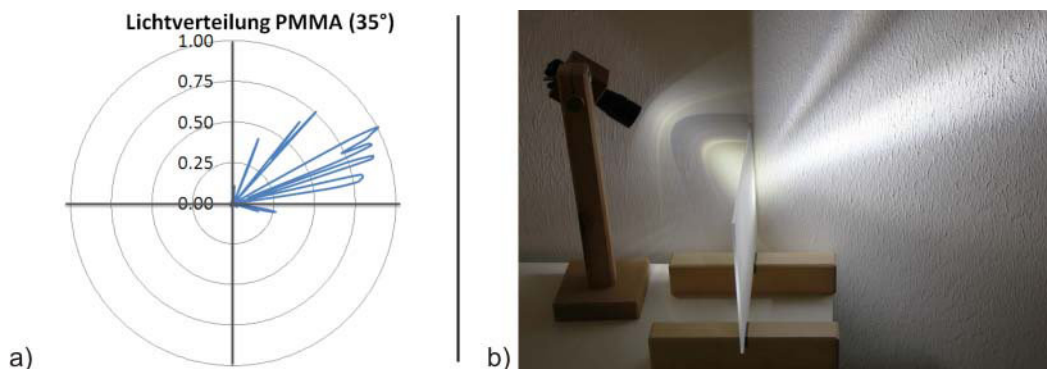


Bild 5.17: a) Simulierte Lichtverteilung im Polardiagramm für $\theta_i = 35^\circ$. b) Mit einer Taschenlampe erzeugte, reale Lichtverteilung für $\theta_i = 35^\circ$ (System hergestellt von *Karl Jungbecker GmbH & Co. KG*).

Fazit

Die Untersuchung der strukturellen Systemqualität lässt sich damit zusammenfassen, dass die Laborprototypen aus PDMS eine hervorragende Qualität und die einseitig heißgeprägten PMMA-Elemente eine gute Qualität mit leichten Formabweichungen aufweisen. Die Erprobung des doppelseitigen Heißprägeverfahrens führte zu Prototypen, die auf einer Seite Deformationen aufwiesen, die sie für den Einsatz im Lichtlenk-system derzeit ungeeignet machen.

Diese Ergebnisse spiegelten sich auch in der lichttechnischen bzw. goniometrischen Bewertung der Systeme wider. Die gegossenen PDMS-Prototypen zeigten sowohl in den Transmissionsdiagrammen, als auch in jedem einzelnen Lichtverteilungsdiagramm eine beeindruckende Übereinstimmung mit dem aus der Simulation gewonnenen Erwartungswert. Damit konnte erfolgreich belegt werden, dass das mikrostrukturierte Lichtlenk-system auch nach dem Transfer von Computerlayout zu physischem System trotz der zahlreichen Zwischenschritte (Diamantschleifen, Formwerkzeugstrukturierung, Replikation, Bonden und Messen) mit der prognostizierten Eigenschaft erstellt werden kann – und zwar wiederholbar. Hier erwies sich die gewählte Strukturkombination mit der Linsenform als besonders wertvoll, da sie zusätzliche Toleranz gegenüber diversen Geometrieunwägbarkeiten bietet.

Die großformatigen PMMA-Systeme wiesen ein insgesamt gutes Übertragungsverhalten auf. Die Lichtverteilungsdiagramme stimmten hinsichtlich der Position der Peaks im Wesentlichen mit der Simulation überein.

Die Lichtverteilung sollte in einigen Details noch überarbeitet werden, um das Licht unter einigen Sonnenständen nicht nur nach oben, sondern auch tief in den Raum zu lenken. Ebenfalls kann die Reduzierung heller Lichtstreifen das Ziel einer Optimierung sein. Beide Aspekte werden daher in Kapitel 6 bearbeitet.

6 Modifikationen und Optimierung

In den bisherigen Kapiteln wurde gezeigt, dass ein mikrostrukturiertes Lichtlenksystem mit Hilfe von Simulationen planbar und technisch umsetzbar ist.

Die goniometrische Untersuchung der Systeme zeigte eine insgesamt gute Lichtlenkcharakteristik, bei der jedoch unter bestimmten Winkeln (wie z.B. $\theta_l = 45^\circ$) das Licht sehr steil umgelenkt wurde und in der Lichtverteilung ein Streifenmuster zu beobachten war. Diese beiden Aspekte gaben dazu den Anlass, das Lichtlenksystem qualitativ zu überarbeiten.

In diesem Kapitel werden Möglichkeiten aufgezeigt, mit denen das System modifiziert werden kann. So bewirkt eine *Überarbeitung der Strukturgeometrie*, dass das Licht tiefer in den Raum gelenkt wird (Kap. 6.1). Gleichzeitig kann die Streifenbildung durch den *gezielten Einsatz von Oberflächenrauheit* reduziert werden (Kap. 6.2).

Abseits von der Tageslichtlenkung wird eine Option vorgestellt, durch die zusätzlich das *Lichtlenksystem als Kunstlichtbeleuchtung* eingesetzt werden und bei Dunkelheit einem Gebäude farbige Akzente verleihen kann (Kap. 6.3).

Die hier vorgestellten Modifikationen sind als optionale Elemente zu verstehen, die bei Bedarf als Werkzeuge zur Anpassung des Beleuchtungsbildes zur Verfügung stehen.

6.1 Überarbeitung der Strukturgeometrie

In Kapitel 4 wurde im Rahmen der Simulationen herausgefunden, dass sich das Licht bei der Nutzung rein prismatischer Strukturen auf wenigen klar definierten Pfaden durch das System bewegt, wodurch eine hohe Störanfälligkeit generiert wird. Ebenfalls erzeugen prismatische Systeme Lichtverteilungen, die aus wenigen hellen Streifen mit hoher Intensität bestehen.

Durch den Einsatz einer linsenförmigen Geometrie wird das eintreffende Licht im Winkel aufgeweitet, mit der Konsequenz, dass sich neben der Erhöhung der Toleranz gegenüber Fertigungsfehlern auch die Streifen in der Lichtverteilung reduzieren. Ein naheliegender Schluss ist daher, diesen Weg fortzusetzen und geradlinige Geometrien durch gewölbte zu ersetzen. Die Sägezahnstruktur bietet das größte Überarbeitungspotenzial.

6.1.1 Beschreibung der Geometrieüberarbeitung

Die aus zahlreichen Simulationen resultierende Strukturüberarbeitung ist in Bild 6.1 abgebildet. Die Linsenseite wurde nicht verändert, da geringe Geometrieänderungen keine nennenswerten Vorteile zeigten und umfangreiche Parameteränderungen unkalculierbare Lichtlenkeigenschaften ergaben. Da das Basissystem mit prismatischem Sägezahn gute lichtlenkende Eigenschaften bewies, orientierte sich die Optimierung an dieser Struktur. Die modifizierte Version des Sägezahns ist blau umrandet. Im Vergleich zum einfachen 35°-Prisma (roter Querschnitt) wurden Boden- und angewinkelte Fläche mit einer Wölbung versehen.

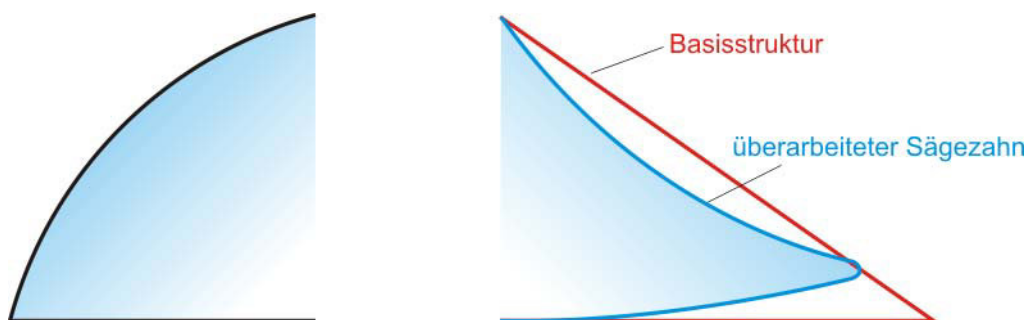


Bild 6.1: Die Wölbung der Prismenflächen verringert die Streifenbildung. Der rote Umriss kennzeichnet die Sägezahnstruktur des Basissystems. Die Geometrie der Linsenseite bleibt unverändert.

Die gezeigte Struktur ist keine Freeform-Figur, sondern basiert auf klaren Geometriebeschreibungen, die zur Fertigung des Formdiamanten definiert wurden. Der entsprechend komplexe Formdiamant musste in mehreren Schritten geschliffen werden. Bild 6.2 zeigt einige Zwischenschritte: Als erstes wird der Formdiamant mit einer dreieckigen Spitze versehen (a). Der Teil des Diamanten, der zur Strukturierung des

Formwerkzeugs benötigt wird, ist in den Bildern schattiert. Die Basis des Dreiecks hat eine Breite von $588\ \mu\text{m}$ und ist damit breiter als der anvisierte Pitchabstand von $500\ \mu\text{m}$. In einem nächsten Schritt wird die Bodenfläche mit einem Radius von $2,5\ \text{mm}$ geschliffen und damit die Basis des Dreiecks auf $500\ \mu\text{m}$ gekürzt. Die angewinkelte Seite wird mit einem Radius von $1\ \text{mm}$ verrundet, wodurch die Kontur aus (b) entsteht. Abschließend wird die Spitze des Diamanten abgerundet ($R = 12,5\ \mu\text{m}$), um ein unkontrolliertes Abbrechen während der Strukturierung des Formwerkzeugs zu verhindern. Die Kontur des fertig geschliffenen Formdiamanten ist in (c) zu sehen.

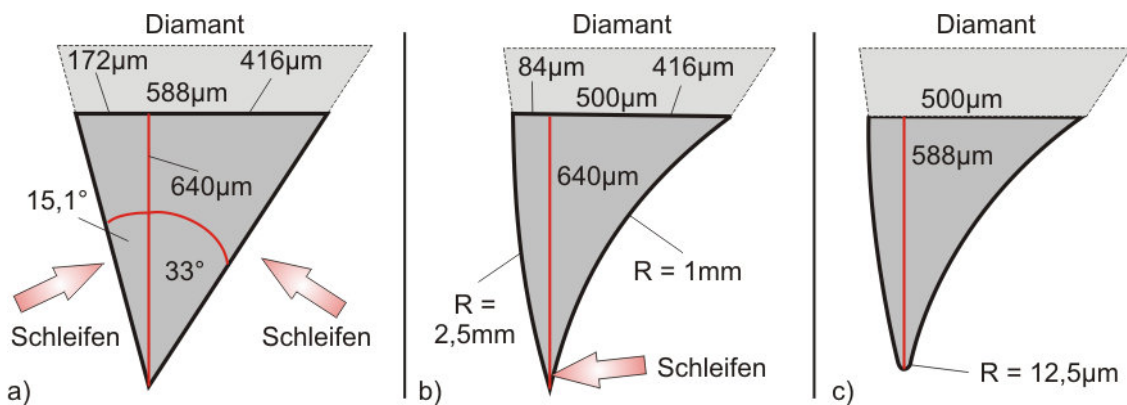


Bild 6.2: Schleifschritte zur Konturierung des Formdiamanten: a) Dreiecksform an der Spitze. b) Herstellen der Strukturradien an den Dreiecksseiten. c) Abrunden der Spitze.

6.1.2 Auswirkungen auf das Lichtlenkverhalten

Die Auswirkungen der Strukturüberarbeitung auf die Lichtverteilungen wurden simulatorisch untersucht und mit den bekannten Transmissions- und Lichtverteilungsdiagrammen ausgewertet. Die Untersuchung wurde für Systeme aus PMMA durchgeführt.

6.1.2.1 Transmissionsdiagramm

Bild 6.3 zeigt das Transmissionsdiagramm des bekannten Basissystems im Vergleich zur modifizierten Version. Beide Systeme unterscheiden sich nur an einer Strukturseite voneinander – und selbst dort ähneln sich die Strukturen. Dies spiegelt sich in den grundsätzlichen Kurvenverläufen wider, die sich ebenfalls ähneln. Hohe Sonnenstände mit Einfallswinkeln $\theta_i \geq 60^\circ$ werden vom modifizierten System mit etwas geringerer Effizienz umgelenkt, weshalb der Transmissionswert des zwischen $\theta_i = 15^\circ$ und $\theta_i = 65^\circ$ einfallenden Lichts auf einen Wert von $65\ \%$ sinkt. Das Basissystem weist einen Wert von $69\ \%$ auf.

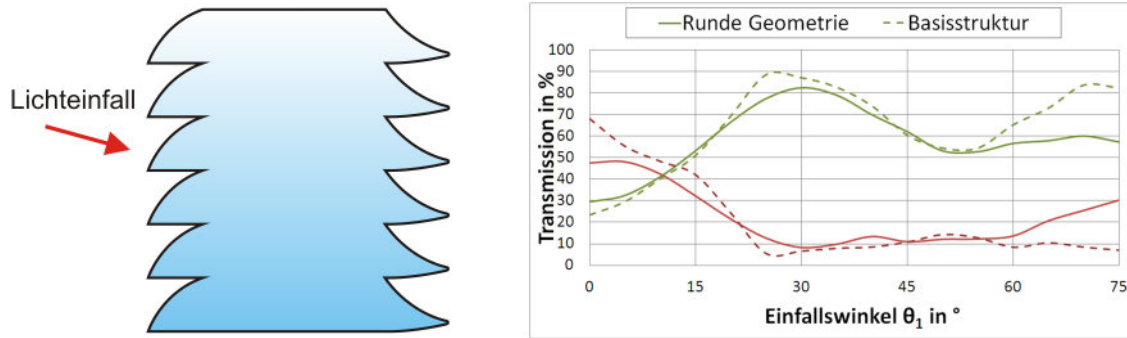


Bild 6.3: Transmissionsdiagramm basierend auf Simulationsergebnissen für ein modifiziertes Lichtlenksystem aus PMMA im Vergleich zum Basissystem.

6.1.2.2 Lichtverteilungsdiagramme

Das Transmissionsdiagramm zeigt, dass sich durch die Modifikation die Lichtlenkeffizienz verringert, wenn auch im geringen Umfang. Die Vorteile der modifizierten Struktur müssen also anhand einzelner Lichtverteilungen belegt werden. Bild 6.4 zeigt die entsprechenden Lichtverteilungsdiagramme für $\theta_1 = 15^\circ$, 30° , 45° und 60° . Die blaue Kurve zeigt das Simulationsergebnis des modifizierten Systems – die rote Kurve zeigt die Verteilung beim Basissystem.

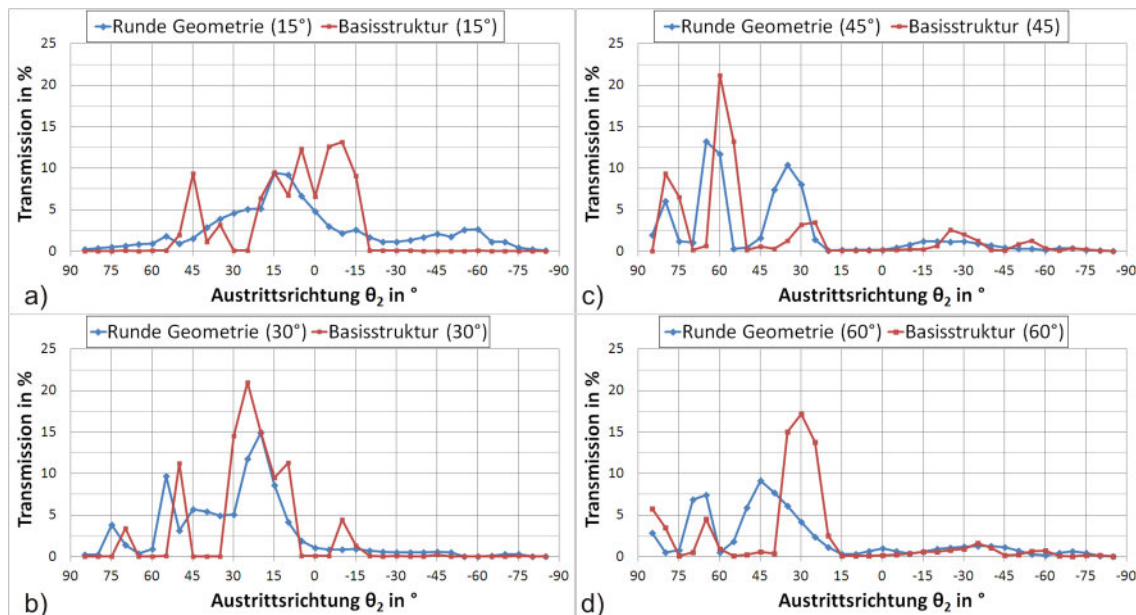


Bild 6.4: Lichtverteilungskurven für die Einfallswinkel $\theta_1 = 15^\circ$, 30° , 45° , 60° (a-d) für das modifizierte System (blau) und für das Basissystem (rot). Beide Systeme bestehen aus PMMA.

Die Peaks des Basissystems sind in allen vier Diagrammen diskreter ausgebildet als die Peaks des modifizierten Systems. Das hat zur Folge, dass die resultierenden Lichtverteilungen mit der modifizierten Struktur insgesamt homogener und weniger streifig

wirken. Potenzielle Lichtstreifen werden stärker aufgeweitet, wodurch auch ihre Leuchtdichte abnimmt.

Ein Kritikpunkt am Basissystem war die steile Lichtlenkung bei einem Einfallswinkel von $\theta_1 = 45^\circ$. Die Lichtverteilung des modifizierten Systems zeigt an dieser Stelle (c) einen zusätzlichen Peak bei $\theta_2 = 35^\circ$, womit nun im direkten Vergleich ein deutlich größerer Lichtanteil tief in den Raum gelenkt wird.

Eine weitere Beobachtung ist, dass der Maximalwert des nach unten fallenden Lichts ($\theta_2 \leq 0^\circ$) beim modifizierten System geringer ist als beim Basissystem, da sich das Licht stärker verteilt. Damit ist mit dem modifizierten System die maximale Blendung etwas geringer, obwohl bei einigen Lichteinfällen in der Summe mehr Licht unterhalb der Horizontalen in den Raum gelangt.

Insgesamt konnte also gezeigt werden, dass sich durch die Modifikation der Geometrie die Lichtverteilung verbessert:

- Helle Streifen werden aufgeweitet und dadurch abgemildert.
- Der Raum wird tiefer ausgeleuchtet.
- Die maximale Helligkeit blendender Lichtanteile wird reduziert.

6.2 Selektiver Einsatz von Oberflächenrauheit

Im vorangegangenen Kapitel zeigte sich während der Untersuchung der Lichtverteilungen der PMMA-Lichtlenksysteme, dass durch eine während der Herstellung entstandene Oberflächenrauheit einzelne Peaks abgeflacht und aufgeweitet werden.

In diesem Abschnitt wird dieser Aspekt erneut aufgegriffen, indem versucht wird, durch gezieltes Aufrauen der Oberfläche das Lichtlenkverhalten positiv zu beeinflussen, wodurch vor allem die Streifenbildung beseitigt werden soll.

Dabei wird folgendermaßen vorgegangen:

- Bestimmung der erzeugbaren Rauheitsformen.
- Messung der zugehörigen Streuverteilungen.
- Transfer der Streuverteilung in ein Simulationsmodell und Simulation.
- Erprobung des Vorgehens.

6.2.1 Experimentelle Bestimmung der Streuverteilung durch Oberflächenrauheit

6.2.1.1 Modelle zur Beschreibung von Streufunktionen

An der mathematischen Beschreibung von Streuung an optischen Oberflächen wird seit Jahrzehnten intensiv geforscht und die entsprechenden Modelle haben sich im Laufe der Zeit fortwährend weiterentwickelt¹.

Auch heute gibt es noch intensive Forschungsbemühungen mathematische Modelle zu entwickeln, mit denen sich aus konkreten Charakteristika die Streueigenschaften einer Oberfläche voraussagen lassen [Fou07, Har10, Sch11]. Zwar wäre es schön, mit dem Rauheitswert R_a direkt auf eine Streuverteilung schließen zu können, allerdings reicht diese Angabe nicht zur vollständigen Charakterisierung einer Oberflächenbeschaffenheit aus [Ben99]. Eine Oberfläche mit „großen Plateaus und tiefen Tälern“ verfügt beispielsweise über den gleichen R_a -Wert wie eine Oberfläche mit eng aneinander liegenden Rautiefen von geringerer Höhe. Licht wird an beiden Oberflächen dennoch verschieden gestreut.

Natürlich kann die Charakterisierung der Oberfläche verfeinert werden, indem weitere spezifische Informationen bestimmt werden, wie zum Beispiel die sogenannte PSD-

¹ Als anerkanntes Basismodell gilt das Rayleigh-Rice Modell [Ric51], das in den 50er und 60er Jahren durch die Beckmann-Kirchhoff Streutheorie [Bec63] weitestgehend abgelöst wurde. In den 70er Jahren modifizierten Harvey und Shack diese Theorie [Har76], deren Theorie mittlerweile ebenfalls überarbeitet wurde [Ver98, Har07]. Daneben gibt es noch weitere Streutheorien, wie die K-Korrelation oder die ABC-Streutheorie [Dit06], die bei manchen Sonderfällen Anwendung finden. Es gibt also keine universell einsetzbare Streuverteilungstheorie.

Funktion (power spectral density), die Ortsfrequenz² der Oberfläche. Allerdings lassen sich die Streueigenschaften selbst dann nicht verlässlich voraussagen [Dup02].

Insgesamt ist es also einfacher und auch zuverlässiger, die Streuerverteilung einer Oberfläche experimentell zu bestimmen und diese dann mit einer Verteilungsfunktion in der Simulation nachzubilden. So wurde es auch hier gehandhabt.

6.2.1.2 Oberflächenmodifikation durch Sandstrahlen

Grundsätzlich kann eine Kunststoffoberfläche mit verschiedenen Techniken aufgeraut werden, beispielsweise chemisch (mit einem Lösungsmittel), mechanisch (durch Schleifen, Sandstrahlen) oder thermisch (mit einem Laser).

Es sollen grundsätzlich nur spezifische Flächen bearbeitet werden, da das Aufrauen anderer Flächen, zum Beispiel der Strukturböden, die Lichtlenkung stören würde. So kommt der Einsatz eines Lösungsmittelbads nicht in Frage, da damit das System global mit einer Rauheit versehen werden würde. Da die Strukturen eine Tiefe im Sub-Millimeterbereich haben, können sie auch nicht einfach mechanisch angeschliffen werden. Somit stehen von den oben genannten Techniken noch Sandstrahlen und Laserbearbeitung zur Wahl. Da das Sandstrahlen verbreitet angewendet wird und zudem kostengünstig ist, wurde sich darauf konzentriert.

Zunächst wurde die Streuerverteilung an unstrukturierten PMMA-Platten (Standardmaterial) untersucht, um die Abhängigkeit von Prozesstechnik und Materialwahl zu spezifizieren. Dazu wurden die Platten unter verschiedenen Bedingungen sandgestrahlt und anschließend lichttechnisch untersucht.

Wichtige Prozessgrößen beim Sandstrahlen sind neben der eingesetzten Anlage und des Materials:

- der Arbeitsabstand zwischen Düse und Probe,
- der Strahlwinkel zwischen Düse und Probe,
- die Art des Strahlmittels,
- die Prozessdauer und
- der Strahldruck.

Zur Herstellung wiederholbarer Ergebnisse wurden bei einzelnen Versuchsreihen alle Parameter bis auf den Strahldruck konstant gehalten. Somit konnten einem definierten Strahldruck, eine spezifische Oberflächenrauheit und Streuerverteilung zugeordnet werden.

Die Versuche zeigten, dass bereits die Herstellung eines homogenen Rauheitsbildes mit niedrigen Rauheitswerten im Bereich von $R_a < 1000 \text{ nm}$ eine Herausforderung ist. So hat zum Beispiel die Wahl der Strahldüse einen starken Einfluss auf die Oberflächen-

² Die Ortsfrequenz gibt eine Information darüber, wie sich die Charakteristika einer Fläche örtlich wiederholen.

homogenität. Die Nutzung einer einfachen kreisrunden Düse (Bild 6.5 (a)) mit zylinderförmigem Kanalquerschnitt erzeugt unregelmäßige Oberflächen mit örtlich stark variierenden Rauheitswerten, weshalb die Oberfläche „fleckig“ aussieht. Der Grund dafür ist ein inhomogener Luftstrahl, der von der Düse erzeugt wird. Mit der Verwendung einer Breitstrahldüse im Format $15\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ (Bild 6.5 (b)) sollte das Strahlen optimiert werden, insbesondere unter der Berücksichtigung, dass später nur einzelne, angewinkelte Flächen aus einer Vorzugsrichtung behandelt werden sollten. Breitstrahldüsen sind wegen langer Lieferzeiten schwierig zu beschaffen und vergleichsweise teuer. Dies liegt vor allem daran, dass sie keinen messbaren Mehrwert bieten, da der erzeugte Luftstrahl nicht dem Profil der Düse folgt und eine ungleichmäßige Intensität hat. Somit lassen sich mit den Düsen (a) und (b) selbst plane Flächen nicht homogen strahlen.

Ein erheblich homogenerer Luftstrahl wird mit einer Venturi-Düse erzeugt (c). Bei einer Venturi-Düse verengt sich der Luftkanal konisch und weitet sich anschließend wieder, was die Homogenisierung des Luftstroms bewirkt. In dieser Arbeit wurde eine Venturi-Düse aus Borcarbid mit einem Durchmesser von 10 mm verwendet.

Düsenquerschnitte:

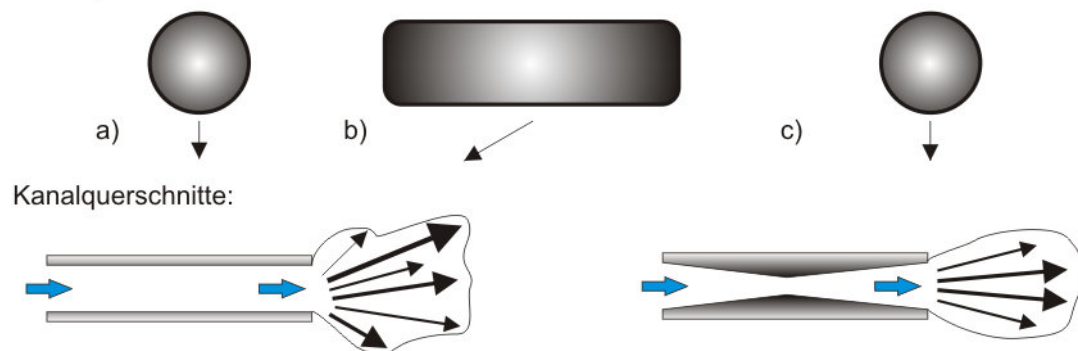


Bild 6.5: a) Herkömmliche kreisförmige Düse ($\varnothing = 10\text{ mm}$). b) Breitstrahldüse ($15\text{ mm} \times 5\text{ mm}$). c) Kreisförmige Venturi-Düse ($\varnothing = 10\text{ mm}$). (a) und (b) haben einen geraden Kanalquerschnitt. (c) hat einen doppelt konischen Querschnitt.

Die Wahl des Strahlmittels hat ebenfalls einen starken Einfluss auf die Oberflächenqualität. Erste Strahlversuche wurden mit Glasperlen in einer Körnung von $100\text{ }\mu\text{m}$ - $200\text{ }\mu\text{m}$ unternommen. Die Glasperlen sind kugelförmig und rauhen die Oberfläche auf, indem sie kleine Keile bzw. Kegel aus ihr herausschlagen (siehe Bild 6.6 (a)). Dies erfordert einen hohen Impuls der Glasperlen und damit einen starken Luftstrom ($> 2,5\text{ bar}$). Bei niedrigem Luftdruck ist der Impuls der Glasperlen zu gering, sodass sie wirkungslos von der Platte abprallen. Daher lassen sich mit ihnen niedrige Rauheitswerte nur schwierig herstellen und sehr schlecht dosieren. Glasperlen erweisen sich insgesamt als ungeeignet zur Herstellung einer gezielten Oberflächenrauheit, insbesondere einer geringen Rauheit.

Scharfkantige Strahlmittel können die Oberfläche auch mit geringem Strahldruck ($\sim 1 \text{ bar}$) aufrauen. Die Ecken und Kanten der Strahlpartikel bohren sich in die Materialoberfläche, wodurch ein feines und homogenes Oberflächenbild entsteht (siehe Bild 6.6 (b)). Ein geeignetes scharfkantiges Strahlmittel ist beispielsweise Korund (Aluminiumoxid Al_2O_3). In dieser Arbeit wurde mit einem speziellen, weißen Edelkorund „EK-F 220“ mit einer Körnung von $53 \mu\text{m} - 75 \mu\text{m}$ gearbeitet. Er eignet sich besonders gut zur Modifikation des Lichtlenksystems, da mit diesem Material keine Grautönung der Oberfläche auftritt, wie es beim Einsatz von herkömmlichen, dunklen Korund geschieht.

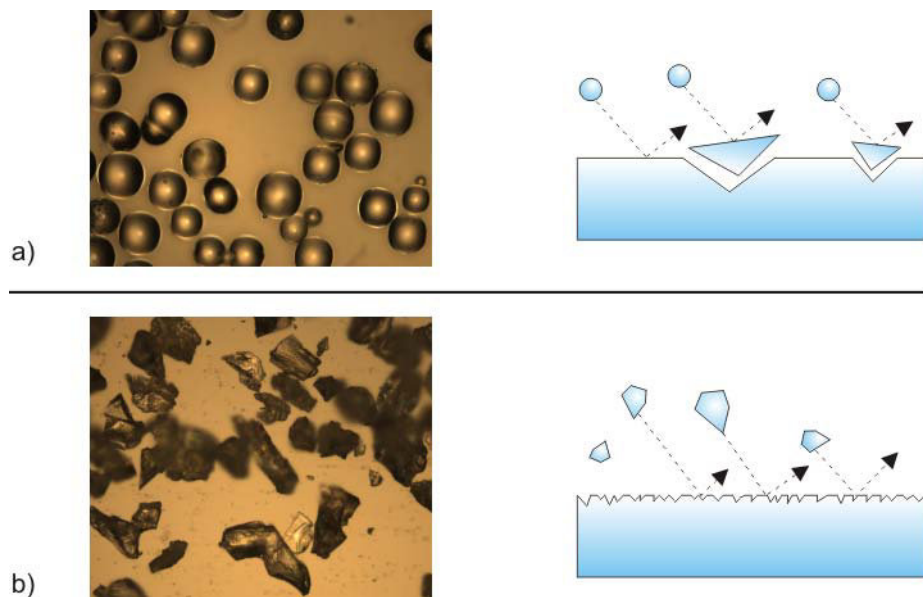


Bild 6.6: Strahlmittel: a) Glasperlen benötigen einen hohen Impuls, um Keile aus der Oberfläche herauszuschlagen. b) Scharfkantiger Korund ermöglicht auch bei niedrigem Strahldruck eine homogene Oberflächenrauheit.

Ein wiederholbares und homogenes Oberflächenbild ergibt sich mit folgendem Strahlprozess: Der Strahlwinkel zwischen Düse und Probe beträgt etwa 60° , der Arbeitsabstand liegt bei 10 cm bis 15 cm . Jede Zeile einer Probe wird langsam und gleichmäßig mit ca. 5 cm/s dreimalig gestrahlt bis die nächsttiefere Zeile mit einer Überlappung von etwa 50% behandelt wird. Die so erstellten Probenreihen wurden anschließend experimentell untersucht.

6.2.1.3 Messaufbau und Messergebnisse

Wie Bild 6.7 zeigt, ist der Messaufbau zur Ermittlung der Streuerverteilung eine Abwandlung des goniometrischen Messaufbaus aus Kapitel 5: Die aufgerauten PMMA-Elemente werden von einem HeNe-Laser³ senkrecht beleuchtet und die resultierende,

³ Wellenlänge $\lambda = 633 \text{ nm}$; Strahlungsleistung $\Phi_e = 3 \text{ dBm}$; Strahldurchmesser $d = 3 \text{ mm}$

transmittierte Lichtverteilung wird auf der anderen Seite im Bereich $-90^\circ \leq \theta_R \leq 90^\circ$ vom Detektor erfasst.

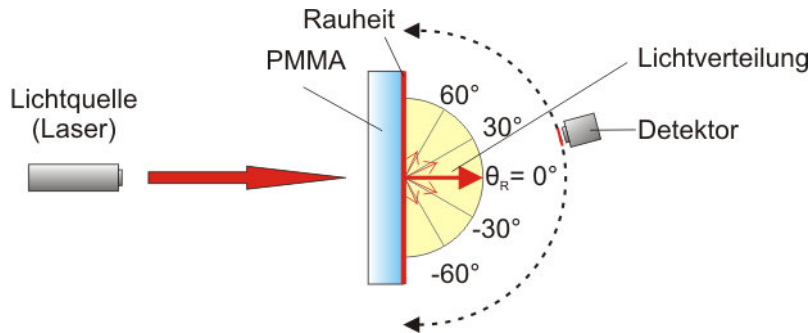


Bild 6.7: Messaufbau zur Bestimmung der Streuverteilung durch Oberflächenrauheit: Laserlicht wird bei der Transmission durch eine PMMA-Platte gestreut und von einem Detektor im Bereich $-90^\circ \leq \theta_R \leq 90^\circ$ erfasst.

Die erste Probenreihe umfasste das ganze Spektrum der möglichen Strahldrücke. Da die Sandstrahlanlage ein Strahlen bis etwa 8 bar ermöglicht, wurde von 1 bar bis 8 bar in Schritten von $0,5 \text{ bar}$ gemessen. Abgesehen von der ersten Streuverteilung glichen sich alle weiteren so stark, dass sie kaum unterscheidbar waren. Weitere Probenreihen lieferten das Ergebnis, dass sich nennenswerte Unterschiede in der Streuverteilung nur ergeben, wenn in einem schmalen Übergangsbereich gestrahlt wird, der bei dieser Anlage bei einem Strahldruck von $0,85 \text{ bar}$ bis $1,25 \text{ bar}$ liegt. Unterhalb von $0,85 \text{ bar}$ wird kein gleichmäßiger Strahl erzeugt und oberhalb von $1,25 \text{ bar}$ wird eine Art „Sättigungsbereich“ erreicht, in dem sich das Streuverhalten der Oberfläche unabhängig vom Strahldruck kaum unterscheidet.

Die Messungen der Streuverteilungen der Probenreihe aus dem Übergangsbereich ist in Bild 6.8 (a) abgebildet. Es ist zu beachten, dass die Einheit der Leistung in $[dBm]$ angegeben ist und somit eine logarithmische Skalierung vorliegt. Wie zu erwarten, befindet sich bei allen Proben das Leistungsmaximum bei $\theta_R = 0^\circ$. Eine unbehandelte Probe dient als Referenz und weist einen Maximalwert von knapp unter 3 dBm auf, was der Ausgangleistung des Lasers abzüglich der Reflexionsverluste an der PMMA-Oberfläche entspricht. Die Oberflächen der weiteren Proben wurden mit einem Luftdruck von $0,85 \text{ bar}$ bis 3 bar gestrahlt. Mit zunehmender Oberflächenrauheit wird der entsprechende Peak in der Mitte breiter und flacher – was ein erwartungsgemäßes Verhalten ist. Die stärkste Veränderung der Kurvenform ergibt sich zwischen $0,85 \text{ bar}$ und $1,25 \text{ bar}$. Die $1,25 \text{ bar}$ -Kurve unterscheidet sich nur wenig von der 3 bar -Kurve, bei der die maximale Aufrauung erreicht sein dürfte.

Diese Annahme wird durch die Messung der Oberflächenrauheit an den Proben gestützt (Bild 6.8 (b)). Bei einer geringen Zunahme des Strahldrucks steigt die Oberflächen-

rauheit rapide auf einen Wert von $R_a \sim 1000 \text{ nm}$ bei $1,1 \text{ bar}$ an, kann aber mit weiter zunehmendem Strahldruck nur wenig gesteigert werden.

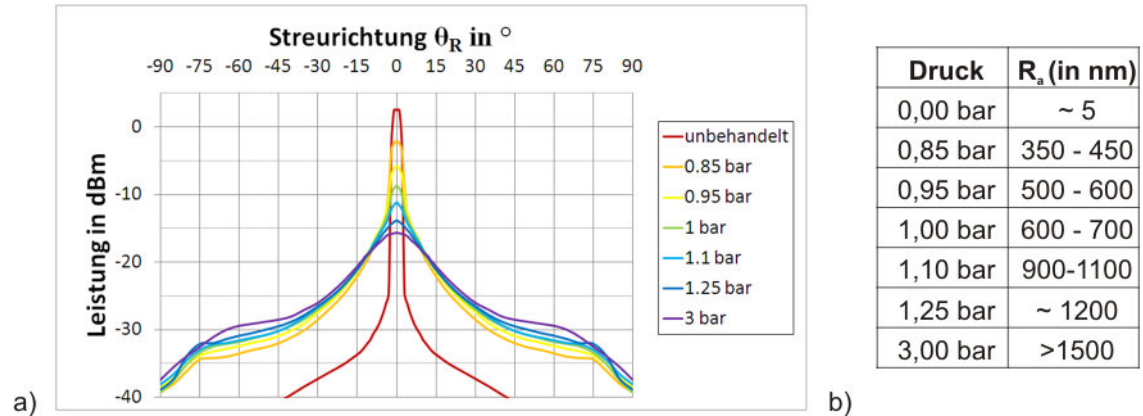


Bild 6.8: a) Streuverteilung des Lichts für unterschiedlich gestrahlte Oberflächen. b) Strahldruck beim Sandstrahlen und zugehörige Oberflächenrauheit R_a .

Insgesamt lässt sich also anhand des Strahldrucks die Form der Lichtstreuung erheblich beeinflussen. Da zwischen einer unbehandelten Oberfläche und einer Oberfläche „im gesättigten Bereich“ nur ein knapper Übergang vorhanden ist, reagiert der Prozess sehr sensibel auf Prozessvarianzen. Mit den gegebenen Einrichtungen war die Beherrschbarkeit des Prozesses sehr schwierig, aber möglich. Eine bessere Ausstattung, die eine präzisere Einstellung des Strahldrucks im genannten Bereich ermöglicht, wird die Beherrschbarkeit sicherlich deutlich verbessern.

6.2.2 Transfer der Streuverteilungen in ein Simulationsmodell

Um den Einfluss der Rauheit auf das System besser untersuchen zu können, müssen die oben ermittelten Verteilungsfunktionen in ein Simulationsmodell übertragen werden.

ZEMAX erlaubt neben der im Kapitel 4 vorgestellten Berechnung eines Strahlwegs auf Basis der Fresnelschen Formeln, auch die Definition von Oberflächeneigenschaften. So kann einer bestimmten Oberfläche eine Verteilungsfunktion zugewiesen werden, gemäß derer ein Strahl sich bei der Transmission verteilt. Wird für eine Oberfläche zum Beispiel eine Normalverteilung für die Transmission definiert, so wird die Energie eines Strahls beim Durchtritt durch die Grenzfläche auf eine definierte Anzahl neuer Strahlen (beispielsweise 50) verteilt. Die Richtung und Energie dieser Strahlen wird anhand der Normalverteilung bestimmt.

Neben der Normalverteilung können weitere Verteilungsfunktionen definiert werden, die sich für optische Anwendungen besser eignen, so z. B. die Lambertverteilung (für diffuse Oberflächen), die ABg-Verteilung (für eher glatte Oberflächen) oder frei definierte Verteilungen.

Bei der Messung der Streuverteilungen wurde beobachtet, dass sich die interessantesten Effekte im Bereich geringer bis mittlerer Rauheit ergeben. Daher wurden die Messergebnisse mit der ABg-Verteilung angenähert. Diese basiert auf einer Verteilung nach Harvey-Shack und folgt der Formel:

$$BSDF = \frac{A}{B + |\underline{x}|^g} \quad 6.1$$

BSDF steht für *Bi-Directional Scatter Distribution Function*. Die Faktoren *A*, *B* und *g* definieren die Form der Verteilung und repräsentieren damit die Oberflächencharakteristik. Der Vektor \underline{x} beschreibt vereinfacht ausgedrückt, wie stark sich der gestreute Strahl vom nicht gestreuten Strahl unterscheidet⁴. Große Werte von \underline{x} bedeuten, dass sich die Richtung des gestreuten Vektors stark von seiner normalen, nichtgestreuten Richtung unterscheidet. Die BSDF ergibt dann einen entsprechend niedrigen Wert, wodurch derartige Strahlen seltener in der Simulation generiert werden. Damit spiegelt sich die in dieser Raumrichtung niedrigere Intensität wider. Analog verhält es sich für kleine Werte von \underline{x} (der gestreute Strahl ähnelt dem nichtgestreuten), bei denen die BSDF große Werte annimmt.

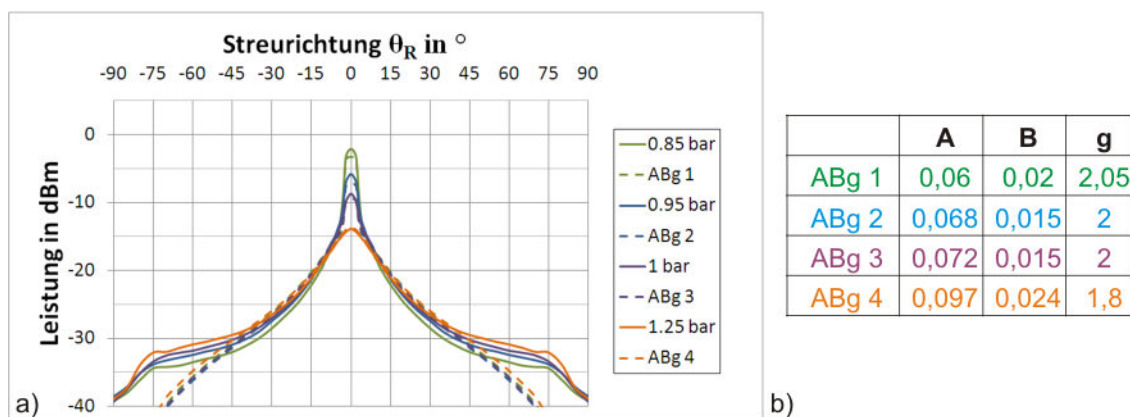


Bild 6.9: a) Gemessene und mit dem ABg-Modell angenäherte Streuverteilungen. b) Koeffizienten der ABg-Verteilungen.

Bild 6.9 zeigt die gemessenen Streuverteilungen und einige Verteilungen, die sich aus Annäherungen mit der Simulation ergeben. Die Kurven stimmen im Bereich von $-45^\circ \leq \theta_R \leq 45^\circ$ sehr gut überein, wodurch insgesamt mehr als 95 % der simulierten Strahlungsleistung mit der gemessenen korrespondieren. Außerhalb dieser Grenzen

⁴ Mathematisch wird der Betrag des Abstands zwischen den Projektionen des Streuvektors und des ungestreuten Vektors auf die Oberfläche gebildet, sodass \underline{x} Werte von 0 bis 2 annehmen kann.

laufen die Kurven etwas auseinander, da die reelle Verteilung dort einen Roll-Off aufweist⁵.

Für diese Arbeit kann aber angenommen werden, dass mit der ABg-Verteilung die gemessenen Streuverteilungen hinreichend genug wiedergegeben werden, um auf ihrer Basis verlässliche Simulationsergebnisse zu erzeugen – zumal die (geringe) Beherrschbarkeit des Sandstrahlprozesses deutlich größere Unwägbarkeiten verursacht, als es durch das Verteilungsmodell geschieht. Somit kann also der selektive Einsatz von Oberflächenrauheit und die dadurch verursachte Streuung mit *ZEMAX* untersucht werden.

6.2.3 Einfluss der Rauheit auf die Lichtlenkcharakteristik

Es wurde gezeigt, welche Streuverteilungen sich durch das Sandstrahlen ergeben und wie sie in ein Simulationsmodell integriert werden. Die resultierenden Ergebnisse können auf das Lichtlenksystem übertragen werden, um die Auswirkungen von Rauheit anhand von Simulationen zu untersuchen. Dabei wird sich auf ein System mit modifizierter Strukturgeometrie konzentriert.

Die Rauheit soll nur selektiv appliziert werden, damit die Bodenflächen der Strukturen nicht beeinträchtigt werden. Weiterhin soll nur eine Plattenseite bearbeitet werden, um den Prozessaufwand gering zu halten. Da die Linsenseite den Winkel des Lichteinfalls gezielt aufweitet, würde das Aufrauen diese Funktion negativ beeinflussen. Aus diesen Gründen wird also nur die angewinkelte Fläche der Sägezahnseite modifiziert, welche in Bild 6.10 rot markiert ist.

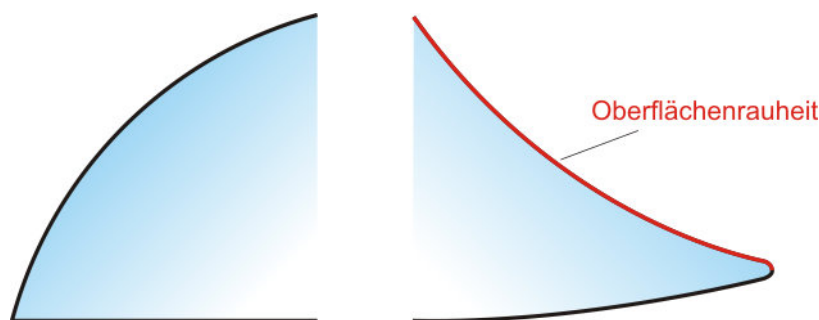


Bild 6.10: Die rot markierte Fläche wird mit einer Oberflächenrauheit versehen.

Der markierten Fläche wurden verschiedene ABg-Verteilungsfunktionen zugewiesen. Es zeigte sich, dass eine nennenswerte Verbesserung der Lichtverteilung sich immer dann ergibt, wenn die Streuverteilung einen hohen Peak aufweist. Dies ist bei niedriger Oberflächenrauheit der Fall und wird zum Beispiel durch die Verteilung „ABg 1“ (siehe Bild 6.9) angenähert, die vergleichbar mit der gemessenen Streuverteilung mit einer

⁵ Die sogenannte K-Korrelation (eine weitere Streutheorie) erweitert die ABg-Verteilung um genau diesen Roll-Off-Effekt. Sie wird allerdings nicht von *ZEMAX* unterstützt.

Rauheit von 400 nm bis 500 nm ist. Bei dieser Verteilung wird der Strahl nicht vollständig gestreut, sondern nur zu rund 80% ⁶.

Die Auswirkung der streuenden Oberfläche wird an den bekannten Transmissions- und Lichtverteilungsdiagrammen deutlich. Das Transmissionsdiagramm aus Bild 6.11 zeigt das Verhalten des überarbeiteten PMMA-Systems mit und ohne Rauheit – die durch die Rauheit entstandenen Unterschiede werden farbig hervorgehoben.

Es zeigt sich, dass durch die Rauheit in der Summe mehr Licht in den Raum transmittiert wird, insbesondere für Einfallswinkel von $\theta_i \geq 40^\circ$ steigt der Anteil des nach oben umgelenkten Lichts um bis zu 20% , während die blendenden Lichtanteile sich nur moderat erhöhen. Mit Oberflächenrauheit werden im Mittel rund 75% des zwischen $\theta_i = 15^\circ$ und $\theta_i = 65^\circ$ einfallenden Lichts nach oben umgelenkt, was im Vergleich zum gleichen System ohne Rauheit (65%) und auch zum Basissystem (69%) eine merkliche Steigerung darstellt.

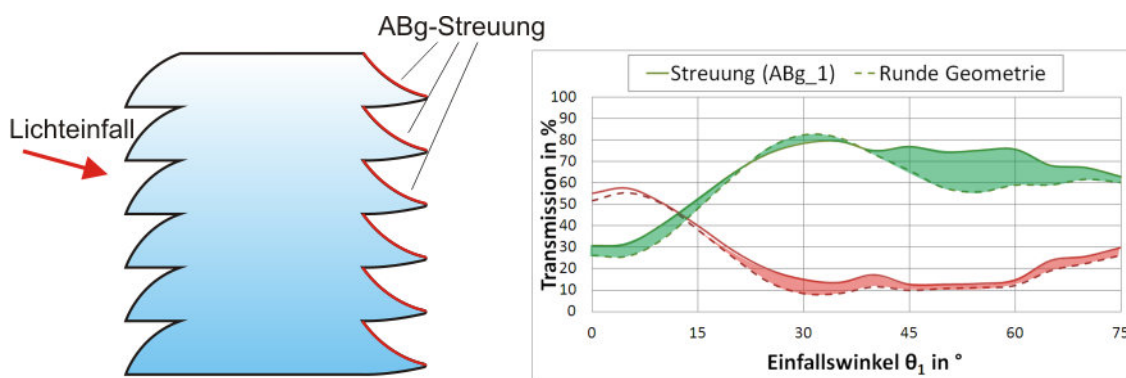


Bild 6.11: Transmissionsdiagramm eines Systems ohne (gestrichelte Kurve) und mit Oberflächenstreuung (durchgezogene Kurve; Streuerverteilung: ABg 1).

Es ist nicht offensichtlich, warum die Oberflächenrauheit eine deutliche Steigerung der Gesamttransmission bewirkt. Die Analyse der Systeme ohne Rauheit zeigte, dass der ursprüngliche Grund für den Leistungsabfall bei Lichteinfällen zwischen $40^\circ \leq \theta_i \leq 65^\circ$ eine große Anzahl von Strahlen ist, die am Sägezahn nicht auskoppeln, sondern in den darüber liegenden Sägezahn wieder eintreten und dann nach außen zurückgelenkt werden, wie es in Bild 6.12 (a) skizziert ist. Durch die Oberflächenrauheit werden diese Strahlen an der Oberfläche gestreut, sodass der rückreflektierte Anteil sinkt und die Gesamttransmission steigt (b).

⁶ Dieser Wert entspricht dem sogenannten *TIS – total integrated scattering*.

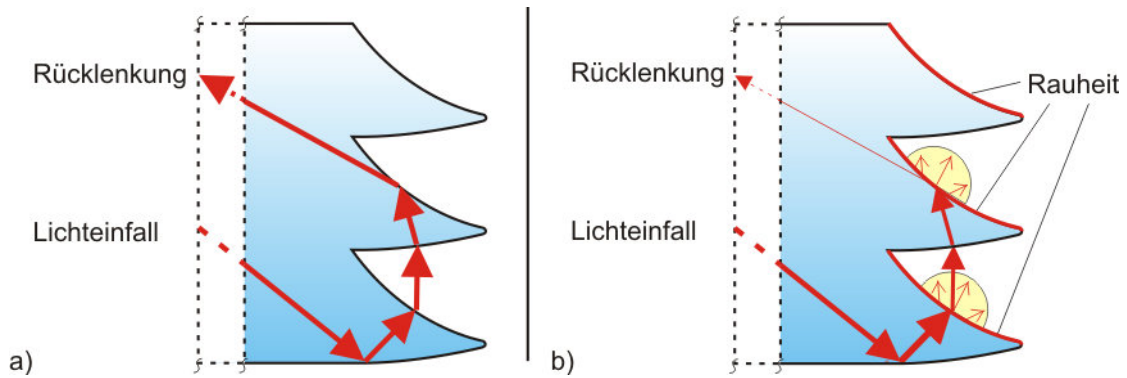


Bild 6.12: a) Bei hohen Einfallswinkeln werden Strahlen zurück nach außen reflektiert. b) Durch die Oberflächenrauheit wird dieser Anteil verringert.

In Bild 6.13 sind die simulierten Lichtverteilungskurven für das überarbeitete System (blau), das gleiche System mit ABg-Rauheit (grün) und für das Basissystem (rot) zu sehen. Alle Systeme bestehen aus PMMA. Es zeigt sich, dass durch die Oberflächenrauheit die einzelnen Peaks erheblich geglättet und aufgeweitet werden. Das Licht wird insgesamt sehr tief in den Raum gelenkt. Für $\theta_1 = 30^\circ$, 45° und 60° liegt der maximale Transmissionswert in eine Raumrichtung bei knapp über 10 % und damit tiefer als bei den Vergleichssystemen – das Basissystem kommt auf Werte von über 20 % und das überarbeitete System auf rund 15 %. Durch die Rauheit werden also Zonen mit besonders hoher Helligkeit reduziert. In der Anwendung würden mehrere Lichtstreifen zu einem einzelnen zusammengefasst werden, dessen Intensität sanft in der Raumtiefe abnimmt.

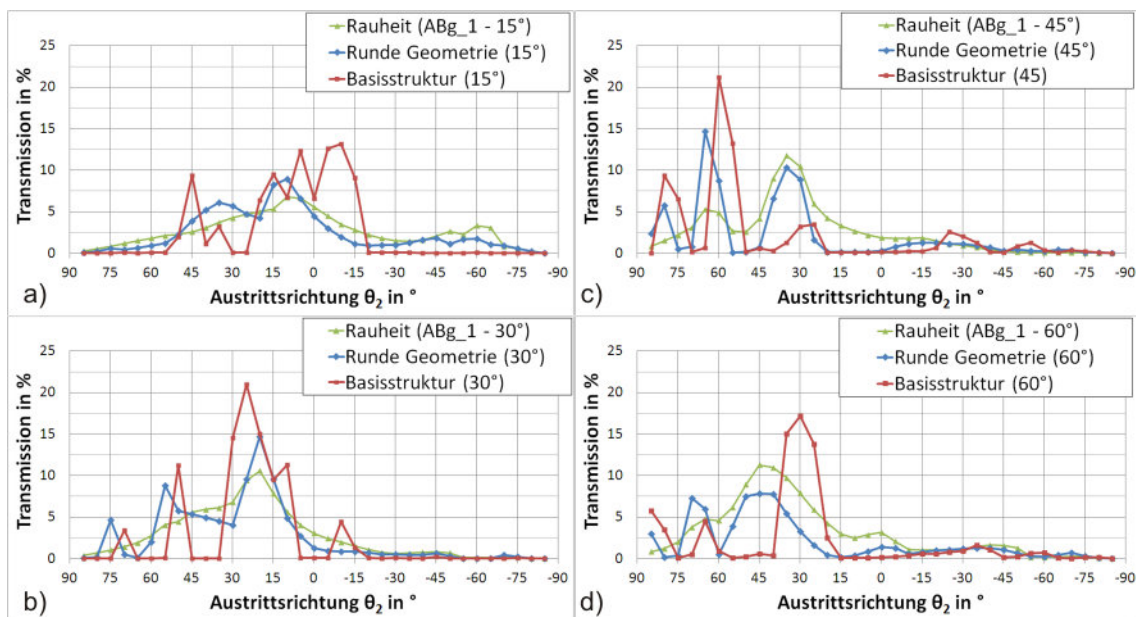


Bild 6.13: Simulierte Lichtverteilungskurven für die Einfallswinkel $\theta_1 = 15^\circ$, 30° , 45° , 60° (a-d) für ein PMMA-System mit Rauheit (grün), ohne Rauheit (blau) und für das Basissystem (rot).

Neben diesen positiven Aspekten zeigt sich aber auch, dass durch die Lichtstreuung der Anteil des Lichts der unterhalb der Horizontalen ($\theta_2 < 0^\circ$) in den Raum eintritt, zunimmt. Dieses Licht könnte in Abhängigkeit seiner Intensität zu einer Blendung führen. Hier bleibt zu überprüfen, ob beim Einbau des Systems in eine Verglasung die Gesamttransmission zusätzlich reduziert werden muss, damit das nach unten fallende Licht nicht blendet. Die genaue Bemessungsgrundlage dafür kann aber nur eine fertige Verglasung sein. Die restlichen Lichtlenkcharakteristika sind nahe am Optimum und bieten genügend Effizienz, um selbst mit einer Abschattung durch die Verglasung effizient zu funktionieren.

6.2.4 Selektivität der Oberflächenrauheit

Eine Anforderung, die den Sandstrahlprozess problematisch macht, ist die Selektivität der Oberflächenrauheit. In den Simulationen wurde bislang einfach davon ausgegangen, dass die Rauheit nur auf der angewinkelten Fläche vorliegt. Es bleibt also zu klären, ob und wie nur diese Fläche aufgeraut werden kann.

In dieser Arbeit wurde versucht, durch „geschicktes“ Strahlen von schräg oben nur die angewinkelte Fläche zu bearbeiten und dabei die Kontur der Oberfläche so zu nutzen, dass die Bodenfläche von der angewinkelten Fläche abgeschattet und somit geschützt wird, wie es in Bild 6.14 (a) gezeigt wird.

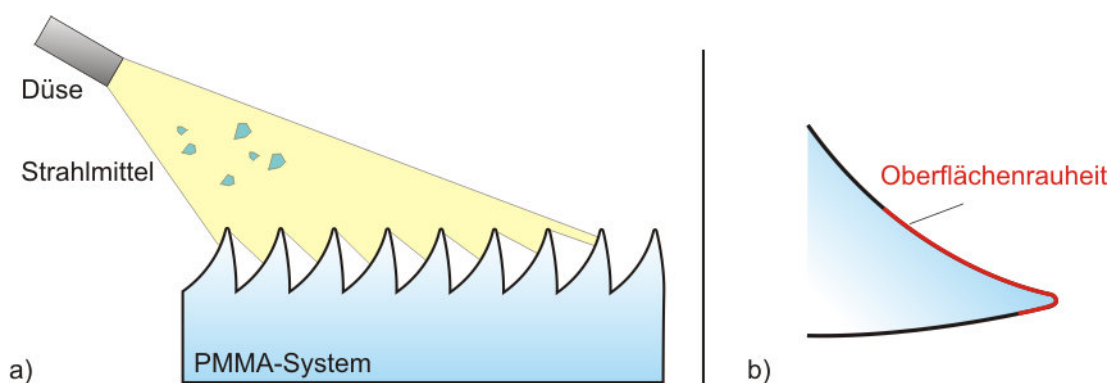


Bild 6.14: a) Selektives Sandstrahlen: die angewinkelte Fläche schattet die Bodenfläche beim Strahlen ab. b) Der obere Bereich der Zielfläche wird nicht angeraut.

Mit dieser Technik wird die Bodenfläche, bis auf die Spitze, gut vor dem Strahlmittel geschützt (siehe (b)). Der Skizze ist allerdings auch zu entnehmen, dass die Zielfläche nicht – wie gewünscht – vollständig angeraut wird, sondern der obere Teil der Strukturoberfläche unbearbeitet bleibt.

Dieser Anteil ließe sich verringern, indem das System aus einem zunehmend senkrechten Winkel bestrahlt werden würde. Allerdings würde dann auch verstärkt die Bodenfläche angeraut werden, insbesondere dadurch, dass das Strahlmittel erst auf die

angewinkelte Fläche trüfe, von dort auf die Bodenfläche reflektiert werden und diese dann anrauen würde. An dieser Stelle muss also ein geeigneter Kompromiss gewählt werden.

Ein Foto der selektiv angerauten Oberfläche ist in Bild 6.15 zu sehen. Das abgebildete Lichtlenksystem erscheint so dunkel, weil es mit Silber beschichtet wurde. Die Silberschicht wurde durch das Sandstrahlen partiell entfernt, wodurch ein guter Kontrast zwischen rauer Oberfläche und den unbearbeiteten Flächen entsteht.

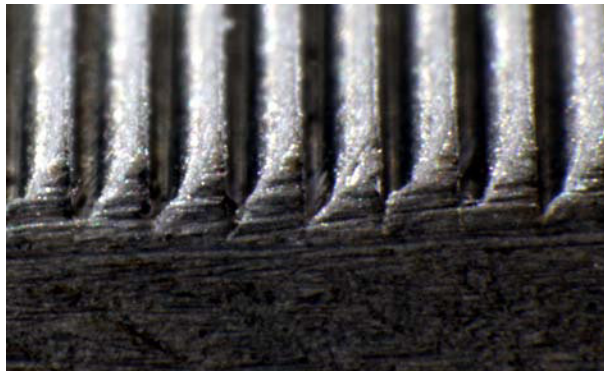


Bild 6.15: Durch Sandstrahlen angeraute Sägezähne. Die gestrahlten Flächen haben einen guten Kontrast zur übrigen Oberfläche, da das System zuvor mit Silber beschichtet wurde.

Es kann also zusammengefasst werden, dass mit „geschicktem“ Sandstrahlen eine bestimmte Fläche selektiv angeraut werden kann. Dies geschieht jedoch nicht so präzise wie es in der Simulation definiert werden kann. Da mit den durchgeführten Untersuchungen jedoch erst einmal nur die grundsätzliche Machbarkeit überprüft werden sollte, wurde bislang keine ausführliche Prozessoptimierung des Strahlvorgangs durchgeführt. Damit existiert hier ein deutliches Verbesserungspotenzial, welches ausgeschöpft werden kann.

Eine Alternative zum Sandstrahlen ist die Laser-Oberflächenbearbeitung, mit der die Aufrauung noch besser kontrolliert werden könnte. Die Laserbearbeitung ist allerdings wirtschaftlich nur sinnvoll, wenn das Formwerkzeug und nicht die Kunststoffelemente bearbeitet werden, da sonst Aufwand und Kosten zu hoch wären. Die Laser-Oberflächenbehandlung wurde in dieser Arbeit nicht erprobt, da die Formwerkzeuge vor einer versehentlichen Beschädigung geschützt werden sollten. Hier sind also zunächst einige Voruntersuchungen notwendig.

6.3 Beleuchtung durch LED-Seiteneinkopplung

Zu Zeiten, an denen es von direktem Sonnenlicht beleuchtet wird, ist die eigentliche Funktionalität des mikrostrukturierten Tageslichtsystems, dass es Licht unauffällig an die Raumdecke lenkt. Zu allen anderen Zeiten reduziert sich seine Funktionalität auf die Unauffälligkeit.

Um diesem Umstand zu begegnen, wurde die Möglichkeit untersucht, das System bei Dunkelheit als Kunstlichtquelle einzusetzen. Die Beleuchtung sollte mit LED-Leisten erfolgen, die so in den Fensterrahmen integriert werden, dass ihr Licht in die Stirnflächen der mikrostrukturierten Scheibe einkoppelt, was beispielsweise mit einer einfachen Stoßkopplung gelingt. Das Licht verteilt sich in der PMMA-Platte, die als Lichtleiter dient, und wird an den Mikrostrukturen ausgekoppelt. Das Lichtlenksystem ist somit eine Art Flächenleuchte.

Wird das Licht, wie in Bild 6.16 gezeigt, von unten in die Scheibe eingekoppelt, so ist die Hauptabstrahlrichtung schräg oben (gelbe Pfeile) – entsprechend verlässt von oben eingekoppeltes Licht die Scheibe nach schräg unten (rote Pfeile). Aufgrund der doppel-seitigen Strukturierung wird das eingespeiste Licht in ungefähr gleichem Maße nach innen und außen abgestrahlt. An den vertikalen Seiten eingekoppeltes Licht verbleibt aufgrund von Totalreflexion größtenteils in der Platte und wird hauptsächlich durch Unebenheiten und Rauheit abgestrahlt.

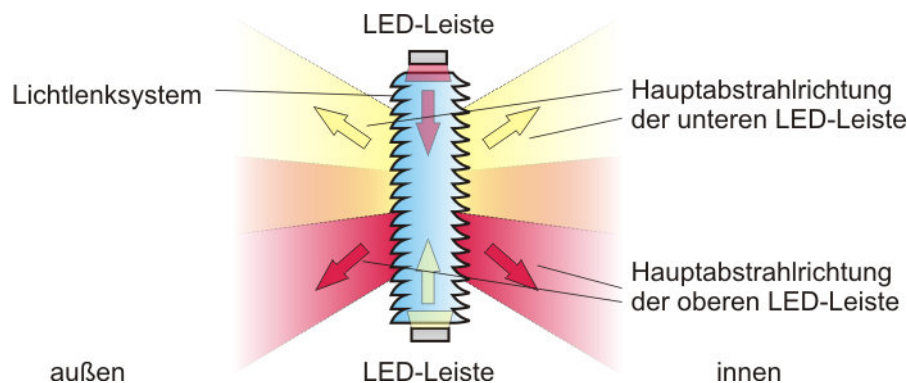


Bild 6.16: Nutzung der mikrostrukturierten PMMA-Platte als Flächenleuchte. Das Licht von LED-Streifen wird über die Stirnflächen in das System eingekoppelt und an den Mikrostrukturen ausgekoppelt.

Um einen Arbeitsplatz ausreichend zu beleuchten, sollte in Höhe der Arbeitsfläche eine Beleuchtungsstärke von wenigstens 200 lx erreicht werden [DIN03]. Mit der skizzierten Flächenleuchtenkonfiguration kann der Arbeitsplatz nur indirekt beleuchtet werden, da von oben eingespeistes Direktlicht (rote Pfeile) entweder sehr nah im Fensterbereich austritt oder aber zu Blendung führen kann, wenn es tiefer in den Raum gerichtet ist. Somit bleibt also nur die indirekte Beleuchtung durch einen unten angebrachten LED-Streifen (gelbe Pfeile), dessen Licht, wie das gelenkte Tageslicht, an der Raumdecke

gestreut wird und den Raum beleuchtet. Aufgrund der doppelseitigen Strukturierung wird gut die Hälfte des Lichts nach außen gerichtet, wodurch die angebrachte LED-Leiste erheblich überdimensioniert werden müsste, um die bauartbedingten Verluste auszugleichen und die nötige Beleuchtungsstärke herzustellen. Somit lässt sich also mit dieser Konfiguration nur eine Kunstlichtbeleuchtung realisieren, die für ein System, welches insgesamt energiesparend wirken soll, nicht effizient genug ist.

Steht allerdings nicht die Raumausleuchtung im Fokus, sondern einzig die Sichtbarkeit des Systems bei Dunkelheit, so ist nur ein deutlich niedrigerer Lichtstrom erforderlich, der mit einfachen LED-Streifen erzeugt werden kann. Ein Standardstreifen mit roten LEDs benötigt beispielsweise eine Leistung von nur $2,4\text{ W}$ je Meter, bei einer LED-Dichte von 30 LEDs je Meter. Selbst bei einer höheren LED-Dichte oder bei der Nutzung von mehrfarbigen RGB-LEDs ist ein insgesamt niedriger Energieverbrauch zu erwarten, der für das gewünschte Beleuchtungsergebnis vertretbar wäre.

Bild 6.17 zeigt exemplarisch zwei Systeme, an denen LED-Streifen angekoppelt wurden. In (a) wird das Licht zweier roter LED-Streifen von oben und unten in die Platte eingekoppelt, während in (b) die Lichtlenkvorrichtung von einem umlaufenden RGB-Streifen beleuchtet wird, was hier aus Gründen der einfacheren Kontaktierung vorgenommen wurde. Mit der RGB-Lösung kann die Farbe des Systems vom Nutzer frei gewählt werden – im Beispiel ist sie goldfarbig. Ebenso ist eine komplexe Lichtsteuerung mit programmierbaren Farbwechseln möglich.

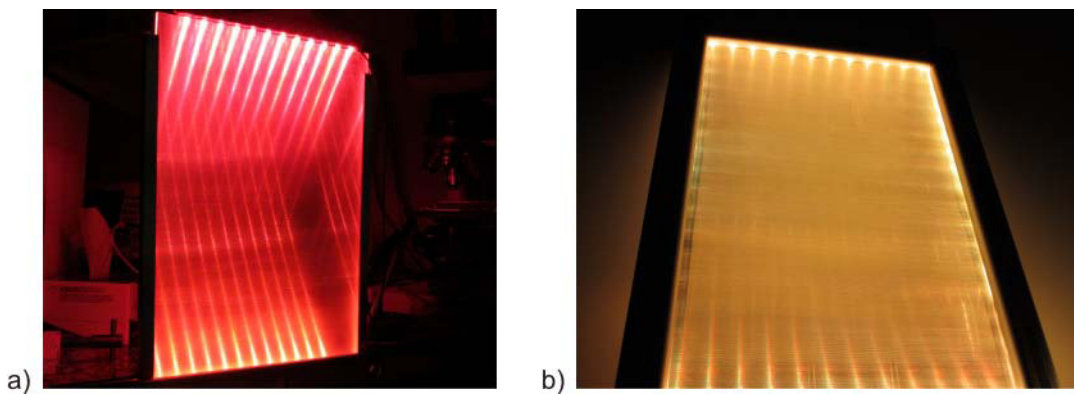


Bild 6.17: a) Einkopplung roter LEDs von unten und oben. b) Goldfarbiges Licht eines Streifens von RGB-LEDs.

In beiden Beispielen wurden keine besonderen Vorkehrungen zur Optimierung der Kopplung getroffen, weshalb die einzelnen LEDs in der Flächenleuchte auch als Lichtquellen identifizierbar sind. Anstatt das LED-Licht an einer polierten Stirnfläche

einzukoppeln, kann diese auch mit einem Mikrolinsen-Klebestreifen versehen werden, der die Lichtverteilung optimiert⁷.

Derartige Flächenleuchten können dazu genutzt werden, Gebäuden bei Dunkelheit interessante Beleuchtungsakzente zu verleihen. Bei einem Einsatz des Lichtlenksystems im gesamten Gebäude könnte jedes Geschoss mit einem umlaufenden farbigen Ring separiert werden, was zusammen mit der Möglichkeit Farbwechsel zu implementieren ein interessantes Werkzeug für den Lichtplaner sein sollte. Die Lichttechnik ist voll in die Verglasung integriert und bietet die ganze Funktionalität der Tageslichtlenkung, wodurch sich die Nutzbarkeit der Verglasung erweitert.

Die Fertigung eines beleuchteten Systems ist verständlicher Weise aufwändiger als ein System ohne Beleuchtung. Allerdings sind bereits Lösungen von Funktionsgläsern mit integrierten LED-Leisten bekannt [Oka12], sodass die grundsätzliche Machbarkeit bereits bewiesen wurde. Diese Verglasungen verfügen allerdings nicht über die volle Funktionalität der Tageslichtlenkung. Die oben beschriebene Kombination aus mikrostrukturiertem Lichtlenksystem und LED-Kopplung ist bislang einzigartig.

⁷ Produktbeispiel: „3M™ Uniformity Tape“.

Fazit

Eine teilweise streifige Lichtverteilung und steil umgelenktes Licht sind zwei Kritikpunkte am Basissystem, die Anlass zur Suche nach optionalen Modifikationsmöglichkeiten waren.

Als erste Option wurde eine Überarbeitung der Geometrie untersucht. Hier zeigte sich, dass mit einer Verrundung des Sägezahns das Licht tiefer in den Raum gelenkt und der Anteil einzelner Lichtstreifen reduziert wird.

Gänzlich beseitigt wurden einzelne Lichtstreifen dadurch, dass als zweite Option die angewinkelte Fläche des Sägezahns mit einer leichten Rauheit versehen wurde. Ein Nebeneffekt des Aufrauens war, dass sich gleichzeitig die Gesamttransmission des Systems im Mittel um 10 % erhöhte. Hier bleibt zu überprüfen, ob zusätzliche Vorkehrungen an der Verglasung getroffen werden müssen, um eine zu große Helligkeit zu reduzieren.

Als problematisch wurde die Beherrschbarkeit des Sandstrahlprozesses identifiziert, da die Einstellung der gewünschten Rauheit äußerst sensibel auf den Strahldruck reagiert und sich dadurch merkliche Veränderungen an der Streuverteilung ergeben.

Eine weitere interessante Option ist die Verwendung des Systems als Flächenleuchte mit energiesparender LED-Technik. So kann ein Lichtplaner mit demselben System nicht nur die umfangreichen Vorteile der Tageslichtlenkung nutzen, sondern auch einem Gebäude bei Dunkelheit eine besondere Charakteristik verleihen.

Insgesamt kann die überarbeitete Geometrieoption uneingeschränkt empfohlen werden. Die Rauheitsmodifikation kann bei explizitem Wunsch nach einem feineren, streifenlosen Lichtbild verwendet werden, sollte zuvor aber noch genauer erprobt werden. Die Anwendung als Flächenleuchte kann mehr als nur ein Gimmick sein. Die Vorteile eines Tageslichtsystems können zwar mit vielen überzeugenden Zahlen belegt werden, die Entscheidung für den Einsatz ist oft aber auch eine emotionale Angelegenheit. Hier könnte sich eine „schicke farbige Beleuchtung“ als gutes Instrument für die Vermarktung erweisen.

7 Vergleich: Mikrostrukturiertes System - Lumitop

In den vorhergehenden Kapiteln wurde das mikrostrukturierte Lichtlenksystem losgelöst von konkurrierenden Systemen untersucht und bewertet. Es wurden zwar vielfältige Faktoren berücksichtigt und beurteilt, allerdings ohne jeweils eine genaue Referenz heranzuziehen. Dies geschah vor allem, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten und um die relevanten Erkenntnisse nicht in einer Ergebnisflut versinken zu lassen.

In diesem Kapitel sollen daher die bisherigen Ergebnisse in Bezug zu einem Konkurrenzsystem gesetzt werden. Dazu werden die Vor- und Nachteile des mikrostrukturierten Systems im Vergleich zum etablierten Lumitop-System¹ betrachtet, wobei sich die Wiederholung einiger Ergebnisse des mikrostrukturierten Systems nicht vermeiden lässt. Jedoch ist dieser Vergleich von besonderem Interesse, weil er Schlüsse auf die Chancen eines Markterfolgs des mikrostrukturierten Systems ermöglicht.

Es werden zunächst die *Unterschiede in der Bauform* beschrieben (Kap. 7.1). Anschließend erfolgt der *Vergleich der lichttechnischen Eigenschaften* (Kap. 7.2).

¹Das Lumitop-System wird als Referenz herangezogen, weil es als einziges Lichtlenksystem Eigenschaften aufweist, die die Anforderungen des Beleuchtungskonzepts erfüllen (siehe Stand der Technik).

7.1 Vergleich der Bauformen

Das mikrostrukturierte System soll hinsichtlich seiner Lichtlenkcharakteristik die Eigenschaften des Lumitop-Systems erreichen oder sogar übertreffen. Dies soll aber mit Hilfe eines einfacheren Systemaufbaus gelingen, sodass der eigentliche Unterschied zwischen den Systemen die Bauform ist.

In Bild 7.1 sind die Querschnitte beider Systeme dargestellt. Das lichtlenkende Element des mikrostrukturierten Systems (b) ist mit etwa 4 mm erheblich schlanker als das mehr als 11 mm dicke Element des Lumitop-Systems (a). Der Größenunterschied bedeutet ebenfalls einen Gewichtsunterschied, der – ausgehend von PMMA als Grundmaterial – bei mehr als 7 kg je Quadratmeter liegt. Das lichtlenkende Element des Lumitop-Systems wiegt rund $12,2\text{ kg}$ je Quadratmeter und das mikrostrukturierte System rund $4,8\text{ kg} / \text{m}^2$, was einer Reduktion von 60% entspricht. Bei der Nutzung einer 5 mm -PMMA-Platte läge die Ersparnis noch bei 50% .

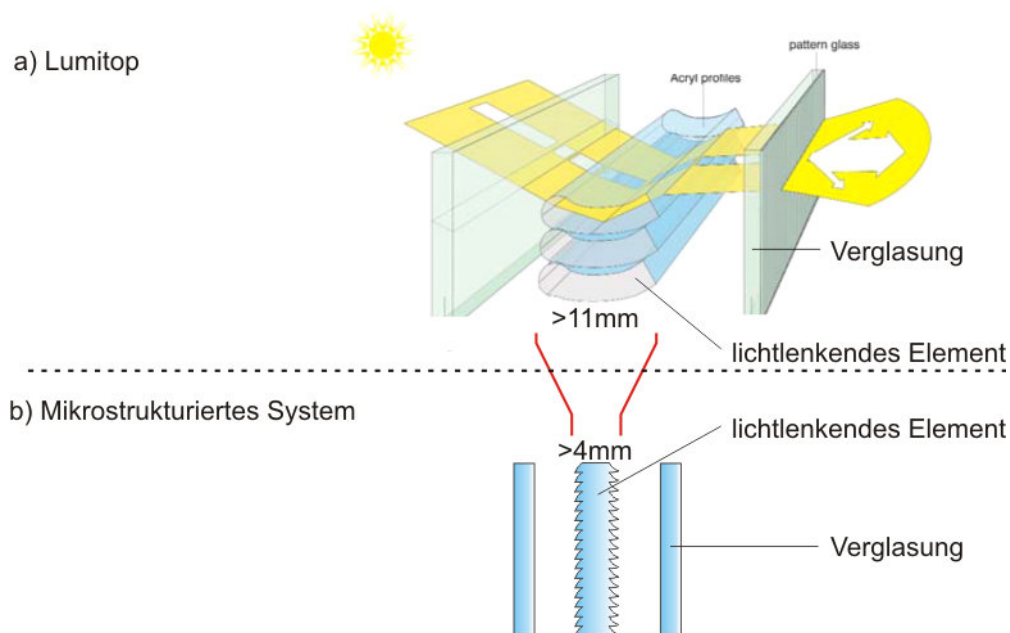


Bild 7.1: Vergleich der Bauform: Das optisch aktive Element von Lumitop ist 11 mm dick (a) (Bild erstellt in Anlehnung an [SGG06]). Die mikrostrukturierte Platte ist rund 4 mm dick (b).

Bild 7.2 zeigt Fotografien der lichtlenkenden Elemente durch die die bauartbedingten Unterschiede deutlich werden. Lumitop besteht nicht aus einer kontinuierlichen Scheibe, sondern aus einem Stapel von Stabprofilen (a). Diese Profile werden im Extrusionsverfahren hergestellt. Dabei wird das PMMA-Rohmaterial in Form von Pellets in einer sogenannten Schnecke aufgeschmolzen und durch eine formgebende Düse gepresst. Damit entsteht ein kontinuierlicher PMMA-Strang, der die gewünschte Kontur aufweist. Die Profile werden anschließend auf die benötigte Länge gekürzt und in der

abgebildeten Halterung (Bild 7.2 (b)) locker übereinander aufgestapelt, da eine feste Fixierung aus Gründen thermischer Ausdehnung nicht sinnvoll ist. Obwohl die Stabprofile eine Art Nut-Feder Profil aufweisen, welches das Stapeln und die Positionierung erleichtert, können Stöße während des Transports oder innere Spannungen dazu führen, dass die Stäbe verrutschen, wodurch sich die Optik des Systems verschlechtert. Es werden 27 übereinanderliegende Lumitop-Stabprofile je 10 cm Verglasungshöhe benötigt.

Im Gegensatz dazu werden beim Mikrosystem die Mikrostrukturen im Heißprägeverfahren in eine kontinuierliche, schmale Platte geprägt. Dadurch kann eine insgesamt schmalere Verglasung hergestellt werden, deren Zusammenbau zudem erheblich einfacher ist.

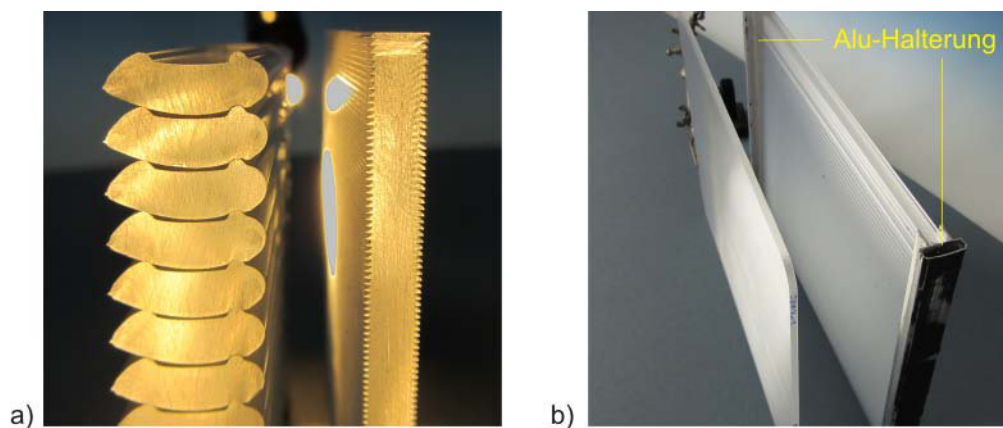


Bild 7.2: Fotografien des mikrostrukturierten und des Lumitop-Systems: a) Querschnittsfotos: Lumitop besteht aus einem Stapel Profile – das mikrostrukturierte System aus einer einzelnen Scheibe. b) Lumitop benötigt eine spezielle Aluhalterung, in der die einzelnen Stabprofile aufgestapelt werden. (Lumitop ist ein Produkt der Firma Saint-Gobain Glass. Das mikrostrukturierte System wurde hergestellt durch die Firma *Karl Jungbecker GmbH & Co. KG.*)

Vorteile des Mikrosystems bei der Bauform:

- schmalere Bauform,
- rund 60 % geringerer Materialbedarf,
- rund 60 % geringeres Gewicht,
- einfachere Herstellung und Montage,
- kein Verrutschen von Teilelementen möglich, da das Lichtlenkelement aus einer einzelnen Scheibe besteht.

Nachteile des Mikrosystems bei der Bauform:

- keine

7.2 Vergleich der lichtlenkenden Eigenschaften

Die aus den vorherigen Kapiteln bekannten, lichttechnischen Untersuchungen wurden ebenfalls an Lumitop durchgeführt. Die bereits vorgestellten Ergebnisse des mikrostrukturierten Systems werden denen von Lumitop gegenübergestellt.

7.2.1 Simulationen

Die Oberflächenuntersuchung der Lumitop-Stabprofile hat eine mittlere Rauheit von $R_a = 300 \text{ nm}$ bis 400 nm erwiesen. Diese entsteht im Rahmen des Extrusionsverfahren und ist nicht intendiert. Das dadurch erzeugte Streuverhalten der Profile hat einen starken Einfluss auf die Lichtlenkung, weshalb es bei der Simulation zwingend berücksichtigt werden muss. Dies wird wieder über die ABg-Verteilung implementiert (siehe auch Kapitel 6.2).

7.2.1.1 Transmissionsdiagramme

Im Transmissionsdiagramm (Bild 7.3) sind die Kurven für Lumitop (Querschnitt (a), durchgezogene Linie), für das Basissystem ((b), gestrichelt) und dem modifizierten System mit verrundeter Sägezahngeometrie ((c), gepunktet) dargestellt. Es zeigt sich, dass alle Systeme grundsätzlich über gute lichtlenkende Eigenschaften verfügen. Bei niedrigeren Lichteinfallswinkeln (für $\theta_1 \leq 20^\circ$) bietet Lumitop² eine etwas bessere Performance als die Mikrosysteme. Für mittlere Lichteinfälle ($30^\circ \leq \theta_1 \leq 45^\circ$) ist die Lichtlenkeigenschaft jedoch etwas schlechter und für sehr hohe Sonnenstände ($\theta_1 \geq 60^\circ$) sogar deutlich schlechter.

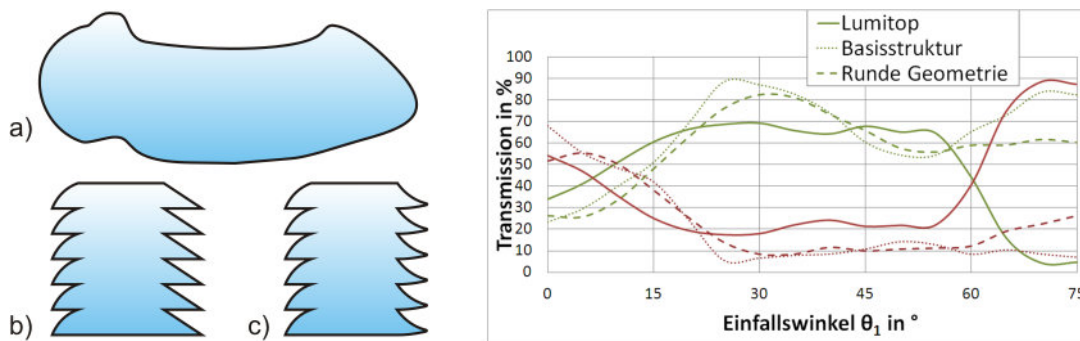


Bild 7.3: Querschnitte von Lumitop (a), dem Basissystem (b) und der verrundeten Geometrie (c). Zugehörige Transmissionsdiagramme zum Vergleich der lichtlenkenden Eigenschaften.

² Ein fiktives Lumitop-System ohne Oberflächenrauheit hätte für alle Einfallswinkel eine höhere Lichtlenkung nach oben und eine reduzierte Abstrahlung nach unten.

7.2.1.2 Lichtverteilungskurven

Die Lichtverteilungskurven (Bild 7.4) zeigen, dass das Lumitop-System eine Lichtverteilung mit einem einzelnen Peak aufweist, der insbesondere für $\theta_1 = 30^\circ$ (b) und $\theta_1 = 45^\circ$ (c) nach oben tief in den Raum gerichtet ist. Die Flanken des Peaks sind nicht steil, sondern laufen in beide Richtungen weich aus, wodurch ein sanfter Hell-Dunkel-Übergang an der Raumdecke entsteht. Die Mikrosysteme weisen diskretere Peaks auf.

Hauptgrund für die sanfte Lichtverteilung ist die Streuung innerhalb der Stabprofile aufgrund der Oberflächenrauheit. Ein weiterer Grund ist die linsenförmige Kontur der Profile. Die Flanken der Lichtverteilungspeaks reichen in den Bereich $\theta_2 < 0^\circ$ hinein, wodurch ein nicht zu vernachlässigender Lichtanteil unterhalb der Horizontalen in den Raum gelangt. Bei den mikrostrukturierten Systemen liegt dieser Wert etwas niedriger, was auch dem Transmissionsdiagramm entnommen werden kann.

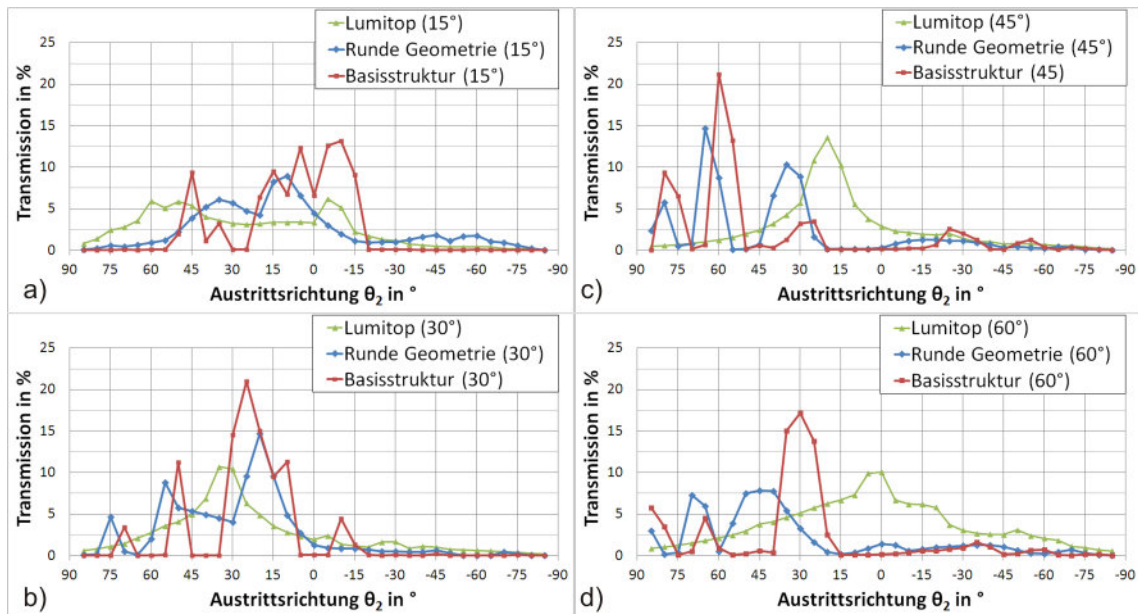


Bild 7.4: Simulierte Lichtverteilungskurven für die Einfallswinkel $\theta_1 = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ (a-d) für das Lumitop-System (grün), das modifizierte Mikrosystem ohne Rauheit (blau) und für das Basissystem (rot).

Die Simulationsergebnisse zeigen ein generell ähnliches lichttechnisches Verhalten. Aus quantitativer Sicht liegen die Vorteile bei den mikrostrukturierten Systemen, dafür ist die Lichtverteilung bei Lumitop etwas sanfter und ausgewogener.

7.2.2 Messungen

Das Lumitop-System wird bereits seit einigen Jahren vertrieben, ohne dass der Hersteller genaue Informationen über die Lichtlenkcharakteristik gibt oder offizielle Datensätze zur Verfügung stellt. Daher wurden eigene Messungen an zwei

Demonstratorsystemen vorgenommen. Damit die Analyse der lichtlenkenden Profile ohne störende Einflüsse der Verglasung möglich war, wurden sie zuvor demontiert.

Für die Messungen der Lumitop-Profile waren einige Änderungen am goniometrischen Aufbau notwendig: Es wurde eine weitere Strahloptik hinzugefügt, wodurch der Punkt-laser zu einer Linie mit einer Länge von 18 mm und einer Breite von 3 mm aufgeweitet wurde. Dies war erforderlich, da die Stabprofile deutlich größere Abmessungen als die Mikrostrukturen haben und die laterale Position der Probe ansonsten einen zu großen Einfluss auf das Messergebnis hätte. Testmessungen ergaben, dass mit dem Linienlaser dieser Einfluss minimiert werden konnte.

Die raue Oberfläche der Profile bewirkt eine merkliche Lichtstreuung, wodurch sich die zu messende Linie jenseits der Probe stark aufweitet und sie rasch breiter wird als vom Detektor erfasst werden kann. Daher wurde der Abstand zwischen Probe und Detektor entsprechend reduziert.

Zur Verifizierung des modifizierten Aufbaus wurden einige bereits untersuchte Proben erneut gemessen und die Ergebnisse miteinander verglichen. Dieser Abgleich ergab eine sehr gute Übereinstimmung, sodass eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse gegeben ist.

7.2.2.1 Transmissionsdiagramm

Das auf den Messwerten basierende Transmissionsdiagramm (siehe Bild 7.5) offenbarte überraschende Kurvenverläufe für beide Lumitop-Systeme, deren Lichtlenkperformance insgesamt deutlich schwächer ist als erwartet.

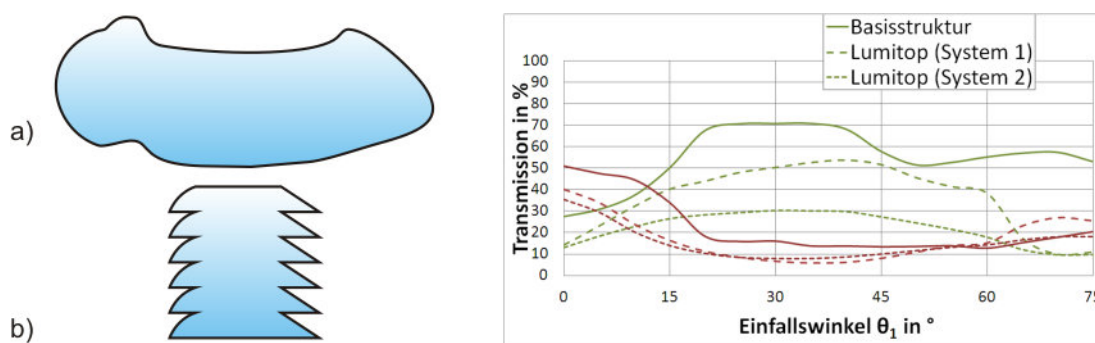


Bild 7.5: Gemessene Transmissionsdiagramme für zwei Lumitop-Systeme (a) und dem PMMA-Basisstruktur ((b), Mittelwert der Messungen).

Es wird zwar für einen breiten Bereich an Lichteinfällen θ_1 mehr Licht nach oben umgelenkt als nach unten fällt, jedoch ist die Gesamttransmission niedrig. Zudem unterscheiden sich die Kurven beider Lumitop-Proben voneinander erheblich, was

daran liegen könnte, dass sie vermutlich verschiedenen Produktionschargen entstammen³.

Der Mittelwert des nach oben umgelenkten Lichts für die Lichteinfälle von $\theta_1 = 15^\circ$ bis $\theta_1 = 65^\circ$ beträgt für Lumitop System 1 rund 43 % und für System 2 rund 26 %. Da diese Werte erheblich unter dem Mittelwert der mikrostrukturierten PMMA-Systeme liegen (rund 61 %), wurden die Messungen mehrfach an verschiedenen Probenpositionen wiederholt, um Fehler auszuschließen. Diese führten jedoch zum gleichen Ergebnis.

7.2.2.2 Lichtverteilungskurven

Anders als der Kurvenverlauf im Transmissionsdiagramm haben die Lichtverteilungen des Lumitop-Systems größere Ähnlichkeit mit den simulierten und erwarteten Verteilungen. Die hier abgebildeten Messwerte zeigen nur die Ergebnisse von System 1, welches das bessere der beiden Lumitop-Systeme ist.

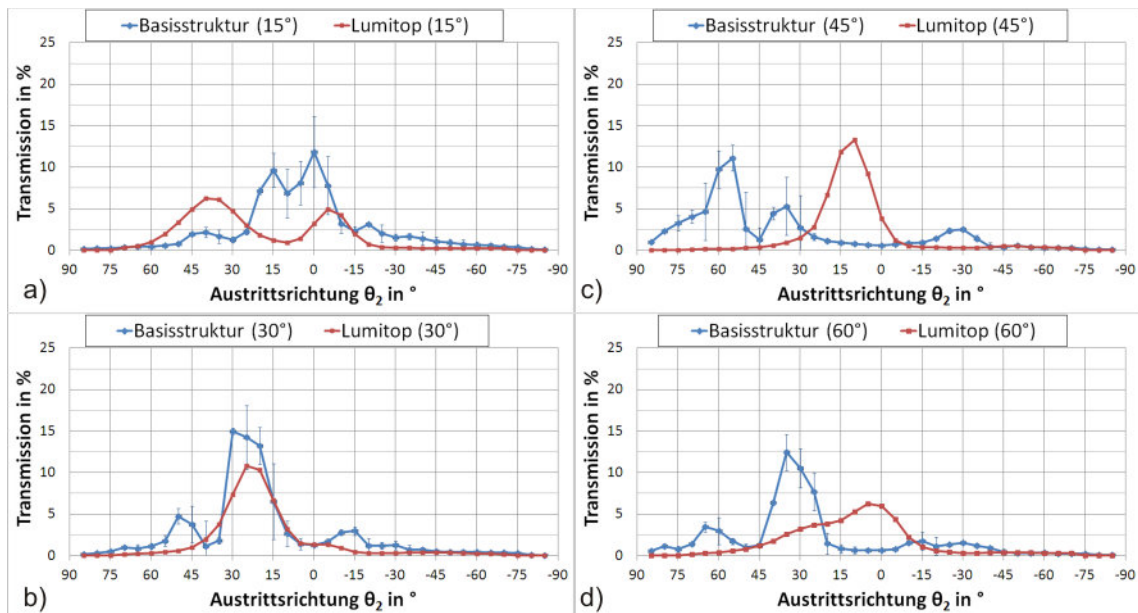


Bild 7.6: Gemessene Lichtverteilungskurven für die Einfallswinkel $\theta_1 = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ (a-d) für das Lumitop-System 1 (rot) und für das Basissystem (blau).

Die Positionen der Peaks der vier Verteilungen von Bild 7.4 (oben) und Bild 7.6 stimmen grundsätzlich gut überein, allerdings fällt die Gesamttransmission deutlich geringer aus, was nach Betrachtung des Transmissionsdiagramms natürlich zu erwarten war. Somit bestätigen die Messungen die auf Basis der Simulationen gemachten Beobachtungen. Weiter lässt sich beobachten, dass die Messergebnisse der beiden unterschiedlichen Systeme sich weniger unterscheiden, als die Simulationsergebnisse. Dies liegt

³ Die Verglasung von System 2 wies eine profilierte Scheibe zur azimuthalen Lichtstreuung auf, System 1 nicht. Die Verglasung war jedoch nicht Teil der Messung.

wohl daran, dass durch die Rauheit des Basissystems die Messkurven ebenfalls abflachen, was in der Simulation oben nicht berücksichtigt wurde.

Der direkte Vergleich der Lichtverteilungen zwischen Lumitop und dem unmodifizierten Basissystem zeigt einen qualitativen Vorteil für Lumitop:

- $\theta_I = 15^\circ$ (a): Die Vor- und Nachteile beider Systeme heben sich gegenseitig auf: das mikrostrukturierte System lenkt das Licht tiefer in den Raum, allerdings ist der Blendanteil etwas größer als bei Lumitop.
- $\theta_I = 30^\circ$ (b): Beide Lichtverteilungen sind sich sehr ähnlich.
- $\theta_I = 45^\circ$ (c): Das Licht des Basissystems wird sehr nah im Fensterbereich an die Raumdecke gelenkt. Lumitop weist hier die bessere Verteilung auf.
- $\theta_I = 60^\circ$ (d): Die von Lumitop erzeugte Lichtverteilung hat einen erhöhten blendenden Anteil, sodass hier das mikrostrukturierte System besser ist.

Die selbst durchgeführten Messungen zeigen, dass die Lichtverteilungen von Lumitop und dem mikrostrukturierten System grundsätzlich vergleichbar sind. Beide Systeme haben je nach Sonnenstand ihre Vor- und Nachteile. Die grundsätzlich höhere Gesamttransmission des mikrostrukturierten Systems ist immer dann besonders vorteilhaft, wenn die Verglasung nicht direkt besonnt wird. So ist beispielsweise bei bedecktem Himmel eine möglichst hohe Transmission des Tageslichts erwünscht. Zudem erreicht das mikrostrukturierte System aufgrund der höheren Effizienz bereits bei kleiner Verglasungsfläche die gleiche Helligkeit, wie Lumitop mit einer großen.

Es sollte auch nicht außer Acht gelassen werden, dass bei der Betrachtung der Lichtverteilungen das Ergebnis des besseren Lumitop-Systems einem Mittelwert von vielen PMMA-Basissystemen gegenübergestellt wurde. Durch die Berücksichtigung weiterer Lumitop-Systeme könnte sich deren Ergebnis durchaus verschlechtern. Im vorherigen Kapitel wurden zudem einige Optionen genannt, durch die die Lichtverteilung des mikrostrukturierten Systems verbessert werden kann, wodurch sich der qualitative Rückstand zu Lumitop verringert.

Vorteile des Mikrosystems bei der Lichtlenkung:

- deutlich höhere Gesamttransmission,
- bessere Lichtverteilung bei hohen Sonnenständen ($\theta_I \geq 60^\circ$).

Nachteile des Mikrosystems bei der Lichtlenkung:

- höhere Blendung bei flachen Sonnenständen ($\theta_I \leq 20^\circ$),
- weniger homogene Lichtverteilung.

Fazit

Der direkte Vergleich zwischen Lumitop und dem mikrostrukturierten Lichtlenksystem hat zunächst einmal erwiesen, dass beide Systeme insgesamt gute Lichtlenkverhalten aufweisen, die sich beide für das Beleuchtungskonzept eignen.

Lumitop hat eine etwas sanftere und homogenere Lichtverteilung, die zudem etwas tiefer in den Raum gerichtet ist. Im Gegensatz dazu, hat das mikrostrukturierte System eine deutlich höhere Gesamttransmission. Diese ermöglicht es, einen Raum mit einer kleineren Verglasungsfläche zu beleuchten und ist grundsätzlich dann von Vorteil, wenn kein direktes Sonnenlicht das Fenster beleuchtet. Lumitop hat also einen leichten Vorteil bei der Licht*qualität*, das Mikrosystem bei der Licht*quantität*. Somit ist das Verhältnis an Vor- und Nachteilen auf der lichttechnischen Seite in etwa ausgeglichen.

Mit den in Kapitel 6 vorgestellten Systemmodifikationen ist es möglich, die Qualität der Lichtverteilung des mikrostrukturierten Systems zu erhöhen, wodurch es auch in dieser Hinsicht den Rückstand zu Lumitop verringert.

Beim Herstellungsverfahren und bei der Bauform liegen alle Vorteile eindeutig beim mikrostrukturierten System: der Materialbedarf ist geringer, die Abmessungen sind kleiner und die Integration in die Verglasung ist deutlich einfacher. Alle Faktoren werden zu einem Kostenvorteil für Hersteller und Nutzer führen.

Zuletzt soll noch auf zusätzliche Vergleichsmessungen hingewiesen werden, die am Deutschen Institut für Angewandte Lichttechnik (DIAL) in Lüdenscheid durchgeführt wurden. Diese unabhängigen Messungen stützen alle oben festgestellten Beobachtungen in qualitativer Form. Da sie jedoch in einer Form vorliegen, die es nicht ermöglicht, sie direkt mit den selbst erzeugten Resultaten zu vergleichen, sind sie in Anhang B zu finden.

8 Zusammenfassung, Ausblick und Fazit

8.1 Zusammenfassung

„Kann man das nicht etwas kleiner machen?“

Mit dieser konkreten Frage wurde diese Arbeit begonnen. Die ersten beiden Kapitel gaben dann eine Einführung in die Thematik der Tageslichtlenkung (siehe Bild 8.1). Hier wurde zunächst das zentrale Beleuchtungskonzept (a) vorgestellt: Ein Lichtlenksystem wird im Bereich des Oberlichts im Scheibenzwischenraum eines Fensters angebracht. Eintreffendes Tageslicht wird an die Raumdecke gelenkt und von dort gestreut, wodurch der Raum blendfrei ausgeleuchtet wird. Mit dieser Form der Tageslichtbeleuchtung lässt sich Energie einsparen, lassen sich Betriebskosten senken und das Wohlbefinden der Raumnutzer steigern.

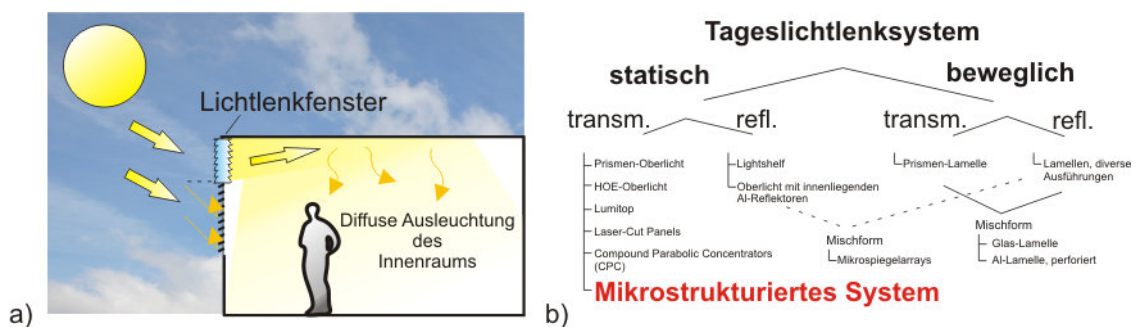


Bild 8.1: Einführung in das Thema: a) Vorstellung des zentralen Beleuchtungskonzepts (Kap. 1). b) Überblick über den Stand der Tageslichttechnik (Kap. 2) (Bild in Anlehnung an [Kaa06]).

Zur Nutzung dieser Vorteile wurden bereits unterschiedliche Tageslichtsysteme entwickelt, die sich in vier Gruppen klassifizieren lassen (b). Das zentrale Beleuchtungskonzept wird von der Gruppe der statisch - transmittierenden Systeme behandelt. Die Untersuchung dieser Gruppe ergab, dass nur das Lichtlenkglas „Lumitop“ geeignete lichtlenkende Eigenschaften aufweist. Da es allerdings Defizite in der Bauform hat, besteht Entwicklungsbedarf an einem leichten, dünnen und vor allem kostengünstigen Alternativsystem. Dieses sollte mit dem mikrostrukturierten System entwickelt werden.

Die nächsten beiden Kapitel befassten sich mit der eigentlichen Entwicklung des mikrostrukturierten Systems (siehe Bild 8.2). In Kapitel 3 zeigte sich, dass grundsätzlich nur Herstellungsverfahren wirtschaftlich sein können, bei denen Strukturen über eine Abformung repliziert werden. Exemplarisch für einen solchen Prozess ist das Heißprägen von PMMA (a).

Mit Kenntnis der möglichen Produktionstechniken ließen sich zielgerichtete optische Simulationen durchführen (b). Für das Lichtlenksystem wurde eine geeignete Strukturkombination identifiziert, die auf der Außenseite mit einer linsenförmigen und auf der Innenraumseite mit einer prismenförmigen Struktur versehen ist. Mit dieser Kombination wird das Licht bereits innerhalb der Platte gestreut, wodurch eine hohe Toleranz gegenüber Fertigungsfehlern erzielt wird.

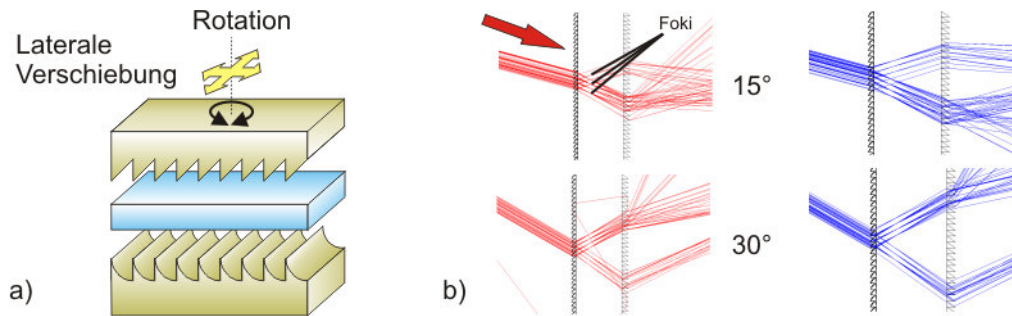


Bild 8.2: Entwicklung des Lichtlenksystems: a) Prüfung der Herstellungstechnologien (Kap. 3). b) Simulationen zur Identifikation einer geeigneten Strukturkombination (Kap. 4).

Anschließend wurden Prototypen im Labor- und im Großformat gefertigt, deren Lichtlenkcharakteristik mit Hilfe eines Lasergoniometers gemessen wurde (Bild 8.3 (a)). Der Abgleich mit den Simulationsergebnissen erwies eine sehr gute Übereinstimmung, insbesondere wenn man berücksichtigt, dass eine komplette Prozesskette zwischen den verglichenen Werten liegt.

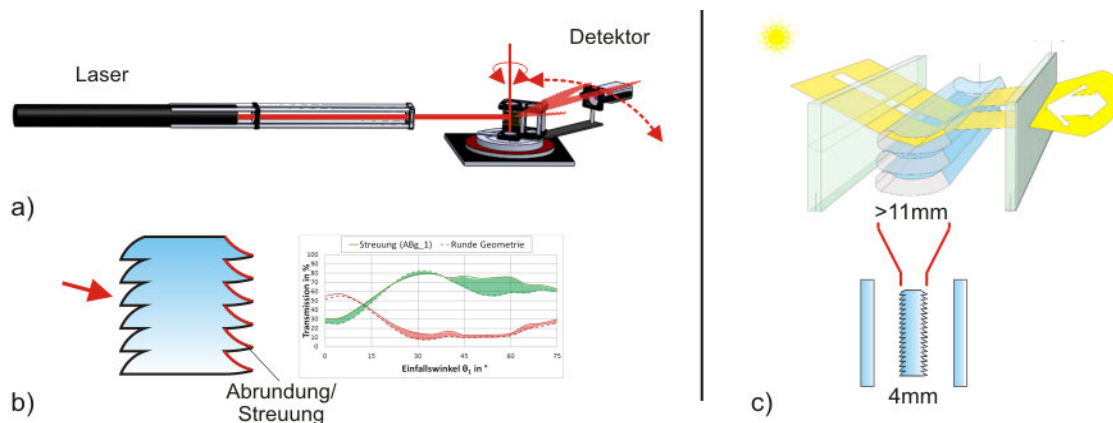


Bild 8.3: a) Goniometrischer Aufbau zum Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und Messung (Kap. 5) (Bild in Anlehnung an [Ouy10]). b) Optimierung des Systems zur Verbesserung der Lichtlenkeigenschaften (Kap. 6). c) Vergleich zwischen Lumitop und dem Mikrosystem (Kap. 7) (Bild in Anlehnung an [SGG06]).

In Kapitel 6 wurden Optimierungsmöglichkeiten (b) zur Verbesserung der Lichtverteilung erörtert. Es wurde die Strukturgeometrie überarbeitet und der gezielte Einsatz von Oberflächenrauheit erprobt.

Der direkte Vergleich (c) zwischen dem mikrostrukturierten System und Lumitop zeigte, dass beide Systeme gute lichtlenkende Eigenschaften aufweisen. Während das Mikrosystem die bessere *Lichtquantität*, in Form einer höheren Gesamttransmission, hat, besitzt Lumitop die bessere *Lichtqualität*, in Form einer homogeneren Verteilung. Beim Herstellungsverfahren und bei der Bauform liegen jedoch alle Vorteile klar beim mikrostrukturierten System (b): Materialbedarf und Abmessungen sind geringer und die Integration in die Verglasung ist erheblich einfacher. Beides führt zu einer deutlichen Kostenersparnis.

Bevor nun die eingangs gestellte Frage in einem Fazit abschließend beantwortet wird, werden im Folgenden einige Anregungen zur Fortsetzung der Arbeit gegeben.

8.2 Anknüpfungspunkte zur Weiterarbeit

Die Arbeit am Projekt „mikrostrukturiertes Lichtlenksystem“ ist nicht abgeschlossen, da noch Schritte erforderlich sind, die das System zu einem marktreifen Produkt machen. In diesem Abschnitt sollen einige Anknüpfungspunkte aufgezeigt werden.

8.2.1 Punkt 1: Produktion des Systems

Die Erzeugung eines marktreifen Produktes steht und fällt selbstverständlich mit der Fertigung der lichtlenkenden Einheit. Hier sollte der Produktionsprozess so optimiert werden, dass die Strukturen in guter Qualität in die PMMA-Platten übertragen werden. Dass der Hersteller dazu in der Lage ist, wurde bereits anhand der einseitig geprägten Platten bewiesen – und auch die doppelseitig geprägten Prototypen zeigten vielversprechende Ansätze. Nun ist aber eine zügige Weiterarbeit gefragt, damit das bislang erzeugte Interesse am mikrostrukturierten System nicht verpufft.

Es sollten grundsätzlich alle Herstellungsoptionen erneut überprüft werden, wobei das doppelseitige Heißprägen im Vordergrund stehen sollte. Hier könnte es notwendig sein, geeignete Werkzeuge extern fertigen zu lassen, um eine höhere Qualität zu erlangen.

Alternativ könnten die Platten auch einseitig strukturiert werden. Dann müsste aber gleichzeitig eine Lösung für die Verbindung beider Strukturplatten gefunden werden. Hier könnten beispielsweise Praktiken der Verbundglastechnik angewendet werden, in denen eine transparente Folie zwischen zwei Platten laminiert wird (Vakuumlamination). Mit einer solchen Folie könnten sogar zusätzliche Funktionen in das System integriert werden, wie zum Beispiel die Filterung des transmittierten Spektrums, um den Wärmetransport zu regulieren. Eine Herausforderung ist die hohe Temperatur während des Laminationsprozesses, die üblicherweise bei rund $130^{\circ} C$ bis $150^{\circ} C$ liegt – und damit oberhalb des Erweichungspunkts von PMMA. Die hohe Laminationstemperatur würde also vermutlich die geprägten Strukturen zerstören. Hier muss geprüft werden, welche Laminierfolie¹ bei niedrigen Temperaturen eingesetzt werden kann. Es sind bereits Anwendungen bekannt, bei denen thermisch sensible Bauelemente, wie LEDs, mit EVA-Folie bei etwa $110^{\circ} C$ zwischen Glasschichten laminiert wurden [Sun12]. Ebenfalls wurde eine spezielle EVA-Folie vorgestellt, deren Laminiertemperatur bei nur etwa $75^{\circ} C$ liegt [CNC11] und sich damit besonders für die Lamination von PMMA eignet.

Weiterhin können die Platten auch auf andere Art miteinander verklebt werden [Tsa09], beispielsweise durch die Verwendung von transparenten UV-härtenden Klebstoffen, die auch bei der Herstellung von speziellen Scheiben in der Fahrzeugindustrie Anwendung finden und damit auch für großflächige, transparente Verklebungen geeignet sind.

¹ Typische Laminierfolien bestehen aus Polyvinylbutyral (PVB) oder Ethylenvinylacetat (EVA) [Als12].

Ebenfalls sollte der Einsatz des Rolle-zu-Rolle Verfahrens in Erwägung gezogen werden. Hier haben sich seit Beginn der Projektarbeit einige Fortschritte gezeigt, die die Umsetzung geeigneter Mikrostrukturen in Folien realistisch erscheinen lassen. Da die Folien selbst keine genügende mechanische Stabilität aufweisen, müssen sie auf eine stabile Basisplatte geklebt werden. Somit muss auch hier das Verbundproblem gelöst werden. Dennoch erscheint das Rolle-zu-Rolle Verfahren aus wirtschaftlicher Sicht am vielversprechendsten.

8.2.2 Punkt 2: Integration der lichttechnischen Eigenschaften in Lichtplanungstools

Damit ein Tageslichtsystem gekauft und eingesetzt wird, muss es Lichtplanern möglich sein, die Auswirkungen eines Einbaus auf die Lichtverhältnisse im Raum sicher abschätzen zu können. Dazu müssen die lichttechnischen Eigenschaften des Systems erfasst werden und als Modul in typische Lichtplanungssoftware (wie z.B. Relux oder DIALux) integriert werden.

Da ein Tageslichtsystem nicht als statische Lichtquelle behandelt werden kann, ist es nicht möglich, nur die einfache Leuchtstärkeverteilung des Systems zu ermitteln und im EULUMDAT-Format der Software zur Verfügung zu stellen. Es müssen schließlich stets die dynamisch wechselnden Eigenschaften bedacht werden, die in Abhängigkeit vom Sonnenstand variieren. An der Integration von komplexen Verglasungssystemen in eine Beleuchtungssoftware wurde an der EPFL (Lausanne, Schweiz) gearbeitet. Hier wurde mit *GERONIMO* ein Softwaremodul entwickelt, welches die Raytracingsoftware Radiance als Basis nutzt und sie so erweitert, dass die durch die komplexe Verglasung entstehenden Beleuchtungsverhältnisse im Raum simuliert und grafisch veranschaulicht werden [Kae11, Lar97].

An der EPFL ist ebenfalls ein Goniophotometer vorhanden (siehe Anhang A), mit dem die Charakterisierung einer komplexen Verglasung möglich ist. Dessen Ergebnisse können in *GERONIMO* integriert werden. Dazu wurden vorläufige Proben zur Vermessung verschickt, deren Ergebnisse jedoch noch nicht verfügbar sind (Stand November 2012). Sobald die ersten vollwertigen Demonstratoren vorliegen, sollten sie dort ebenfalls vermessen werden, um sie in die Simulationssoftware zu integrieren.

8.2.3 Punkt 3: Erprobung in einem Musterraum

Neben der technischen Charakterisierung des Systems und der Integration in eine Simulationssoftware, ist die ausführliche Untersuchung des Lichtlenkverhaltens in einem Musterraum wünschenswert. Mit vergleichbaren Untersuchungen konnte beispielsweise die verbesserte Raumausleuchtung von Lumitop in der Alltagsanwendung nachgewiesen werden [Mue05]. Ebenfalls ist im Rahmen einer Studie zur Erfassung der Nutzerakzeptanz die Sammlung subjektiver Beurteilungen der Lichtverhältnisse von

Interesse. Auf Basis dieser Ergebnisse kann eine nutzerorientierte Optimierung der Mikrostrukturen durchgeführt werden.

8.2.4 Punkt 4: Anpassung der Simulationsumgebung

Die Simulationsumgebung zur Entwicklung des mikrostrukturierten Lichtlenksystems orientierte sich speziell an den Anforderungen des Lichtlenkkonzepts und an den vorhandenen Fertigungs- und Messmöglichkeiten, wodurch beispielsweise enge Grenzen hinsichtlich möglicher Sonnenstände gesetzt wurden. Damit auch andere Systeme mit der Simulationsumgebung bewertet werden können, sind zunächst Anpassungen erforderlich, um geeignete Resultate generieren zu können.

In diesem Zusammenhang ist es sinnvoll, die Simulationsanordnung so zu implementieren, dass sie den Standards der Lichtplanungssoftware entspricht. Dies betrifft zum Beispiel die zu untersuchenden Lichteinfälle ebenso wie das Format der mit der Simulation erzeugten Lichtverteilungsdaten. Durch die Überarbeitung der Simulationsumgebung kann ein großer Schritt zur Vereinfachung des Wissensaustauschs gemacht werden: Mit *ZEMAX* werden geometrische Formen auf ihre Verwendbarkeit hin überprüft und ihre Wirkung kann in wenigen Zwischenschritten in das Lichtplanungstool übertragen werden. Im Umkehrschluss können Lichtplaner anhand von Beleuchtungsszenarien konkrete Zielvorgaben definieren, die leicht in *ZEMAX* übertragen werden können.

Hier wurden bereits erste Schritte unternommen, um mit *ZEMAX* geeignete Daten zu generieren. Die Lichtquellen beleuchten das zu untersuchende System nicht nur azimuthal senkrecht und von $0^\circ \leq \theta_l \leq 75^\circ$, sondern wurden gemäß der Empfehlung aus [IEA99] auf die Sonnenstände nach Tregenza erweitert [Tre87]. Damit werden 145 verschiedene Sonnenstände untersucht, die die Hemisphäre abbilden. Unter Erfüllung einiger Symmetriebedingungen kann die zu untersuchende Anzahl auf 42 Sonnenstände reduziert werden. Die Ergebnisausgabe wurde ebenfalls dem in [IEA99] empfohlenen Datenformat angepasst, sodass ein grundsätzlicher Datenaustausch bereits möglich ist, dieser aber noch erprobt werden muss (Stand November 2012).

8.3 Ideen für weitere Anwendungen

Mit Hilfe von mikrostrukturierten PMMA-Platten lassen sich weitere Beleuchtungsziele abseits von dem vorgestellten Beleuchtungskonzept realisieren. Einige Beispiele und Ideen sollen im Folgenden benannt werden und als Anregung für weitere Entwicklungen dienen.

8.3.1 Einsatz als Lichtdecke

Insbesondere hohe Räume, wie sie zum Beispiel in Galerien oder Museen vorkommen, eignen sich zur Beleuchtung mit einer Lichtdecke [FGL06]. Sollte über die Raumdecke ein direkter Zugang zu Tageslicht vorhanden sein, so kann ein mikrostrukturiertes System das direkt einfallende Licht diffus in den Raum lenken (siehe Bild 8.4). Da das mikrostrukturierte System eine hohe Transmission und das Tageslicht eine hohe Leuchtdichte bietet, reichen bereits verhältnismäßig kleine Öffnungen für eine gute Raumausleuchtung. Das Mikrosystem hat bei geringem Gewicht eine hohe mechanische Stabilität und ist daher für den Deckeneinbau besonders gut geeignet – zusätzliche Last und Durchbiegen der Elemente fallen gering aus.

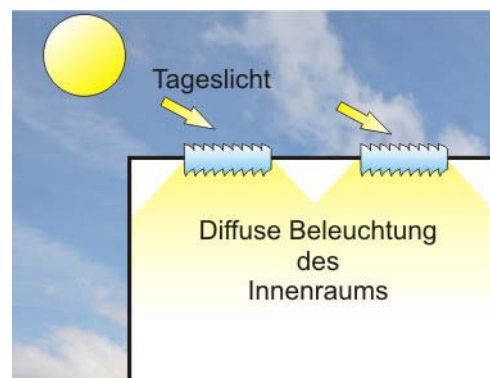


Bild 8.4: Einsatz eines mikrostrukturierten Elements als Tageslichtdecke. Durch die hohe Leuchtdichte des Tageslichts sind bereits kleine Flächen zur Raumausleuchtung geeignet.

Eine erste Prüfung zeigte, dass für diese Anwendung vielleicht sogar das hier vorgestellte Lichtlenksystem in Frage kommt. Werden die Elemente so eingesetzt, dass vorzugsweise die Bodenflächen der Strukturen beleuchtet werden – das System also „von unten“ beleuchtet wird – so wird das Licht für einen sehr breiten Bereich von Lichteinfällen nahezu gleichmäßig in alle Richtungen gestreut. Damit könnte sich das bekannte System als guter Ausgangspunkt für eine Systementwicklung erweisen.

8.3.2 Verbesserung der Ausleuchtung in Gewächshäusern

Ein Objekt, welches vollkommen auf die Nutzung von Tageslicht angewiesen ist, ist ein Gewächshaus. Durch die kontrollierte Kultivierung ist der Anbau von Pflanzen möglich, die üblicherweise andere klimatische Verhältnisse benötigen. Für den Gemüsebau sind Gewächshäuser von besonderem Interesse, da die Pflanzen eher reifen und so bereits vorsaisonal geerntet und zu höheren Preisen verkauft werden können. Gewächshäuser sind also vor allem außerhalb der üblichen Vegetationszeiten von besonderer Bedeutung, also zu Jahreszeiten in denen die Sonne besonders tief steht. Allerdings werden sie häufig nicht optimal ausgeleuchtet, wie in Bild 8.5 (a) gezeigt wird. Durch die Nutzung eines mikrostrukturierten Elements kann das flach einfallende Licht gezielt auf die Pflanzen gelenkt werden (b), wodurch sich die Tageslichtnutzung verbessert.

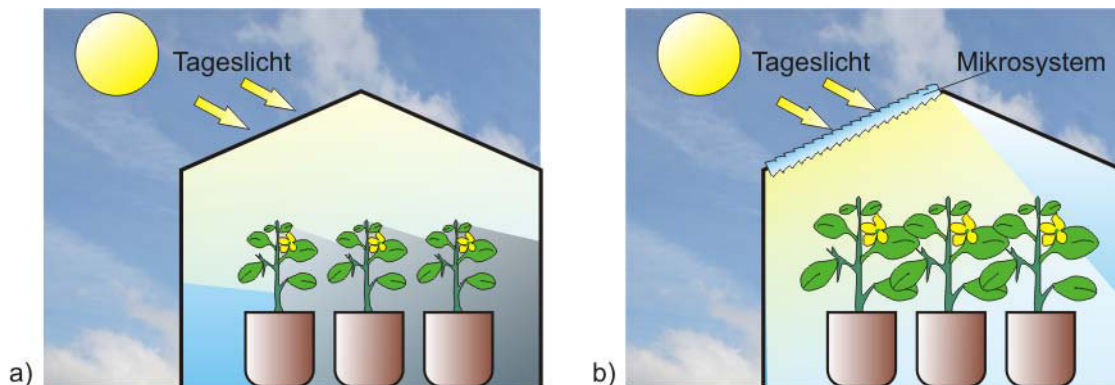


Bild 8.5: Ausleuchtung eines Gewächshauses ohne (a) und mit (b) Einsatz eines mikrostrukturierten Elements. Vor allem bei flach einfallendem Tageslicht, wie im Winter und Frühling, kann das Tageslicht besser genutzt werden.

Für diese Anwendung müssen besonders große Flächen mit strukturierten Elementen bestückt werden, sodass sich das Heißprägen von PMMA-Platten, aufgrund des verhältnismäßig geringen Durchsatzes, nicht anbietet. Mit der in Kapitel 3.4 vorgestellten kontinuierlichen Strukturierung von Folien kann ein ausreichend hoher Durchsatz erreicht werden. Da im Gewächshaus die Anforderungen an die Ästhetik gering sind und kleinere Fehler und Formabweichungen toleriert werden können, liegen ideale Voraussetzungen für den Einsatz dieser Technik vor.

Folien bieten ebenfalls den Vorteil, dass sie bei Nichtgebrauch aufgerollt werden können. So wird also zusätzlich eine manuelle Regulierung der Tageslichtlenkung ermöglicht.

8.3.3 Lichtkunst mit mikrostrukturierten Elementen

Bei den bisherigen Themen stand stets die technische Funktionalität im Vordergrund. Allerdings zeigte sich schon bei der LED-Seiteneinkopplung (Kapitel 6.4), dass sich im Zusammenspiel zwischen Mikrotechnologie und Licht eine besondere und ungewöhnliche Ästhetik entfaltet. Ein Beispiel ist der durch die Strukturen entstehende dreidimensionale Eindruck in Bild 6.19, der den Betrachter verblüfft. Die Anwendung von mikrostrukturierten Elementen als Werkzeuge der Lichtkunst ist daher durchaus denkbar.

Durch den Einsatz farbiger, mikrostrukturierter PMMA-Platten kann aus gewöhnlichem Tageslicht ein besonderes Farbspiel im Raum erzeugt werden. Die ergänzende Kombination mit Kunstlicht und einer Lichtsteuerung stellen einem Künstler ein weites Spielfeld zur Verfügung, das bislang wenig benutzt wurde.

Fazit

Mit Kenntnis der vorgestellten Ergebnisse, kann man nur zu dem Fazit kommen, dass die Entwicklung eines mikrostrukturierten Systems zur Tageslichtlenkung erfolgreich war. Aufgrund seiner kompakten Bauform ist das resultierende System materialsparend und kann leicht in eine Verglasung integriert werden. Der Einsatz einer linsenförmigen Struktur bewirkt eine starke Erhöhung der Fehlertoleranz, wodurch eine kostengünstige Massenproduktion ermöglicht wird.

Die Funktionalität der Lichtlenkung wurde messtechnisch überprüft und zeigt im Vergleich zum etablierten Lumitop-System eine um mehr als 20 % erhöhte Effizienz.

Diese Kombination aus hoher Umlenkeffizienz und ökonomischer Massenfertigung ist bislang einzigartig und bietet damit erstmals für ein Tageslichtlenkprodukt das Potenzial einer hohen Marktdurchdringung.

Durch die quasi unbegrenzte Anzahl an möglichen Geometrikombinationen können mit Hilfe mikrostrukturierter Systeme auch Lösungen für die unterschiedlichsten Lichtanwendungen realisiert werden. Hier sind den Möglichkeiten kaum Grenzen gesetzt.

Die abschließende Antwort auf die einleitende Frage ist also:

„Ja, man kann! ...und es geht noch viel mehr...“.

9 Literaturverzeichnis

9.1 Verwendete Literatur

- [Ala11] Al-Ashwal, N. T., Budaiwi, I. M.: „Energy savings due to daylight and artificial lighting integration in office buildings in hot climate“, International Journal of Energy and Environment, Vol. 2, No. 6, 2011, pp. 999-1012
- [Als12] Alsaed, O., Jalham, I. S.: „Polyvinyl Butyral (PVB) and Ethyl Vinyl Acetate (EVA) as a Binding Material for Laminated Glass“, Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, Vol. 6, No. 2, 2012, pp. 127-133
- [And03] Andersen, M., Rubin M., Scartezzini, J.-L.: „Comparison between ray-tracing simulations and bi-directional transmission measurements on prismatic glazing“, Solar Energy, Vol. 74, 2003, pp. 157-173
- [And04] Andersen, M.: Innovative Bidirectional Video-Goniophotometer for Advanced Fenestration Systems, (Dissertation EPFL Lausanne, Schweiz), 2004
- [And06] Andersen, M.: „Validation of the performance of a new bidirectional video-goniophotometer“, Lighting Research and Technology, Vol. 38, 2006, pp. 295-313
- [And10] Andersen, M., et.al.: „Using Digital Imaging to Assess Spectral Solar-Optical Properties of Complex Fenestration Materials: A New Approach in Video-Goniophotometry“, Solar Energy, Vol. 84, 2010, pp. 549-562
- [Api95] Apian-Bennewitz, P.: Messung und Modellierung von lichtstreuenden Materialien zur Computer-Simulation von Tageslichtbeleuchtung, (Dissertation Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg im Breisgau), 1995
- [Api07] Apian-Bennewitz, P.: „pab gonio-photometer“, 2007, verfügbar unter: www.pab-opto.de, (09.05.2012)
- [Bec63] Beckmann P., Spizzichino, A.: The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces, New York, Pergamon Press, 1963
- [Ben99] Bennett, J. M., Mattson, L.: Introduction to Surface Roughness and Scattering – Second Edition, Washington D.C., Optical Society of America,

1999

- [Ber02] Berson, D. M., Dunn, F. A, Takao, M.: „Phototransduction by Retinal Ganglion Cells That Set the Circadian Clock“, Science, Vol. 295, 2002, pp. 1070-1073
- [Bha05] Bhattacharya S., et. al.: „Studies on Surface Wettability of Poly(Dimethyl) Siloxane (PDMS) and Glass Under Oxygen-Plasma Treatment and Correlation With Bond Strength“, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 14, No. 3, 2005, pp. 590-597
- [BMW12] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Die Energiewende in Deutschland – Mit sicherer, bezahlbarer und umweltschonender Energie ins Jahr 2050, Berlin, 2012
- [Bod02] Bodart, M., De Herde, A.: „Global energy savings in office buildings by the use of daylighting“, Energy and Building, Vol. 34, No. 5, 2002, pp. 421-429
- [Bom04] Van Bommel, W.J. M., van den Beld, G. J.: „Lighting for work: a review of visual and biological effects“, Lighting Research Technology, Vol. 36, No. 4, 2004, pp. 255-269
- [Bor80] Born, M., Wolf, E.: Principles of Optics - 6th Edition, Cambridge, Cambridge University Press, 1980
- [Boy03] Boyce, P. R.: Human Factors in Lighting, Second Edition, Taylor & Francis, London, 2003
- [Boy09] Boyce, P. R.: „The impact of light in buildings on human health“, in 2nd International Conference on Sustainable Healthy Buildings (SHB2009), Seoul (Korea), 09.10.2009
- [Bre04] Brecher, C., et. al.: „Manufacturing of free-form surfaces in optical quality using an integrated NURBS data interface“, Proceedings of American Society for Precision Engineering (ASPE), Raleigh, 2004, pp. 88-93
- [Bue03] Bühler, C., Mikrostrukturen zur Lenkung von Tageslichtströmen, (Dissertation Albert-Ludwigs Universität Freiburg im Breisgau), 2003
- [Cai08] Cai, D.: Optical and Mechanical Aspects on Polysiloxane Based Electrical-Optical-Circuits-Board, (Dissertation TU Dortmund), 2008
- [CNC11] CNC-INTERLAYER TECH Produktbeschreibung: „Ethylene-vinyl acetate EVA Interlayer Film laminating PMMA acrylic sheet“, 2011, verfügbar unter: www.cncnext.com/ethylene-vinyl-acetate-eva-interlayer-film-laminating-pmma-acrylic-sheet/ (14.08.2012)

- [Dav03] Davies, M. A. et. al.: „Application of precision diamond machining to the manufacture of micro-photonics components“, Proceedings of SPIE Vol. 5183, Bellingham, 2003
- [DeW10] De Wilde, W. P., Brebbia, C. A., Mander, U. (Editoren): High Performance Structures and Materials V, WIT Press, Southampton, 2010
- [DIN79] DIN 5036-3:1979-11: „Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien; Meßverfahren für lichttechnische und spektrale strahlungsphysikalische Kennzahlen“, 1979
- [DIN03] DIN EN 12464-1/2: „Beleuchtung von Arbeitsstätten – Arbeitsstätten in Innenräumen“, 2003
- [Dit06] Dittman, M.G.: “K-correlation power spectral density& surface scatter model”, Proceedings of SPIE vol. 6291, 2006
- [Dup02] Duparré, A., et. al.: „Surface characterization techniques for determining the root-mean-square roughness and power spectral densities of optical components“, Applied Optics, Vol. 41, No. 1, 2002
- [Edd08] Eddings, M. A., Johnson, M. A., Gale, B. K.: „Determining the optimal PDMS-PDMS bonding technique for microfluidic devices“, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 18, 2008
- [Ede10] Edelmann, J., et. al.: „Micro structuring of inorganic glass by hot embossing of coated glass wafers“, Microsystem Technologies, Issue 16, 2010, pp. 553-560
- [Edm91] Edmonds, I. R.: „Transparent Light deflecting panel for daylighting rooms“, US-Patent No.: US4,989,952 vom 05.02.1991
- [Edm93] Edmonds, I. R.: „Performance of laser cut light deflecting panels in daylighting applications“, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 29, Issue 1, 1993, pp. 1-26
- [Edm06] Edmonds, I. R.: „Light channelling window panel for shading and illuminating rooms“, US-Patent No.: US7,070,314 vom 04.07.2006
- [Ehl00] Ehling, K.: Tageslichtsysteme: Lichttechnische Bewertung und Wirtschaftlichkeit, (Dissertation TU Berlin), VDI Verlag, Düsseldorf, 2000
- [Eic93] Eichler, H.-J.: „Interferenz und Beugung“, in Bergmann Schaefer Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 3 Optik, 9.Auflage, Verlag Walter de Gruyter, 1993

- [Erc12] ERCO Leuchten GmbH: Ratgeber, Version 20.12.2012, Lüdenscheid, 2012, verfügbar unter: www.ercos.com
- [Evo11] Evonik Röhm GmbH (Hrsg.): Plexiglas[®] 7N, Datenblatt, Darmstadt, 2011
- [FGL06] Fördergemeinschaft Gutes Licht: Informationen zur Lichtanwendung Nummer 18: Gutes Licht für Museen, Galerien, Ausstellungen, Frankfurt am Main, 2006
- [Fle08] Fleger M.: Polymerbasierte Mikrofluidiksysteme mit integrierten optischen Komponenten, (Dissertation TU Dortmund), Der Andere Verlag, 2008
- [Fou07] Fouckhardt, H., et. al.: „nm- and μm -Scale Surface Roughness on Glass with Specific Optical Scattering Characteristics on Demand“, *Advances in OptoElectronics*, Vol. 2007, 2007
- [Har76] Harvey, J. E.: Light-scattering characteristics of optical surfaces, (Dissertation, University of Arizona), 1976
- [Har07] Harvey, J. E., Krywonos, A., Vernold, C. L.: „Modified Beckmann-Kirchhoff Scattering Theory for Rough Surfaces with Large Scattering and Incident Angles“, *Optical Engineering*, Vol. 46, Issue 7, 2007
- [Har10] Harvey, J. E., Choi, N., Krywonos, A.: „Scattering from Moderately Rough Interfaces between Two Arbitrary Media“, *Proceedings of SPIE*, Vol. 7794, 2010
- [HMG99a] Heschong Mahone Group: Skylighting and Retail Sales: An Investigation into the Relationship Between Daylighting and Human Performance, for Pacific Gas and Electric Company, Fair Oaks (California, USA), 1999, verfügbar unter: www.pge.com/pec/daylight (05.10.2012)
- [HMG99b] Heschong Mahone Group: Daylighting in Schools: An Investigation into the Relationship Between Daylighting and Human Performance, for Pacific Gas and Electric Company, Fair Oaks (California, USA), 1999, verfügbar unter: www.pge.com/pec/daylight (05.10.2012)
- [HMG02] Heschong Mahone Group: Re-Analysis Report: Daylighting in Schools, Additional Analysis, for California Energy Commission, Fair Oaks (California, USA), 2002
- [Hoc10] Hocheng, H., et. al.: „A brighter place: overview of microstructured sunlight guide“, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 43, Issue 1, 2010, pp. 409-417

- [Hoc11] Hocheng, H., et. al.: „Microstructural fabrication and design of sunlight guide panels of inorganic-organic hybrid material“, *Energy and Buildings*, Vol. 43, 2011, pp. 1011-1019
- [Hoh11] Hohmeyer, O.: „The IPCC Special Report on Renewables and Climate Change“, in *Cleantech for Sustainable Buildings – CISBAT*, Lausanne (Schweiz), 14.09.2011
- [Hsu09] Hsu, R. Q., Wang, H. B., Liang, D. L.: „Hot Embossing of Parallel v-Groove Microstructures on Glass“, *Journal of the American Ceramic Society*, Issue 92, No. 11, 2009, pp. 2605-2608
- [IEA99] IEA International Energy Agency: *Measurement of Luminous Characteristics of Daylighting Materials. A Report of IEA SHC Task 21 ECBCS ANNEX29*, 1999
- [IEA00] IEA International Energy Agency: *Daylight in Buildings – A Source Book on Daylighting Systems and Components, SHC Task 21 / ECBS Annex 29*, Berkeley (USA), 2000
- [IEA06] IEA International Energy Agency: *Light's Labour's Lost*, IEA Publications, Frankreich, 2006
- [IEA10] IEA International Energy Agency: *Guidebook on Energy Efficient Electric Lighting for Buildings. ECBCS ANNEX 45*, Aalto (Finnland), 2010
- [IPC12] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, Cambridge University Press, Cambridge, 2012
- [Kaa06] Kaase, H.: „Umdruck zur PIV: Beleuchtungsplanung mit Tageslicht“, TU Berlin, Fachgebiet Lichttechnik, 2006
- [Kae11] Kämpf, J., Scartezzini, J.-L.: „GERONIMO: the CFS Daylighting Wizard“, in *4th VELUX Daylight Symposium. 2011*, Lausanne
- [Kla08] Klar, R.: (Fraunhofer IPT, Aachen), Gesprächsnotiz basierend auf einem Telefonat, geführt vom Verfasser. Dortmund, 11. Juli 2008
- [Koe10] Köster, H.: „Energiesparressource Tageslicht – Lichtlenkung“, *industriemagazin* – architektur technik management, 56. Jahrgang, Ausgabe 2/2010, Merching, 2010
- [Kop07] Kopetz, S.: *Technologie optischer Lagen für elektrisch-optische Leiterplatten*, (Dissertation TU Dortmund), Der Andere Verlag, 2007

- [Kuc02] Kuckelkorn, T.: Nichtabbildende Konzentratoren für den Sonnenschutz in Gebäuden, (Dissertation TU München), 2002
- [Kue99] Küsters: "Transparenter Sonnenschutz mit holographisch-optischen Elementen (HOE) und Photovoltaik (PV)", Abschlussbericht zu Projekt Nr. 253 141 97, Institut für Licht und Bautechnik, Fachhochschule Köln, 1999
- [Kug12a] Kugler GmbH (Hrsg.): Präzision in einer neuen Dimension, Produktkatalog, Salem, 2012
- [Kug12b] Kugler GmbH: Produktvideo: KUGLER MICROGANTRY nano, 2012, verfügbar unter: www.kugler-precision.com/index.php?Gitterstrukturen (15.10.2012)
- [Lar97] Larson, G.W., Shakespeare, R.: Rendering with Radiance, The Art and Science of Lighting Visualization, Morgan Kaufmann, 1997
- [Lew82] Lewy, A. J., et. al.: „Bright artificial light treatment of a manic-depressive patient with seasonal mood cycle“, American Journal of Psychiatry, Vol. 139, No.11, 1982, pp. 1496-1498
- [Li09] Li, Q., et.al.: „Design and fabrication of self-assembling micromirror arrays“, Proceedings of SPIE, Vol. 7362, 2009, pp. 736211-1 - 736211-8
- [Luo00] Luo, S.J, Vidal, M., Wong, C.P.: „Study on surface tension and adhesion in electronic packaging“, Proc 50th Electronic Components and Technology Conf, Las Vegas, 2000, pp. 586-591
- [Mil95] Miller, C. L., et. al.: „The effects of cycled versus noncycled lighting on growth and development in preterm infants“, Infant behavior & development, Vol. 18, Nr. 1, 1995, pp. 87-95
- [Mue05] Müller, H.F.O., et al.: „Sonnenschutz und Tageslicht in Büroräumen“, in Bauphysik-Kalender 2005, Ernst & Sohn, Berlin, 2005
- [Nad10] Nadir, A.: „Roll to roll UV embossing technology“, The Holography Times Techsheet, 2010, verfügbar unter: www.scribd.com/doc/41572855/Roll-to-Roll-UV-Embossing-Technology, (28.03.2012)
- [Nen06] Nentwig, J.: Kunststoff-Folien: Herstellung – Eigenschaften – Anwendung, 3.Auflage, München, Hanser-Verlag, 2006
- [Ngs09] Ng, S. H., Wang, Z. F.: „Hot roller embossing for microfluidics: process and challenges“, Microsystem Technologies, Issue 15, 2009, pp. 1149-1156

- [Nit03] Nitz, P., et. al.: „Sonnenschutz und Lichtlenkung durch mikrostrukturierte Oberflächen“, in Tagungsband zum Neunten Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden, Kloster Banz, OTTI Institut e.V., 2003
- [Nit07] Nitz, P., et. al.: Verglasungen mit mikrostrukturierten optisch-funktionalen Komponenten“, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. -OTTI-, Regensburg: 13.Symposium „Licht und Architektur“, 2007
- [Oka12] Produktbeschreibung von OKALUX: „Funktionsgläser mit LED“, 2012, verfügbar unter: www.okalux.de/de/news/produktneuheiten/okalux-funktionsglaeser-mit-led.html (14.08.2012)
- [Ouy10] Ouyang, S.: Goniometrische Charakterisierung lichtlenkender Polymerfolien (Studienarbeit TU Dortmund), 2010
- [Pap96] Papamichel, K., Ehrlich, C., Ward, G.: „Design and Evaluation of Daylighting Applications of Holographic Glazings“, Final Report prepared for Physical Optics Corporation und Contract Agreement Number BG-95037, University of California, Berkeley, 1996
- [Par04] Park, S., Lee, H.: „Effect of atmospheric-pressure plasma on adhesion characteristics of polyimide film“, Journal of colloid and interface science, Vol. 285, 2004, pp. 267-272.
- [Ped02] Pedrotti, F., et. al.: Optik für Ingenieure, 2. Auflage, Berlin, Springer-Verlag, 2002
- [Rab07] Rabe, E.: Technologien großformatiger Replikationsformen für elektrisch-optische Schaltungsträger, (Dissertation TU Dortmund), Der Andere Verlag, 2007
- [Rea03] Rea, M. S.: „Light – Much More Than Vision“, Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, USA, verfügbar unter: www.lrc.rpi.edu/programs/lightHealth/pdf/moreThanVision.pdf (21.08.2012)
- [Rea11] Rea, M. S.: „Sustainable Lighting: Let’s Talk about Value“, Proceedings of CISBAT 2011, Daylighting: architecture and lighting design, Routledge, New York, 2011
- [Ric51] Rice, S.O.: „Reflection of electromagnetic waves from slightly rough surfaces“, Communications on Pure and Applied Mathematics, Vol. 4, No. 2-3, 1951, pp. 351-378
- [Roe04] Römhild, T., Jentsch, M.: „Holographic Optical Elements“, TU Wismar, Fachbereich Architektur, 2004

- [Ros90] Rosen, L. N., et. al.: „Prevalence of seasonal affective disorder at four latitudes“, *Psychiatry Research*, Vol. 31, No. 2, 1990, pp. 131-144
- [Sch06] Schuster, H.: *Tageslichtsysteme im Spiegel der Nutzer – Zur Nutzerakzeptanz von Sonnenschutz- und Lichtlenksystemen in Büroräumen*, (Dissertation TU Dortmund), 2006
- [Sch11] Schröder, S., et. al.: „Modeling of light scattering in different regimes of surface roughness“, *Optics Express*, Vol. 19, No. 10, 2011
- [SGG06] Produktbeschreibung von Saint-Gobain Glas: „SGG LUMITOP“, 2006, verfügbar unter: uk.saint-gobain-glass.com/upload/files/sgg_lumitop_.pdf (26.09.2012)
- [Sha09] Shaw, K.: „Effective energy-saving strategies for lighting design“, in *Professional Lighting Design Convention – PLDC*, Berlin, 31.10.2009
- [Sto01] Stojanoff, C. G.: „Langzeituntersuchung von holographischen Konzentratoren unter Realbedingungen“, Abschlussbericht zu Projekt Nr. 263 501 99, RWTH Aachen, 2001
- [Sun12] Sun-Tec Swiss United Technologies LTD.: „Technical Datasheet 2012“, 2012, verfügbar unter: www.sun-tec.ch/ledfilm/index.html (14.08.2012)
- [Tre87] Tregenza, P. R.: „Subdivision of the sky hemisphere for luminance Measurements“, *Lighting and Technology*, Vol. 19, No. 1, 1987, pp. 13-14
- [Tre11] Tregenza P., Wilson M.: *Daylighting – Architecture and lighting design*, 1. Auflage, Routledge, Oxon, 2011
- [Tsa09] Tsao, C.-W., DeVoe, D. L.: Review „Bonding of thermoplastic polymer microfluidics“, *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 6, No. 1, 2009, pp. 1-16
- [Vel10] Velten, T., et. al.: „Investigations on reel-to-reel hot embossing“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Issue 47, 2010, pp. 73-80
- [Ver98] Vernold, C. L., Harvey, J. E.: “Modified Beckmann-Kirchoff Scattering Theory for Nonparaxial Angles“, *Proceedings of SPIE*, vol. 3426, San Diego, USA, July 1998, pp. 51-56
- [Vie09] Viereck, V., et. al.: „Großflächige Anwendung von optischen MEMS: Mikrospiegel-Arrays zur Tageslichtlenkung“, *Photonik* 2/2009, 2009, pp. 28-29

- [Wac98] Wacker-Chemie GmbH (Hrsg.): „Elastosil[®] RT 601“, Datenblatt, München, 1998
- [Wac00] Wacker-Chemie GmbH (Hrsg.): „Wacker RTV-2 Siliconkautschuk: Verarbeitung“, Verarbeitungsdatenblatt, München, 2000
- [Wag04] Wagner, D., et. al.: „Holographic Optical Elements (HOE) for High Efficiency Illumination, Solar Control and Photovoltaic Power in Buildings – Final Report“, EU - Contract No.: ENK6-CT-2000-00327, Brussels, 2004
- [Wor08] Worgull, M., et. al.: „Modeling of large area hot embossing“, *Microsystem Technologies*, Issue 14, 2008, pp. 1061-1066
- [Wor09] Worgull, M.: *Hot Embossing: theory and technology of microreplication*, Oxford, William Andrew (Elsevier Science), 2009

9.2 Liste der eigenen Veröffentlichungen

- [Kla09] Klammt, S., Müller, H., Neyer, A.: „Advanced Daylighting by Microstructured Components“, in Professional Lighting Design Convention – PLDC, Berlin, 30.10.2009
- [Kla11] Klammt, S., Müller, H., Neyer, A.: „Redirection of Sunlight by Microstructured Components“, in Cleantech for Sustainable Buildings – CISBAT, Lausanne (Schweiz), 15.09.2011
- [Kla12a] Klammt, S., Müller, H., Neyer, A.: „Redirection of sunlight by microstructured components – Simulation, fabrication and experimental results“, Solar Energy, Vol. 86, 2012, pp. 1660-1666
- [Kla12b] Klammt, S., Müller, H., Neyer, A.: „Microoptics for Efficient Redirection of Sunlight“, Applied Optics, Vol. 51, No. 12, 2012, pp. 2051-2056
- [Kla12c] Klammt, S., Müller, H., Neyer, A.: „Mikrostrukturiertes Tageslichtlenk-system mit hoher Effizienz“, in LICHT 2012, Berlin 14.09.2012
- [Mue10] Müller, H., Klammt, S., Neyer, A.: „Advanced Daylighting by Microstructured Components“, in World Renewable Energy Congress XI-WREC XI, Abu Dhabi 28.09.2010
- [Mue11] Müller, H., Klammt, S., Neyer, A.: „Detailing Daylighting and Solar Control of Windows“, in 10th international detail design in architecture conference - dda10, Istanbul 27+28.10.2011

A Übersicht über Goniophotometer

Im Rahmen eines IEA-Projekts (International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programme, SHCP Task 21) wurden 1999 weltweite Vergleichsmessungen an Goniophotometern durchgeführt [IEA99]. An dieser Untersuchung waren das Institut für Lichttechnik der Technischen Universität Berlin (TUB), das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) und das Solar Energy and Building Physics Laboratory des Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne (LESO-EPFL) beteiligt.

In Bild A.1 ist das Goniophotometer des LESO-EPFL zu sehen. Es hat eine raumfüllende Größe – allein die Hauptplattform (a) hat einen Durchmesser von rund 3 m. Die Positionen von Probe, Detektor-Kamera und Streuschirm sind markiert.

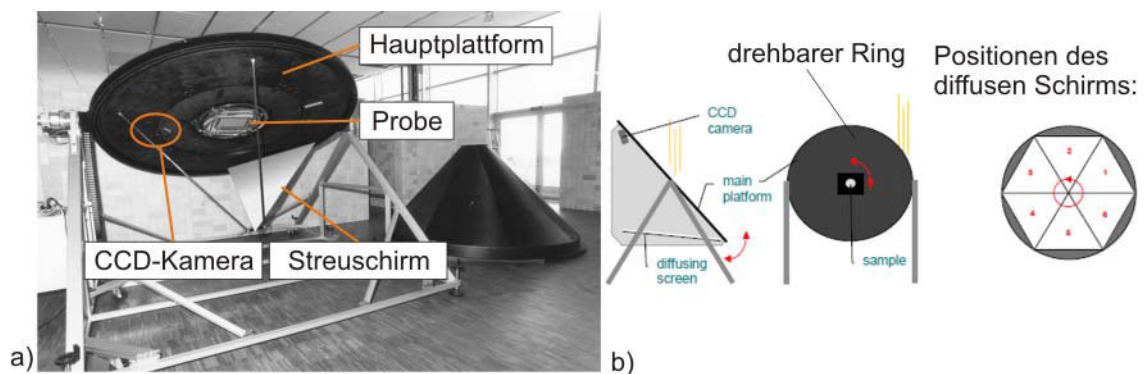


Bild A.1: Das Goniophotometer des LESO-EPFL: eine CCD-Kamera erfasst die Lichtverteilung auf einem diffusen Schirm, woraus eine Lichtverteilung berechnet wird (Bilder erstellt in Anlehnung an [IEA99]).

Das am LESO-EPFL eingesetzte Goniophotometer wurde im Rahmen einer Dissertation entwickelt [And04]. Die zu untersuchende Probe wird in eine Öffnung in der Mitte der lichtundurchlässigen Hauptplattform eingespannt und von oben beleuchtet¹. Der die Probe umgebende, ringförmige Teil der Hauptplattform kann um den Probenmittelpunkt gedreht werden. An diesem sind ein dreieckiger, diffuser Schirm, der etwa ein Sechstel des Halbraums einnimmt, und eine CCD-Kamera befestigt. Die Kamera fotografiert die Lichtverteilung auf dem Schirm. Anhand der Bilddaten wird die räumliche Lichtverteilung berechnet. Anschließend wird der Ring um 60° gedreht und eine weitere Aufnahme gemacht. Somit kann mit sechs Fotos die gesamte Lichtverteilung im Halbraum unterhalb der Scheibe erfasst werden (siehe (b)). Die Lichtverteilung wird mit einer

¹ Leistung des Scheinwerfers: 2,5 kW.

Auflösung von 5° ermittelt. Andere Lichteinfallswinkel werden durch Drehen von Probe und Hauptplattform eingestellt.

Bild A.2 zeigt die Aufbauten der TU Berlin (a) [IEA95] und des ISE (b) [Api95]. Beide Geräte sind jeweils rund 3 m hoch und unterscheiden sich hauptsächlich in der Anordnung von Lichtquelle, Probe und Detektor, verwenden aber ein gemeinsames Messprinzip: Eine variabel einstellbare Lichtquelle beleuchtet die Probe und erzeugt eine Lichtverteilung. Diese wird von einem Photodetektor erfasst, indem schrittweise der gesamte Halbraum hinter der Probe gescannt wird. In Abhängigkeit von der Auflösung der Detektion dauert ein Scan des Halbraums mehrere Stunden. Zur Bewertung eines Tageslichtsystems ist die Messung vieler Sonnenstände erforderlich. Die Wechsel der Lichteinfälle zwischen den einzelnen Scans erfolgt manuell. So benötigt eine komplette Messung eines Systems mehrere Tage.

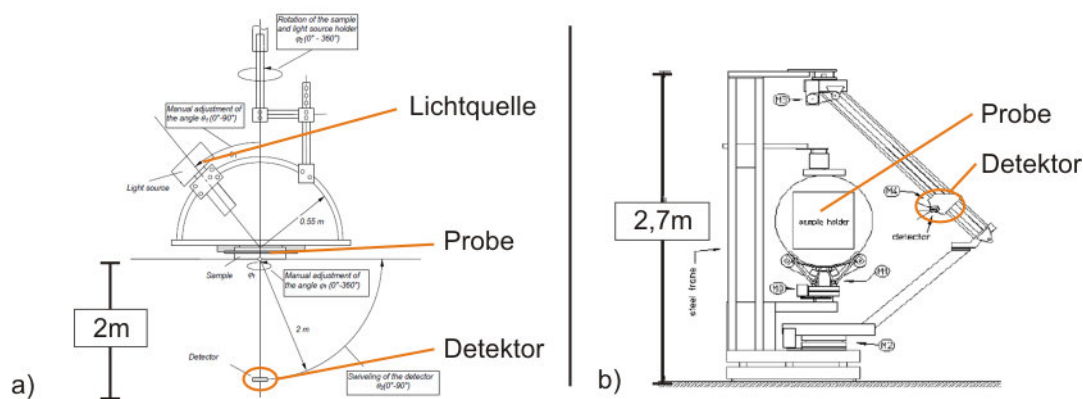


Bild A.2: Goniophotometer der TU Berlin (a) und des Fraunhofer ISE (b): Die Lichtverteilung wird jeweils mit einem Photodetektor gescannt (Bilder erstellt in Anlehnung an [IEA99]).

Mit den unterschiedlichen Messgeräten wurden Vergleichsmessungen durchgeführt. Trotz gleicher Proben unterschieden sich die gemessenen Ergebnisse um bis zu 10% [IEA99]. Am LESO-EPFL wurden die Lichtverteilungen für lichtlenkende Jalousien simuliert und goniometrisch gemessen. Ein Abgleich zwischen den Ergebnissen ergab, dass sich die Werte um bis zu $12,5\%$ unterschieden [And06]. Das zeigt, dass selbst mit Großgeräten ausgestattete und auf Lichttechnik spezialisierte Einrichtungen nicht vollkommen belastbare Werte generieren können. Für die selbst durchgeführten Messungen kann daher nicht der Anspruch erhoben werden zu 100% zuverlässige Resultate zu erzeugen. Es geht vielmehr darum, die eigenen Simulationsergebnisse qualitativ mit Messungen zu überprüfen.

Mittlerweile sind aus den oben beschriebenen Goniophotometern Weiterentwicklungen entstanden. Ein Nachfolgemodell des ISE-Messaufbaus arbeitet ebenfalls auf Scanbasis und ist nun kommerziell verfügbar [Api07]. Mit dem sogenannten „Heliodome“ wurde

vom LESO-EFPL ein weiteres Gerät auf Videobasis vorgestellt [And10]. Von diesen Geräten liegen keine Daten über ihre Zuverlässigkeit vor.

B Externe Messungen

Um unabhängige Messergebnisse zu erhalten, wurden im Deutschen Institut für Angewandte Lichttechnik (DIAL) in Lüdenscheid Messungen an den Tageslichtsystemen in Auftrag gegeben. Es wurde die Gesamttransmission und die Lichtverteilung unter drei verschiedenen Lichteinfällen für ein Lumitop-System und ein mikrostrukturiertes System bestimmt.

B.1 Transmissionsgrad τ [%]

Die Messung des Transmissionsgrads τ [%] erfolgte nach DIN 5036-3:1979-11 [DIN79] und wurde mit einer Normlichtquelle vom Typ D 65 unter den Einfallswinkeln 0° und 45° durchgeführt.

Die Messung wird so durchgeführt, dass eine Lichtquelle, die ein dem Tageslicht ähnlichen Spektrum aufweist (deshalb Typ D 65), in eine Ulbricht-Kugel (Durchmesser hier: 1,25 m) hineinleuchtet, wie in Bild B.1 zu sehen. In der Kugel wird das Licht diffus gestreut und mit einem Fotodetektor ein Referenzwert des Lichtstroms gemessen. Anschließend wird das zu untersuchende System vor die Öffnung der Ulbricht-Kugel platziert, wodurch sich der gemessene Lichtstrom reduziert. Der Transmissionsgrad τ [%] ist das Verhältnis zwischen Messwert mit System und dem Referenzwert. Neben der senkrechten Beleuchtung (Einfallswinkel 0°) wurde auch der Transmissionsgrad für $\theta_l = 45^\circ$ bestimmt.

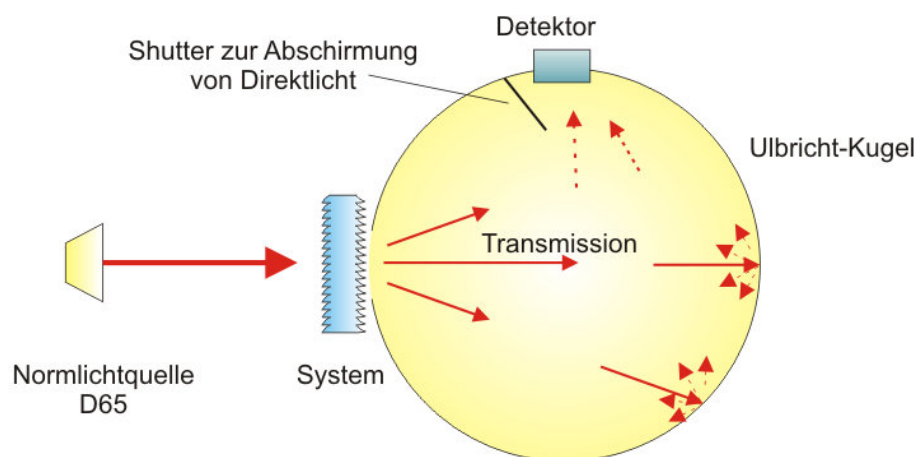


Bild B.1: Messprinzip zur Ermittlung des Transmissionsgrads τ [%]: Der Detektor bestimmt den Lichtstrom mit und ohne System. Der entsprechende Quotient ergibt τ [%].

Messobjekte waren ein mikrostrukturiertes Basissystem aus PMMA ohne Verglasung und ein Lumitop-Demonstrator inklusive Verglasung. Die Scheibe auf der Rauminnen-

seite wies eine sinusförmige Profilierung auf, die zur azimuthalen Aufweitung des Lichts dient. Bei dem Lumitop-Demonstrator handelt es sich um ein weiteres System, welches nicht in Kapitel 7 untersucht wurde. Die ermittelten Ergebnisse sind in Tabelle B.1 zu finden.

Tabelle B.1: Transmissionsgrad τ [%] für das mikrostrukturierte Basissystem aus PMMA (ohne Verglasung) und für Lumitop (mit Verglasung).

	Mikrosystem	Lumitop
$\tau_{D65, 0^\circ}$	79,47 %	43,08 %
$\tau_{D65, 45^\circ}$	78,13 %	47,22 %

Durch den Unterschied hinsichtlich der Verglasung sind die Werte nicht direkt vergleichbar. Die Messwerte unterscheiden sich allerdings so erheblich (Mikrosystem: $\tau \approx 80$ %, Lumitop: $\tau \approx 45$ %), dass dies nicht allein auf die Verglasung zurückgeführt werden kann. Deren Einfluss liegt im Bereich kleiner 20 %. Somit ermöglicht das lichtlenkende Element des mikrostrukturierten Systems eine höhere Lichttransmission als die Lumitop-Stabprofile.

Dieses Ergebnis deckt sich mit den selbst durchgeführten Simulationen und Messungen.

B.2 Lichtverteilungskurven

Mit einem Leuchtenwender-Goniophotometer (siehe Bild B.2) wurden bei DIAL ebenfalls die Lichtverteilungen der beiden Proben bestimmt. Üblicherweise wird mit diesem Goniophotometer die Abstrahlungscharakteristik von Lichtquellen untersucht. Da die Proben jedoch keine eigene Lichtquelle besitzen, wurde eine Messbox angefertigt, in der ein Projektionsscheinwerfer das Lichtlenksystem unter einem definierten und verstellbaren Winkel θ_l beleuchtet. Es wurden die Verteilungen für $\theta_l = 30^\circ$, 45° und 60° gemessen.

Das Schema des Messaufbaus ist in Bild B.2 dargestellt. Die von Scheinwerfer und Lichtlenksystem erzeugte Lichtverteilung trifft nach einer Messstrecke von 12 m auf einen Detektor. Dieser erfasst die Lichtstärke in einem Raumwinkel mit einem Öffnungswinkel von 5° . Über einen starren Spiegel wird das Licht in die Horizontale gelenkt. Nur so ist es möglich, die lange Strecke zu messen. Da der gesamte Halbraum unter der Leuchte vermessen werden soll und der Detektor nicht auf einer Halbkugel mit einem Radius von 12 m bewegt werden kann, wird die Leuchte selbst gedreht. Ein Roboterarm rotiert und schwenkt die Leuchte, sodass die gesamte Lichtverteilung Ebene für Ebene (die sogenannten C-Ebenen) vom Detektor erfasst wird.

Der als Lichtquelle genutzte Projektionsscheinwerfer vom Typ „mini Profile 200 mm“ der Firma Spotlight wurde von DIAL zur Verfügung gestellt. Er wurde unter den Kriterien einer möglichst kompakten Bauweise, bei gleichzeitig niedrigem Lichtöffnungswinkel und hoher Helligkeit ausgewählt. Er verfügt über eine Halogenlampe mit einer Leistung von 300 W und einem Öffnungswinkel von 20° . Leider ist er mit diesen Werten nicht mit direktem Sonnenlicht oder dem Laser, der selbst durchgeführten, goniometrischen Messungen, vergleichbar.

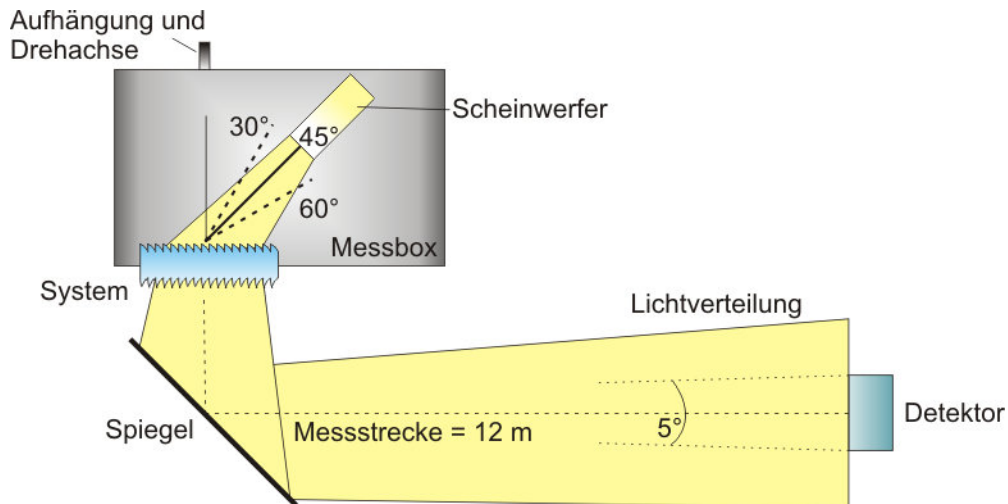


Bild B.2: Aufbau des Leuchtenwender-Goniophotometers bei DIAL: Detektor und Spiegel sind starr. Ein Roboterarm dreht die Lichtquelle so, dass der gesamte Halbraum unter dem System gemessen wird.

Bild B.3 verdeutlicht das Koordinatensystem, das den Messungen zugrunde liegt: Unterhalb der Messbox stehen die sogenannten C-Ebenen (hier C0, C90, C180 und C270), die senkrecht zu ihr stehen. Jede einzelne Ebene wird dann durch Kippen der Box von 0° bis 90° vermessen. Anschließend wird die Messbox rotiert und die nächste C-Ebene gemessen.

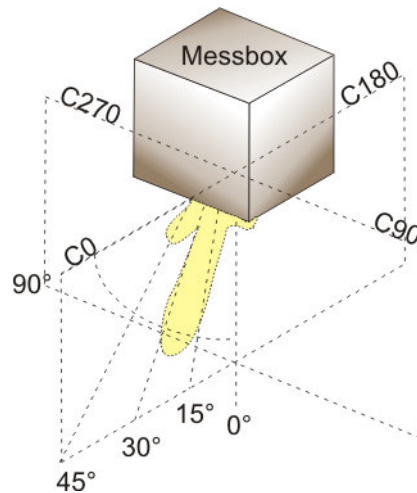


Bild B.3: Die Lichtverteilung unter der Messbox wird in sogenannte C-Ebenen unterteilt.

Insgesamt wurden bei DIAL die Ebenen von C0 bis C180 in Schritten von $2,5^\circ$ vermessen. Der Raum von C182,5 bis C357,5 ist symmetrisch zum Raum jenseits der C0-C180-Ebene, also der Symmetrieachse.

Die Betrachtung der Lichtstärkeverteilung soll im Folgenden nicht für alle C-Ebenen erfolgen, stattdessen wird ein Querschnitt durch die C0- und die C180-Ebene gezogen. Damit ergeben sich die Kurven aus Bild B.4.

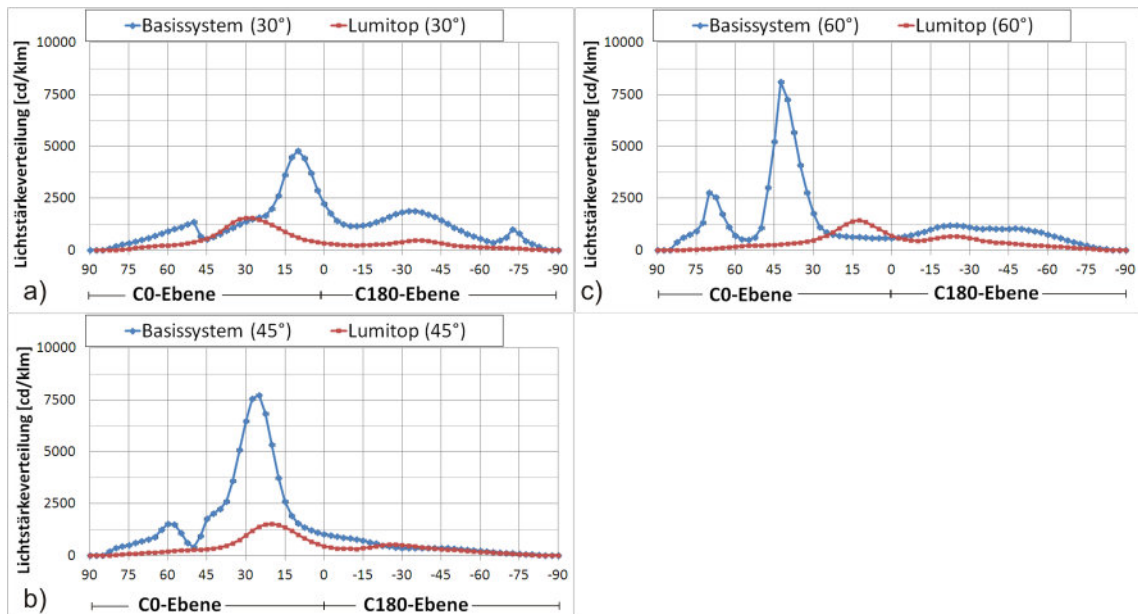


Bild B.4: Von DIAL gemessene Lichtstärkeverteilung für das Basissystem und Lumitop. Dargestellt sind die C0 und die C180-Ebene für den Lichteinfall des Scheinwerfers unter $\theta_1 = 30^\circ$, 45° und 60° . Hinweis: Diese Kurven sind **nicht** mit den übrigen Lichtverteilungskurven vergleichbar.

Trotz der optischen Ähnlichkeit kann kein direkter Vergleich mit den anderen Lichtverteilungskurven dieser Arbeit gemacht werden, da hier nicht die gesamte transmittierte Strahlungsleistung in das Ergebnis einfließt, sondern nur ein Querschnitt durch die Lichtverteilung gezogen wird. Das ist auch der Grund für den großen Unterschied zwischen Lumitop und dem Mikrosystem. Die sinusförmige Scheibe der Lumitopverglasung verteilt das transmittierte Licht azimuthal, wodurch der transmittierte Lichtkegel insgesamt breiter wird. Dadurch fällt viel Licht außerhalb der C0-C180 Ebene, die sich azimuthal senkrecht zum Lichtlenksystem befindet, und wird in diesem Diagramm nicht erfasst.

Die hier genutzte Einheit ist [cd/klm] (Candela je Kilolumen), womit sich üblicherweise Rückschlüsse auf die Helligkeit an einem Ort ziehen lassen, wenn eine bestimmte Leuchte eingebaut wird. Eine Leuchte mit einem Lichtstrom 1000 lm hätte an der C0-Ebene unter einem Winkel von 55° eine Lichtstärke von $x\text{ cd}$. Für ein Tageslichtlenksystem ist dieser Zusammenhang natürlich nicht so einfach zu ermitteln, da der Lichtstrom nicht konstant ist.

Bei der Betrachtung der gezeigten Lichtverteilungen zeigt sich, dass alle Peaks im Bereich der C0-Ebene liegen. Somit wurde eine eindeutige Lichtlenkung nach oben nachgewiesen. Weiterhin ist interessant, dass die Diagramme nahelegen, dass das Licht insgesamt tiefer in den Raum gelenkt wird als erwartet, was sich vor allem bei $\theta_l = 45^\circ$ zeigt. Das könnte anteilig auf den Scheinwerfer zurückführbar sein, der das Lichtlenksystem – im Vergleich zu direktem Sonnenlicht oder zu einem Laser – mit Licht beleuchtet, welches stärker im Winkel aufgeweitet wurde.

Obwohl die bei DIAL durchgeführten Messungen mit den eigenen Messungen nicht direkt verglichen werden können, liefern sie losgelöst von den übrigen Betrachtungen das Ergebnis, dass insgesamt ein starker Lichtlenkeffekt beim Basissystem vorliegt. In qualitativer Hinsicht stützen sie also die eigenen Ergebnisse.