

**ENERGIEBEDARF UND ENERGIEBEREITSTELLUNG  
FORDERUNGEN UND BEITRÄGE AUS DER WISSENSCHAFT,  
INSBESONDERE ZUR ALTBAUSANIERUNG**

**Jochen Fricke**

Physikalisches Institut der Universität Würzburg und  
Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern)

## 1. Einleitung

Im Zusammenhang mit der Rentendiskussion wird zurecht mit der Einhaltung des Generationenvertrages argumentiert. Dieser ungeschriebene Vertrag muss natürlich auch im Energiebereich Gültigkeit besitzen.

Der Wissenschaftsrat hat hierzu in seiner Stellungnahme von 1999 zur Energieforschung zehn Thesen verabschiedet, die ich hier in zwei Punkten in Erinnerung rufen möchte:

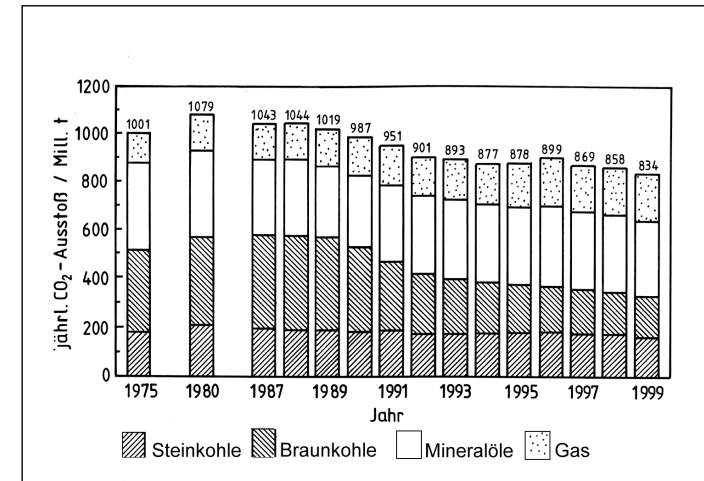
*"Vorsorge im Bereich der Energieversorgung ist eine Aufgabe von herausragender Bedeutung für die Zukunftsfähigkeit jeder Gesellschaft."*

Für einen Wissenschaftler ist wohl einsichtig, dass die fossilen Ressourcen begrenzt sind, und dennoch glauben viele, einen Anspruch auf jedwede Menge billiger Energie zu haben. Und Kohle, Öl und Gas sind heute viel billiger als vor einigen Jahrzehnten, wenn man die Kaufkraft unserer Währung berücksichtigt. Die Vorsorge für unsere Kinder und Kindeskinde gebietet den sparsamen Umgang mit unseren fossilen Ressourcen, also auch den rationellen Energieeinsatz. Vorsorge bedeutet aber auch die Weiterentwicklung und Nutzung von neuen Energiequellen, wie Windenergie und Solarenergie.

*"Die derzeitige Energieversorgung ist eine der wesentlichen Quellen von Umweltbelastungen und die Verbrennung fossiler Energieträger Hauptursache der anthropogenen Freisetzung von Treibhausgasen".*

Auch die Begrenzung von Schadstoffströmen gebietet einen sparsamen Umgang mit Kohle, Öl und Gas. Die derzeitige CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre liegt bereits bei 370 ppm (gegenüber 280 ppm vor der Industrialisierung) und steigt absehbar schnell weiter. Im Kyoto-Protokoll 1997 haben 38 Industrienationen zugesagt, ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren; Deutschland hatte sich bis 2012 eine Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 21% gegenüber 1990 vorgenommen. Bis 1999 sind die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen um ca. 15% zurückgegangen (s. Abb. 1), wobei allerdings auf den Zusammenbruch der Wirtschaft in den Neuen Bundesländern nach der Wiedervereinigung rund 10% entfallen (zu erkennen insbesondere

am Rückgang des Braunkohle-Einsatzes); wirklich eingespart wurden also nur rund 5%. Um das 21% - Ziel zu erreichen, müssen noch gut 50 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> an jährlichen energierelevanten Emissionen eingespart werden, was durchaus schwierig sein wird, zumal die deutsche Wirtschaft ja weiter wächst.



**Abbildung 1: Jährliche energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland  
(nach BWK 52, 34 (2000))**

Auch wenn der Weltklimagipfel in Den Haag kein Resultat gebracht hat, denke ich, es besteht weitgehender Konsens, an dem 1997 gemachten Commitment für Deutschland keine Abstriche zu machen. Dann aber bleibt die Frage, wie denn unsere CO<sub>2</sub>-Emissionen weiter reduziert werden sollen.

## 2. CO<sub>2</sub>-Einsparungen bei der Stromversorgung

Wenden wir uns zunächst dem Bereich Strom zu. In Tab. 1 ist die Stromerzeugung aus Kohle, Öl und Gas sowie Kernbrennstoff, Laufwasser, Wind, Müll und Photovoltaik im Jahr 1999 aufgelistet.

Rund zwei Drittel unserer Stromversorgung resultierten 1999 aus der Verbrennung von Kohle, Öl und Gas, 31% stammt aus Kernreaktoren und ca. 5% entfielen auf Laufwasser, Wind und Müll plus Biomasse. Für das Jahr 2012 wollen wir von einem ähnlichen Gesamtstromverbrauch ausgehen, was im Hinblick auf die wachsende Wirtschaft eine eher optimistische Annahme ist.

	elektrische Energieversorgung 1999	elektrische Energieversorgung 2012	
Kohle Öl Gas	64%	57%	Reduktion CO <sub>2</sub> -Ausstoss: 40 Mio. t
Kernenergie	31%	31%	erzeugte Strommenge konstant entspricht 170 Mio. t CO <sub>2</sub>
Laufwasser	4%	4%	kaum Steigerung möglich
Wind	1%	5.1%	10.000 Offshore-Windanlagen à 1.5 MW
Müll Biomasse	0.5%	2.9%	gesamten Müll verbrennen; Biomasse von 4.000 km <sup>2</sup>
Solar	0.007%	0.02%	Zuwachs install. Fläche + (15 – 18)% pro Jahr
Gesamt	100%	100%	Stromverbrauch konstant

**Tabelle 1: Elektrische Energieerzeugung 1999 und Prognose für 2012 unter der Prämisse, dass die Gesamtzeugung und der absolute Kernenergiebeitrag konstant bleiben und Windenergienutzung und Müll/Biomasseinsatz deutlich erhöht werden.**

Ebenso soll der absolute Beitrag der Kernenergie konstant gehalten werden (der im übrigen einer vermiedenen Menge von ca. 170 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> entspricht). Hier wird dafür plädiert, dass abgebrannte Kernbrennstäbe ohne Wiederaufarbeitung rückholbar untertag eingelagert werden, um zukünftigen Generationen eine Rückgriffsmöglichkeit auf die riesigen, in den Brennstäben enthaltenen Energiemengen zu geben, wenn die Energieversorgung anders nicht mehr gedeckt werden kann. Wir sollten uns dem Faktum nicht verschliessen, dass abgebrannte Kernbrennstäbe kein Müll, sondern Wertstoffe sind.

Der Beitrag von Laufwasserenergien wird sich nur unwesentlich steigern lassen.

Die Nutzung der Windenergie – in Deutschland durchaus eine Erfolgsstory – brachte Ende 2000 bereits 2% und könnte im Jahr 2012 einen Beitrag von 5% oder sogar mehr liefern, vorausgesetzt, die technisch nicht einfache Offshore-Technik entwickelt sich wie erwartet. Allerdings müssten zu den bereits installierten ca. 9000 Windenergieanlagen auf dem Festland noch rund 10000 am Meeresboden verankerte Windmühlen à 1,5 bis 2,5 MW hinzukommen. Die Attraktivität ist hier die hohe Windgeschwindigkeit, welche bekanntlich mit der dritten Potenz in die Leistung eingeht. Doppelte Windgeschwindigkeit bedeutet demnach achtfache Leistung. Aus diesem Grund ist es auch volkswirtschaftlich nicht zielführend, Windmühlen in Würzburg oder München zu installieren, auch wenn sich dies betriebswirtschaftlich aufgrund der staatlichen Förderung rechnet. Wenn wir im Binnenland die Windenergie im grösseren Stil nutzen wollen und den Verlauf der Isoventen beachten, dann sollte dies in den Mittelgebirgen oder den Voralpen geschehen. Aus Gründen der Objektivität sei aber angemerkt, dass Windenergiestrom von Binnenland-Standorten weniger teuer als photovoltaisch erzeugte Elektrizität ist.

Müll und Biomasse könnten 2012 knapp 3% des Strombedarfs decken; allerdings muss der Müll dann auch verbrannt und nicht deponiert oder kompostiert werden. Ebenso ist die energetische Nutzung der Biomasse von 400.000 ha erforderlichlich.

Der Photovoltaikbeitrag wird zwar relativ gesehen drastisch weiter anwachsen, absolut gesehen spielt die Photovoltaik aber auch 2012 noch eine untergeordnete Rolle. Zum 100.000 Dächerprogramm in Deutschland ist u.a. zu bemerken, dass eine grenzüberschreitende, EU-weite Betrachtungsweise, d.h. zum Beispiel eine Installation in Italien oder Spanien anstatt in Deutschland ca. die eineinhalbfachen Stromerträge brächte. Auch wäre eine Aufteilung etwa in zehn 10.000 Dächerprogramme mit zeitlicher Staffelung im Hinblick auf die Innovation deutlich zu bevorzugen. Dennoch ist festzuhalten, dass die Photovoltaik eine Technik mit grossem Potential in der Zukunft ist, vorausgesetzt Forschung und Entwicklung insbesondere bezüglich Dünnschicht-Photovoltaik werden verstärkt staatlich weitergeführt. Dass die Photovoltaik sich im Inselbetrieb schon heute betriebswirtschaftlich rechnet, brauche ich hier nur anzumerken.

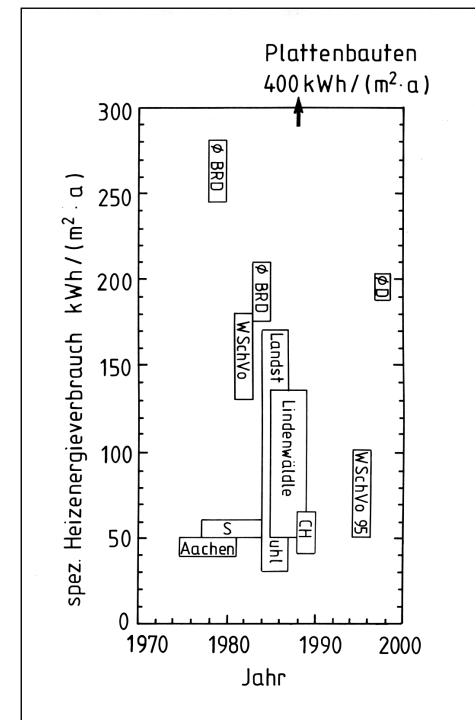


Abbildung 2: Entwicklung des Heizenergieverbrauchs in Deutschland

Die Quintessenz aus unserem Stromversorgungsszenario ist, dass der Einsatz der fossilen Energieträger zur Stromerzeugung deutlich verringert und damit der CO<sub>2</sub>-Ausstoss um ca. 40 Mio. Tonnen reduziert werden könnte.

### 3. CO<sub>2</sub>-Einsparungen bei der Wärmeversorgung in Gebäuden

Wenden wir uns nun dem Bereich Wärmeversorgung zu. Ca. ein Drittel unseres Endenergiebedarfs fällt für die Gebäudeheizung an. Entsprechend wurden hier 1998 laut Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) rund 270 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> freigesetzt. Hier existiert bei einem derzeitigen spezifischen Verbrauch von fast 200 kWh/Jahr und m<sup>2</sup> Wohnfläche in Deutschland ein besonders grosses Potential zur Einsparung (Abb. 2).

So sollte eine Verbesserung des derzeitigen Dämmstandards von 23 Mio. Altbauwohneinheiten auf die Vorgaben der Wärmeschutzverordnung von 1995 den Heizenergieverbrauch auf ein Drittel und die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 140 Mio. Tonnen reduzieren können. Allerdings ist diese energetische Renovierung des Gebäudebestands nicht in einem Sprung möglich. Die Kosten liegen immerhin bei etwa 30.000 DM/ Wohneinheit. Würden 500.000 WE pro Jahr saniert, fielen Kosten von 15 Mrd. DM/a an. Der CO<sub>2</sub>-Ausstoss liesse sich dann bis 2012 um 40 Mio. t/a verringern. Ein weiteres Plus wäre die Schaffung von etwa 150.000 Dauerarbeitsplätzen.

Es gibt eine ganze Reihe von Möglichkeiten, eine solche Innovationswelle anzuschieben:

staatliche Förderung
steuerliche Anreize
Renovierungsleitfaden (Internet)
Energiepass
Energieverbrauchs-Monitoring mit Visualisierung
stringente Dämmvorschriften auch für Altbau
Erhöhung des Energiepreises
F&E neue Dämmsysteme (Beispiel ZAE Bayern)

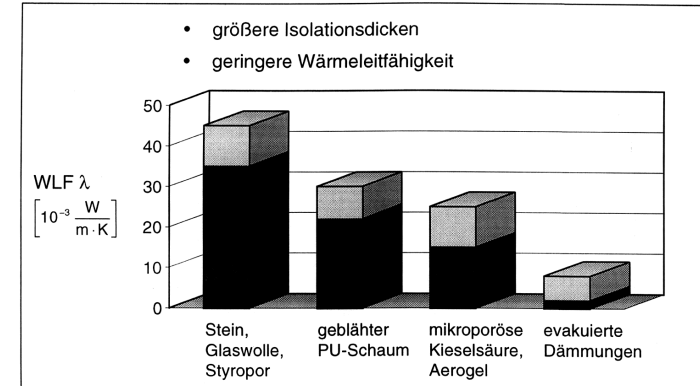
**Tabelle 2: Mögliche Massnahmen zur Reduktion des Heizenergieverbrauchs**

Besonders effizient wäre ein direkter staatlicher Zuschuss – wie man von der äusserst erfolgreichen Förderung der solaren Warmwasserkollektoren mit 1500 DM pro Anlage (bei Kosten von ca. 10.000 DM) weiss. Hier werden mit 1 DM staatlichen Zuschusses von privater Seite Zukunftsinvestitionen von etwa 6 DM realisiert.

Die Techniken zur Altbausanierung reichen von der Verbesserung der Wärmedämmung bis hin zur Nutzung der Solarenergie. Das ZAE Bayern hat hierzu mehrere Verbundprojekte initiiert, in denen in enger Kooperation mit der Industrie diesbezügliche Entwicklungsarbeiten bis hin zum Demo-Objekt geführt werden.

### 3.1 Vakuumdämmungen

Eine attraktive Neuentwicklung ist die thermische Vakuumisolation für den Einsatz in Gebäuden. Derartige Vakuumisolationspaneele (VIP) mit langer Lebensdauer enthalten einen nanostrukturierten, hochporösen Stützkörper aus Kieselglaspulver und sind mit einer weitgehend diffusionsdichten Mehrschichtfolie umhüllt. Der Stützkörper nimmt den Atmosphärendruck von 10<sup>5</sup> N/M<sup>2</sup> auf. Die Wärmeleitfähigkeit des auf technisches Vakuum evakuierten Pulverkörpers liegt bei ca. 4·10<sup>-3</sup> W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup> und ist damit fast zehnmal geringer als in Styropor (Abb. 3). Sie wird von der Festkörperwärmeleitung dominiert (Beitrag ca. 3·10<sup>-3</sup> W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>). Der Infrarot-Strahlungswärmetransport ist rein diffusiv und hat einen Anteil von nur etwa 1·10<sup>-3</sup> W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>. Dies wird durch Zusatz von IR-Trübungsmitteln wie Eisenoxid, Siliziumcarbid oder Kohlenstoff ZUM SiO<sub>2</sub>-Pulver erreicht, welche IR-Strahlung streuen und absorbieren.



**Abbildung 3: Evakuierte Dämmungen mit etwa zehnfach grösserer Dämmwirkung als Styropor bei vergleichbarer Dicke**

Gaswärmeleitung in den Poren setzt erst ein, wenn der Druck 20 mbar wesentlich übersteigt (Abb. 4). Für Drücke unter diesem Wert ist die Knudsen-Zahl gross gegen 1, d.h. es erfolgen praktisch keine Teilchen-Teilchen-Stösse sondern fast nur Stösse der Restgasteilchen mit dem nanostrukturierten Pulverskelett. Bei Anstieg des Restgasdruckes auf 1 bar – etwa bei Perfo-

ration der Hülle – steigt die Wärmeleitfähigkeit auf ca.  $20 \cdot 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  an, ist somit also immer noch deutlich geringer als jene von konventionellen Dämmmaterialien.

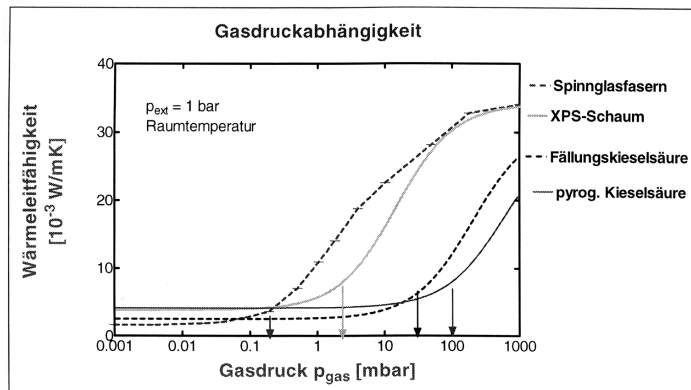


Abbildung 4: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Füllmaterialien für VIPs als Funktion des Luftdrucks

Als Füllmaterialien kommen besonders feinteilige Pulver infrage mit völlig amorphen ungeordneten Strukturen und meist grossen massenspezifischen Oberflächen:

- pyrogene Kieselsäure wird in einem Flammprozess hergestellt und findet bislang Einsatz u.a. als Füllstoff in Autoreifen oder als Verdickungsmittel in Farben;
- $\text{SiO}_2$ -Aerogele werden in einem nass-chemischen Sol-Gel-Prozess mit anschliessender schonender Trocknung hergestellt.

Rund  $50 \text{ m}^2$  Vakuumsulationspaneele sind bereits in die Fassade des neuen ZAE-Experimentiergebäudes installiert. Mit Dicken von etwa 2 cm lassen sich k-Werte von ca.  $0.2 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  realisieren, wie man sie für Niedrigenergiehäuser benötigt. Für Passivhäuser ergeben VIPs von 4 cm Dicke platzsparend die gewünschten k-Werte von etwa  $0.1 \text{ W m}^{-2} \text{ K}$ , während mit konventionellen Dämmmaterialien Dicken von 40 cm erforderlich sind. In einem vom ZAE Bayern koordinierten Forschungsprogramm, welches im Rahmen der High-Tech-Initiative Bayern mit einer Reihe von Industriepartnern durchgeführt wird, werden einige  $1000 \text{ m}^2$  VIPs beispielsweise als Aussenwanddämmung, Kerndämmung, Innendämmung, Fussbodendämmung, Tüрдämmung und in Glasfassaden zwischen Scheiben eingesetzt.

### 3.2 Schaltbare Wärmedämmung

Man bringt in ein Vakuumpaneel mit einer Wärmeleitfähigkeit von ca.  $3 \cdot 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  eine geringe Menge Wasserstoffgas gezielt ein. Die Gaswärmeleitfähigkeit von  $\text{H}_2$  beträgt in der verwendeten Glasfaserfüllung bei 50 mbar ca.  $150 \cdot 10^{-3} \text{ W/(mK)}$ . Damit liegt die Wärmeleitfähigkeit im gefluteten Zustand um den Faktor 50 höher als bei einem Gasdruck unter 0.01 mbar.

Die zum Schalten benötigte geringe Wasserstoffmenge wird durch elektrisches Heizen eines Metallhydrids freigesetzt. Dieses Material befindet sich in einem kleinen Behälter im Paneel. Die spezielle Wärmeisolation des Behälters ermöglicht es, die elektrische Heizleistung auf wenige Watt pro Quadratmeter Paneelfläche zu begrenzen. Kühlt sich das Hydrid ab, so wird das Wasserstoffgas reabsorbiert, und der dämmende Zustand des Paneels ist wiederhergestellt.

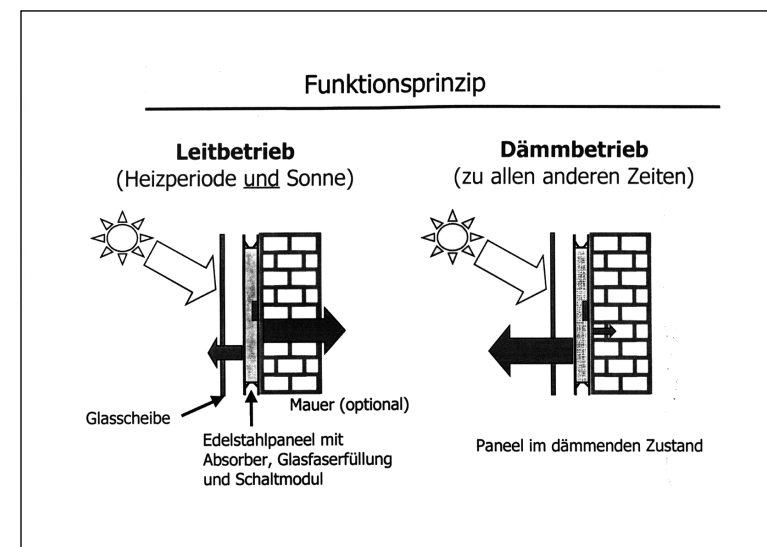
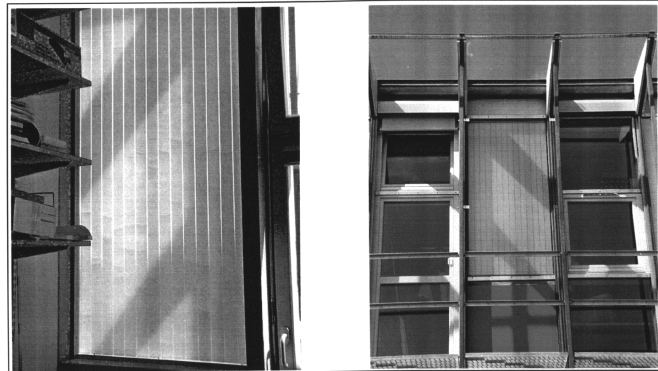
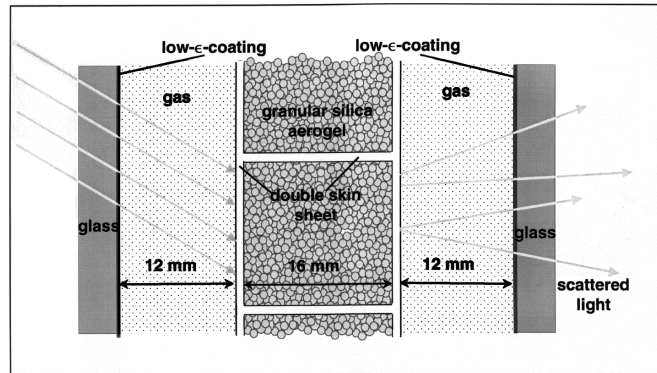


Abbildung 5: Funktionsweise der schaltbaren Wärmedämmung

Für die solarthermische Nutzung wird das schaltbare Wärmedämmpaneel (SWD) als Absorber mit Glasabdeckung in eine Südfassade integriert (Abb. 5). Bei ausreichender Einstrahlung während der Heizperiode ist der SWD auf Durchlass geschaltet. Nachts, bei fehlender Einstrahlung und im Sommer, wenn keine Wärme gebraucht wird, schaltet sich das Paneel selbsttätig zurück in den rein passiven, hoch dämmenden Zustand. Die Netto-Energieeinträge belaufen sich auf etwa 150 kWh pro Jahr und Quadratmeter Paneelfläche.

### 3.3 Streuung und Lenkung von Sonnenlicht

$\text{SiO}_2$ -Aerogele besitzen nicht nur exzellente Dämmeigenschaften sondern sind auch lichtdurchlässig. Zusammen mit einem Industriepartner hat das ZAE Bayern ein transluzentes Fassadenelement (Abb. 6a und b) entwickelt, das einen k-Wert von ca.  $0.5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  aufweist und die Raumausleuchtung über Lichtstreuung wesentlich verbessert (der Lichttransmissionsgrad liegt bei 54%).



Abbildungen 6a und b:  
Hoch dämmendes Licht streuendes Fassadenelement mit  $\text{SiO}_2$ -Aerogelschicht

Lichtlenkung ist über Brechung und Totalreflexion in entsprechenden Fassadenkomponenten möglich. Gerade in Büro- und Verwaltungsgebäuden ist die blendfreie Nutzung von Tageslicht hoch erwünscht. Hier liegt ein erhebliches Einsparpotential bei Beleuchtungs- und Kli-

matierungsbedarf, welches bei Entwicklung vor allem von miniaturisierten Lichtlenkstrukturen ausgeschöpft werden kann.

Gehen wir ein paar Schritte weiter, so gelangen wir zu einer in thermischer Hinsicht aber auch bezüglich der Lichttransmission variablen Fassade, die dann über eine entsprechende Sensorik gesteuert wird.

### 4. Ausblick

Abschliessend sei bemerkt, dass es in Deutschland durchaus realistische Chancen gibt, die  $\text{CO}_2$ -Reduktionsziele nach dem Kyoto-Protokoll bis 2012 zu erreichen, ja sogar zu übertreffen. Eine zentrale Voraussetzung ist allerdings, dass die Kernenergienutzung ( $\text{CO}_2$ -Vermeidung 170 Mio. t/a) nicht zurückgefahren wird. Weiter müssen bis dahin ca. 6 Mio. Altbauwohneinheiten energetisch renoviert sein, die Windenergienutzung an Standorten mit hoher mittlerer Windgeschwindigkeit, d.h. vor allem im Offshore-Bereich ausgebaut sowie Müll und Biomasse verstärkt für die Stromerzeugung eingesetzt sein.

Im Übrigen sollten wir nicht vergessen, dass der vorjährige Preisanstieg für Rohöl sicher nicht der letzte gewesen sein dürfte, dass Öl noch immer 40% des Primärenergiekonsums in Deutschland deckt und rund 60% der Weltölreserven in den OPEC-Ländern liegen.