

# Großflächige Anwendung von optischen MEMS: Mikrospiegel-Arrays zur Tageslichtlenkung

Volker Viereck, Qingdang Li, Andreas Jäkel, Hartmut Hillmer, Universität Kassel

**In konventionelle Isolierverglasung integrierte großflächige Mikrospiegelarrays könnten in Zukunft die Helligkeitsverteilung in Innenräumen erheblich verbessern. Im Vergleich zu makroskopischen Lösungen sind solche Mikrospiegelanordnungen optisch unauffällig, mechanisch unanfällig und wartungsfrei. Die großflächige Realisierung bedingt sowohl die Wahl kostengünstiger Prozesse und Materialien, als auch die Minimierung von Prozessschritten mit einfacher und zuverlässiger Prozessführung.**

Die Fotomontage (**Bild 1**) zeigt die Vision: das Tageslicht im Raum möglichst gut auszunutzen ohne zu blenden. Der Arbeitsplatz ist abgeschattet, das einfallende Licht dient aber zur indirekten Beleuchtung. Ein Segment im Oberlicht rückt die Pflanze ins rechte Licht.

Ein solcher Sonnenschutz, der den Bezug zur Außenwelt erhält und nur die nötigen Bereiche abschattet, ließe sich mit Mikrospiegelarrays realisieren. Werden die einzelnen Spiegelemente so dimensioniert, dass sie mit bloßem Auge nicht wahrnehmbar sind, entsteht in Durchlassstellung der Eindruck einer leicht getönten Scheibe (**Bild 2**). Zwischen den Scheiben einer Isolierverglasung implementiert, sind die Module vor Wind, Wetter und Verschmutzung geschützt. Zudem



**Bild 1: Fotomontage zur Visualisierung des Ziels: Tageslicht erhellt den Raum ohne am Arbeitsplatz zu blenden**

sind keinerlei architektonische Umgestaltungen notwendig, so dass sich eine solche Abschattung in nahezu jedem Gebäude installieren ließe, auch nachträglich in Altbauten oder denkmalgeschützten Bauwerken.

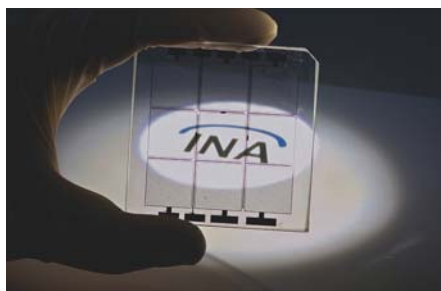
### Technische Umsetzung

Bisher existieren solche Mikrospiegel-Fenster erst als Machbarkeitsstudie. Im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projektes wurde ein Modul im Labormaßstab auf einer Größe von etwa 30 cm<sup>2</sup> mit neun separat ansteuerbaren Segmenten hergestellt. Sie werden mit konventionellen Verfahren der Dünnschichttechnologie und der Mikrostrukturierung hergestellt. Das Schichtsystem für die Mikrospiegel wird in der Ebene deponiert (Surface Micromachining).

Ein Mikrospiegelement besteht aus dem Siliziumoxinitrid-Spiegelträger und dem Aluminium-Spiegel. Als Substratmaterial dient Standard-Floatglas, auf das als transparente Gegenelektrode eine Schicht aus Indium-Zinn-Oxid (ITO) flächig aufgebracht ist. Durch eine definierte Gradientenverspannung im Spiegelträger stellen sich die Mikrospiegel nach dem Entfernen einer Opferschicht selbständig auf (**Bild 3**).

Durch Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen der Spiegelschicht und der flächigen unterliegenden ITO-Elektrode können die Spiegel in einem gewissen Winkelbereich bewegt oder auch ganz an das Substrat herangezogen werden (**Bild 4**).

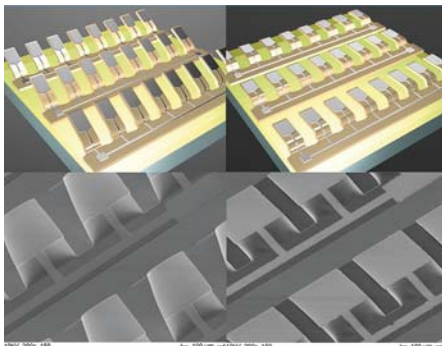
Erste funktionsfähige Spiegelgruppen lassen



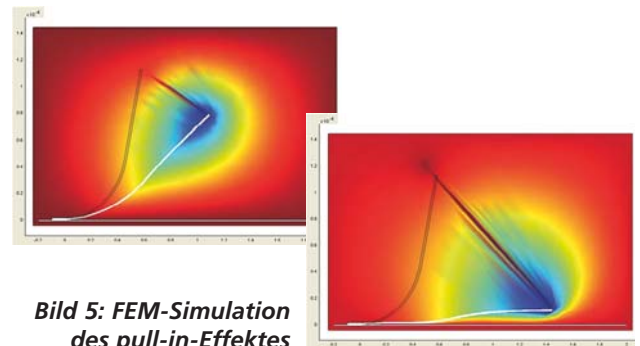
**Bild 2: In diesem offenen Zustand ist die Durchsicht durch ein Mikrospiegel-Modul fast unbeeinträchtigt, geschlossen ist der Bedeckungsgrad >95%**



**Bild 3: Schematische Darstellung eines Mikrospiegelementes (Querschnitt) in geschlossener (links) und geöffneter Position (rechts)**



**Bild 4:** Schema (oben) und Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme (unten) von Mikrospiegelgruppen in halbgeöffneter (links) und geschlossener Position (rechts)



**Bild 5:** FEM-Simulation des pull-in-Effektes

sich aus einer fast senkrechten Position um nahezu 90° in die Ebene ablenken, bei einer Aktuierungsspannung von 80 V. Theoretische Modellrechnungen haben ergeben, dass die Mikrospiegel in einem Bereich bis zu einem Winkel von ca. 45° analog durch Variation der angelegten elektrischen Spannung gesteuert werden können. Unterhalb dieses Grenzwinkels kommt es dann zu einem schlagartigen Anlegen der Spiegel an das Substrat (sog. pull-in-Effekt, **Bild 5**). Der steuerbare Winkelbereich ist für die Tageslichtlenkung völlig ausreichend.

In **Bild 6** wird das Labor-Modul von oben beleuchtet: in der linken Aufnahme lenken mehrere Tausend etwa 150 x 400 µm<sup>2</sup> große Spiegelemente das Licht zum Betrachter, in der rechten Aufnahme (voll aktuierte Spiegel) reflektieren sie das Auflicht direkt zurück. Die notwendige Leistung, um diese Position zu halten, beträgt weniger als 0,1 W/m<sup>2</sup>.

## Herausforderung große Fläche

Der aktuelle Herstellungsprozess für die Mikrospiegelmodule kommt mit fünf Depositions- und drei Mikrostrukturierungsschritten aus. Die Materialien und Prozesse für diese Module sind so gewählt, dass sie eine kostengünstige Skalierung auf große Flächen erlauben. Insbesondere kommen PECVD-, PVD- und Sputter-Prozesse zum Einsatz, wie sie bereits in der großtechnischen Glasbeschichtung und in der Herstellung von Photovoltaik-Elementen üblich sind. Lediglich die Mikrostrukturierung wird im Labor noch mit konventioneller Photolithographie durchgeführt. Diese ist auf großen Flächen nicht praktikabel und muss durch ein entsprechendes Verfahren ersetzt

werden. Bevorzugt sollten die Strukturen aus Photoresist gedruckt werden. Vorteilhaft für die großflächige Herstellung ist, dass das Design der Mikrospiegel bis zu 5 µm Fehljustage zwischen den einzelnen Strukturebenen toleriert. Auch unter dem Aspekt der Prozessausbeute ist diese Fehlertoleranz von Bedeutung: Derzeit liegt die Prozessausbeute für Module, die weniger als 2% „Pixelfehler“ haben, noch deutlich unter 50%. Das Ziel ist es, dass Module im unmittelbaren Sichtbereich völlig fehlerfrei sein müssen. Dies wird sich zunächst nur durch einen modularen Aufbau realisieren lassen, der weitere Herausforderungen wie eine optisch unauffällige elektrische und mechanische Modulverbindung mit sich bringt.

## Kostensparen durch Gruppensteuerung

Ein wichtiger Punkt zur Kostenersparnis ist der Verzicht auf eine Einzelansteuerung der Spiegel zugunsten einer Ansteuerung von Spiegelgruppen über ein einfaches Leitungsnetzwerk. Simulationen des Fachgebiets Rationelle Energiewandlung der Universität Kassel haben gezeigt, dass es für einen praktikablen Einsatz im Fenster ausreicht, Segmente von etwa 1 dm<sup>2</sup> Fläche unabhängig ansteuern zu können, was einer Spiegelgruppe von etwa 150 000 Einzelspiegeln entspricht. Die Ansteuerung der Spiegelgruppen bedingt die Einbindung in ein intelligentes Energiemanagementsystem.

## Ausblick

Erste Mikrospiegelanordnungen für die Fensterintegration wurden auf Laborgrö-

ße von einigen zehn Quadratzentimetern Fläche entwickelt. Der Transfer auf eine großflächige Produktion stellt in vielfacher Hinsicht eine große Herausforderung dar. Die Prozess-Ausbeute und die Wahl eines kostengünstigen Verfahrens für die Mikrostrukturierung sehen wir als größte Meilensteine an.

Betrachtet man allerdings die Kosten- und Größenentwicklung von TFT-Displays unter Berücksichtigung der Qualitätssteigerung in den letzten Jahren, so erscheint die Möglichkeit von MEMS-Modulen von einem viertel Quadratmeter Fläche, mit denen auch große Glasflächen bestückt werden können, durchaus realistisch.

## Literatur:

- [1] M. Pizzi, V. Koniachkine, M. Nieri, S. Sinesci, P. Perlo, *Electrostatically driven film light modulators for display applications*, Microsystem Technologies, Vol 10, 17-21 (2003)
- [2] H. Hillmer, J. Daleiden, S. Irmer, F. Römer, C. Prott, A. Tarraf, M. Strassner, E. Ataro, T. Scholz, *Potential of micromachined photonics: miniaturization, scaling and applications in continuously tunable vertical air-cavity filters*, (invited) SPIE Proc. Series Vol. 4947, 196-211 (2003)
- [3] L.J. Hornbeck, *Digital Light Processing and MEMS: an overview*, in: Advanced Applications of Lasers in Materials Processing, Broadband Optical Networks/Smart Pixels/Optical MEMS and their Applications, 1996, ISBN 0-7803-3175-3, 7 pp
- [4] J. Schmid, *Transparente Wärmedämmung in der Architektur*, C.F. Müller Verlag, 1995, ISBN 378807485X
- [5] V. Viereck, J. Ackermann, Q. Li, A. Jäkel, J. Schmid, H. Hillmer, *Sun Glasses for Buildings based on Micro Mirror Arrays: Technology, Control by Networked Sensors and Scaling Potential*, 5<sup>th</sup> International IEEE Conference on Networked Sensing Systems (INSS) 2008, Technical Digest, 135-139

## Kontakt:

Volker Viereck  
Institut für  
Nanostrukturtechnologie  
und Analytik (INA)  
Universität Kassel  
Heinrich-Plett-Str. 40  
D-34132 Kassel  
viereck@ina.uni-kassel.de  
www.te.ina-kassel.de



www.photonik.de **Webcode 2001**

**Bild 6:** Von oben beleuchtet lenken die voll ausgeblendeten Spiegelemente das Licht zum Betrachter (links), rechts werfen sie es direkt zurück

