

Von Waitzische Beteiligungen GmbH
Theaterstraße 1, 34117 Kassel

**Verbesserte Tageslichtnutzung in Gebäuden durch großflächige
Anordnungen von mikro- und nanoskaligen Spiegeln in
Fensterflächen (aktive Fenster)**

**gefördert durch die
Deutsche Bundesstiftung Umwelt
AZ 23717**

Abschlussbericht

Partner: *FG Rationelle Energiewandlung (IEE), Universität Kassel
Institut für Nanostrukturtechnologie und Analytik (INA),
Universität Kassel*

Verfasser: *Dipl. Phys. Volker Viereck
Dipl.-Ing. Alexander Schwank
Dipl.-Ing. Ulrich Neumann*

Kassel, 26.03.2009

Zusammenfassung:

Mikrospiegelanordnungen in Fensterflächen zur großflächigen Umlenkung von Tageslicht sollen künftig dazu eingesetzt werden, eine signifikant verbesserte Helligkeitsverteilung in Innenräumen zu erreichen. Die Mikrospiegelmodule werden dabei zwischen den beiden Scheiben konventioneller Isolierverglasungen implementiert. Sie sollen zu einem reduzierten Kunstlichteinsatz während des Tages und einer gleichmäßigen Ausleuchtung von Räumen mit angenehmem „natürlichem“ Tageslicht führen. Gleichzeitig sollen diese Mikrospiegelanordnungen effektive Wärmeschutz- und Wärmeregulierungsfunktionen wahrnehmen. Durch das Anlegen einer elektrischen Steuerspannung können die Spiegel um nahezu 90° ausgelenkt werden. Dadurch ergibt sich eine steuerbare Transmission der Fenster.

Derartige „Aktive Fenster“ sind energiesparend, extrem langlebig und wartungsarm. Sie können sowohl im Hinblick auf den „Schutz stofflicher und energetischer Ressourcen“ als auch auf „Gesundheitsschutz und Behaglichkeit“ ein wichtiger Bestandteil nachhaltiger Gebäude- und Energiekonzepte im Sinne des Leitfadens „Nachhaltiges Bauen“ des BMVBW werden. Durch ihre einfache Nachrüstbarkeit und optische Unauffälligkeit sind sie besonders für Altbausanierungen im Bereich denkmalgeschützter Gebäude geeignet.

Das Projekt hat als Machbarkeitsstudie die Herstellung eines Demonstrators zum Ziel, der die Funktionalität der „Aktiven Fenster“ im Labormaßstab zeigen soll. Zu diesem Zweck sind Fertigungsprozesse für Mikrospiegelanordnungen eigens entworfen worden, die die folgenden Kriterien erfüllen sollen:

- Prozessierung auf einem transparenten Substratmaterial
- Einfacher Aufbau mit einem Minimum an mikrosystemtechnischen Prozessschritten
- Wahl solcher Prozessschritte, die eine prinzipielle Großflächigkeit für einen folgenden Industrietransfer erlauben.

Im vorliegenden Bericht wird zunächst der Aufbau der Mikrospiegelanordnungen von mikrosystemtechnologischer Seite ausführlich dokumentiert. Dies beinhaltet insbesondere das Design, den prinzipiellen Aufbau, die Dokumentation der technologischen Prozesse sowie theoretische Modellrechnungen zur elektrostatischen Aktuierbarkeit.

Danach werden in einer umweltlichen Betrachtung der Primärenergieeinsatz, die Treibhauswirkung des Systems bei seiner Herstellung, in der Nutzungsphase und dem Recycling bilanziert. Zudem sollten toxische Substanzen identifiziert werden. Die Ergebnisse werden denen eines existierenden, optimierten Makro-Jalousiesystems gegenübergestellt werden.

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	23717	Referat	21/0	Fördersumme	349.500,00 €
----	--------------	---------	-------------	-------------	---------------------

Antragstitel Verbesserte Tageslichtnutzung in Gebäuden durch großflächige Anordnungen von mikro- und nanoskaligen Spiegeln in Fensterflächen (aktive Fenster)

Stichworte Ökobau, energieeffizientes Bauen, Tageslichtlenkung

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
32 Monate	20.03.2006	31.12.2008	1

Zwischenberichte:	alle 6 Monate Kurzbericht		
Bewilligungsempfänger	Von Waitzische Beteiligungen GbR		
	Theaterstr. 1		
	34117 Kassel		
	Tel	0561/70798-0	
	Fax	0561/70798-44	
	Projektleitung		
	Dr. Friedrich von Waitz		
	Bearbeiter		
	Dr. Friedrich von Waitz		

Kooperationspartner Universität Kassel, Fachgebiet Technische Elektronik, Kassel
Universität Kassel, Fachgebiet Rationelle Energiewandlung, Kassel

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Mittels Mikrospiegelanordnungen in Fensterflächen zur großflächigen Umlenkung von Tageslicht kann eine signifikant verbesserte Helligkeitsverteilung in Innenräumen erreicht werden. Dies führt zu einem reduzierten Kunstlicheinsatz während des Tages und einer gleichmäßigen Ausleuchtung von Räumen mit angenehmem „natürlichem“ Tageslicht. Gleichzeitig nehmen diese Mikrospiegelanordnungen effektive Wärmeschutz- und Wärmeregulierungsfunktionen wahr. Die Mikrospiegelmodule werden dabei zwischen den beiden Scheiben konventioneller Isolierverglasungen implementiert. Derartige „Aktive Lichtlenkfenster“ sind energiesparend, extrem langlebig und wartungsarm. Sie können sowohl im Hinblick auf den „Schutz stofflicher und energetischer Ressourcen“ als auch auf „Gesundheitsschutz und Behaglichkeit“ ein wichtiger Bestandteil nachhaltiger Gebäude- und Energiekonzepte im Sinne des Leitfadens „Nachhaltiges Bauen“ des BMVBW werden. Durch ihre einfache Nachrüstbarkeit und optische Unauffälligkeit sind sie besonders für Altbausanierungen, auch für denkmalgeschützte Gebäude geeignet. Das Projekt hat als Machbarkeitsstudie die Herstellung eines Demonstrators im Labormaßstab zum Ziel. Dieser soll aus mehreren 6 x 6 cm² großen Modulen bestehen und die volle Funktionalität der „Aktiven Fenster“ bereits umfassen. Das Projekt soll damit die Basis für einen Industrietransfer bilden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Die Machbarkeitsstudie besteht im wesentlichen aus drei Aufgabengebieten. Der eine befasst sich mit der rein technologischen Realisierung der Mikrospiegelmodule und wird im wesentlichen vom „Institut für Nanostrukturtechnologie und Analytik“ durchgeführt. Ein zweiter Komplex befasst sich mit Simulationsrechnungen über die „aktiven Fenster“, sowohl vom Standpunkt der Simulation von Beleuchtungsszenarien, vom Aspekt des Energiemanagements in Gebäuden als auch vom Aspekt des Designs und der Gestaltung und ist Aufgabe des „Fachgebietes Rationelle Energiewandlung“. Ein dritter Teil wird die „Aktiven Fenster“ von der Anwendungsseite her evaluieren und mitentwickeln, hier ist vor allem die Möglichkeit einer Implementierung in gängige Fenstertechnologien, eine Studie zu Marktchancen sowie ein „Life Cycle Assessment“ zu nennen. Dieser Teil ist Aufgabe der „Von Waitzischen Beteiligungen GbR“.

Die Machbarkeitsstudie besteht zu einem bedeutenden in der Realisierung der mikrosystemtechnischen Prozessschritte, in dem insbesondere die Anwendbarkeit von plasmagestützten Depositions- und Ätzprozessen. Die zu verwendenden Prozessschritte werden dabei derart gewählt, dass Prozesse verwendet werden, die in einer ähnlichen Form in einem der drei Industriezweige Solarzellenherstellung, Glasbeschichtungen oder Displayherstellung bereits verwendet werden. Es entfällt somit die Notwendigkeit, Maschinen oder Prozesse für den Industrietransfer von Grund auf neu zu entwickeln. Insbesondere sollen die Verfahren Magnetron-Sputtern, PECVD, RIE und thermisches Aufdampfen verwendet werden. Ein Ersetzen von konventioneller Lithographie durch ein kostengünstiges Mikro-Imprint-Verfahren wird ebenfalls angestrebt. Als Materialien werden hauptsächlich kostengünstige Dielektrika sowie Einfachmetallschichten verwendet.

Die rechtliche Absicherung der Technologien ist durch zwei Patentanmeldungen der Universität Kassel ([DE000010358967A1](#), [DE000010358812A1](#)) gewährleistet.

Ergebnisse und Diskussion

Es wurde ein 6cm x 6cm großes Modul entworfen, bestehend aus 9 Untersegmenten, die, einzeln ansteuerbar, die Funktionalität der „Aktiven Fenster“ demonstrieren sollen. Dazu wurden mikrosystemtechnische Prozessschritte entwickelt, unter Verwendung der Materialien Glas, Indium-Zinn-Oxid, Siliziumoxid, Siliziumnitrid und Aluminium, sowie der Verfahren Ionenstrahlsputterdeposition, plasmaunterstützte Gasphasendeposition und Elektronenstrahlverdampfen. Als Mikrostrukturierungsverfahren wurde Photolithographie eingesetzt. Alle eingesetzten Materialien und Verfahren erlauben einen späteren Transfer auf Industrieanlagen.

Die nahezu fehlerfreie Aktuierung der 2cm x 2cm großen Untersegmente des Demonstratormoduls wurde gezeigt. Die Segmente wiesen dabei eine „Pixelfehlerdichte“ von unter 2% auf. Das geometrische Verhältnis zwischen offenem und geschlossenem Zustand (Tastverhältnis) liegt im aktuellen Design im offenen Zustand bei 34% Bedeckungsgrad gegenüber 95% Bedeckungsgrad im geschlossenem Zustand. Die Leistung zum Halten der Spiegel in einer definierten Position beträgt $0,1\text{W}/\text{m}^2$. Die Spannung, um die Spiegel voll zu aktuieren, beträgt rund 80V. Die „Pixelfehlerdichte“ von etwa 2 Prozent sollte noch verbessert werden. Die Aktuierungs- und Lebensdaueruntersuchungen haben gezeigt, dass die Mikrospiegelelemente sowohl einer dauernden Bewegung über mehrere Tage als auch einer hochfrequenten Bewegung bis zu 2kHz standhalten.

Die energetische und ökologische Betrachtung zeigt für die Herstellungsphase deutliche Vorteile für das Mikrospiegelsystem (PEE: 3325 MJ bzw. 924 kWh) gegenüber dem Jalousiesystem „Genius“ (PEE: 4503 MJ bzw. 1251 kWh). Auch die Treibhauswirkungen liegen mit 226 kg CO₂-Äquivalent um ca. 19 % unter denen der Jalousieherstellung (269 kg CO₂-Äquivalent). Die Umweltwirkungen der Herstellung des Mikrospiegel-Systems resultieren hauptsächlich aus dem elektrischen Energiebedarf. Es wurden keine toxischen Substanzen bei der Herstellung der Systeme identifiziert. Ein Recycling des Mikrospiegel-Systems ist wegen der geringen eingesetzten Materialmengen (Dünnschichten) nicht sinnvoll. Die Glasscheiben können beispielsweise bei der Herstellung von Dämmstoffen (u.a. Glaswolle) verwendet werden.

Während der Nutzungsdauer über einen Zeitraum von 25 Jahren werden in den betrachteten Sommerperioden über 4.700 kWh Primärenergie gegenüber der Makro-Jalousie eingespart. Das Mikrospiegel-System verursacht bei der gewählten Konfiguration einen um ca. 80 Prozent höheren Kühlenergiebedarf (5818 kWh). Allerdings wird dies durch einen geringeren Energiebedarf für die Beleuchtung überkompensiert (Mikrospiegel-System 7703 kWh gegenüber 14860 kWh für das Makro-Jalousiesystem). In der Gesamtbetrachtung macht der Energiebedarf für die elektrische Beleuchtung den größten Anteil aus. Die Untersuchung wurde mit einer statischen Winkeleinstellung für die Lamellen bzw. für die Mikrospiegel durchgeführt. Es zeigt sich, dass durch eine angepasste Regelung der Einstellwinkel noch erhebliches Energieeinsparpotenzial beim Mikrospiegel-System besteht, vor allem im Bereich der Beleuchtung.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

- **Teilnahme an nationalen und internationalen Tagungen:**
 - *Mikrosystemtechnik-Kongress 2007, Dresden (Poster)*
 - *3rd Shanghai International Nanotechnology Symposium 2007, Shanghai, China (Vortrag)*
 - *IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (2007), Hualien, Taiwan (Poster)*
 - *Impulsveranstaltung Nano Energie 2007, Hanau (Workshop)*
 - *Nanotechnologieforum Hessen 2007, Frankfurt / Main (eingeladener Vortrag)*
 - *Thüringer Grenz- und Oberflächentage 2008, Jena (Vortrag)*
 - *NanoEurope 2008, St.Gallen, Schweiz (Poster)*
 - *5th International IEEE Conference on Networked Sensing Systems (INSS) 2008, Kanazawa, Japan (eingeladener Vortrag)*
- *Auszeichnung mit dem European Grand Prix of Innovation Award 2006*
- *Teilnahme an der Woche der Umwelt 2007*
- *Berichterstattung: Zahlreiche Artikel in der lokalen und überregionalen Tagespresse sowie Fernsehbeiträge*
- *Titelbeitrag in den Hessen-Nanotech News 1/2007*
- *5-minütiger Fernsehbeitrag im Erfindermagazin „Einfach Genial“ des Mitteldeutschen Rundfunk 2007*
- *Ausgezeichneter Ort im Land der Ideen 2009*
- *Weitere Publikationen in Vorbereitung*

Fazit

Die Machbarkeit von Mikrospiegelmodulen einer Größe von 6cm x 6 cm im Labormaßstab unter Verwendung von „low-cost“-Materialien und Prozessen wurde gezeigt. Der optische Eindruck der Mikrospiegelanordnungen ist für eine künftige Anwendung im Sichtbereich geeignet. Die Aktuierungsspannung von rund 80V ist für die elektrostatische Aktuierung eines Mikrosystems vergleichsweise gering. Der Strom, um die Spiegel in einer definierten Position zu halten, hat mit aktuell 0,1W /m² bereits Energieeinsparpotential. Die entwickelten mikrosystemtechnologischen Prozesse sind in der jetzigen Form für einen Transfer auf Industrieanlagen geeignet.

Die vergleichende ökologische und energetische Bilanzierung hat ergeben, dass ein System aus derartigen Mikrospiegel-Modulen aufgebaut, in der Herstellungsphase geringere Umweltwirkungen verursacht und in der Nutzungsphase ein deutlich höheres Energieeinsparungspotenzial als das Vergleichssystem mit makroskopischen Lamellen hat.

Inhalt

1	Einleitung.....	6
2	Technologische Umsetzung.....	8
2.1	Beschreibung des Aufbaus der Mikrospiegelemente.....	8
2.2	Detaillierte Beschreibung der technologischen Prozessschritte	9
2.3	Alternative Prozesse	14
2.4	Beschreibung des Designs der Mikrospiegelemente	16
2.5	Theoretische Modellrechnungen	18
2.6	Aufbau eines Messplatzes	20
2.7	Dokumentation der fertiggestellten Mikrospiegelanordnungen	21
3	Energetische und ökologische Bewertung.....	24
3.1	Herstellungsphase.....	27
3.1.1	Fenstersystem mit Mikrospiegelarrays	27
3.1.2	Fenstersystem mit Makro-Verschattungssystem	28
3.1.3	Gegenüberstellung der Ergebnisse	29
3.2	Nutzungsphase.....	32
3.2.1	Analyse des Wärmeeintrags	32
3.2.2	Analyse der Ausleuchtung.....	39
3.3	Recycling.....	42
3.4	Ergebnisse in Wirkkategorien	42
4	Fazit	44
5	Anhang.....	46
5.1	Literatur	46
5.2	Öffentlichkeitsarbeit.....	49
5.3	Expertisen der Projektpartner	50
5.3.1	Institut für Nanostrukturtechnologie und Analytik (INA).....	50
5.3.2	Institut für Elektrische Energietechnik (IEE)	51
5.3.3	Von Waitzische Beteiligungen GmbH	52

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: <i>Visualisierung</i>	6
Abb. 2.1: <i>Schematische Zeichnung eines Mikrospiegelementes mit den wichtigsten funktionellen Elementen, links im geschlossenen, rechts im geöffneten Zustand</i>	8
Abb. 2.2: <i>Schematischer Schichtaufbau eines Mikrospiegelementes</i>	9
Abb. 2.3: <i>Das Substrat</i>	9
Abb. 2.4: <i>Die Elektrodenschicht</i>	10
Abb. 2.5: <i>Die Isolationsschicht</i>	10
Abb. 2.6: <i>Die Opferschicht</i>	11
Abb. 2.7: <i>Der Spiegelträger</i>	12
Abb. 2.8: <i>Die Spiegelflächen</i>	12
Abb. 2.9: <i>Die Kompensationsschicht</i>	13
Abb. 2.10: <i>Strukturierung der Spiegelschicht</i>	13
Abb. 2.11: <i>Entfernen der Opferschicht</i>	13
Abb. 2.12: <i>Schematisch Aufbau des Schichtsystems zur alternativen Prozessführung</i>	14
Abb. 2.13: <i>Links eine Gruppe von Mikrospiegeln, zu erkennen an ihren fast planaren Spiegelflächen, rechts eine Gruppe von Mikroshuttern, die eine halbrunde Form aufweisen</i>	16
Abb. 2.14: <i>REM-Aufnahme diverser Mikrospiegel mit verschiedenen Spiegelgeometrien</i>	17
Abb. 2.15: <i>REM-Aufnahme eines Mikrospiegels (links): Man erkennt zwei Kompensationsstreifen im Scharnierbereich (oben im Bild) sowie eine Falz am oberen Spiegelrand (unten). Der Spiegel selbst wirkt durch die Aufsicht von oben stark verkürzt. Man erkennt aber sehr gut die Ebenheit und die mechanische Spannungsfreiheit des Spiegels</i>	18
Abb. 2.16: <i>Darstellung der Auslenkung in Abhängigkeit zur Spiegelänge für diverse Spiegelgeometrien</i>	19
Abb. 2.17: <i>FEM-Simulation des Pull-in-Effekts: rechts ein Mikrospiegel kurz vor, links ein Mikrospiegel kurz nach dem Pull-in bei einem Grenzwinkel von 45°</i>	19
Abb. 2.18: <i>Aufbau eines Aktuationsmessplatzes bestehend aus einem Funktionsgenerator, einem Spannungsverstärker, Strom- und Spannungsmessgerät (links) sowie einer Vorrichtung mit mikrojustierbaren Nadelkontakten unter einem Mikroskop / Weisslichtinterferometer</i>	20
Abb. 2.19: <i>Segment aktuierbarer Mikrospiegelarrays (Mikroskop, Aufsicht), links: geschlossener (aktuierter) Zustand, rechts: offener Zustand</i>	21
Abb. 2.20: <i>Segment aktuierbarer Mikrospiegelarrays (Video-Capture) Links: geschlossener (aktuierter) Zustand, rechts: offener Zustand</i>	22
Abb. 2.21: <i>Durchsicht durch ein Mikrospiegel-Array (Design: Maskensatz 5), links auf Distanz, rechts im Kontakt mit einer unterliegenden Schrift</i>	22
Abb. 2.22: <i>Aufsicht auf ein fehlerfreies Mikrospiegelareal mit hohem geometrischem Tastverhältnis (34% offen zu 95% geschlossen)</i>	23
Abb. 2.23: <i>2cm x 2cm-Segment aktuierbarer Mikrospiegelarrays, bestehend aus rund 4000 Mikrospiegeln (Design: Maskensatz 5), Links: offener Zustand, rechts: geschlossener (aktuierter) Zustand</i>	23
Abb. 3.1: <i>Raumgeometrie, Lage der Leuchtmittel und Messpunkte für die Beleuchtungsstärke</i>	24
Abb. 3.2: <i>Querschnitt des Raums und Konfiguration der Verschattungssysteme Mikrospiegel und Warema Genius</i>	25

Abb. 3.3: Zusammenhang von Sonnenhöhe γ , Abstand der Mikrospiegel zur Raumdecke h , Ausleuchtungstiefe (z.B.: t_1, t_2) und Umlenkung der Lichtstrahlen an den Mikrospiegeln δ .	25
Abb. 3.4: Ausleuchtungstiefe an die Raumdecke in Abhängigkeit des Spiegelwinkels α ; Parameter: Sonnenhöhe γ ($0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$); Höhe des Spiegels h : 1 m.	26
Abb. 3.5: Genius-Lamellenform, in Radiance implementiert.	26
Abb. 3.6: Lichtlenk-Jalousie Typ E 80 Genius (Herst. Warema).	29
Abb. 3.7: Primärenergieeinsatz (PEI) und Treibhauspotenzial (GWP) der Mikrospiegel-Herstellung.	30
Abb. 3.8: Umweltwirkungen (PEI und GWP) der Herstellung beider Verschattungssysteme.	31
Abb. 3.9: Vereinfachter schematischer Aufbau der Mikrospiegel-Arrays mit Bezeichnungen: Schematischer Aufbau der Mikrospiegelarrays. Mirror Fixed (feststehender Spiegelteil), Mirror Moving (beweglicher planer Spiegelanteil), Mirror Bended (gebogener Spiegelanteil (Spiegelgelenk)).	32
Abb. 3.10: Veranschaulichung der Energieflüsse und Begriffe: Reflektionsgrad ρ , Absorptionsgrad α , Transmissionsgrad τ_e , sekundärer Wärmeabgabegrad q_i und Gesamtenergiedurchlassgrad g [WAG07].	33
Abb. 3.11: Schematische Aufteilung der Solarstrahlung auf eine geneigte Fläche [DUF06].	34
Abb. 3.12: Schematische geometrische Darstellung zweier Spiegelemente, der Fensterscheibe und der auftreffenden Solarstrahlung.	35
Abb. 3.13: Schematische Darstellung der relevanten Parameter und des Ersatzschaltbilds für den Wärmetransport.	37
Abb. 3.14: Winkelabhängiger Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) des Fenstersystems Warema Genius.	38
Abb. 3.15: Wärmeeintrag über die Vergleichsperiode (21. Juni-21. September) von verschiedenen Fenstersystemen. Verwendete Bezeichnungen: I_b : Direktstrahlung (Beam); $I_{d\ cs}$: Diffus-Circumsolar; $I_{d_{hz}}$: Diffus-Horizontal; I_r : Reflektierte Strahlung; $I_{iso\ 0-30^\circ}$: Diffus-Isotrope Strahlung aus dem Höhenwinkel $0-30^\circ$; $I_{iso\ 30-60^\circ}$ und $I_{iso\ 60-90^\circ}$ entsprechend.	38
Abb. 3.16: Zusammenhang zwischen Elektrischer Systemleistung von Leuchtstofflampe, Vorschalt- und EVG Gerät zum Lichtstrom der Lampe für ein typisches System [OSR00].	39
Abb. 3.17: Die Diagramme zeigen die Beleuchtungsstärke für das Mikrospiegel-Fenstersystem in den Raumbereichen A, B, C.	41
Abb. 3.18: Die Diagramme zeigen die Beleuchtungsstärke für das Makro-Jalousie System in den Raumbereichen A, B, C.	41
Abb. 3.19: Durchschnittlicher Täglicher Energiebedarf für die elektrische Beleuchtung nach Berechnungen mit Radiance.	42
Abb. 3.19: PEI und GWP der Verschattungssysteme über eine Nutzungsdauer von 25 Jahren (Betrachtungszeitraum: jeweils 21.06. – 21.09.)	43

1 Einleitung

Die meisten öffentlichen Gebäude in Deutschland werden lediglich während des Tages genutzt. Dennoch wird ein Großteil dieser Räume auch tagsüber mit künstlichem Licht beleuchtet, was einen beträchtlichen Teil der Gebäudekosten ausmacht. Darüber hinaus ist seit vielen Jahren bekannt und forschungsbasiert eindeutig belegt, dass ein mit Tageslicht ausgeleuchtetes Gebäude erheblich an Behaglichkeit für die Menschen in diesem Gebäude gewinnt.

Dennoch wird Tageslicht nur sehr ineffizient zur Raumausleuchtung verwendet. Denn die Nutzung von Tageslicht in typischen Räumen mit Fenstern an einer Seite des Raumes ist alles andere als optimal. Bei hohem Sonnenstand ist der Bereich unmittelbar hinter den Fenstern hell ausgeleuchtet, während andere Teile des Raumes relativ dunkel bleiben. Bei tiefem Sonnenstand kommt es zu unerwünschten Blendeffekten. Auch bei diffusem Tageslicht (verdeckte Sonne) existiert eine stark winkelabhängige Verteilung der Lichtintensität am Himmel, so dass auch hier nur der Bereich hinter den Fenstern ideal ausgeleuchtet wird, da die maximale Lichtintensität jahreszeitunabhängig im Zenit liegt.

Auf der anderen Seite kommt aber ein maßgeblicher Wärmeeintrag in Gebäude durch die Sonneneinstrahlung durch Gebäudefenster zustande. Klimatisierungskosten stellen ohnehin den dominierenden Energiekostenanteil dar. Es wird also ein Konzept benötigt, welches gleichzeitig Wärme- und Blendschutzaufgaben übernimmt und Tageslicht zu Beleuchtungszwecken in die Tiefe des Raumes lenken kann. Das vorgestellte Konzept sieht vor, Mikrospiegelanordnungen großflächig in Gebäudefenster zu implementieren. Diese Mikrospiegelanordnungen sind elektrisch ansteuerbar und ermöglichen es, die Mikrospiegel gruppenweise in ihrer Ausrichtung zu variieren und somit Tageslicht flexibel, abhängig vom Sonnenstand und der Gebäude- bzw. Raumsituation gezielt umzulenken. Abb. 1.1 visualisiert die Funktionalität von „aktiven Fenstern“: Der Arbeitsplatz ist abgeschattet, das einfallende Licht dient aber zur indirekten Beleuchtung. Ein Segment im Oberlicht rückt die Pflanze ins rechte Licht.

So können diese Spiegelelemente das Tageslicht gezielt tief in den Raum lenken, z.B. in Form einer indirekten Beleuchtung an eine weiße Zimmerdecke. Gleichzeitig werden schon durch diese Art der Lichtumlenkung Blendeffekte reduziert. Man sieht, dass die Funktionalität weiterhin Blend- und Wärmeschutzfunktionen durch partielle Abschattungen des Fensters umfasst. Die Größe der Mikrostrukturen ist so gewählt, dass die Spiegelelemente vom Auge als Einzelkörper



nicht wahrgenommen werden können; es ergibt sich, je nach Stellung der Spiegel, der optische Eindruck einer mehr oder weniger starken Tönung. Auf den zusätzlichen Einsatz von konventionellen Jalousien kann beim Einsatz von „aktiven Fenstern“ verzichtet werden, da diese deren Funktionalitäten einschließen.

Abb. 1.1: *Visualisierung.*

Der Einsatz von mikromechanischen Strukturen bietet darüber hinaus den erheblichen Vorteil, dass aktive Fenster über ihre gesamte Lebensdauer praktisch verschleiß- und wartungsfrei sind (Mikrostrukturen zeigen nahezu keine mechanischen Verschleißerscheinungen!) [2]. Gleichzeitig

ist das Konzept „aktive Fenster“ architektonisch leicht umsetzbar und sogar problemlos im Nachhinein in bestehende Gebäude zu integrieren.

Es werden sich also durch den Einsatz von „aktiven Fenstern“ Energie- und Kostenersparnisse bei gleichzeitigem Funktionalitätsgewinn realisieren lassen. Zusammenfassend ergeben sich folgende Vorteile:

- Tageslichtlenkung in den Raum, dadurch verminderter Kunstlichteinsatz
- Tageslichteinsatz steigert Behaglichkeit
- Wärmeregulierungsfunktionen, dadurch verminderter Klimatisierungsbedarf
- Blendschutz, daher keine zusätzlichen Jalousien erforderlich
- extrem geringer Eigenenergieverbrauch, aber hohes Energieeinsparungspotenzial
- ressourcenschonend, damit nachhaltig umweltentlastend
- einfach und kostengünstig im Aufbau, wartungsarm und langlebig
- einfach aus- oder nachrüstbar, damit in kurzer Zeit kostensparend
- großes Einsatzgebiet vom Privathaushalt bis zur vollverglasteten Gebäudefassade

Die aktiven Fenster sollen in ihrer endgültigen Form aus Einzelmodulen von einer Größe von je etwa einem sechzehntel Quadratmeter bestehen, die, randseitig elektrisch und mechanisch verbunden, im Scheibenzwischenraum einer konventionellen Doppelverglasung untergebracht werden. Die Ansteuerlektronik für die Module sowie eine Sensorik für die Analyse der Beleuchtungssituation wird außerhalb der Fenster positioniert werden.

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurden elektrostatische Mikrospiegelmodule im Labormaßstab einer Größe von 6cm x 6cm hergestellt. Als Zielvorgabe sollten dabei nur solche Prozesse verwendet werden, die in einer ähnlichen Form in einem der drei Industriezweige Solarzellenherstellung, Glasbeschichtungen oder Displayherstellung bereits verwendet werden. Die Prozessierung soll auf einem transparenten Substratmaterial, bevorzugt auf Glas erfolgen. Die Dokumentation der entwickelten Prozesse wird detailliert in Kapitel 2.1 geschildert. Eine weitere Zielvorgabe ist die elektrostatische Aktuierbarkeit der Spiegelflächen von einer Position nahe der Orthogonalen bis in die Fensterebene hinein. Dies bedingt neue Designansätze, die in Kapitel 2.4 aufgezeigt werden. Die mit diesen Methoden fertiggestellten Mikrospiegelanordnungen zeigt Kapitel 2.7.

In einer energetischen und ökologischen Betrachtung werden in Kapitel 3 der Primärenergieeinsatz und die Treibhauswirkung des Mikrospiegelsystems über seine Lebensdauer von 25 Jahren bilanziert und mit denen eines optimierten Jalousiensystems verglichen: Neben der Ermittlung der Umweltwirkungen bei der Herstellung und dem Recycling werden für die Nutzungsphase die Verschattungseigenschaften und die Tageslichtlenkung während der Sommerperioden analysiert und der Elektrizitätsbedarf für die reduzierte Raum-Kühllast und den zusätzlichen Kunstlichteinsatz ermittelt.

2 Technologische Umsetzung

2.1 Beschreibung des Aufbaus der Mikrospiegelemente

Die Mikrospiegelanordnungen bestehen aus dicht aneinander angeordneten einzelnen Mikrospiegelementen, die in Dünnschichttechnologie in Verbindung mit Verfahren der Mikrostrukturierung hergestellt werden.

Das Schichtsystem für die Mikrospiegel wird in der Ebene in mehreren Einzelschichten deponiert (Surface Micromachining). Abb. 2.1 zeigt schematisch ein Mikrospiegelement im geschlossenen Zustand (links) und im geöffneten Zustand (rechts). Es besteht wesentlich aus dem Siliziumoxinitrid-Spiegelträger und der Spiegelschicht aus Aluminium. Als Substratmaterial dient Standard-Floatglas, auf das als transparente Gegenelektrode eine Schicht aus Indium-Zinn-Oxid (ITO) flächig aufgebracht ist.

Der Herstellungsprozess bedient sich einer Opferschichttechnologie mit einem „Self – Assembling-Schritt“. Durch eine definierte Gradientenverspannung im Spiegelträger stellen sich die Mikrospiegel nach dem Entfernen der Opferschicht selbständig auf. Eine verspannungskompensierende sog. Kompensationsschicht sorgt dafür, dass die Gradientenverspannung des Spiegelträgers nur im Scharnierbereich des Spiegels wirksam wird.

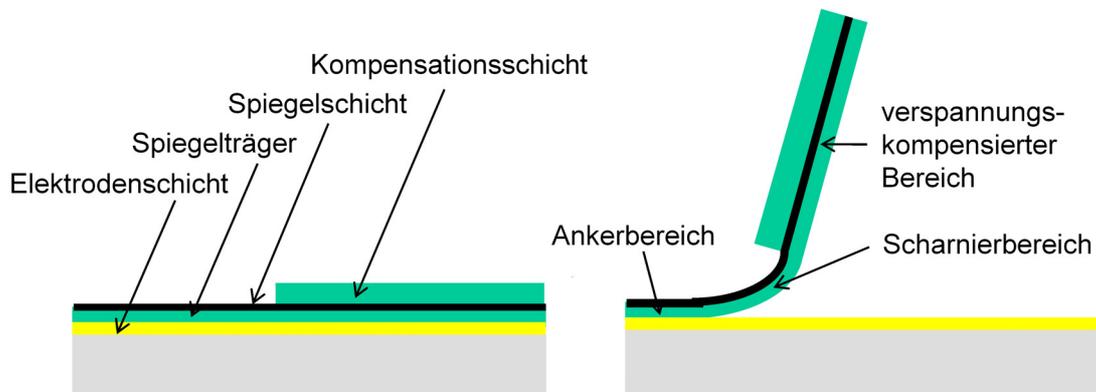


Abb. 2.1: Schematische Zeichnung eines Mikrospiegelementes mit den wichtigsten funktionellen Elementen, links im geschlossenen, rechts im geöffneten Zustand.

Durch Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen den Spiegelflächen und der flächigen unterliegenden ITO-Elektrode können die Spiegel in einem gewissen Winkelbereich bewegt oder auch ganz an das Substrat herangezogen werden.

Abb. 2.2 zeigt die Schichtstruktur eines Mikrospiegelementes. Der Herstellungsprozess kommt mit lediglich 5 Depositions- und drei Photolithographieschritten aus. Der Herstellungsprozess wird im folgenden Kapitel detailliert erörtert.

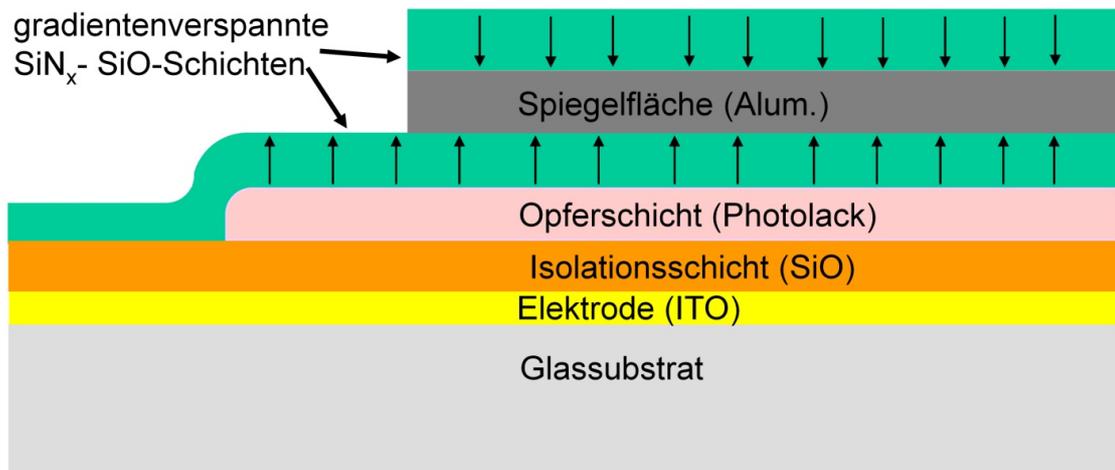


Abb. 2.2: Schematischer Schichtaufbau eines Mikrospiegelementes.

2.2 Detaillierte Beschreibung der technologischen Prozessschritte

Das Substrat



Abb. 2.3: Das Substrat.

Als Substratmaterial dient Standard-Floatglas. Diese wird von einem regionalen Glaser in derjenigen Qualität und Sauberkeit bezogen, die man auch bei einem späteren Produkt vorfinden würde. Die Gläser werden vor Ort zu handhabbaren Probengrößen von 7cm x 7 cm gespalten und entgratet. Zur Reinigung und Vorbehandlung werden die Substrate zunächst mit Stickstoff abgeblasen. Anschließend werden sie in einer Mischung aus Wasser und Geschirrspülmittel entfettet und mittels eines fusselfreien Papiertuches mechanisch gereinigt. Es folgt ein weiterer Reinigungsschritt mit Isopropanol, ebenfalls mechanisch durch Reiben mit einem Papiertuch unterstützt. Zum Abschluss erfolgt eine zehnminütige Behandlung mit einem Sauerstoffplasma bei hoher Leistung (250 W), um etwaige verbliebene organische Rückstände zu entfernen.

Die Elektrodenschicht



Abb. 2.4: Die Elektrodenschicht.

Die Gegenelektrode zu den Mikrosiegeln wird durch eine flächig aufgebraute Schicht aus Indium-Zinn-Oxid (ITO) gebildet. Schichten aus ITO haben die Eigenschaft, bei einer Schichtdicke unter 100nm eine hohe Transparenz (typisch >90%) im sichtbaren Spektralbereich bei gleichzeitig vergleichsweise geringem Flächenwiderstand (typisch 10 – 100Ohm/Square) auszuweisen.

Eine gängige Methode zur Deposition von ITO ist das Ionenstrahlsputterdepositionsverfahren (IBSD). Es ist dabei sowohl möglich, ein keramisches ITO-Target mit einem Inertgas (z.B. Argon, Xenon) zu sputtern, als auch ein metallisches Target mittels Sauerstoffionen zu sputtern und so das Oxid erst während des Sputterprozesses zu bilden. Mit dem zweitgenannten Verfahren kann die Stöchiometrie der Schichten sehr genau eingestellt werden.

Die von uns verwendeten ITO-Schichten werden unter Verwendung eines keramischen Targets mittels Argonionen gesputtert. Schichten mit einer Dicke von 80nm haben dabei, nach Aktivierung durch kurzzeitiges Erhitzen auf 390°C mittels Rapid Thermal Annealing (RTA) einen typischen Flächenwiderstand von 80Ohm/Square.

Die Isolationsschicht



Abb. 2.5: Die Isolationsschicht.

Um etwaige elektrische Kurzschlüssen an fehlerhaft prozessierten Stellen der Proben vorzubeugen, ist die Elektrodenschicht aus ITO flächig mit einer Isolationsschicht aus Siliziumoxid (SiO) bedeckt. Diese Isolationsschicht wird mittels eines plasmaunterstützten chemischen Gasphasenabscheidungs-Verfahrens (PECVD) hergestellt. Im Randbereich wird während des Depositionsprozesses ein Teil abgedeckt, der zur späteren elektrischen Kontaktierung dient.

Die Opferschicht

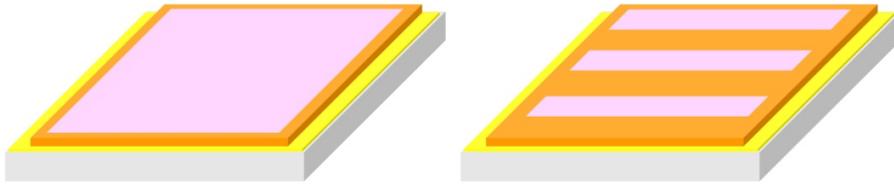


Abb. 2.6: Die Opferschicht.

Die Opferschicht besteht aus einem Positiv Photoresist. Die Wahl eines Photoresist hat zahlreiche Gründe:

1. Es ist neben dem Photolithographie-Prozess kein weiterer Depositionsschritt erforderlich
2. Die Strukturierung erfolgt bereits durch den Entwicklungsschritt mit 0,8%iger Kalilauge, es ist kein weiterer Nass- oder trockenchemischer Ätzprozess erforderlich.
3. Die Opferschicht ist nasschemisch mit Aceton oder trockenchemisch Im Sauerstoffplasma eines Barrelreaktors problemlos entfernbar.
4. Durch einen Hartbackschritt nach der Entwicklung des Photoresists bekommt der Lack eine Flanke von etwa 45° Steilheit mit sehr weichen Kanten. Dies ist im Hinblick auf das Design der Spiegel von elementarer Bedeutung, da im Gegensatz zu gängigen konventionellen Opferschichtprozessen, die Deposition nicht auf einer flächigen Opferschicht erfolgt, die dann teilweise herausgelöst wird, sondern auf dem bereits strukturierten Photoresist. Die nachfolgenden Filme müssen also der Struktur der Opferschicht problemlos folgen können, dies ist durch die vergleichsweise flache Flanke mit den weichen Kanten möglich.
5. Insbesondere die folgenden Schichten, die mittels PECVD-Prozessen hergestellt werden, haben nur eine geringe Richtungsanisotropie und bedecken damit die Flanken der Opferschicht in praktisch derselben Dicke und Qualität wie die ebenen Flächen auf und zwischen den Opferschichtstrukturen. Lediglich beim folgenden Aufdampfprozess von Aluminium, der eine sehr hohe Richtungsanisotropie besitzt, kommt es auf einer 45° Flanke zu einer Schichtdickenreduktion um etwa einen Faktor 0,7.
6. Der größte Nachteil bei der Verwendung von Photoresist als Opferschicht ist eine schlechte Schichtdickenkontrolle. Zum einen verliert der Photoresist mit zunehmendem Alter (d.h. insbesondere Während seiner Verwendung) an Lösungsmittelanteil, was beim Aufschleudern unter sonst gleichen Bedingungen zu einer größeren absoluten Lackhöhe über die gesamte Probe führt. Zum zweiten ist auch die Lackdickenverteilung auf der Probe nicht konstant. Insbesondere durch den Prozess des Lackaufschleuderns kommt es bei den von uns verwendeten rechteckigen Proben zu einer inhomogenen Höhenverteilung, insbesondere in den Ecken der Proben.

Dies ist allerdings als nicht sehr kritisch zu bewerten, da zum einen die Dicke der Opferschicht etwa in der Größenordnung eines Tausendstel der lateralen Ausdehnung der Mikrospiegel liegt, eine Schichtdickenänderung in der Größenordnung von 10% hätte in keinerlei Hinsicht Auswirkungen auf die spätere Funktion der Mikrospiegel.

Des Weiteren ist der Vorgang des Aufschleuderns von Photoresist eine Methode, die nur im Labormaßstab praktikabel ist. In einer späteren Fertigung wird man den Photoresist entweder aufsprühen oder die Scheiben durch ziehen in einem Tauchbad belackten.

Der Spiegelträger

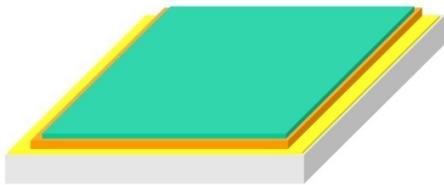


Abb. 2.7: Der Spiegelträger.

Auf die Opferschicht wird nun mittels des PECVD-Verfahrens ein Schichtsystem aus Siliziumnitrid (ca. 300nm) und Siliziumoxid (ca. 120nm) deponiert. Um die Opferschicht nicht zu beschädigen, erfolgt die Deposition bei lediglich 120°C. Die Depositionsparameter beider Einzelschichten sind so gewählt, dass sie nur geringfügige intrinsische Verspannung aufweisen, an der Grenzfläche zwischen beiden Schichten bildet sich jedoch eine effektive Gradientenverspannung von mehreren Hundert Gigapascal heraus. Durch Veränderung der Schichtdickenverhältnisse kann die effektive Gradientenverspannung in weiten Grenzen eingestellt werden.

Die Spiegelflächen

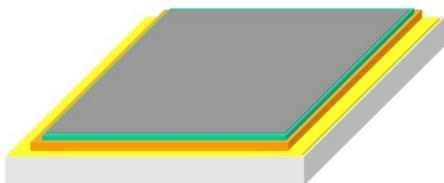


Abb. 2.8: Die Spiegelflächen.

Auf den Spiegelträger wird mittels Physical Vapour Deposition (PVD)-Verfahren eine 80nm dicke Aluminiumschicht aufgedampft. Sie bildet später die eigentlichen reflektierenden Spiegelflächen.

Die Kompensationsschicht

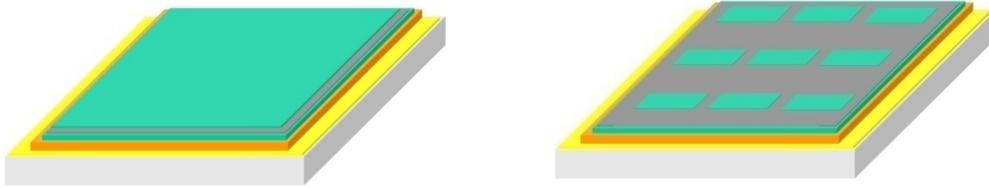


Abb. 2.9: Die Kompensationsschicht.

Mittels PECVD-Verfahren wird nun ein weiteres Schichtsystem aus Siliziumoxid und Siliziumnitrid aufgebracht, dessen Gradientenverspannung exakt so eingestellt ist, dass sie der Verspannung des Spiegelträgers und der Spiegelflächen entgegenwirkt. Durch sie wird gewährleistet, dass die späteren Spiegel eine ebene Form erhalten. Mittels Photolithographie und anschließendem trockenchemischen Ätzen wird diese Schicht strukturiert.

Strukturierung der Spiegelschicht

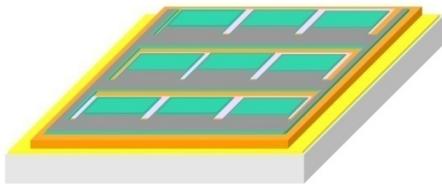


Abb. 2.10: Strukturierung der Spiegelschicht.

Mittels Photolithographie und folgendem nasschemischen Ätzen im Säurebad (Phosphorsäure / Salpetersäure) werden die Spiegelflächen strukturiert. In einem anschließenden Trockenätzschritt wird auch die unterliegende Spiegelträgerschicht bis auf das Substrat bzw. die Opferschicht durchgeätzt.

Entfernen der Opferschicht

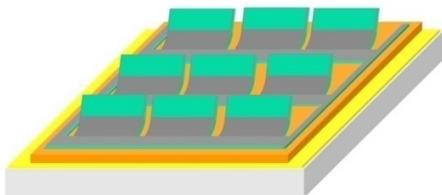


Abb. 2.11: Entfernen der Opferschicht.

Durch Unterätzen der Strukturen mit einem Sauerstoffplasma in einem Barrelreaktor wird die Opferschicht unter den Spiegelementen herausgelöst. Nach der Entnahme sind die Spiegelflächen um 90° gegenüber der Substratebene aufgerichtet und damit fertiggestellt.

2.3 Alternative Prozesse

Die im Ergebnisteil dokumentierten Resultate sind unter Verwendung der im letzten Abschnitt ausführlich dokumentierten Prozesse entstanden. Es wurden parallel jedoch zahlreiche Prozessalternativen entwickelt, die eine weitere Vereinfachung des Prozessablaufes mit sich bringen sollen. Mit den im folgenden kurz skizzierten Prozessabläufen wurden mittlerweile erfolgreich Mikrospiegelarrays hergestellt und auch aktuiert.

a) *Verzicht auf die Spiegelschicht aus Siliziumnitrid / Siliziumoxid*

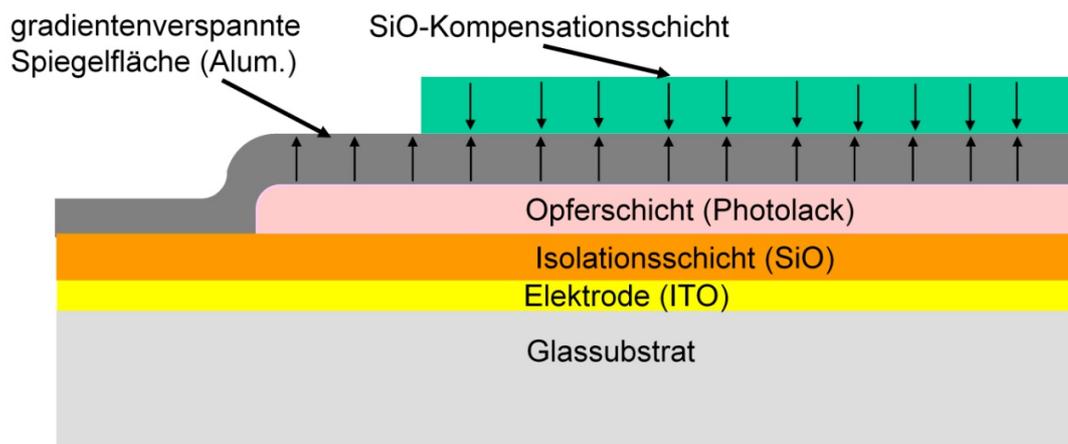


Abb. 2.12: Schematisch Aufbau des Schichtsystems zur alternativen Prozessführung.

Es wurde ein PVD-Prozess entwickelt, um Aluminiumschichten zu deponieren, die zum einen eine Gradientenverspannung von mehreren hundert Gigapascal aufweisen, vergleichbar mit der der Siliziumnitrid / Siliziumoxid-Bischichten. Die Gradientenverspannung dieser Aluminiumschichten ist dabei über die Prozessparameter präzise einstellbar. Basis dieses Prozesses ist ein Bischichtsystem, bei dem zwei Aluminiumschichten direkt nacheinander unter extrem unterschiedlichen Aufwuchsbedingungen deponiert werden.

Dadurch ist es möglich, auf die Spiegelträgerschicht aus Siliziumnitrid / Siliziumoxid komplett zu verzichten, es wird dadurch der entsprechende Depositionsschritt und der Trockenätzschritt zur Strukturierung eingespart. Eine Darstellung der entsprechenden Schichtstruktur kann in Abb. 2.12

betrachtet werden. Da dies zwei der aufwändigsten Prozesse im Gesamtprozess stellt diese Variante eine erhebliche Vereinfachung für den Herstellungsprozess dar.

b) Nasschemisches Entfernen der Opferschicht

Das trockenchemische Entfernen der Opferschicht im Sauerstoffplasma hat zum einen den Nachteil, dass es sehr langwierig (>2h) und damit energieaufwändig ist, zum anderen stellt es eine hohe thermische Belastung für die Mikrospiegelarrays dar.

Ein nasschemisches Entfernen der Opferschichten von Mikrosystemen bringt allerdings die prinzipielle Schwierigkeit mit sich, dass beim Trocknen oftmals die Strukturen durch Adhäsion irreversibel am Substrat haften bleiben. Die gängigen Lösungen für kleinflächige Mikrosysteme stellen Trocknungsverfahren mittels Kritisch-Punkt-Trocknen oder Gefrietrocknen dar. Da beide Wege auf großen Flächen nicht praktikabel sind, wurde ein neuartiger, extrem einfacher Ansatz versucht:

Die Opferschicht wird mittels Azeton entfernt. Dies geschieht innerhalb weniger Minuten. Das Azeton wird durch Wasser getauscht, dem ein kleiner Anteil Tenside beigesetzt wird. Anschließend wird die Probe durch einfaches Verdunsten der Wasserrückstände getrocknet. Die starke mechanische Spannung der Mikrospiegel und ihr großer Aufstellwinkel gegenüber dem Substrat reichen aus, um ein Haften am Substrat zu verhindern.

c) Mikrospiegel ohne Kompensationsschicht (Mikroshutter)

Kommt es in einer Anwendung nicht auf eine gezielte Lichtlenkfunktionalität an, sondern lediglich darauf, das Licht „ungerichtet“ in den Raum zu lenken, so ist es möglich, auf die Kompensationsschicht zu verzichten, und damit einen Depositionsschritt, einen Photolithographieschritt sowie einen Trockenätzschritt einzusparen. Die Funktionalität der „Mikroshutter“ im aktuierten, also geschlossenen Fall, unterscheidet sich nicht von der der Mikrospiegel. Abb. 2.13 zeigt Rasterelektronenmikroskopaufnahmen von Mikrospiegeln mit den planaren und spannungskompensierten Spiegelflächen(links) so wie eine Gruppe von aufgerollten Mikroshuttern(rechts).

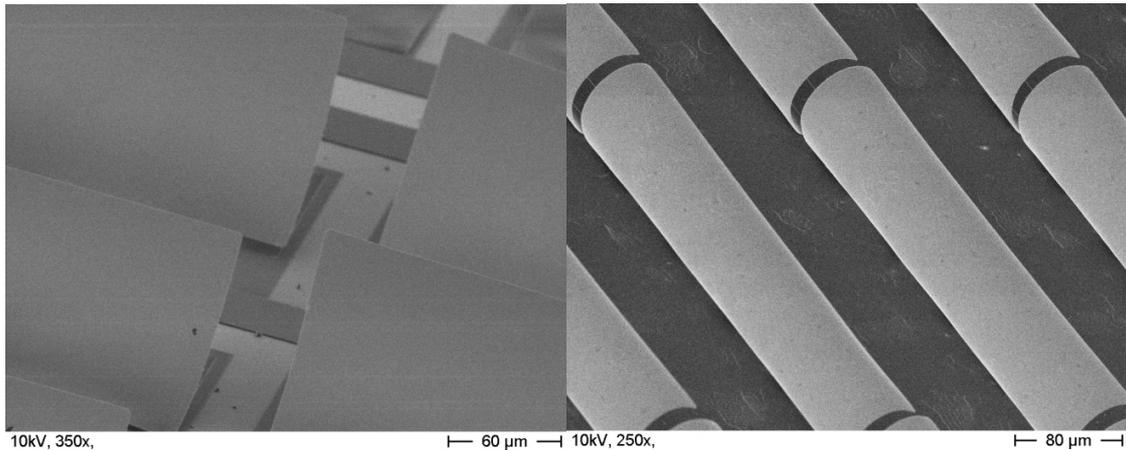


Abb. 2.13: Links eine Gruppe von Mikrospiegeln, zu erkennen an ihren fast planaren Spiegelflächen, rechts eine Gruppe von Mikroshuttern, die eine halbrunde Form aufweisen.

d) Eine Kombination au a), b) und c)

Eine Kombination au a), b) und c) erlaubt es, Mikrospiegelarrays herzustellen, die mit lediglich 4 Depositionsschritten, 2 Photolithographieschritten und ganz ohne trockenchemische Ätzprozesse auskommt. Die Machbarkeit solcher Mikroshutter, auch ihre Aktuierung, konnte bereits gezeigt werden.

2.4 Beschreibung des Designs der Mikrospiegelemente

Dem Design der Mikrospiegel wurde besondere Aufmerksamkeit gezollt unter Berücksichtigung insbesondere der folgenden Aspekte:

- Ein möglichst hoher Bedeckungsgrad des Substrates im geschlossenen Zustand, um in der späteren Anwendung effektive Wärmeschutzfunktionen übernehmen zu können
- Ein möglichst hohes Tastverhältnis zwischen offenem und geschlossenem Zustand
- Eine möglichst effektive Aktuierung mit einem Minimum an elektrischer Steuerspannung
- Eine Minimierung von mechanischen Spannungskonzentrationen im Scharnierbereich
- Eine möglichst geringe Durchbiegung der Spiegelemente

Ausgehend von diesen Forderungen wurden innerhalb des Projektes vier Photolithographiemaskensätze entwickelt, die unter Berücksichtigung der oben genannten Forderungen insgesamt mehrere hundert verschiedene Spiegeltypen auf ihre Eignung hin überprüft hat. In Abb. 2.14 sind sieben verschiedene Spiegeltypen zu erkennen, die allesamt dieselben Grundabmessungen von $400\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$ aufweisen, sich jedoch in wesentlichen Details unterscheiden.

Die Spiegeltypen 5 -7 haben im Scharnierbereich jeweils Unterbrechungen in verschiedenen Größen und an verschiedenen Positionen. Ziel dieser Unterbrechungen war es, die mechanische Gegenkraft gegenüber der elektrostatischen Aktuationskraft zu minimieren. Dieser Ansatz hat sich in der Praxis nicht bewährt, da die schmalen Scharnieredazu neigen, sich seitlich selbst zu stabilisieren und dadurch nicht wunschgemäß durchzubiegen. Dementsprechend sind die Spiegel kaum aufgestellt.

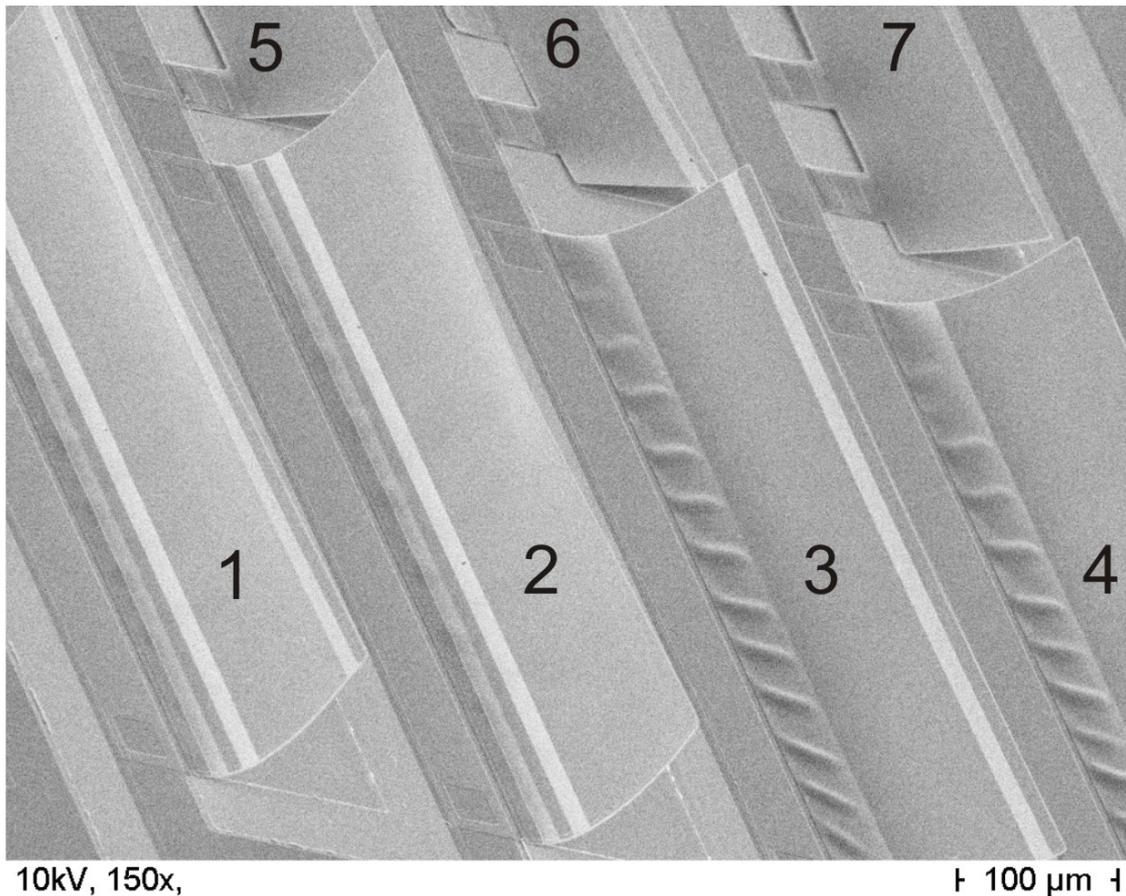


Abb. 2.14: REM-Aufnahme diverser Mikrospiegel mit verschiedenen Spiegelgeometrien.

Die Spiegeltypen 3 und 4 haben eine durchgehende Scharniere, die den Spiegeln ein Aufstellen ermöglichen, man erkennt jedoch deutlich mechanische Spannkonzentrationen im Scharnierbereich der Spiegel, die sich zwar bezüglich der elektrostatischen Aktuierung kaum bemerkbar machen, jedoch mit großer Wahrscheinlichkeit Auswirkungen auf die Langlebigkeit der Mikrospiegelemente haben werden.

Diesen Spannkonzentrationen wird bei den Spiegeltypen 1 und 2 entgegengewirkt, indem im Scharnierbereich spannungskompensierende Streifen aufgebracht sind. Man sieht, dass die mechanische Verspannung der Scharniere dadurch sehr deutlich kompensiert wird.

Spiegeltyp 1 und 2 unterscheiden sich nochmals dadurch, dass Typ 1 am oberen Spiegelende einen Falz aufweist, der den spannungskompensierten Spiegelbereich gegen eine seitliche

Durchbiegung stabilisiert. Die Typen 1 und 2 sind die derzeit favorisierten Spiegeltypen, mit denen ein Großteil der Ergebnisse erzielt wurden.

Abb. 2.15 zeigt einen Spiegel vom Typ 1 in einer detaillierten Aufsicht: Man erkennt zwei Kompensationsstreifen im Scharnierbereich (oben im Bild) sowie eine Falz am oberen Spiegelrand (unten). Der Spiegel selbst wirkt durch die Aufsicht von oben stark verkürzt. Man erkennt aber sehr gut die Ebenheit und die mechanische Spannungsfreiheit des Spiegels.

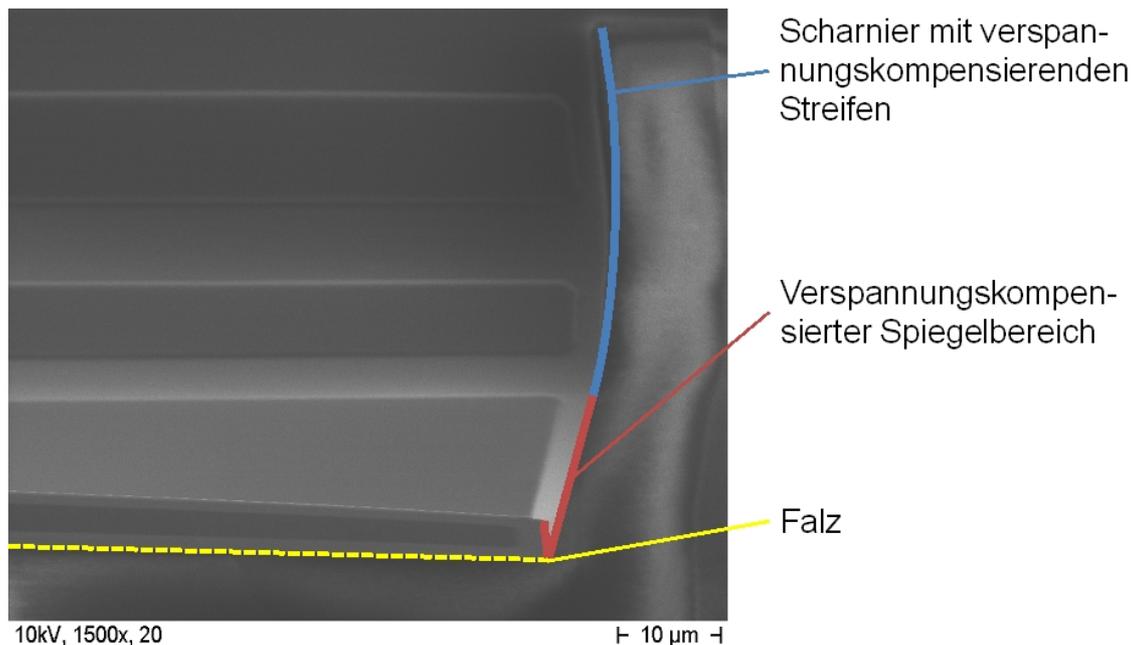


Abb. 2.15: REM-Aufnahme eines Mikrospiegels (links): Man erkennt zwei Kompensationsstreifen im Scharnierbereich (oben im Bild) sowie eine Falz am oberen Spiegelrand (unten). Der Spiegel selbst wirkt durch die Aufsicht von oben stark verkürzt. Man erkennt aber sehr gut die Ebenheit und die mechanische Spannungsfreiheit des Spiegels.

Ein weiterer Punkt, der sich sowohl auf das effektive Tastverhältnis als auch auf die elektrostatische Aktuierbarkeit auswirkt, ist das Verhältnis Spiegellänge zu Scharnierlänge der Mikrospiegel. Dieser Aspekt wurde auch theoretisch modelliert (siehe nächster Abschnitt). In der Praxis wurden Designs mit Verhältnissen von $\frac{1}{4}$ Scharnierlänge zu $\frac{3}{4}$ Spiegellänge bis $\frac{2}{3}$ Scharnierlänge zu $\frac{1}{3}$ Spiegellänge entworfen und experimentell erprobt.

2.5 Theoretische Modellrechnungen

In einer zweidimensionalen Modellrechnung mittels Finiter Elemente Methode (FEM) wurden die Spiegel- und die Scharnierlängen eines Mikrospiegelelementes variiert, um ein optimales Verhältnis zu finden, bei dem der Mikrospiegel eine Auslenkbarkeit bei minimaler Steuerspannung aufweisen. Es hat sich dabei herausgestellt, dass ein Optimalverhältnis besteht, wenn Spiegel und Scharnier etwa gleich lang sind (siehe Abb. 2.16).

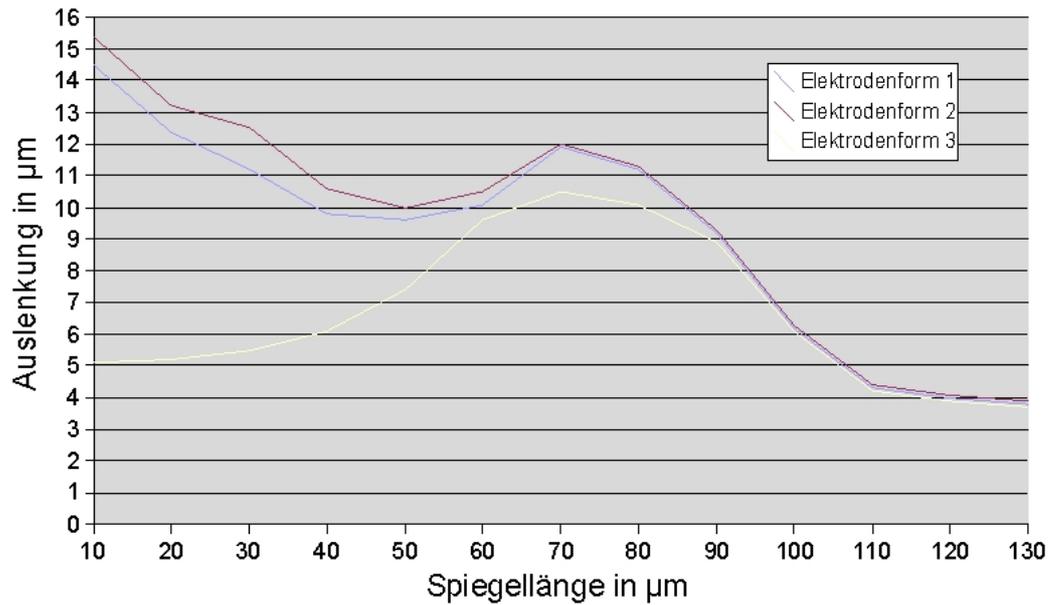


Abb. 2.16: Darstellung der Auslenkung in Abhängigkeit zur Spiegellänge für diverse Spiegelgeometrien.

Ein wichtiger Effekt bei der elektrostatischen Aktuierung eines Mikrospiegelelementes ist der sog. „Pull-in-Effekt“. Die Mikrospiegelelemente lassen sich durch elektrostatische Aktuierung bis zu einer bestimmten Spannung „analog“ steuern, d.h. eine Vergrößerung der elektrischen Steuerspannung hat eine größere Auslenkung des Spiegelelementes zur Folge. Ab einem gewissen Grenzwinkel ist dieses Verhalten jedoch nicht mehr gegeben, denn bei weiterer Auslenkung dominieren die elektrischen Kräfte gegenüber der mechanischen Rückstellkraft und es kommt zu einem plötzlichen Anklappen der Spiegel an das Substrat. Für ein Mikrospiegelelement mit dem o.g. Optimalverhältnis zwischen Spiegel- und Scharnierlänge tritt dieser Pull-in-Effekt in der FEM-Simulation bei einem Grenzwinkel von $45,4^\circ$ auf (Abb. 2.17). Bei diesem Winkel ist eine Lichtlenkung ohnehin nicht mehr sinnvoll (diese spielt sich in einer Spiegelposition zwischen 65° und 90° gegenüber der Fensterebene ab) und der Bedeckungsgrad beträgt bereits über 70%. Somit kann auch die Transmission und damit die Durchsicht in einem weiten Bereich gesteuert werden.

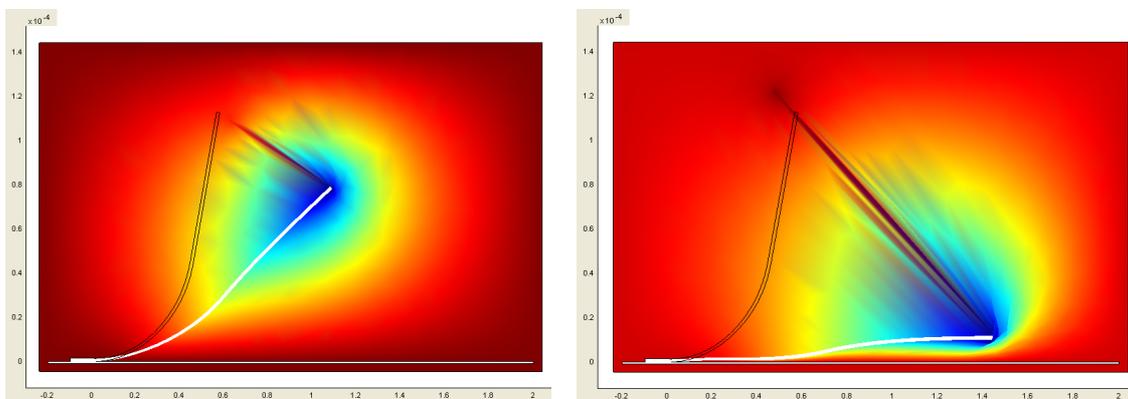


Abb. 2.17: FEM-Simulation des Pull-in-Effekts: rechts ein Mikrospiegel kurz vor, links ein Mikrospiegel kurz nach dem Pull-in bei einem Grenzwinkel von 45° .

2.6 Aufbau eines Messplatzes

Die Mikrospiegel-Arrays, die auf den Photolithographie-Maskensätzen zwei und vier basieren, steuern jeweils nur kleine Gruppen zwischen sechs und zweihundert Mikrosiegeln gleichzeitig an. Um diese Spiegelgruppen gezielt einzeln ansteuern zu können, bedarf es eines Aktuatorsmessplatzes, dessen Aufbau im Folgenden skizziert wird.

Auf einer Grundplatte, auf der auch die Proben platziert werden, befinden sich drei Mikromanipulatoren mit jeweils einem Nadelkontakt. Durch zwei dieser Nadelkontakte wird der elektrische Kontakt zur Aktuierung hergestellt, der dritte Nadelkontakt dient lediglich Kontrollmessungen.

Als Spannungsquelle dient ein Spannungsverstärker (Typ Piezomechanik SVR 350 bip /1), wie er zur Positionierung von Piezo-Elementen verwendet wird. Es stellt eine elektrische Spannung von bis zu $\pm 350\text{V}$ zur Verfügung.

Er verfügt über die Möglichkeit, ein Signal, das von einem Funktionsgenerator vorgegeben wird, zu verstärken. Dies ist für die durchgeführten Langzeittests sowie für höherfrequente Messungen von Bedeutung. Darüber hinaus kann eine beliebige Spannung statisch über ein Potentiometer eingegeben werden.

Die Resultate der Aktuierung können durch ein Weisslichtinterferometer, das hier lediglich als Mikroskop verwendet wird, beobachtet und von einer CCD-Kamera aufgezeichnet werden.

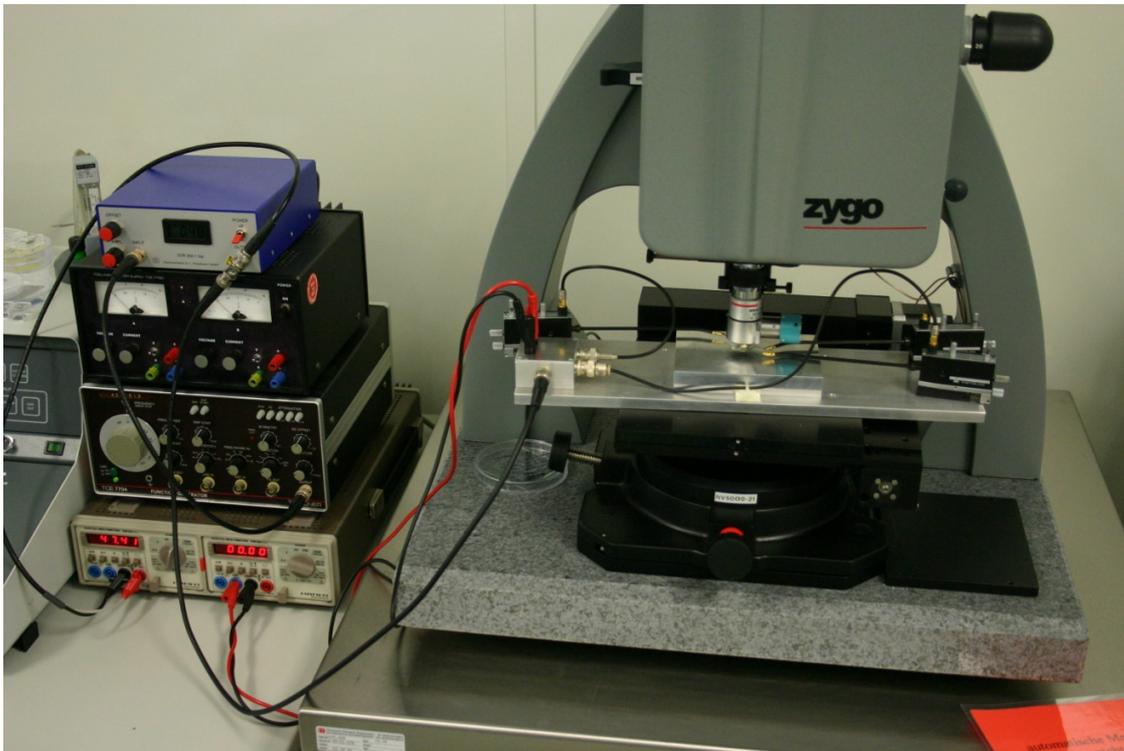


Abb. 2.18: Aufbau eines Aktuatorsmessplatzes bestehend aus einem Funktionsgenerator, einem Spannungsverstärker, Strom- und Spannungsmessgerät (links) sowie einer Vorrichtung mit mikrojustierbaren Nadelkontakten unter einem Mikroskop / Weisslichtinterferometer.

2.7 Dokumentation der fertiggestellten Mikrospiegelanordnungen

Dokumentation der fertiggestellten Mikrospiegelanordnungen

Zu Beginn des Projektes wurden die bereits im Abschnitt 2.4 beschriebenen kleinen Mikrospiegelanordnungen zur Evaluation der günstigsten Spiegelgeometrie hergestellt. Dabei handelte es sich um Segmente zu jeweils 6 bis 16 Spiegel die mit einem Kontakt zusammengefasst adressierbar waren. Hier waren wir in der Lage, die ersten Mikrospiegel zu aktuierten. Es stellten sich bei einer statische Aktuierung mit einer Spannung von ca. 80 V Ströme $< 1\mu\text{A}$ ein.

Sukzessive Optimierungen der Prozessführung sowie die Aufnahme der gewonnenen Erkenntnisse in die folgenden Photolithographie-Maskensätze führten dazu, auch große Gruppen von Mikrospiegelanordnungen herstellen und elektrostatisch aktuierten zu können. Abb. 2.19 zeigt eine Gruppe von 80 Mikrospiegelelementen unter dem Auflichtmikroskop, die fehlerfrei hergestellt und als Gruppe fehlerfrei aktuiert werden konnte. Die nicht aktuierte obere Reihe gehört bereits zur nächsten Spiegelgruppe. Dies kann man in Abb. 2.20, die denselben Aktuierungsvorgang in einer Kameraaufnahme von vorn zeigt sehen. Das Untersegment der Probe ist in zwei Gruppen eingeteilt die separat adressiert werden können. Ebenfalls zu erkennen sind die Nadelkontakte des Messaufbaus, mit deren Hilfe die elektrische Spannung an dafür vorgesehenen Kontakten angelegt werden kann. Die Spiegel haben im geschlossenen Zustand einen sehr hohen Bedeckungsgrad. Die Transmission im geschlossenen Zustand ist jedoch noch nicht ideal und wurde im folgenden Design weiter verbessert.

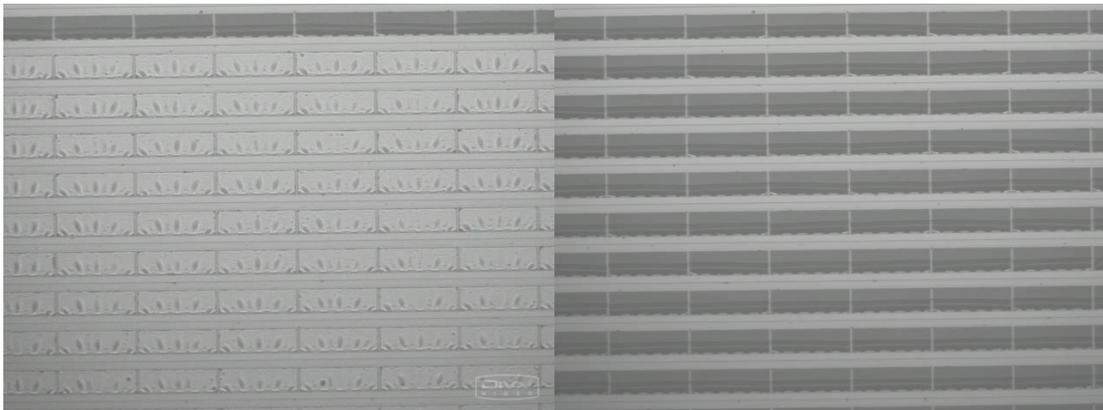


Abb. 2.19: Segment aktulierbarer Mikrospiegelarrays (Mikroskop, Aufsicht), links: geschlossener (aktuierter) Zustand, rechts: offener Zustand.

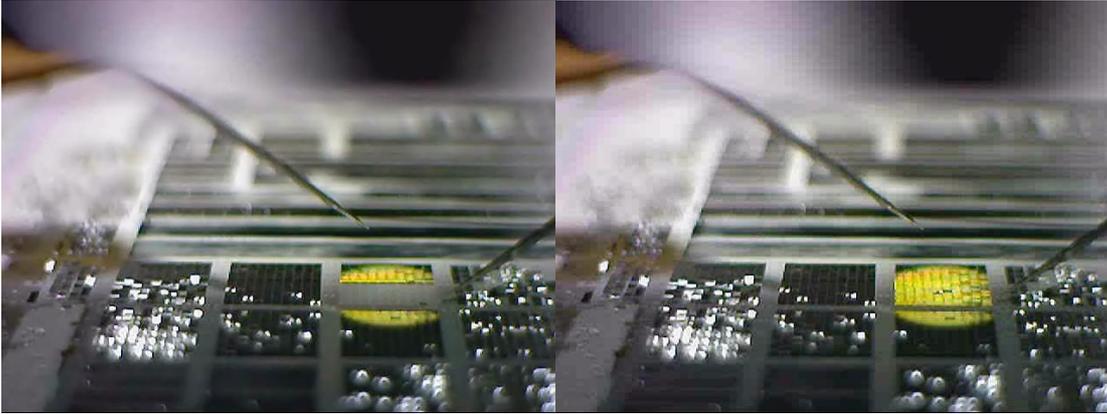


Abb. 2.20: Segment aktuierbarer Mikrospiegelarrays (Video-Capture) Links: geschlossener (aktuierter) Zustand , rechts: offener Zustand.

Als nächster Schritt wurde ein 6cm x 6cm großes Modul entworfen, bestehend aus 9 Untersegmenten. Abb. 2.21 zeigt die Durchsicht durch ein solches Modul, links in einiger Entfernung zum unterliegenden Schriftzug, rechts im direkten Kontakt. Man kann erkennen, dass die Durchsicht durch die Module fast unbeeinträchtigt ist. Als optische Störungen wirken im Wesentlichen die „Pixelfehler“, also einige nicht oder nicht ideal aufgerichtete Spiegelemente. Die derzeitige Fehlerrate liegt bei etwa 2%, wobei durchaus größere fehlerfreie Abschnitte vorhanden sind (siehe Abb. 2.22). Das geometrische Verhältnis zwischen offenem und geschlossenem Zustand (Tastverhältnis) wurde bei diesem Schritt nochmals signifikant verbessert. Im aktuellen Design liegt dieses geometrische Tastverhältnis bei 34% Durchsicht im offenen Zustand gegenüber 95% im geschlossenen Zustand.

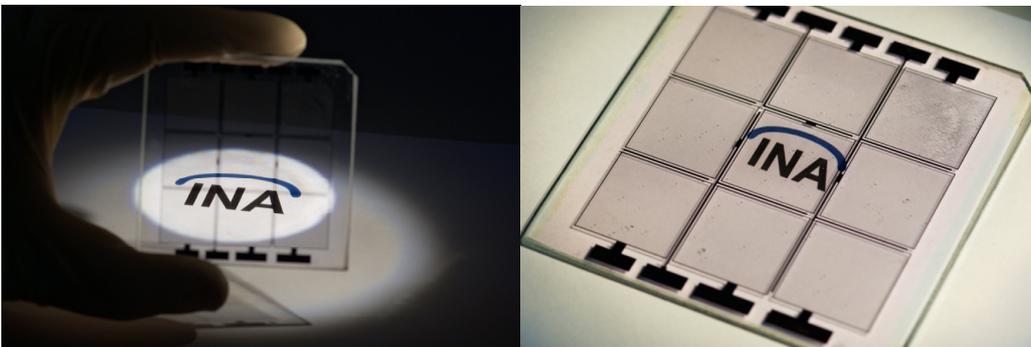


Abb. 2.21: Durchsicht durch ein Mikrospiegel-Array (Design: Maskensatz 5), links auf Distanz, rechts im Kontakt mit einer unterliegenden Schrift.

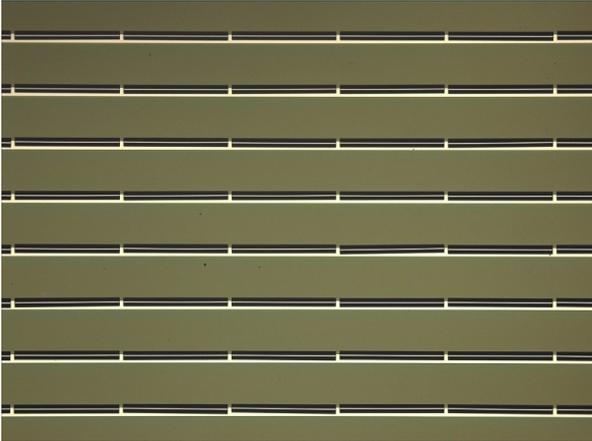


Abb. 2.22: Aufsicht auf ein fehlerfreies Mikrospiegelareal mit hohem geometrischem Tastverhältnis (34% offen zu 95% geschlossen).

Die nahezu fehlerfreie Aktuierung eines 2cm x 2cm großen Untersegmentes zeigt Abb. 2.23. Im linken Bild reflektieren die geöffneten Spiegel das Licht einer Lampe in die Kamera, im rechten Bild reflektieren die an das Substrat angelegten Spiegel das Auflicht direkt zurück. Bei diesen Feldern handelt es sich bereits um Mikrospiegelanordnungen in der Größenordnung einiger Tausend Mikrospiegelelemente. Die Aktuierung dieser Segmente ist sowohl statisch als auch dynamisch mit einer durch den Frequenzgenerator vorgegebenen Wechselspannung möglich.



Abb. 2.23: 2cm x 2cm-Segment aktuierbarer Mikrospiegelarrays, bestehend aus rund 4000 Mikrospiegeln (Design: Maskensatz 5). Links: offener Zustand, rechts: geschlossener (aktuierter) Zustand.

Im Rahmen von Lebensdaueruntersuchungen wurden die Segmente dieses Moduls dynamisch zum einen mit Frequenzen von bis zu 2kHz belastet. Die Mikrospiegel konnten der Frequenz mit einer vollen Auslenkbewegung bis etwa 80Hz folgen, bei höheren Frequenzen erfolgte nur noch eine teilweise Auslenkung der Spiegel. Bei diesen Untersuchungen zeigten sich keine mechanischen Beeinträchtigungen oder auftretenden Defekte, selbst bei Belastung über Stunden.

3 Energetische und ökologische Bewertung

In der nachfolgenden energetischen und ökologischen Bewertung sollen als relevant erachtete Umweltwirkungen des Mikrospiegelsystems über seinen Lebensweg (Herstellung, Nutzungsphase, Recycling/Entsorgung) aufgezeigt und denen einer optimierten Makro-Jalousie gegenübergestellt werden. Für die Nutzungsphase werden die Systeme hinsichtlich ihrer Haupt-Einsatzzwecke betrachtet:

Verschattung/ Wärmeschutz: In welchem Maß trägt ein System durch Verringerung des solaren Strahlungseinfalls zur Reduzierung der Kühllast eines Raumes im Sommer bei

Tageslichtlenkung: In welchem Maß kann während dieser Zeit durch gezielte Beleuchtung mit Tageslicht der Einsatz von Kunstlicht reduziert werden

Die Systeme sind dabei alternativ in das rahmenlose Fenster ($3,50\text{m} * 2,00\text{m}$) eines Büroraums (siehe Abb. 3.1) integriert. Die Raumgeometrie stammt aus [VDI2078]. In beiden Fällen werden externe Sensoren, Schalter, MicroController und ähnliches nicht bilanziert. Die Untersuchung wird für beide Systeme mit einer statischen Winkeleinstellung für die Lamellen und die Mikrospiegel durchgeführt. Diese kann Grundlage für spätere dynamische Untersuchungen sein.

Die Lebensdauer der Verschattungssysteme soll der betrachteten Nutzungsphase von 25 Jahren entsprechen, d. h. Wartungsarbeiten und Ersatzteile werden nicht bilanziert. Die Sachbilanz konzentriert sich auf die folgenden Umweltwirkungsgrößen:

Primärenergieeinsatz (PEE)

Treibhauspotenzial (GWP)

Toxizität (qualitativ berücksichtigt).

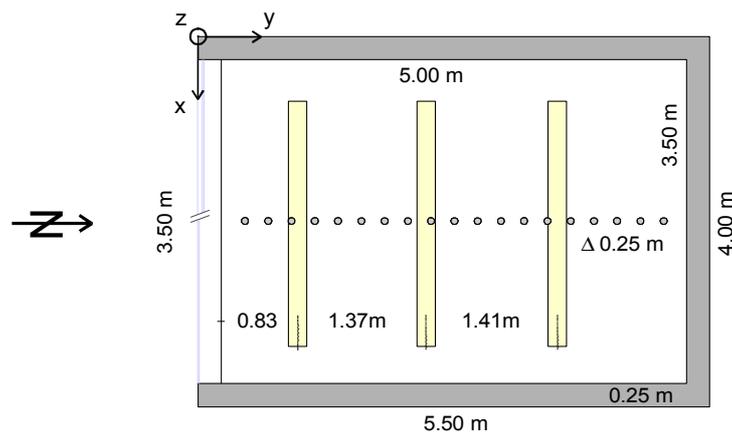


Abb. 3.1: Raumgeometrie, Lage der Leuchtmittel und Messpunkte für die Beleuchtungsstärke.

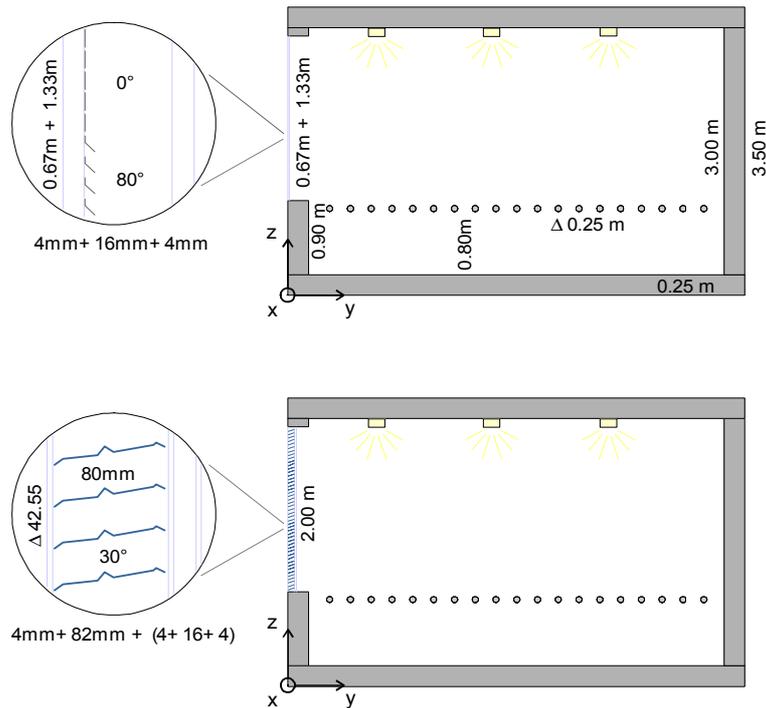


Abb. 3.2: Querschnitt des Raums und Konfiguration der Verschattungssysteme Mikrospiegel und Warema Genius.

Fenstersystem mit Mikrospiegel-Arrays

Das Mikrospiegelsystem ist auf die geschützte Innenseite der Außenscheibe einer konventionellen 2-Scheiben-Isolierverglasung aufgebracht. Die Bilanzierung beschränkt sich auf das reine Mikrospiegelsystem, das isolierverglaste Fenster incl. Rahmen wird dabei "Ohnehin-Bauteil" bewertet. Der Lichttransmissionsgrad der Einfachverglasung für senkrecht auftreffende Strahlung ist entsprechend [DIN13363-1] $\tau_v=0,9$.

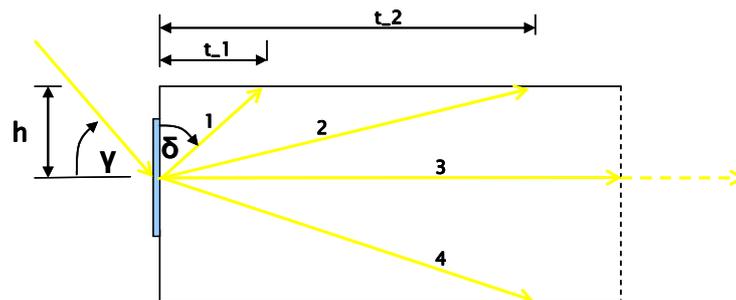


Abb. 3.3: Zusammenhang von Sonnenhöhe γ , Abstand der Mikrospiegel zur Raumdecke h , Ausleuchtungstiefe (z.B.: t_1, t_2) und Umlenkung der Lichtstrahlen an den Mikrospiegeln δ .

Ergebnisse von 2-dimensionalen geometrischen Analysen der Auslenkung des Lichts in Fenstern mit Mikrospiegeln zeigt Abb. 3.4 Hier ist die Ausleuchtungstiefe in den Raum über dem Anstellwinkel der Spiegel für verschiedene Sonnenhöhen aufgetragen. Der Abstand des Spiegels zur Decke beträgt einen Meter. Aus dieser Darstellung ist zu erkennen, dass es in dem zur Verfügung stehenden Auslenkungsbereich der Spiegel ($40-80^\circ$), bei allen am untersuchten Standort vorkommenden Sonnenhöhen (Kassel: Sonnenhöhe in Kassel am 21. Juni um 12 Uhr Solarzeit: 63°) möglich ist, die Direktstrahlung in den Raum zu lenken. Um den positiven

Einfluss des steigenden Abstands der Mikrospiegel zur Raumdecke auf die Ausleuchtungstiefe zu nutzen (vergleiche Abb. 3.3) und gleichzeitig dem Nutzer eine gute Sicht nach außen zu gewährleisten, ist die folgende Konfiguration gewählt: Die Mikrospiegel, die das untere Drittel der Scheibe auf ganzer Breite bedecken, werden auf 80° eingestellt, der verbleibende obere Teil wird aus Wärmeschutzgründen geschlossen (0°) (siehe Abb. 3.2). Folgende vereinfachende Annahmen liegen der Simulation zu Grunde: Die Spiegel erstrecken sich in einem unterbrechungsfreien Segment, über die gesamte Breite der Scheibe. Dies vermindert die Beleuchtungsstärke innerhalb des Raumes gegenüber dem realen Aufbau, in dem die Spiegel horizontal unterbrochen werden. Der Biegeteil der Spiegel ist als ideales Gelenk abgebildet.

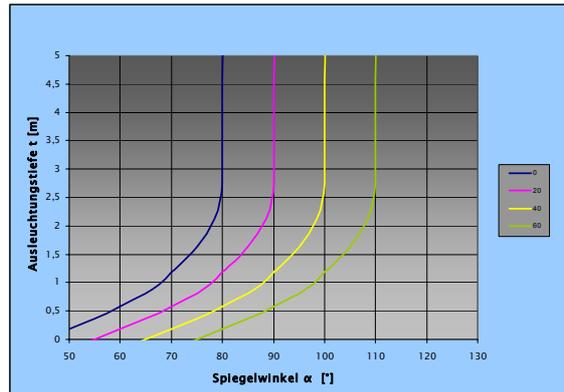


Abb. 3.4: Ausleuchtungstiefe an die Raumdecke in Abhängigkeit des Spiegelwinkels α ; Parameter: Sonnenhöhe γ (0° , 20° , 40° , 60°); Höhe des Spiegels h : 1 m.

Fenstersystem mit Makro-Jalousie: Warema Genius

Die Makro-Jalousie ("Genius"-Profil; Hersteller: Warema, MarktHeidenfeld) hängt vor einer konventionellen 2-Scheiben-Isolierverglasung, die auch hierbei unberücksichtigt bleibt. Zum Bilanzobjekt gehört jedoch eine zusätzliche Außenscheibe als Wetterschutz (siehe Abb. 3.2 unten). Das betrachtete System steht stellvertretend für den aktuellen Stand der technischen Entwicklung und wird deshalb als Vergleichssystem genutzt. Die speziell geformten Lamellen sind zwischen einer unbeschichteten Einfachverglasung (außen) und einer Wärmeschutz-Doppelverglasung angebracht. Ihr Kippwinkel ist auf 30° aus der Horizontalen festgelegt. Für die Lichtsimulation wurde die Lamellenform aus [HUE] extrahiert und die Konfiguration in einem Radiance Parametersatz implementiert (Abb. 3.5). Die äußere Verglasung wurde mit einem Lichttransmissionsgrad von $\tau_v=0,9$ und die beiden Scheiben der Doppelverglasung jeweils mit $\tau_v=0,87$ angenommen [DIN 18599-10]. Der Reflektionsgrad der Oberseite der Lamellen beträgt 63% bzw. 35% für die Unterseite.

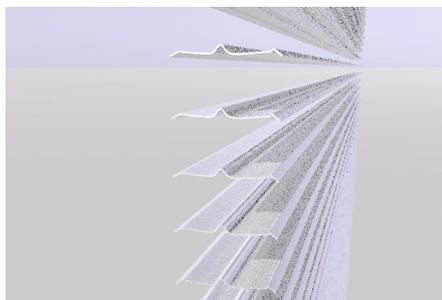


Abb. 3.5: Genius-Lamellenform, in Radiance implementiert.

3.1 Herstellungsphase

Im Folgenden werden die relevanten Prozessschritte für die Analyse der Wirkkategorien beschrieben.

3.1.1 Fenstersystem mit Mikrospiegelarrays

Reinigung des Substrats

Wie in Abschnitt 2 beschrieben, werden zur Substratreinigung Stickstoff (bzw. reine Druckluft), Tenside, Isopropanol und Sauerstoff benötigt; Datensätze hierzu sind in ecoinvent 1.1 [ECO04] und Gemis 4.42 [GEM07] vorhanden. Die angenommenen Mengen beziehen sich auf eine großtechnische Herstellung. Die Prozessenergie für die Behandlung mit einem Sauerstoff-plasma ist aus vorhandenen Laborwerten hochgerechnet; dabei lässt sich der Energieeinsatz im großtechnischen Maßstab auf 20 ... 25% reduzieren [DIE08]. Der Stromverbrauch ist wegen der besseren Vergleichbarkeit für beide Verschattungssysteme als Mittelspannungs-Netzstrom 2005 aus Gemis bilanziert.

ITO-Schicht aufbringen: Sputtern

Auf die gereinigte Floatglasscheibe wird eine transparente leitfähige Schicht aus Indium-Zinn-Oxid (ITO) gesputtert. Das Magnetron-Sputtern ist in ecoinvent für die Beschichtung von Fensterglas zu Wärmeschutzglas detailliert beschrieben. Dem Datensatz ist der Wert für den Elektrizitätsverbrauch entnommen, die Werte sind hinsichtlich der Schichtdicken kompatibel [INT07, INT09]. Für das Indium-Zinn-Oxid wird ersatzweise Zinn aus ecoinvent angesetzt, die Daten für Argongas entstammen Gemis.

Isolationsschicht (SiO₂) aufbringen: PECVD

Die Isolationsschicht wird mittels plasmaunterstützter chemischer Gasphasenabscheidung (PECVD) aufgebracht, als Depositionsrate kann 200 nm/min angenommen werden. Depositionsrate und Elektrizitätsverbrauch sind dabei auf eine Anlage der Firma Roth&Rau (SiNA XL) bezogen [RR09], wobei der Verbrauchswert eine obere Abschätzung darstellt. Als Reaktions-gase werden Silan (SiH₄) und Distickstoffmonoxid (Lachgas, N₂O) verwendet; ersteres ist als hochreines Gas in Gemis dokumentiert, die Daten für Lachgas sind aus dem Gemis-Datensatz für Ammoniumnitrat abgeleitet.

Opferschicht (Photolack) aufdrucken: Ink-Jet-Druck

Mit Industrie-Ink-Jet-Druckern können genügend feine Strukturen ohne nachfolgende Lithographieschritte erzeugt werden, zudem kann im Vergleich zu herkömmlichen Methoden die eingesetzte Lackmenge deutlich reduziert werden. Der Photolack, ein Kresolharzlack, wird als Phenolharz aus ecoinvent bilanziert, der Verdünner (PGMEA, 1-Methoxy-2-propyl-acetat) als hochreine Essigsäure aus Gemis. Die Prozessenergie entspricht Herstellerangaben der Firma Heidelberger Druckmaschinen [HEI09].

Trägerschicht (SiN_x / SiO₂) aufbringen: PECVD

Analog zur Isolationsschicht wird auch die Trägerschicht im PECVD-Prozess aufgebracht. Bei gleicher Depositionsrage steigt der Elektrizitätsbedarf entsprechend der größeren Schichtdicke.

Spiegelflächen (Al) aufbringen: Sputtern

Wie auch die ITO-Schicht werden die Spiegelflächen aufgesputtert. Der Elektrizitätsverbrauch ist auf die größere Schichtdicke abgestimmt; als Verbrauchsmaterialien sind Aluminium (ecoinvent) und Argongas (Gemis) berücksichtigt.

Kompensationsschicht (SiN_x/SiO₂) aufbringen: PECVD

Dieser Schritt entspricht der Deposition der Trägerschicht.

Schutzschicht auf Kompensationsschicht (Photolack) aufdrucken: Ink-Jet-Druck

Die Schutzschicht wird analog der Opferschicht bilanziert; die Lackmenge ist auch für die größere Schichtdicke ausreichend bemessen.

Kompensationsschicht strukturieren: RIE (Plasmaätzen)

Für den Energieeinsatz werden die spezifischen Verbrauchswerte der PECVD-Schritte übernommen, bei einer angenommenen Ätzrate von 300 nm/min. Als Reaktionsgase kommen Trifluormethan (CHF₃) (ersatzweise als hochreines CF₄ bilanziert) und Argon zum Einsatz.

Schutzschicht (Photolack) aufdrucken: Ink-Jet-Druck

Diese Lackschicht entspricht der oben bilanzierten Schutzschicht.

Spiegelflächen samt Kontakten strukturieren: Tauchen (Nassätzen)

Die Daten für das Schwefelsäure/Phosphorsäure-Tauchbad entstammen Gemis; der Stromverbrauch ist abgeschätzt.

Trägerschicht strukturieren: RIE (Plasmaätzen)

Dieser Schritt entspricht dem Ätzen der Kompensationsschicht.

Opferschicht veraschen: Plasma-Reaktor (Magnetron)

Die Veraschung im Plasma-Reaktor entspricht der Plasmabehandlung bei der Substratreinigung, der Einsatz von Energie und Prozessgas wurden auf die längere Behandlungsdauer angepasst.

3.1.2 Fenstersystem mit Makro-Verschattungssystem

Beschreibung des Systems: Bei der Makrojalousie handelt es sich um eine Lamellenjalousie mit optimiertem Profil ("Genius", Breite 80mm, siehe Abb. 3.6). Sowohl die Lamellen als auch das Ober- und Unterprofil sowie die Führungsschienen bestehen aus pulverbeschichtetem

Aluminium. Die Jalousie wird mit zwei Elektromotoren über Planetengetriebe und Umlenkstangen verstellt; Materialien hierfür sind Stahl, Stahlblech und Kupferdraht. Kunststoffe finden für Kordeln und Bänder (Polyester) Verwendung [WAR07, HL06].

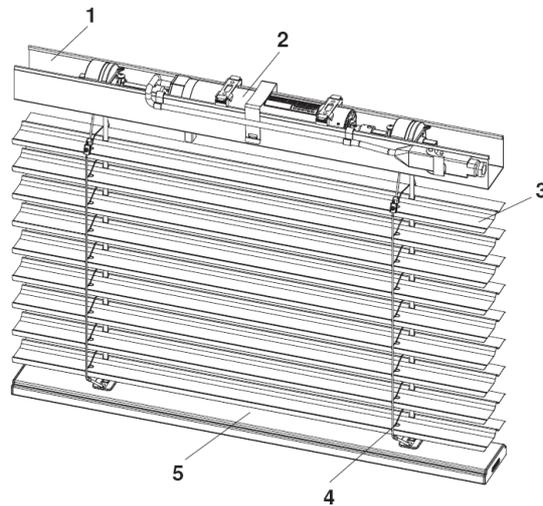


Abb. 3.6: Lichtlenk-Jalousie Typ E 80 Genius (Herst. Warema).

Neben der eigentlichen Jalousie ist auch die zusätzliche Außenscheibe als Wetterschutz berücksichtigt. Die Daten für die Werkstoffbereitstellung und für die Pulverbeschichtung der Lamellen und der Aluminiumprofile sind wiederumecoinvent 1.1 und Gemis 4.42 entnommen; dabei ist der Datensatz für die Beschichtung der dünneren Lamellenbleche an die geringere Aufheizenergie angepasst. Durch den Ansatz eines Aluminium-Produktionsmixes aus Primär- und Sekundäraluminium wird eine spätere Werkstoffgutschrift in der Recyclingphase berücksichtigt.

3.1.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Beim **Mikrospiegel-System** sind die Herstellungs-Aufwendungen von 3.325 MJ (entsprechend 924 kWh) Primärenergie-Einsatz zu 83 Prozent vom elektrizitätsbedarf verursacht. Die Materialien tragen wegen der geringen eingesetzten Mengen nur wenig zu den Gesamtbelastungen bei; allein die Photolacke und die Säuren für das Tauchbad haben einen nennenswerten Anteil. Dies drückt sich auch in der sehr ähnlichen Verteilung der Treibhausgas-Emissionen (gesamt: 226,2 kg CO₂-Äquivalente) aus, die zu 86 Prozent von der Stromerzeugung herrühren; allein die Druckschritte, das nasschemische Tauchen und die Substratreinigung zeigen geringe Unterschiede zwischen den Anteilen am Primärenergie-Einsatz und am Treibhauspotenzial.

Der energieintensivste Einzelschritt ist das Plasmaveraschen mit 23 Prozent des gesamten Primärenergieeinsatzes, gefolgt von den drei PECVD-Beschichtungsschritten (2 mal 13 bzw. 10 %), den beiden Trockenätzschritten (je 9%), den drei Lackdruckschritten (je 4%), sowie dem Nassätzschritt und der Substratreinigung (je 3%). Das Sputtern der Spiegelflächen und der ITO-Schicht benötigen am wenigsten Primärenergie (2,0 bzw. 1,3%).

Bezüglich der Treibhauswirkung sind Reihenfolge und Gewichtung bei den Plasmaprozessen gleich, während das Nassätzen und die Substratreinigung mit je 5 Prozent der Gesamtemissionen vor den Lackdruckschritten (je 2%) liegen.

Sollten Systemleckagen auftreten, wären allerdings noch die Treibhauswirkungen von nicht ausreagiertem N₂O und CHF₃ zu berücksichtigen. Keine der verwendeten Substanzen wurde als toxisch identifiziert.

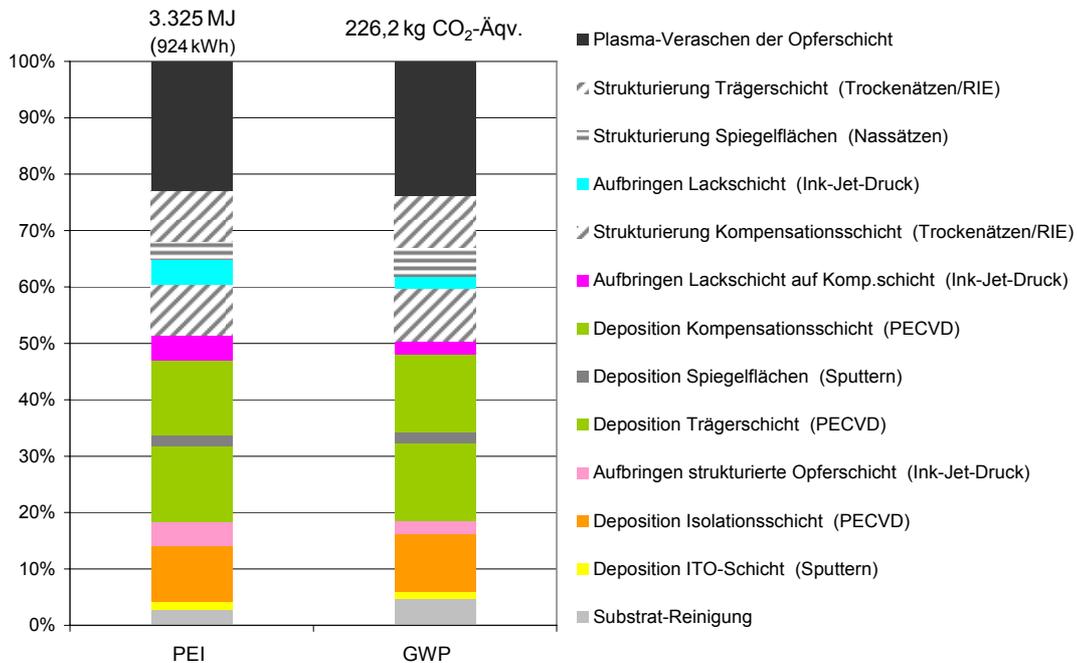


Abb. 3.7: Primärenergieeinsatz (PEI) und Treibhauspotenzial (GWP) der Mikrospiegel-Herstellung.

Schritt	Bezeichnung	PEI [MJ/m ²]	GWP [kg CO ₂ - Eqv./m ²]	φPEI [MJ]	GWP [kg CO ₂ - Eqv.]
1	Reinigung des Substrats (Glasscheibe)	13,5	1,5	94	10,5
2	Sputtern der leitfähigen Schicht (ITO)	6,1	0,4	43	3,0
3	Deposition der Isolationsschicht (SiO ₂) mittels PECVD	46,8	3,3	328	23,1
4	Aufbringen der strukturierten Opferschicht mittels Ink-Jet-Druck	21,2	0,7	148	5,2
5	Deposition der Spiegelträgerschicht (SiN _x /SiO ₂) mittels PECVD	63,1	4,4	442	31,1
6	Sputtern der Spiegelflächen (Al)	9,4	0,7	66	4,6
7	Deposition der Kompensationsschicht mittels PECVD	63,1	4,4	442	31,1
8	Aufbringen der Lackschicht auf der Komp.schicht mittels Ink-Jet-Druck	21,2	0,7	148	5,2
9	Strukturierung der Kompensationsschicht mittels Trockenätzen (RIE)	42,5	3,0	297	21,0
10	Aufbringen der Lackschicht mittels Ink-Jet-Druck	21,2	0,7	148	5,2
11	Strukturierung der Spiegelflächen im nasschemischen Prozess (Tauchen)	15,6	1,6	109	11,5
12	Strukturierung der Trägerschicht mittels Trockenätzen (RIE)	42,5	3,0	297	21,0
13	Veraschen der Opferschicht durch Unterätzen im Plasma-Reaktor	109,0	7,7	763	53,8
	SUMME	475,0	32,3	3.325	226,2

Die Herstellung des *Makro-Systems* wird zu knapp 80 Prozent von den Lamellen und Schienen aus Aluminium sowie durch deren Pulverbeschichtung bestimmt. Zweitgrößter Posten ist die Vorsatzscheibe mit 17 Prozent. Der Antrieb schlägt mit ca. 2 Prozent zu Buche. Der Primärenergie-Einsatz liegt mit 4.503 MJ (bzw. 1.251 kWh) ca. 35 Prozent über dem des Mikrospiegel-Systems. Auch hier wurden keine toxischen Substanzen identifiziert.

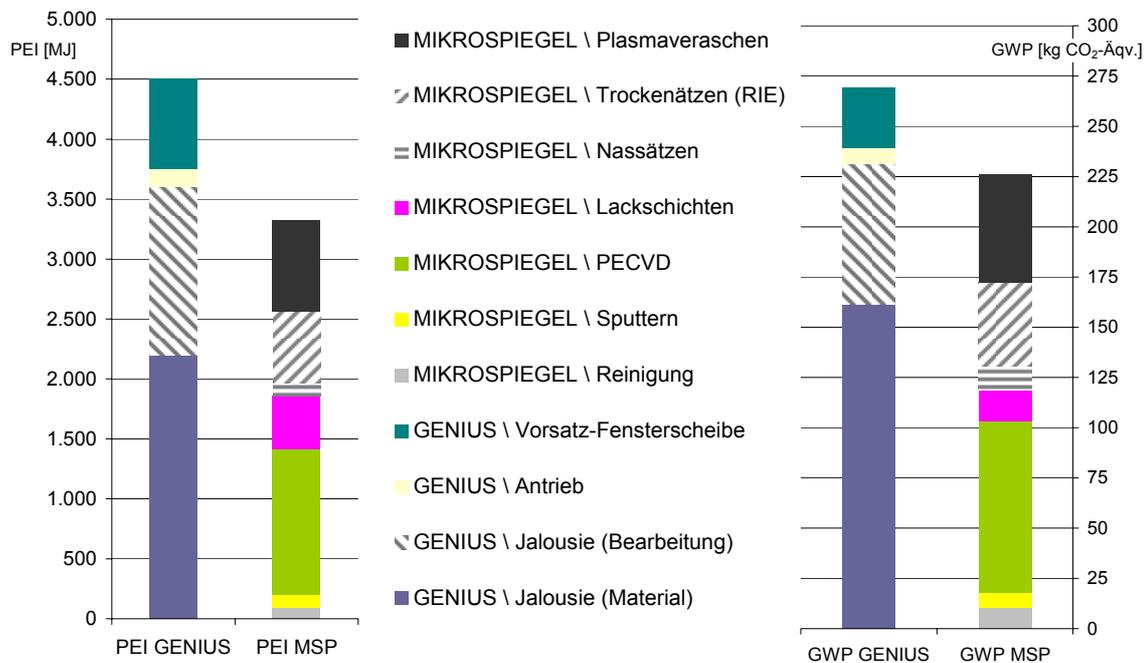


Abb. 3.8: Umweltwirkungen (PEI und GWP) der Herstellung beider Verschattungssysteme.

		PEI [MJ]	[%]	GWP [kg CO ₂ -Äqv]	[%]
GENIUS	Jalousie (Material)	2.204	48,9	161	59,9
	Jalousie (Bearbeitung)	1.398	31,0	70	25,9
	Antrieb	150	3,3	8	2,9
	Vorsatz-Fensterscheibe	752	16,7	30	11,2
SUMME GENIUS		4.503		269	
MIKROSPIEGEL	Reinigung	94	2,8	10	4,6
	Sputtern	109	3,3	8	3,4
	PECVD	1.211	36,4	85	37,7
	Lackschichten	444	13,4	16	6,9
	Nassätzen	109	3,3	11	5,1
	Trockenätzen (RIE)	595	17,9	42	18,5
	Plasmaveraschen	763	22,9	54	23,8
SUMME MIKROSPIEGEL		3.325		226	

3.2 Nutzungsphase

Das Ziel der Analyse der Nutzungsphase ist es den Effekt der beiden Fenster-Systeme auf den Primärenergieeinsatz für die Kühlung und die Beleuchtung von Büroräumen zu quantifizieren und zu vergleichen. Der Vergleichsraum ist in Abb. 3.1 zu sehen. Sie stammt aus [VDI2078]. Als relevanter Zeitraum für die Kühlung wurde die Periode 21. Juni bis 21. September gewählt. Die relevanten Bürozeiten eines Tages sind von 7 bis 18 Uhr [DIN18599-10].

Abb. 3.9 zeigt den implementierten schematischen Aufbau der Mikrospiegelarrays, der den bereits beschriebenen realen Aufbau abbildet. Es finden sich dort feststehende, bewegliche und gebogene Spiegelanteile, sowie die Zwischenräume. Vereinfachend wird angenommen, dass die Spiegelemente horizontal unterbrechungsfrei durchgezogen sind und, dass der gebogene Spiegelanteil ein ideales gerades Gelenk darstellt. In den folgenden Abschnitten werden die die Annahmen, die der Simulation zugrunde liegen, beschrieben.

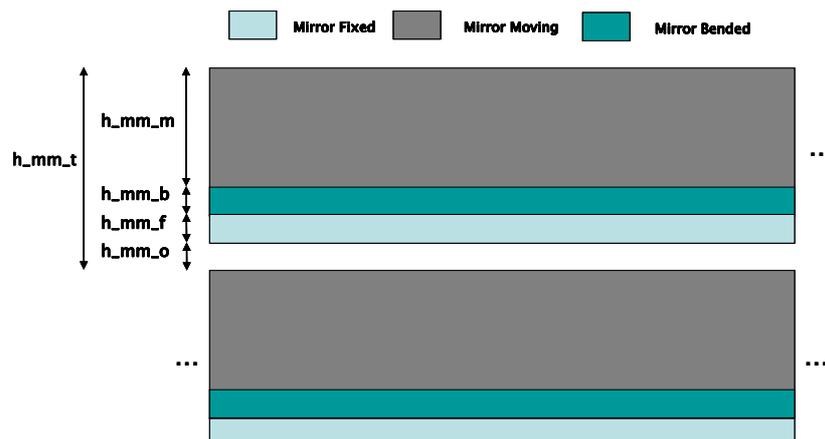


Abb. 3.9: Vereinfachter schematischer Aufbau der Mikrospiegel-Arrays mit Bezeichnungen: Schematischer Aufbau der Mikrospiegelarrays. Mirror Fixed (feststehender Spiegelteil), Mirror Moving (beweglicher planer Spiegelanteil), Mirror Bended (gebogener Spiegelanteil (Spiegelgelenk)).

3.2.1 Analyse des Wärmeeintrags

In diesem Teil wird analysiert wie viel Wärme dem Raum durch das Fenster in Form von solarer Strahlungsenergie und infolge des sekundären Wärmeeintrags zugeführt wird. Es wird angenommen, dass die eingetragene Wärme während der benannten Periode als Kühllast anfällt und somit Energie für die Klimatisierung erfordert. Die real anfallende Kühllast hängt, zusätzlich zu den betrachteten Faktoren, noch von einer Fülle anderer Faktoren ab, wie das Verhältnis der Fensterfläche zum Raumvolumen, der Bauart oder der Möglichkeit von Nachtlüftungen. Diese Faktoren bleiben hier unberücksichtigt, um den Einfluss des Fenstersystems exakter bestimmen zu können.

Grundlagen: g-Wert, Transmissionsgrad, sekundärer Wärmedurchlassgrad

In diesem Abschnitt sollen kurz grundlegende Begriffe geklärt werden. Für ausführlichere Erklärungen sei auf [DUF06] verwiesen. Trifft die Solarstrahlung I auf ein teil-transparentes Medium so wird sie reflektiert, absorbiert und transmittiert. Für den Zusammenhang dieser Größen gilt die folgende Formel.

$$\rho + \alpha + \tau_e = 1 \quad \text{Formel 1}$$

ρ : Reflektionsgrad

α : Absorptionsgrad

τ_e : Transmissionsgrad

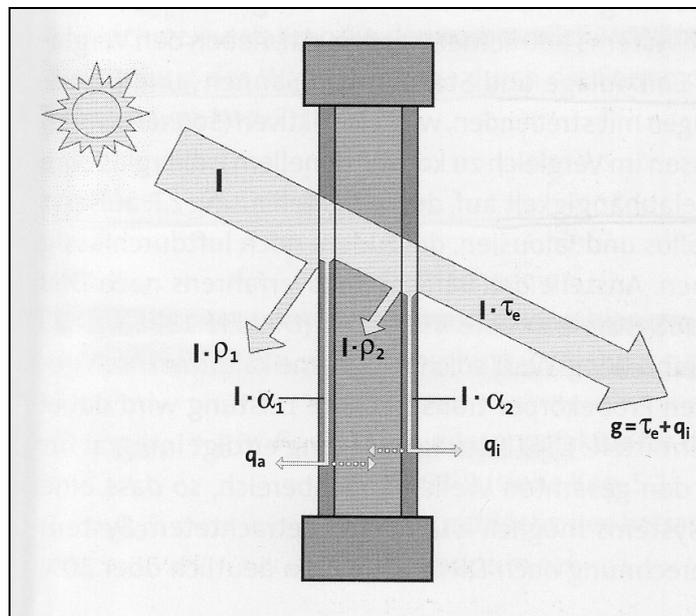


Abb. 3.10: Veranschaulichung der Energieflüsse und Begriffe: Reflektionsgrad ρ , Absorptionsgrad α , Transmissionsgrad τ_e , sekundärer Wärmeabgabegrad q_i und Gesamtenergiedurchlassgrad g [WAG07].

Der Gesamtenergiedurchlassgrad (g -Wert) wird zur Bewertung solarer Gewinne herangezogen. Die Zusammenhänge und die Ermittlung des g -Wertes ist in Abb. 3.14 veranschaulicht. Er entspricht dem Verhältnis der direkt transmittierten Strahlung ($\tau_e \cdot I$) über das gesamte solare Spektrum plus sekundären Wärmeabgabe in den Raum in Folge von Erwärmung durch Absorption zur gesamten Solarstrahlung außen.

$$g = \frac{\tau_e \cdot I + q_i}{I} \quad \text{Formel 2}$$

I : Solare Einstrahlung auf Fensterfläche

$\tau_e \cdot I$: Transmittierte Strahlung über gesamtes Solares Spektrum

q_i : Sekundäre Wärmeabgabe

3.2.1.1 Grundlagen der Berechnung des Mikrospiegel-Systems

Das Programm zur Berechnung dieser Kühllast wurde im Rahmen dieses Projektes entwickelt. Im Folgenden werden die Methoden und Randbedingungen beschrieben, welche diesem zugrunde liegen.

Zunächst wird zur Modellierung der solaren Einstrahlungsverhältnisse auf geneigte Flächen das HDKR Modell (Hay, Davies, Klucher, Reindl) eingesetzt [DUF06]. Dieses Modell errechnet auf der Grundlage von Messwerten für die Global-Horizontale und die diffuse Solarstrahlung und aus Angaben des Zeitpunktes, des Ortes und der Orientierung der Fläche eine Aufteilung der Strahlung in Direkt-, Diffus-Circumsolar, Diffus-Isotrop, Diffus-Horizontal und boden-reflektierter Strahlung. Die boden-reflektierte Strahlung wird bei den vorgenommenen Berechnungen vernachlässigt. Die stündlichen Werte für die Global-Horizontal und für die diffuse Strahlung in Kassel wurden mit dem Programm Meteonorm extrahiert.

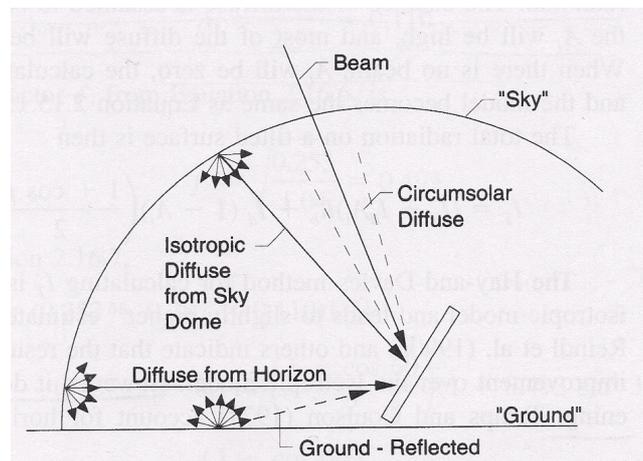


Abb. 3.11: Schematische Aufteilung der Solarstrahlung auf eine geneigte Fläche [DUF06].

Im Fall der betrachteten Verschattungselemente ist nicht nur die Intensität der einzelnen Strahlungsanteile, sondern auch deren Einfallswinkel von zentraler Bedeutung. Während der Einfallswinkel bei Direkter- und Diffus-Circumsolarer Strahlung in Sonnenhöhen und Azimutwinkel determiniert ist, kann dieser für die Diffus-Isotrope und die Diffus-Horizontale Strahlung nicht exakt ermittelt werden, sondern trifft aus festgelegten Bereichen auf die Fenster auf. Diese Bereiche werden in der Berechnung in gleich große Sektoren aufgeteilt aus denen jeweils die gleiche Strahlungsleistung auf die Fenstersysteme auftrifft. Somit kann der Einfluss der Diffus-Strahlung winkelabhängig analysiert werden.

Jeder einzelne Anteil der Solaren Strahlung trifft nun auf das Fenstersystem und dabei zunächst auf die äußere Fensterscheibe. An dieser wird die Strahlung reflektiert, transmittiert und absorbiert. Der Anteil der reflektierten und der transmittierten Strahlung wird mit den Gleichungen von Fresnel berechnet. Es ergibt sich ein winkelabhängiger Reflektions- und Transmissionsgrad der von der optischen Brechungsindex des verwendeten Glas abhängt. Die

Absorption eines teiltransparenten Mediums wird mit der Gleichung von Bouguer bestimmt. Diese Berechnungen finden jeweils statt, wenn die Strahlung auf eine Fensterscheibe trifft. Die absorbierte Strahlung bewirkt eine Erwärmung der Scheibe. Über die Berechnung der Wärmetransportmechanismen wird der Anteil des Wärmestroms, der zum Raum fließt berechnet. Die Grundlegenden Gleichungen für diesen Abschnitt finden sich beispielsweise in [DUF06, S. 204-213].

Transmissionsgrad

Die Beschreibung der Berechnung der Vorgänge an den Fensterscheiben erfolgte im vorherigen Abschnitt. Der transmittierte Anteil der Solaren Strahlungskomponente trifft nun auf die Mikrospiegel-Arrays. Wie bereits weiter oben beschrieben, besteht die Oberfläche der Mikrospiegel aus Aluminium. Der Transmissionsgrad des Aluminiums wird vernachlässigt. Daher kann die Strahlung dort nur reflektiert oder absorbiert werden. Der Reflektionsgrad des Aluminiums hängt stark vom Zustand der Oberfläche ab. Bei guter Oberflächenqualität wird er in geringem Maße von der Wellenlänge und vom Einfallswinkel der Strahlung beeinflusst; diese Einflüsse werden hier vernachlässigt. Der Reflektionsgrad wird mit 90 % über das gesamte Spektrum angenommen [KAM02]. Ein anderer Teil der Strahlung wird durch die Zwischenräume in den Arrays transmittiert.

Der Teil der Strahlung, welcher durch die Spiegelflächen reflektiert und wieder durch die äußere Scheibe nach außen transportiert wird verursacht eine Wärmeentwicklung in dieser Scheibe. Diese wird teilweise nach Außen und teilweise zum Raum geleitet. Der absorbierte Teil der Strahlung wird direkt in den Spiegeln in Wärme umgewandelt und ebenfalls teilweise zum Raum geleitet.

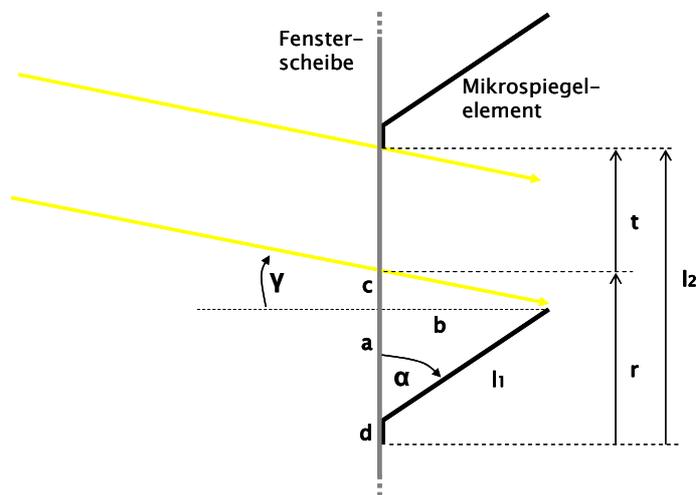


Abb. 3.12: Schematische geometrische Darstellung zweier Spiegelemente, der Fensterscheibe und der auftreffenden Solarstrahlung.

Die geometrische Bestimmung des transmittierten Anteils für horizontal angeordnete Spiegel wird in Abb. 3.12 veranschaulicht. Es sind in zweidimensionaler Darstellung die Fensterscheibe, zwei Mikrospiegelemente und exemplarisch die beiden Solarstrahlen dargestellt, welche gerade

noch diese Anordnung passieren können. Die Strahlung in den Bereichen a, c und d wird reflektiert. Das Verhältnis von transmittierter zu reflektierter Strahlung wird im Folgenden Abdeckungsgrad ψ genannt. Bei horizontal angeordneten Spiegelementen hängt er von der Geometrie der Spiegelanordnung und dessen Anstellwinkel α und von der Sonnenhöhe γ ab. Die Formeln zur Berechnung des Abdeckungsgrads sind folgende:

$$\begin{aligned}
 a &= l_1 * \cos \alpha \\
 b &= l_1 * \sin \alpha \\
 c &= b * \tan \gamma \\
 r &= a + c + d \\
 \psi &= \frac{r}{l_2} = \frac{l_1 * \cos \alpha + l_1 * \sin \alpha * \tan \gamma + d}{l_2}
 \end{aligned}$$

Formeln 3

l_1 : Länge des beweglichen und des gebogenen Teils des Mikrospiegels

l_2 : Länge eines kompletten Mikrospiegelsegments einschließlich des unbedeckten Bereichs

d: Länge des fixierten Teils des Mikrospiegels

α : Anstellwinkel des Mikrospiegels

γ : Sonnenhöhe

Abschließend wird die Bedingung geprüft, ob das reflektierte Licht auf die Rückseite des darüber oder darunter liegenden Spiegels geworfen wird. Ist dies der Fall, so wird angenommen, dass das gesamte Licht, bis auf den Teil der an den feststehenden Spiegelementen reflektiert wird, die Mikrospiegel-Arrays passiert. Letztlich bleibt zur Berechnung der transmittierten Solarstrahlung durch das Fenstersystem noch die Bestimmung des reflektierten und absorbierten Anteils.

Schließlich wird angenommen, dass der Anteil der Solarstrahlung, der die 2. Scheibe erreicht auch für eine Erwärmung des Raumes sorgt. Die Reflektion und die Absorption in dieser Scheibe werden also vernachlässigt. Dementsprechend wird die Kühllast eher höher berechnet als im realen Fall. Es handelt sich somit um eine sichere Abschätzung. Insgesamt ergibt sich für die Berechnung des Transmissionsgrades für ein Fenstersystem mit Mikrospiegelarrays folgender Zusammenhang

$$\tau_{ges} = \tau_{F1} * (1 - \psi)$$

Formel 4

Sekundärer Wärmeeintrag

Der sekundäre Wärmeeintrag resultiert aus der Solarstrahlung die in den Scheiben und in den Mikrospiegel-Arrays absorbiert und in Wärme umgesetzt wurde. Abhängig von den Wärmetransport Eigenschaften des Fensteraufbaus wird ein Teil dieser Wärme nach Außen, ein Teil nach Innen und ein Teil in Querrichtung transportiert. Die Wärmetransportvorgänge in Querrichtung werden in diesen Berechnungen vernachlässigt.

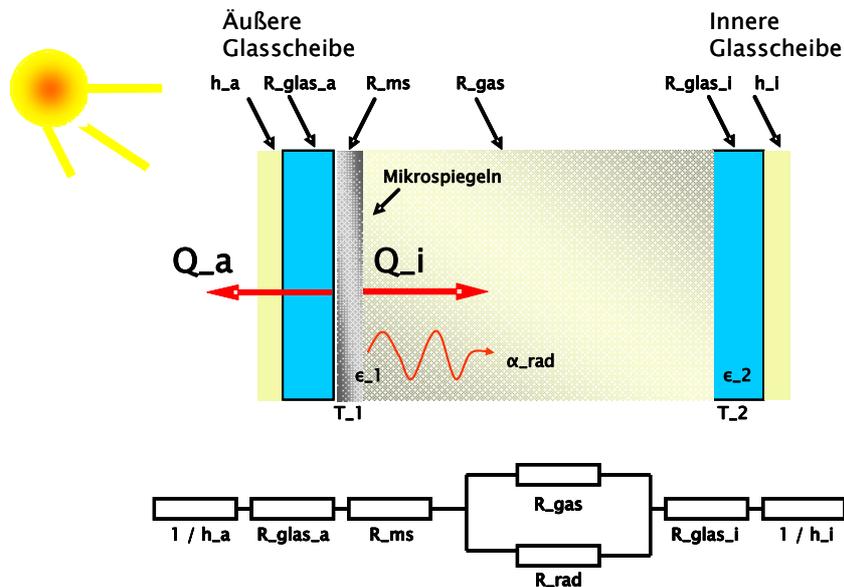


Abb. 3.13: Schematische Darstellung der relevanten Parameter und des Ersatzschaltbilds für den Wärmetransport.

Abb. 3.13 zeigt die grundlegenden Parameter für die Berechnung des sekundären Wärmeeintrags Q_i . An den Übergängen zwischen der Außen- bzw. der Raumluft zur Scheibe sind der äußere und der innere Wärmeübergangskoeffizienten h_a und h_i zu erkennen. Darauf folgen die Wärmedurchlasswiderstände der äußeren und der inneren Glasscheibe R_{glas_a} und R_{glas_i} , der Mikrospiegel R_{ms} und des Zwischenraums, welcher mit Gas gefüllt ist R_{gas} . Parallel zur Wärmeleitung über dieses Gas im Zwischenraum wird ein signifikanter Anteil der Wärme zwischen den Mikrospiegeln und der inneren Glasscheibe über Strahlung transportiert. Der Betrag dieser Strahlung hängt von der Emissivität der beiden korrespondierenden Flächen (ϵ_1 und ϵ_2) und von deren Temperaturen (T_1 und T_2) ab. Die Berechnung dieses Wärmestroms erfolgt mit einer sicheren Abschätzung der Gleichung von Stefan Boltzmann [SCH95, S. 56ff]. Wärmetechnisch sind die einzelnen Komponenten so verkoppelt, wie es im Ersatzschaltbild zu sehen ist. Die Breite des Fensterzwischenraums ist so gewählt, dass die konvektiven Wärmetransportvorgänge vernachlässigt werden können. Dominierend sind die Wärmetransportmechanismen, die auf Strahlung beruhen [SCH95, S. 55].

3.2.1.2 Grundlagen der Berechnung des Fenstersystems Warema Genius

Die Berechnung des Wärmeeintrags der Fenstersystems Warema Genius erfolgt auf der Grundlage winkelabhängiger g-Werte. Diese wurden aus [KUH07] gewonnen und sind in Abb. 3.15 zu sehen. Da die Genius-Lamellen um 30° gegenüber der Horizontalen angestellt sind, sinkt der Gesamtenergiedurchlassgrad bei steigendem Höhenwinkel. Nun wird für die außen auftreffende Solarstrahlung I , bewertet mit Höhen- und Azimuthwinkel, der g-Wert interpoliert und ausgelesen und der entsprechend der Wärmeeintrag in den Raum bestimmt

$$I \cdot \tau_e + q_i = g_{tot} \cdot I \quad \text{Formel 5}$$

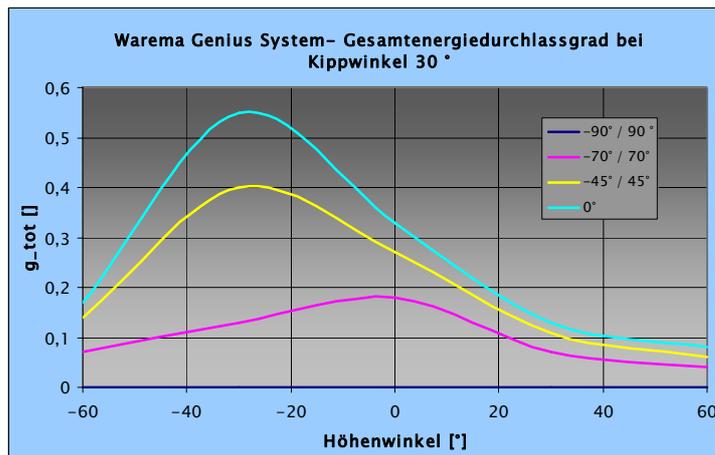


Abb. 3.14: Winkelabhängiger Gesamtenergiedurchlassgrad (g -Wert) des Fenstersystems Warema Genius.

3.2.1.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulation der Wärmeeinträge sind in Abb. 3.14 zu sehen. Die verschiedenen Abschnitte der Balken repräsentieren den Anteil der verschiedenen solaren Strahlungsanteile am Wärmeeintrag. Es ist zu erkennen, dass die gesamte solare Einstrahlung auf die äußere Fensterfläche über die betrachtete Periode 1417 kWh beträgt. Der Wärmeeintrag durch das beschriebene Fenstersystem mit Mikropiegeln beträgt 300 kWh und ist damit knapp doppelt so hoch wie der Wärmeeintrag durch das Fenstersystem mit „Genius“ Lamellen (167 kWh). Das liegt unter anderem daran, dass es sich beim „Genius“ System um ein dreifach-verglastes System mit Wärmeschutzverglasung handelt. Ein wesentlicher energetischer Anteil der Strahlung wird bereits durch die Fensterflächen reduziert. Dies wird sich auch mindernd auf das Ausleuchtungsverhalten des Genius-Systems auswirken.

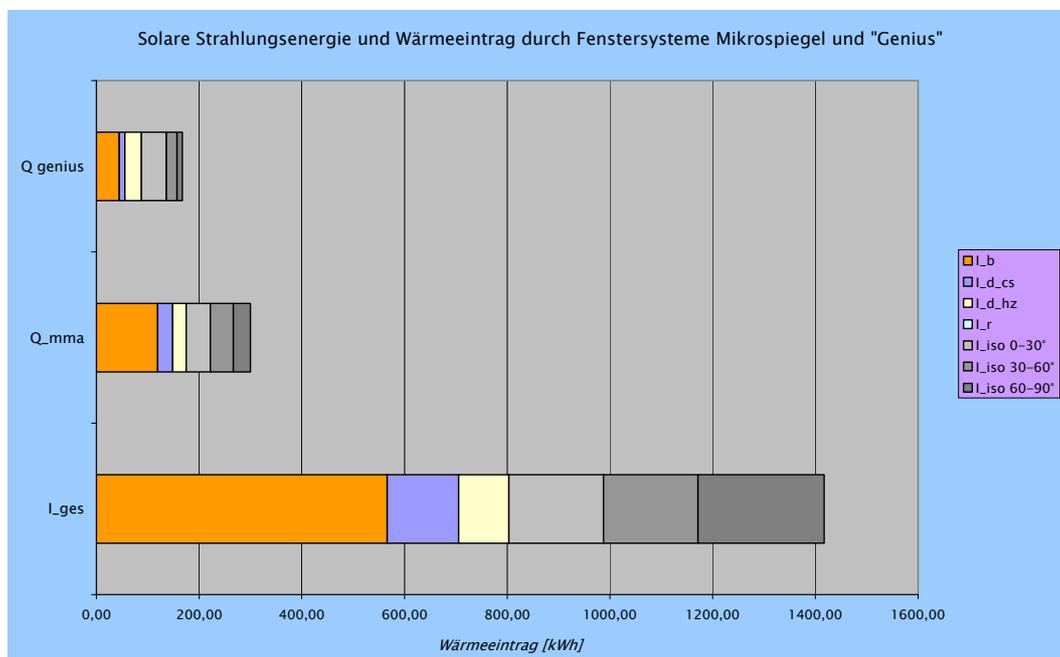


Abb. 3.15: Wärmeeintrag über die Vergleichsperiode (21. Juni-21. September) von verschiedenen Fenstersystemen. Verwendete Bezeichnungen: I_b : Direktstrahlung (Beam); $I_{d\ cs}$: Diffus-Circumsolar; $I_{d\ hz}$: Diffus-Horizontal; I_r : Reflektierte Strahlung; $I_{iso\ 0-30^\circ}$: Diffus-Isotrope Strahlung aus dem Höhenwinkel $0-30^\circ$; $I_{iso\ 30-60^\circ}$ und $I_{iso\ 60-90^\circ}$ entsprechend.

3.2.2 Analyse der Ausleuchtung

Im Folgenden werden die Grundlagen und Randbedingungen der Simulationen erläutert. Alle Simulationen der Ausleuchtung werden mit dem Programm Radiance durchgeführt, welches auf physikalischer Grundlage die Lichtstrahlen verfolgt, die von Lichtquellen ausgesandt werden und daraufhin in Interaktion mit den Materialien treten, auf die sie treffen.

Nach [DIN 18599-10] sollte die Beleuchtungsstärke in Einzel-, Gruppen-, Großraumbüros und Besprechungszimmern einen Sollwert von 500 Lux aufweisen. Entsprechend der obigen Beschreibung wird als Referenzraum ein Einzelbüro gewählt. Die Beleuchtungsstärke wird mittig im Raum vom Fenster zur hinteren Wand des Raums auf einer Höhe von 80 cm analysiert. Die Stellen, an denen die Beleuchtungsstärke aufgenommen wird sind in Abb. 3.1 ersichtlich. Zur Simulation des Tageslichtes, welches durch die Fenstersysteme in den Raum einfällt, wird das CIE Standard Sky Himmelmmodell eingesetzt. Dieses wird über das Radiance Programm gensky berechnet.

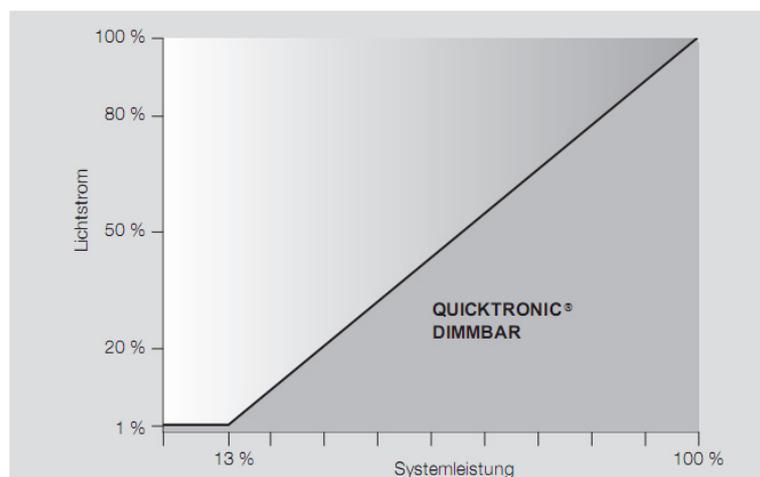


Abb. 3.16: Zusammenhang zwischen Elektrischer Systemleistung von Leuchtstofflampe, Vorschalt- und EVG Gerät zum Lichtstrom der Lampe für ein typisches System [OSR00].

Ist die Beleuchtungsstärke, die aus dem Tageslichteintrag resultiert nicht ausreichend um den Sollwert von 500 Lux zu erreichen, so wird nach dem Prinzip der Superposition mit dimmbarem Kunstlicht genau in dem Maße zusätzlich ausgeleuchtet, bis der Sollwert erreicht wird. Dazu sind an der Decke des Raumes drei indirekte Beleuchtungssysteme (Abb. 3.1) mit jeweils 2 Leuchtstoffröhren a 54 Watt Leistung installiert und mit einem Vorschalt- und Dimmgerät versehen. Ein exemplarisch ausgewähltes System hat einen optischen Wirkungsgrad von 87,6 % und eine maximale Leistung von 324 W [LAL09].

Simulationen der Beleuchtungsstärke mit ausreichender Genauigkeit benötigen einen relativ hohen Rechen- und Zeitaufwand. Deshalb werden diese Simulationen nicht stündlich durchgeführt, sondern lediglich der Verlauf an 4 Referenztagen (21. Juni, 21. Juli, 21. August, 21. September) an den Zeitpunkten 7, 8, 10, 12, 14, 16, 17 und 18 Uhr (Mitteleuropäische

Sommerzeit MESZ). Die Werte der Beleuchtungsstärke für die zwischenliegenden Uhrzeiten und für die gesamte Periode werden mittels Interpolation ermittelt. Die aus dieser Mittelung resultierende Abweichung gegenüber den realen Verhältnissen fällt weniger stark ins Gewicht, weil die beiden Vergleichssysteme nach demselben Konzept behandelt werden.

Der resultierende elektrische Endenergiebedarf für die Beleuchtung wird berechnet aus der maximalen elektrischen Leistung der Beleuchtung und dem errechneten Dimmfaktor zur Erreichung des geforderten Sollwerts für die Beleuchtungsstärke. Die Wirkungsgrad des Gesamtsystems Lampe-Vorschaltgerät für verschiedenen Arbeitspunkte wird mittels der Zusammenhänge in Abb. 3.16 interpoliert.

Ergebnisse

In den folgenden Plots sind die durchschnittlichen Beleuchtungsstärken resultierend aus dem einfallenden Tageslicht für das Mikrospiegel-Fenstersystem (siehe Abb. 3.17) und des Genius-Fenstersystems (Abb. 3.18) in den 3 Bereichen des Raums über der Zeit zu erkennen. Es ist zu erkennen, dass sich bei den gewählten Konfigurationen mit dem Mikrospiegel-Fenstersystem eine erheblich bessere Ausleuchtung mit Tageslicht ergibt als mit dem Genius-Fenstersystem. Insgesamt werden über diese Periode mit dem **Mikrospiegel-Fenstersystem 132,4 kWh elektrische Endenergie** für die Beleuchtung benötigt, während für das **Genius-Fenstersystem 255,4 kWh** anfallen.

Ferner ist zu erkennen, dass durch eine angepasste Regelung des Mikrospiegel Systems erhebliche Potentiale für weitere Energieeinsparungen bestehen. In allen Bereichen des Raums, bis hin zum hinteren Raumbereich C, sind die Beleuchtungsstärken über große Zeiträume weit über der geforderten Soll-Beleuchtungsstärke. Somit könnten größere Flächen der Mikrospiegel-Arrays abgeblendet werden, ohne die Sollwerte zu unterschreiten. Daraus würde ein geringerer Wärmeeintrag resultieren.

Abschließend zeigt Abb. 3.19 für beide Systeme den Verlauf des täglichen elektrischen Energiebedarfs für die Beleuchtung über die gesamte betrachtete Periode. Es zeigt sich ein relativer konstanter Bedarf, wobei das Niveau des Genius Systems knapp doppelt über dem des Mikrospiegel-Systems liegt.

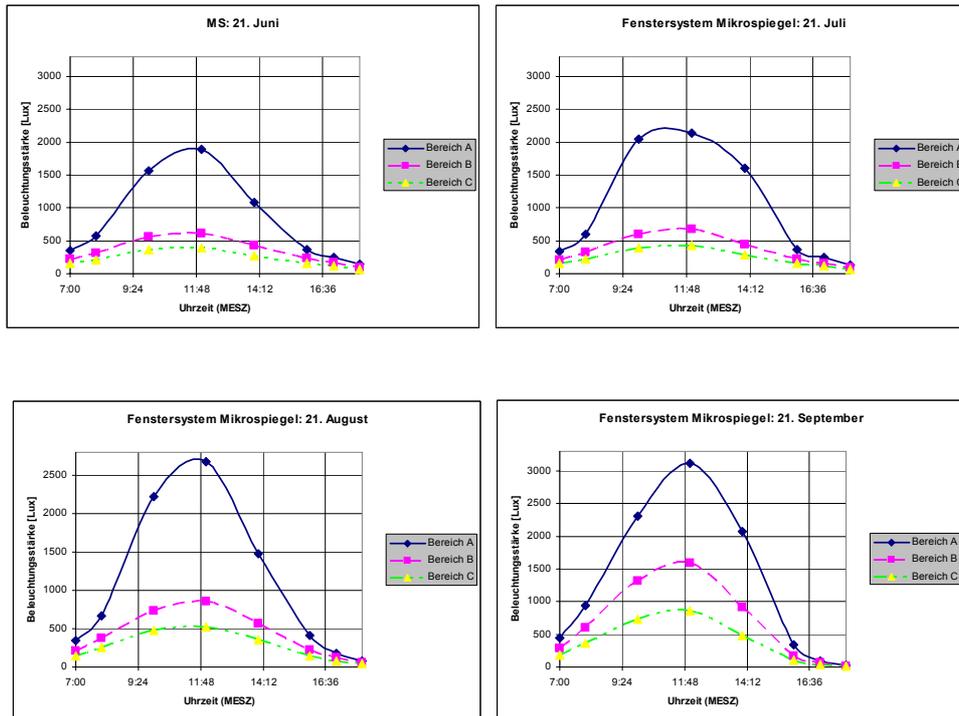


Abb. 3.17: Die Diagramme zeigen die Beleuchtungsstärke für das Mikrospiegel-Fenstersystem in den Raumbereichen A, B, C.

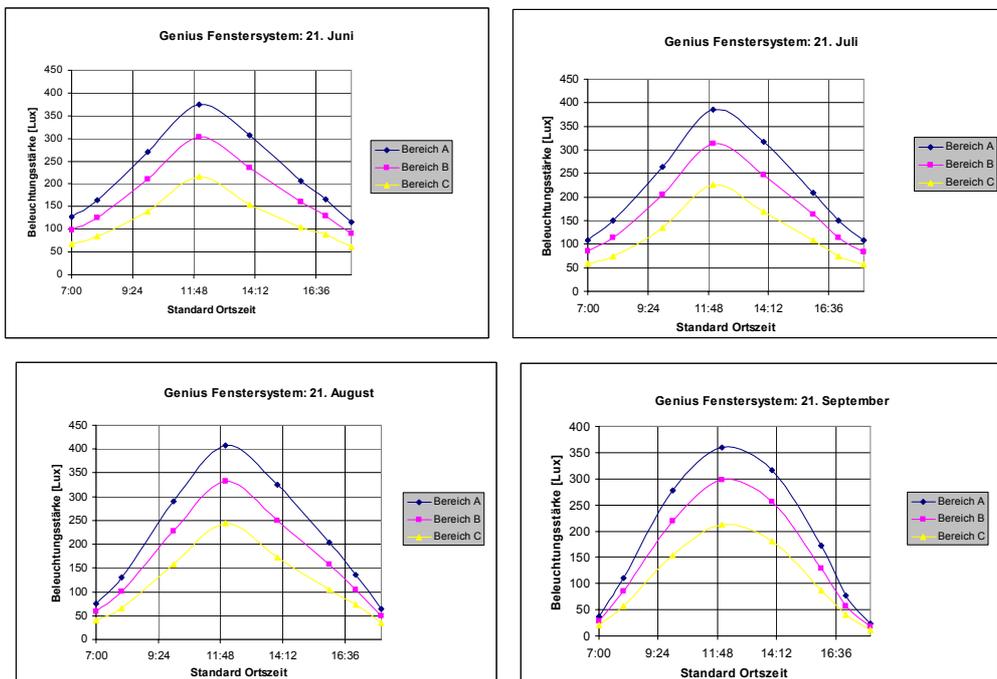


Abb. 3.18: Die Diagramme zeigen die Beleuchtungsstärke für das Makro-Jalousie System in den Raumbereichen A, B, C.

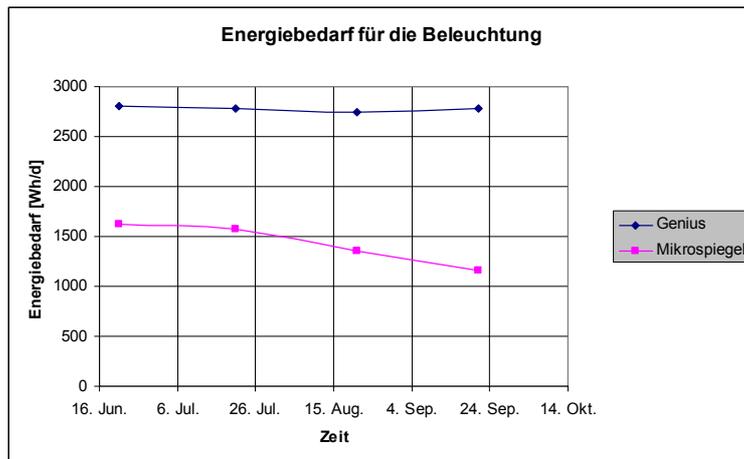


Abb. 3.19: Durchschnittlicher Täglicher Energiebedarf für die elektrische Beleuchtung nach Berechnungen mit Radiance.

3.3 Recycling

Mikrospiegel-System: Die verwendeten Beschichtungsmaterialien sind bei den geringen Schichtdicken nicht sinnvoll zu recyceln. Das Fensterglas könnte ggf. als Rohstoff für die Herstellung von Schaumglas oder Glaswolle Verwendung finden – ein echtes closed-loop-Recycling wäre jedoch nur für die entschichtete Glasscheibe möglich. Der Abtransport der Glasscheiben und die Zuführung zu einem Glasrecycling werden hier wie auch beim Makro-System als neutral angenommen, d. h. der Aufwand wird durch eine Gutschrift für den Sekundärrohstoff aufgewogen.

Makro-System: Sämtliche Bestandteile des Verschattungssystems können in bestehenden Recyclingstrukturen einer Wiederverwendung zugeführt werden. Besonders für die Metallteile ist ein echtes Recycling üblich und auch bereits in den Datensätzen für die Werkstoffbereitstellung bei der Herstellung als Sekundärmetall-Anteil berücksichtigt. Durch die Pulverbeschichtung der relativ dünnen Profile und besonders der dünnen Lamellenbleche ist das Recycling jedoch erschwert. Für die Kunststoffteile und das Fensterglas (Rohstoff für die Dämmstoffe Glaswolle und Schaumglas) werden keine Gutschriften angesetzt, andererseits bleibt, wie beim Mikrospiegel-System, auch der Energieaufwand für den Abtransport dieser Teile unberücksichtigt.

3.4 Ergebnisse in Wirkkategorien

Für eine abschließende Betrachtung werden die Aufwendungen für die Herstellung der Verschattungssysteme mit dem Energieeinsatz für die Beleuchtung (d. h. den verbleibenden Kunstlichtbedarf) und die Raumkühlung verrechnet. Die Recyclingphase bleibt, wie zuvor beschrieben, neutral bzw. ist bereits in der Werkstoffbereitstellung der Herstellungsphase berücksichtigt.

Zusätzlich ist beim Mikrospiegelsystem eine Halteenergie erforderlich. Sie beträgt, wie bereits beschrieben, $0,1 \text{ W/m}^2$. Im Betrachtungszeitraum von 90 Tagen zu je 11 Stunden Bürozeit bei

einem Wirkungsgrad von 25 Prozent für das Gesamtsystem verursacht dies einen Stromverbrauch von weniger als 3 kWh. Der Endenergiebedarf für Kunstlicht wird 1:1 als Strombedarf eines Großverbrauchers auf Niederspannungsebene bilanziert (Gemis Netz-el-DE-Trafo-MS/NS_2005: Primärenergiefaktor 2,33 kWh/ kWh_{el}). Die Raumkälte wird mit einer elektrisch betriebenen Kältemaschine mit der Arbeitszahl 3 bereitgestellt. Die ermittelten Werte beziehen sich für den betrachteten Zeitraum von 25 Jahren auf die Sommermonate.

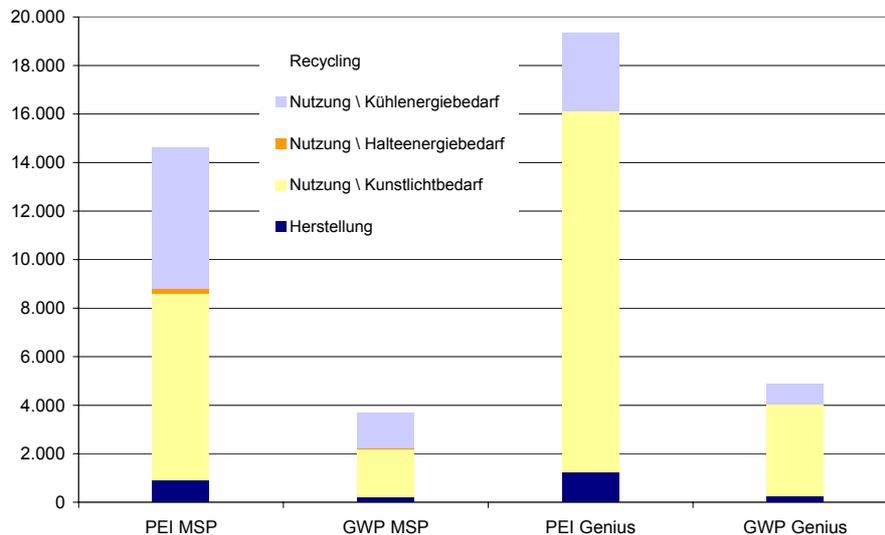


Abb. 3.20: PEI und GWP der Verschattungssysteme über eine Nutzungsdauer von 25 Jahren (Betrachtungszeitraum: jeweils 21.06. – 21.09.)

	MIKROSPIEGEL			GENIUS		
	EndEn	PEI **	GWP **	EndEn	PEI **	GWP **
	[kWh/a] *	[kWh/a] *	[kg CO ₂ Äqv/a] *	[kWh/a] *	[kWh/a] *	[kg CO ₂ Äqv/a] *
Nutzung \ Kunstlichtbedarf	132,4	308	78	255,4	594,4	151
Nutzung \ Halteenergiebedarf	2,8	7	2	0	0,0	0
Nutzung \ Kältebedarf ***	300 / 3	233	59	167 / 3	129,6	33
Nutzung \ Summe	235,2	547	139	311,1	723,9	184

	[kWh/25a] *	[kWh/25a] *	[kg CO ₂ Äqv/25a] *	[kWh/25a] *	[kWh/25a] *	[kg CO ₂ Äqv/25a] *
Herstellung		924	226		1.251	269
Nutzung \ Kunstlichtbedarf	3.310	7.703	1.956	6.385	14.860	3.773
Nutzung \ Halteenergiebedarf	70	163	41	0	0	0
Nutzung \ Kühlenergiebedarf ***	2.500	5.818	1.477	1.392	3.239	822
Nutzung \ Summe	5.880	13.685	3.475	7.777	18.099	4.595
Recycling ****	-	-	-	-	-	-
SUMME LCA		14.608	3.701		19.349	4.865
		-4.741	-1.164			

* Betrachtungszeitraum: Sommerperiode 21.06. - 21.09.

** Datensatz Elektrizität: Gemis 4.42 / Netz-el-DE-Trafo HS/MS-2005

*** Kältemaschine mit Arbeitszahl 3,0

**** neutral bzw. in Werkstoff-Datensatz Herstellung berücksichtigt

Das Mikrospiegelsystem kann die Umweltvorteile bei seiner Herstellung während der Nutzungsdauer noch weiter ausbauen: über einen Betrachtungszeitraum von 25 Jahren werden über 4.700 kWh Primärenergie gegenüber der Makro-Jalousie eingespart. Der um ca. 80% höheren Kältebedarf wird durch eine Halbierung des Kunstlichtbedarfs überkompensiert und damit nicht nur die Lichtqualität deutlich verbessert, sondern auch der Energiebedarf für die Belichtung reduziert.

4 Fazit

Es wurde ein 6cm x 6cm großes Modul entworfen, bestehend aus 9 Untersegmenten, die, einzeln ansteuerbar, die Funktionalität der „Aktiven Fenster“ demonstrieren sollen. Dazu wurden mikrosystemtechnische Prozessschritte entwickelt, unter Verwendung der Materialien Glas, Indium-Zinn-Oxid, Siliziumoxid, Siliziumnitrid und Aluminium, sowie der Verfahren Ionenstrahlputterdeposition, plasmaunterstützte Gasphasendeposition und Elektronenstrahlverdampfen. Als Mikrostrukturierungsverfahren wurde Photolithographie eingesetzt. Alle eingesetzten Materialien und Verfahren erlauben einen späteren Transfer auf Industrieanlagen.

Die nahezu fehlerfreie Aktuierung der 2cm x 2cm großen Untersegmente des Demonstratormoduls wurde gezeigt. Die Segmente wiesen dabei eine „Pixelfehlerdichte“ von unter 2% auf. Das geometrische Verhältnis zwischen offenem und geschlossenem Zustand (Tastverhältnis) liegt im aktuellen Design im offenen Zustand bei 34% Bedeckungsgrad gegenüber 95% Bedeckungsgrad im geschlossenem Zustand. Die Leistung zum Halten der Spiegel in einer definierten Position beträgt $0,1\text{W}/\text{m}^2$. Die Spannung, um die Spiegel voll zu aktuieren, beträgt rund 80V. Die „Pixelfehlerdichte“ von etwa 2 Prozent sollte noch verbessert werden. Die Aktuierungs- und Lebensdaueruntersuchungen haben gezeigt, dass die Mikrospiegelemente sowohl einer dauernden Bewegung über mehrere Tage als auch einer hochfrequenten Bewegung bis zu 2kHz standhalten.

Die energetische und ökologische Betrachtung zeigt für die Herstellungsphase deutliche Vorteile für das Mikrospiegelsystem (PEE: 3325 MJ bzw. 924 kWh) gegenüber dem Jalousiesystem „Genius“ (PEE: 4503 MJ bzw. 1251 kWh). Auch die Treibhauswirkungen liegen mit 226 kg CO₂-Äquivalent um ca. 19 % unter denen der Jalousieherstellung (269 kg CO₂-Äquivalent). Die Umweltwirkungen der Herstellung des Mikrospiegel-Systems resultieren hauptsächlich aus dem elektrischen Energiebedarf. Es wurden keine toxischen Substanzen bei der Herstellung der Systeme identifiziert. Ein Recycling des Mikrospiegel-Systems ist wegen der geringen eingesetzten Materialmengen (Dünnschichten) nicht sinnvoll. Die Glasscheiben können beispielsweise bei der Herstellung von Dämmstoffen (u.a. Glaswolle) verwendet werden.

Während der Nutzungsdauer über einen Zeitraum von 25 Jahren werden in den betrachteten Sommerperioden über 4.700 kWh Primärenergie gegenüber der Makro-Jalousie eingespart. Das Mikrospiegel-System verursacht bei der gewählten Konfiguration einen um ca. 80 Prozent höheren Kühlenergiebedarf (5818 kWh). Allerdings wird dies durch einen geringeren Energiebedarf für die Beleuchtung überkompensiert (Mikrospiegel-System 7703 kWh gegenüber 14860 kWh für das Makro-Jalousiesystem). In der Gesamtbetrachtung macht der Energiebedarf für die elektrische Beleuchtung den größten Anteil aus. Die Untersuchung wurde mit einer statischen Winkeleinstellung für die Lamellen bzw. für die Mikrospiegel durchgeführt. Es zeigt sich, dass durch eine angepasste Regelung der Einstellwinkel noch erhebliches Energieeinsparpotenzial beim Mikrospiegel-System besteht, vor allem im Bereich der Beleuchtung.

Die Machbarkeit von Mikrospiegelmodulen einer Größe von 6 cm x 6 cm im Labormaßstab unter Verwendung von „low-cost“-Materialien und Prozessen wurde gezeigt. Der optische Eindruck der Mikrospiegelanordnungen ist für eine künftige Anwendung im Sichtbereich geeignet. Die Aktuationsspannung von rund 80V ist für die elektrostatische Aktuierung eines Mikrosystems vergleichsweise gering. Der Strom, um die Spiegel in einer definierten Position zu halten, hat mit aktuell 0,1W /m² bereits Energieeinsparpotential. Die entwickelten mikrosystemtechnologischen Prozesse sind in der jetzigen Form für einen Transfer auf Industrieanlagen geeignet. Die vergleichende ökologische und energetische Bilanzierung hat ergeben, dass ein System aus derartigen Mikrospiegel-Modulen aufgebaut, in der Herstellungsphase vergleichbare Werte liefert, in der Nutzungsphase ein deutlich höheres Energieeinsparungspotenzial als das Vergleichssystem mit makroskopischen Lamellen hat.

5 Anhang

5.1 Literatur

- [ACK06] Ackermann, J. (2006). Technologische Realisierung großflächiger Mikrospiegelarrays - Entwicklung von Prozessschritten für low-cost-Mikrospiegel. Universität Kassel, Fachbereich Elektrotechnik.
- [ACK07] Ackermann, J., Viereck, V., Dharmarasu, N., & Hillmer, H. (2007). Mikrosystemtechnische Lichtlenksysteme auf der Basis von Mikrospiegelarrays für Photovoltaische Anlagen an Gebäuden.
- [BAR08] Bartels, M., Viereck, V., Li, Q., Ackermann, J., Jäkel, A., Schmid, J., et al. (2008). Die Sonnenbrille fürs Büro: Mikrospiegel-Arrays zur Lichtlenkung, Tagungsband Thüringer Gernz- und Oberflächentage und Thüringer Kolloquium "Dünne Schichten in der Optik", 2008, S. 66-70.
- [DIE08] Telefonische Auskunft Herr Diener, Fa. Diener, Nagold
- [DIN13363-1] DIN EN 13363-1:2003+A1:2007: Sonnenschutzeinrichtung in Kombination mit Verglasungen- Berechnung der Solarstrahlung und des Lichttransmissionsgrades- Teil 1
- [DIN18599-10] DIN V 18599-Teil 10: 2007/02: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten
- [DUF06] J. Duffie, W. Beckman: Solar Engineering of Thermal Processes; John Wiley & Sons, 3. ed, 2006, S. 204-210
- [ECO04] Frischknecht R, Jungbluth N, e. a.: ecoinvent Data v1.1, Schweizer Zentrum für Ökoinventare, CH-Dübendorf, 2004
- [GEM07] Fritsche e. a.: Gemis 4.42, Öko-Institut Darmstadt, 2007
- [HEI09] Heidelberger Druckmaschinen AG, Heidelberg
- [HI07] Hillmer, H. (2007). Innovative Lichtlenksysteme auf Basis von Mikrospiegelarrays. hessen-nanotech NEWS , 1/07, 5.
- [HIL07] Hillmer, H. (2007). Micromirror arrays: sun glasses for buildings, (invited, key note), NanoEquity Europe, Hilton Frankfurt, 2007.
- [HIIM07] H. Hillmer; J. Schmid: Tandem Vortrag: Nano- und Mikrotechnologien im Dienste der nachhaltigen Entwicklung, 4. Nanotechnologieforum Hessen: What's next for International Nanomarkets, 2007.
- [HIL03] Hillmer, H., Schmid, J., & Stadler, I. (2003). Mikrospiegelarray. DE 103 58 967.
- [HL06] Genius Ersatzteil-Liste, HL GmbH, Oldenburg, 2006
- [HUE] Hüppe Genius: Die Revolution im Sonnenschutz, Herstellerbroschüre der Fa. hüppelux, Oldenburg (Hersteller bis zur Insolvenz 2005), ohne Ort und Jahr

- [INT07] Interpane AG: Gestalten mit Glas, Lauenförde, 7. Aufl., 2007
- [INT09] Telefonische Auskunft Herr Böwer, Fa. Interpane
- [JAE07] Jäkel, A.: Herstellung, Charakterisierung und Optimierung eines Low-Cost Mikrospiegel Arrays zur Tageslichtlenkung. Diplomarbeit, Universität Kassel, Fachbereich Naturwissenschaften, 2007.
- [KAM02] C. Kammer: Aluminium Taschenbuch, Aluminium Verlag, 16. Auflage, 2002
- [KIA98] Kiang, M.-H., Solgaard, O., Lau, K. Y., & Muller, R. S. (1998). Electrostatic Comdrive-Actuated Micromirrors for Laser-Beam Scanning and Positioning. JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS , 7, 27-37.
- [KRU03] Krujatz, J. (2003). Herstellung von Spiegelschichtsystemen auf der Basis von Aluminium oder Silber für den Einsatz in der Mikrosystemtechnik. Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Naturwissenschaften.
- [KUH07] T. E. Kuhn: Sonnenschutz: Eine generelle Bewertungsmethode- auch für zwischenliegende Systeme..., Bauphysik 29 (2007), Heft 1, Ernst & Sohn Verlag
- [LAL09] http://www.lalighting.com/catalogfiles/cata/A-02_1%20PID300.PDF
- [LAR03] Rendering with Radiance. The Art of Lighting Visualization. Revised Version. Greg Ward and Rob Shakespeare, 2003
- [MET97] Meteororm, Version 3.0, Meteotest 1997
- [OSR00] OSRAM: Quitronic- Technische Fibel: Elektronische Vorschaltgeräte für Leuchtstofflampen und Kompaktleuchtstofflampen, 2000, (http://www.osram.de/osram_de/Professionals/EVG_und_LMS/Literatur_EVG_pdf/Literatur_fuer_EVG_fuer_FL_und_CFL/130T04D.pdf)
- [PIZ03] Pizzi, M., Koniachkine, V., Nieri, M., Sinesi, S., & Perlo, P. (2003). Electrostatically driven film light modulators for display applications. Microsystem Technologies, Springer-Verlag , 10, 17-21
- [RR09] Auskunft H. Helbig, Fa. Roth & Rau AG, Hohenstein-Ernstthal
- [SCH00} Schenk, H. (2000). Ein neuartiger Mikroaktor zur ein- und zweidimensionalen Ablenkung von Licht. Gerhard-Mercator-Universität-Gesamthochschule-Duisburg, Fachbereich Elektrotechnik.
- [SCH95] J. Schmid: Transparente Wärmedämmung in der Architektur, C.F. Müller Verlag, 1995
- [VDI2078] VDI 2078 Blatt 1: Berechnung der Kühllast klimatisierter Gebäude bei Raumkühlung über gekühlte Raumschließungsflächen
- [VIE08] Viereck, V., Ackermann, J., Li, Q., Jäkel, A., Schmid, J., & Hillmer, H. (2008). Sun Glasses for Buildings based on Micro Mirror Arrays: Technology, Control by Networked Sensors and Scaling Potential (invited). 5th International IEEE Conference on Networked Sensing Systems(INSS) 2008., Technical Digest , 135-139.
- [VIE07] Viereck, V., Li, Q., Ackermann, J., Schwank, A., Araujo, S., Jäkel, A., et al. (2007). Novel Large Area Applications Using Optical MEMS, Proc. IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics, 2007, S. 55-56.

- [VV07] Viereck, V., Li, Q., Jäkel, A., Werner, S., Ackermann, J., Dharmarasu, N., et al. (2007). Innovative Lichtlenksysteme zur Tageslichtnutzung und zur Wärmeregulierung in Gebäuden auf der Basis von Mikrospiegelarrays, Tagungsband des Mikrosystemtechnik Kongress Dresden 2007, 2007.
- [WAG07] A. Wagner: Energieeffiziente Fenster und Verglasungen; S. 21, 3. Auflage, BINE Informationsdienst, Solarpraxis AG, 2007
- [WAR07] Beschreibung Lichtlenk-Jalousie Genius, Intranet Warema, Marktheidenfeld, 2007
- [WER06] Werner, S.: Theoretische Modellrechnung von optischen MEMS - Optimierung von elektrostatisch aktuierten Mikrospiegelementen zur Tageslichtlenkung, Diplomarbeit, Universität Kassel, Fachbereich Elektrotechnik / Informatik, Technische Elektronik, 2007.
- [YOO03] Yoon, Y. S., Bae, K. D., Kim, J. H., Choi, H., & Koh, B. C. (2003). A low voltage actuated micromirror with an extra vertical electrode for 90° rotation. INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING, JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING , 13, 922-926.

5.2 Öffentlichkeitsarbeit

Teilnahme an nationalen und internationalen Tagungen:

*Mikrosystemtechnik-Kongress 2007, Dresden (Poster) [ACK07], [VV07]
IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics
(2007), Hualien, Taiwan (Poster) [VIE07]
Impulsveranstaltung Nano Energie 2007, Hanau (Workshop)
Nanotechnologieforum Hessen 2007, Frankfurt / Main (eingeladener Vortrag)
[HIIM07]
Thüringer Grenz- und Oberflächentage 2008, Jena (Vortrag) [BAR08]
NanoEurope 2008, St.Gallen, Schweiz (Poster)
5th International IEEE Conference on Networked Sensing Systems (INSS)
2008, Kanazawa, Japan (eingeladener Vortrag) [VIE08]*

Auszeichnung mit dem European Grand Prix of Innovation Award 2006

Teilnahme an der Woche der Umwelt 2007

*Berichterstattung: Zahlreiche Artikel in der lokalen und überregionalen Tagespresse
sowie Fernsehbeiträge*

Titelbeitrag in den Hessen-Nanotech News 1/2007

*5-minütiger Fernsehbeitrag im Erfindermagazin „Einfach Genial“ des Mitteldeutschen
Rundfunk 2007*

Ausgezeichneter Ort im Land der Ideen 2009

5.3 Expertisen der Projektpartner

5.3.1 Institut für Nanostrukturtechnologie und Analytik (INA)

Universität Kassel
Fachgebiet Technische Elektronik
Heinrich-Plett-Str40, 34132 Kassel
Institutsleiter: Prof. Dr. rer. nat. Hartmut Hillmer
Tel. (0561) 804 4485
Fax (0561) 804 4488
hillmer@uni-kassel.de

Thematische Ausrichtung:

Das INA, Fachgebiet „Technische Elektronik“ im Fachbereich Elektrotechnik / Informatik der Universität Kassel, beschäftigt sich seit vielen Jahren mit dem Design, der technologischen Herstellung, der messtechnischen Charakterisierung und der theoretischen Modellrechnung optoelektronischer Bauelemente, der Mikrosystemtechnik und der Photonik. Ein Schwerpunkt der Arbeiten lag in den letzten Jahren auf mikromechanischen Systemen für optische Anwendungen. Das INA verfolgt dabei eine Miniaturisierungsstrategie, um die Effizienz mikromechanischer Aktuation (Bewegung, Verformung, Kippung) mit möglichst geringen elektrischen Steuergrößen zu erreichen.

Technologische Ausstattung:

Im Reinraum (insgesamt 400m², bis Reinraumklasse 1) und den peripheren Technologiellabors stehen folgende Großgeräte zur Verfügung: optische Lithographie, Elektronenstrahl-Lithographie,

Focussed Ion Beam-Technologie(FIB), mehrere Plasmaätzenanlagen, thermische Aufdampfanlagen, plasmaunterstützte Deposition (PECVD), Ionenstrahldeposition (IBD), Molekularstrahlepitaxie (MBE) und nasschemische Arbeitsplätze. Auf dem Gebiet der Analytik: optische Mikroskopie, Raster-Elektronenmikroskopie und Rastersonden-Mikroskopie, Ellipsometrie und Weisslicht-Interferometrie.

Weitere Vorarbeiten:

Erfolgreich durchgeführtes BMBF-Projekt (Förderkennzeichen 01BC150), daraus resultierend 6 Patentanmeldungen, und mehrere internationale Bestwerte auf dem Gebiet der elektrostatischen Aktuation von reflektiven mikrosystemtechnischen Komponenten. Die dort erzielten Resultate bilden eine wichtige Grundlage für die Prozessentwicklung der Mikrospiegelanordnungen.

5.3.2 **Institut für Elektrische Energietechnik (IEE)**

Fachgebiet Rationelle Energiewandlung
Universität Kassel
Wilhelmshöher Allee 73, 34121 Kassel
Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmid
Tel.: (0561) 804-6201
Fax: (0561) 804-6434
jschmid@uni-kassel.de

Das Fachgebiet Rationelle Energiewandlung (IEE-RE) wurde 1995 am Institut für Elektrische Energietechnik (IEE) des Fachbereichs Elektrotechnik/Informatik gegründet. Der Lehrstuhl wird von Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmid geleitet. Wesentliches Merkmal des Fachgebietes ist seine interdisziplinäre und internationale Ausrichtung. Neben der Kooperation mit den übrigen Fachgebieten am IEE gibt es auch eine enge Zusammenarbeit mit anderen Fachbereichen der Hochschule wie Architektur und Maschinenbau und mit internationalen Universitäten. Des Weiteren werden viele Projekte in Kooperation mit der Industrie, Energiedienstleistern und öffentlichen Einrichtungen durchgeführt. Dank der engen Zusammenarbeit mit dem Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET), dessen Vorstandsvorsitzender Prof. Schmid seit 1998 ist, und dem Fachgebiet Elektrische Energieversorgungssysteme (EVS) entstand in Kassel in den vergangenen Jahren ein Schwerpunkt in Forschung und Lehre auf dem Gebiet der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz. Das Fachgebiet befasst sich mit Themen der erneuerbaren Energien und der rationellen Energieverwendung. Dabei liegt der Arbeitsschwerpunkt im Bereich erneuerbarer Energien auf autarken, nicht mit einem Verbundnetz gekoppelten, Photovoltaik- und Hybridsystemen zur Versorgung ländlicher Gebiete. Die Arbeiten auf dem Gebiet der rationellen Energieverwendung befassen sich vor allem mit der Energieeinsparung in Büro- und Verwaltungsgebäuden, ausgewählten Branchen aus Gewerbe und Industrie und der Erstellung von Energiekonzepten. In beiden Bereichen ist in den vergangenen Jahren die Beschäftigung mit Verfahren und Techniken zum Energiemanagement in den Mittelpunkt der Aktivitäten gerückt.

5.3.3 Von Waitzische Beteiligungen GmbH

Dr. Friedrich von Waitz
Theaterstraße 1, 34117 Kassel
Tel.: 0561-70798-0
Fax: 0561-70798-44
FvWaitz@WaitzvonEschen.de

Im Bereich der industriellen Aktivitäten der Von Waitzischen Beteiligungen GmbH bestehen langjährige Erfahrungen in der industriellen Entwicklung, Fertigung und des Vertriebs anspruchsvoller Produkte des Investitionsgüter- bzw. Vorprodukte-Sektors.

In einer eigenen Entwicklungsabteilung werden in Zusammenarbeit mit externen Konstrukteuren und Hochschulinstituten (unter anderen auch dem Fachbereich Maschinenbau der Universität Kassel) marktreife Produkte entwickelt, woraus auch zahlreiche Patente resultieren. Aufgrund der hohen Innovationsgeschwindigkeit in diesem Markt sind ein ausgefeiltes Controlling und eine präzise Projektsteuerung in technischer, zeitlicher und finanzieller Hinsicht entscheidende Bausteine des langjährigen Erfolges in der Entwicklung neuer Produkte und Technologien. In der Fertigung liegen Erfahrungen in verschiedenen technischen und organisatorischen Verfahren vor. Im Vertrieb bestehen umfangreiche Erfahrungen in der engen Kooperation mit Kunden – vor allem zu Optimierung der Produkte – und im Aufbau neuer, insbesondere auch internationaler Vertriebswege (eigene Tochtergesellschaften in den USA und Ostasien). Im Rahmen der Errichtung und des Betriebs eines Windparks entwickelte sich eine Kooperation mit dem Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET e. V.) der Universität Kassel in Projekten der Nutzung alternativer Energien.

Im Bereich der Immobilien verfügt die Gruppe über langjährige Erfahrungen im Neubau und in der Sanierung und Entwicklung von Bestands-Immobilien (Wohn- und Gewerbegebäude) im In- und Ausland. Insbesondere in Altbauten stellen heutige Nutzungsformen und -ansprüche erhebliche Anforderungen an die technischen Lösungen für das Energiemanagement, den Sonnenschutz, vor allem aber die Ausleuchtung der Räume bei begrenzter Fensterfläche. Hier wurden seit vielen Jahren verschiedene technische Verfahren angewandt und – aufgrund der Vermietung der Objekte im Eigenbestand – auf ihre nachhaltige Tauglichkeit beobachtet. Diese Anwender-Erfahrungen sollen in dieses Projekt einfließen.

Die Gruppe hat sowohl existierende Unternehmen übernommen und ausgebaut, als auch Unternehmen neu gegründet und aufgebaut. Sie versteht sich als strategischer Investor, der seine Beteiligungen nachhaltig entwickelt und langfristig führt. Der Beitrag der Gruppe zu diesem Projekt soll vor allem in der Projektsteuerung und der Marktausrichtung der Produkt- und Technologie-Entwicklung liegen.

Die von Waitzischen Beteiligungen GmbH besteht zum jetzigen Zeitpunkt aus der UNIFLEX Hydraulik GmbH, der UNIFLEX Umformtechnik GmbH, der UNIFLEX Spezialmaschinen GmbH und der POLYMA Energiesysteme GmbH. Die Gruppe hat aktuell 99 Angestellte und hatte einen Jahresumsatz in 2005 von 18.713.000 Euro.