



# Vakuumverglasung

Ein Forschungsvorhaben im Rahmen des 5. Energieforschungsprogramms der Deutschen Bundesregierung mit dem Ziel Edelgas als Füllgas in Mehrscheibenverglasungen durch Vakuum zu ersetzen.



Das BINE projektinfo 01/08 finden sie unter [www.bine.info](http://www.bine.info)

Abb. 1: Mit seinen guten Werten bei Wärmedämmung und Schallschutz ist die Vakuumverglasung eine zeitgemäße Entwicklung. Hier zwei Vakuumisoliervlas-Exponate auf der Messe glasstec in Düsseldorf.  
Quelle: [www.vig-info.de](http://www.vig-info.de)



In den letzten zwanzig Jahren haben sich die wärmedämmenden und optischen Eigenschaften von Verglasungen im Bauwesen erheblich verbessert. Die heute üblichen Wärmeschutzverglasungen mit hauchdünnen Silberschichten und Edelgasfüllungen haben ein hohes Niveau erreicht. Mit dem Edelgas Argon gefüllte Zweifach-Wärmeschutzverglasungen sind mittlerweile im Neubau Standard. Sie erreichen einen  $U_g$ -Wert zwischen 1,3 und 1,1  $W/m^2K$ . Hochwertige, dreifachverglasete Fenster weisen einen Wärmedurchgangskoeffizienten von 0,6 bis 0,7  $W/m^2K$  im Scheibenbereich auf.

Ein schwerer Aufbau, mehrere Zentimeter starke Verglasungen sowie der Einsatz von teuren Edelgasen bieten bei diesen Verglasungen Anreiz für Innovationen.

Vakuumverglasungen sind ein solch neuer Weg. Ein japanisches und ein chinesisches Unternehmen bieten bereits Vakuumglas am asiatischen Markt an, allerdings mit  $U_g$ -Werten von 1,1–1,3  $W/m^2K$ . Diese Werte sollen im Rahmen des Forschungsprojektes deutlich verbessert werden. Im Zweifachverglasenaufbau mit evakuiertem Scheibenzwischen-

raum können Vakuumverglasungen Wärmedurchgangskoeffizienten vom 0,8  $W/m^2K$  für das gesamte Fenster und 0,5  $W/m^2K$  für den Scheibenbereich erreichen.

Mit einem angestrebten Systemaufbau von weniger als 10 mm bei 4 mm Glasdicke ist Vakuum-Isolierglas schlanker als herkömmliche Isolierverglasungen. Der Einsatz von Edelgasen ist nicht mehr erforderlich. Jedoch ist der atmosphärische Druck auf evakuierte Flachgläser mit zehn Tonnen pro Quadratmeter sehr hoch und erfordert den Einsatz von Stützkörpern im Scheibenzwischenraum.

Herauszufinden, wie eine auf dem europäischen Markt konkurrenzfähige, dauerhaft vakuumdichte Verglasung technisch machbar ist, ist das Ziel eines mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Forschungsprojektes. Ein Verbund aus drei Forschungsinstituten und fünf mittelständischen Unternehmen ist hieran beteiligt.

## Der Aufbau von Vakuumisoliervlas

Der gasdichte Randverbund verbindet zwei 3–4 mm dicke Scheiben, von denen eine mit niedrig-emittierender Schicht (Low- $\epsilon$ -Schicht) versehen ist. Mit einem Glasabstand von etwa 0,7 mm ist diese Verglasung deutlich schlanker als heute übliche Zweifachverglasungen. Das „Kernstück“ des Vakuumisoliervlases befindet sich im Scheibenzwischenraum: Durch Evakuierung fehlt hier das Medium, das Wärme und Schall von der Innen- zur Außenscheibe transportiert. Um dies zu erreichen, wird der Druck in diesem Bereich auf unter  $10^{-3}hPa$  gesenkt. Nur so ist es möglich, den Wärmetransport des Restgases auf Werte von weniger als 0,1  $W/m^2K$  zu reduzieren und einen guten Gesamt-Wärmedurchgangskoeffizienten für die Verglasung zu erreichen. Den atmosphärischen Druck nehmen die Stützen auf. Geringe Sichtbarkeit und Wärmeleitfähigkeit spielen eine wichtige Rolle bei der Auswahl geeigneter Stützkörper.

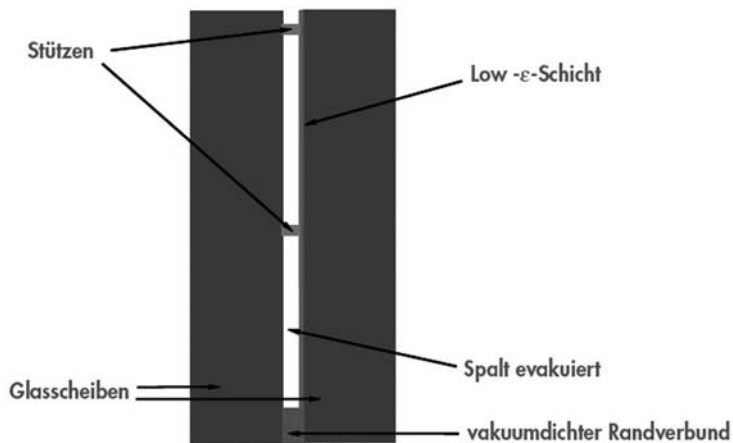


Abb. 2: Aufbau Vakuumisoliervlas  
Quelle: www.zae-bayern.de

## Herausforderungen im Forschungsprojekt

### Randverbund

Unter sämtlichen Einflüssen und Belastungen sollen die im Randverbund verwendeten Materialien über die Lebensdauer des Fensters vakuumdicht und wärmedämmend sein. Das heißt, der Restgasdruck von weniger als 0,001 hPa im Scheibenzwischenraum sollte im Temperaturbereich von -40 °C bis +60 °C über 25 Jahre hinweg stabil bleiben. Neben der Vakuumdichtheit ist eine gewisse Elastizität nötig. Diese gleicht auftretende Spannungen aus und vermeidet so Rissbildungen durch Überbeanspruchungen an den Glaskanten.

Die von asiatischen Herstellern von Vakuumglas verwendete starre Verbindung der Scheiben mit Glaslot kann diesen Anforderungen nicht genügen. Ihre Fertigung erfordert Temperaturen von mehr als 300 °C, was den Einsatz von hochwertigen low-ε-softcoatings unmöglich macht, da diese den hohen Temperaturen nicht standhalten können.

Die Spannungen im Randverbund steigen mit wachsender Scheibengröße, sodass es bei größeren Fenstern und hohen Temperaturdifferenzen zwischen Innen- und Außenscheibe zu Glasbruch kommen kann. Mit dünner Metallfolie als Material für den Randverbund konnten die Entwickler das Problem lösen. Ihre Elastizität gleicht temperaturbedingte Spannungen aus.

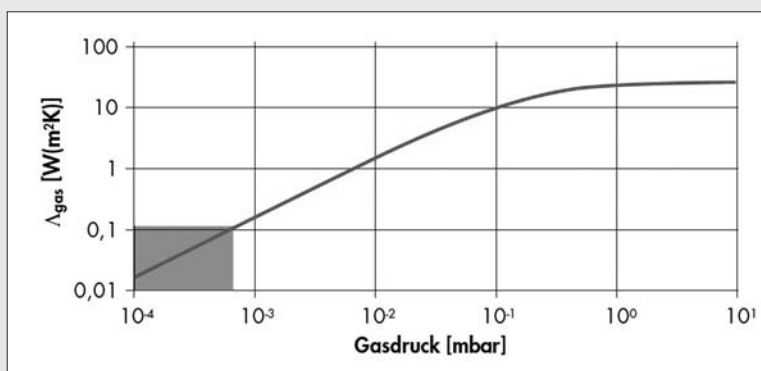
Auf der Suche nach einem geeigneten Verfahren, Metallfolie und Glas zu verbinden, kristallisierte sich eine Kombination aus Ultraschall- und Laserschweißen als beste Lösung heraus (Abb. 3). Zunächst wird dabei die Metallfolie mit dem Glas ultraschallgeschweißt. Die dabei entstehende chemische Verbindung zwischen Metall und Glas ist dauerhaft vakuumdicht. Anschließend werden die beiden Scheiben mit den dazwischen liegenden Abstandhaltern aufeinander gelegt. Um das Element vakuumdicht zu verschließen, müssen die Metallbänder der Innen- und Außenscheibe miteinander laserverschweißt werden. Die überste-

henden Blechfahnen können dann umgefaltet werden. Somit liegt ein flexibler und dauerhafter Randverbund vor. Das gesamte Verfahren findet in einer Druckkammer unter Vakuum statt.

### Wärmetransport im Fenster

Bei der Konstruktion eines wärmedämmenden Fensters gilt es, den Wärmetransport über drei verschiedene Mechanismen zu reduzieren:

- **Wärmeleitung** dominiert als Transportmechanismus in Feststoffen, etwa im Fensterrahmen und im Randverbund der Verglasung. Entscheidend für den Wärmeverlust ist die Wahl isolierender Werkstoffe und die Verminderung von Materialquerschnitten etwa durch Hohlkammerprofile.
- **Wärmekonvektion** nennt man den Wärmetransport durch bewegliche Teilchen. Im Scheibenzwischenraum spielt dieser Wärmetransportmechanismus zusammen mit der Wärmeleitung über das Füllgas eine zentrale Rolle. Je leichter die Gasmoleküle, umso mehr Wärme wird transportiert. Aus diesem Grund werden die Scheibenzwischenräume in Wärmeschutzverglasungen mit schweren Edelgasen wie Argon befüllt. Sehr hochwertige Fenster enthalten das noch schwerere aber deutlich teurere Krypton. Im idealen Vakuum kann es naturgemäß keine Wärmekonvektion geben. Aber auch ein Teilvakuum reduziert den Wärmetransport schon deutlich. Wird der Druck so weit reduziert, dass die Moleküle sich ohne gegenseitige Beeinflussung bewegen können, sinkt der Wärmetransport linear mit den Gasdruck.



Wärmedurchlasskoeffizient als Funktion des Gasdrucks (Scheibenabstand 1mm)

Quelle: www.zae-bayern.de

- **Wärmestrahlung** Jeder Körper strahlt elektromagnetische Wellen mit einem für seine Temperatur charakteristischen Spektrum ab und befindet sich so im Energieaustausch mit seiner Umgebung. Im Gegensatz zur Wärmeleitung und Wärmekonvektion findet Wärmestrahlung auch im Vakuum statt. Eine so genannte Low-ε-Beschichtung von Wärmeschutzverglasungen mindert diese Wärmeverluste. Die sehr dünnen Metalloxydschichten lassen kurzweilige Strahlung (Licht) nahezu ungehindert passieren, reflektieren aber die langwellige Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung).

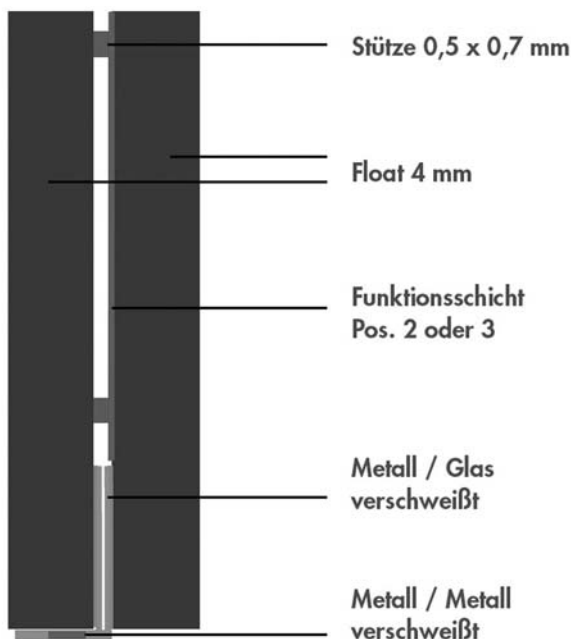


Abb. 3: Vakuumdichter Randverbund mit verschweißten Metallfolien  
Quelle: www.zae-bayern.de

#### Forschungsbedarf bei Rahmenkonstruktionen

Die wärmebrückenarme Rahmen- und Fassadenanbindung von Vakuumisoliertglas stellt bisher noch ein Problem dar. Ein optimaler Rahmen für Vakuumverglasungen sollte die Wärmebrücke Randverbund überdecken, schlank und gut dämmend sein. Diese Aufgabe können marktgängige Modelle nicht erfüllen. Ein Zusammenschluss aus Wissenschaft und Industrie entwickelt in dem Projekt „HWFF“ solche hochwärmedämmenden Fenster- und Fassadensysteme mit schlanken Rahmenkonstruktionen und hocheffizienten Verglasungen. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie fördert auch dieses Projekt.

#### Neues Produktionsverfahren entwickelt

Bislang musste die Scheibe bei der Vakuumherzeugung durch eine Öffnung im Fenster über Stunden abgepumpt und dabei unter hoher Temperatur (bis 400 °C) gehalten werden, bis alle Feuchtigkeit im Scheibenzwischenraum entfernt war. Bei dem jetzt angewendeten Verfahren (Sputtern), wird die Feuchtigkeit von den Glasoberflächen durch Beschuss mit energiereichen Ionen (Plasma) entfernt. Die Scheibenränder werden in einer großen Druckkammer unter Vakuum verschweißt. Ziel des vom BMWi geförderten Forschungsprojektes ProVIG ist es, eine industriegerechte Produktionsanlage zu bauen, in der u.a. dieses Verfahren integriert wird. Geplant ist die Fertigstellung im Jahr 2009. Hier sollen Vakuumglas-Scheiben in Größen bis zu 2500 x 1500 mm produziert werden.

#### Stützkörper

Ziel war es, Abstandhalter zu identifizieren, die optisch kaum wahrnehmbar aber mechanisch belastbar sind. Während für Optik und Thermik des Vakuumglases kleine Stützen mit geringer Auflagefläche günstig sind, trifft auf die Anforderungen an die Mechanik genau das Gegenteil zu.

Berücksichtigt werden musste, dass die Größe der Abstandhalter, der Abstand der einzelnen Stützen zueinander (Rastermaß) sowie die Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Materials den Gesamtwärmeverlust des Vakuumglases beeinflussen. Stützen unter 0,35 mm Größe sind für einen Beobachter in einem Meter Entfernung nicht mehr auflösbar, während Stützen mit einer Größe von 3,5 mm sehr gut wahrnehmbar sind. Untersuchungen zur Thermik zeigten bei metallischen Stützen und Glaszylindern vergleichbare Ergebnisse: Bei einer Rasterweite von 40 mm betrug der  $U_g$ -Wert bei ersteren 0,49  $W/m^2K$  und bei Glaszylindern 0,51  $W/m^2K$ .

Die mechanische Belastbarkeit der Stützen prüften die Wissenschaftler, indem sie die Abstandhalter zwischen Floatglasscheiben anbrachten und in einer Universalprüfmaschine auf ihre Druckfestigkeit testeten. Metallstützen zeigten dabei die höchste Sicherheit gegen Überlastung. Auch bei Hagelschlagsimulationen stellten sich metallische Stützen gegenüber Glasstützen als bessere Lösung heraus, da sie eine deutlich geringere Schädigungsschwelle aufweisen. Im Spannungsfeld zwischen Optik, Thermik und Mechanik identifizierten die Wissenschaftler schließlich Metallzylinder als das geeignetste Stützmaterial. Sie entwickelten ein Modell, das ausreichende mechanische Stabilität und Elastizität bietet und blendfrei ist. Das Rastermaß der Abstandhalter beträgt 30–40 mm. Mit einem Durchmesser von 0,5 mm sind die Stützen nur vor kontrastarmen Hintergrund und bei einem Abstand von weniger als einem Meter sichtbar (Abb 4).

#### Einordnung in den aktuellen Fenstermarkt

Wärmeschutzverglasungen mit Argon sind auf dem Markt erhältliche Standardprodukte. Die sehr guten  $U_g$ -Werte von Dreifach-Wärmeschutzverglasung mit Krypton sind teuer „erkaufte“, da das verwendete Edelgas sehr kostenintensiv ist. Für einen  $U_g$ -Wert von 0,5  $W/m^2K$  ist ein Scheibenzwischenraum von 12–14 mm erforderlich, was zu einer entsprechenden Systemdicke führt. Das hohe Gewicht kann Probleme bei Scharnieren, Beschlägen und Rahmen verursachen. Im Unterschied dazu erreicht Zweifach-Vakuumglas bei geringerem Gewicht und schlankem Aufbau  $U_g$ -Werte von 0,5  $W/m^2K$ . Da hier nur eine Low- $\epsilon$ -Schicht verwendet wird, weist dieses, verglichen mit Dreifach-Wärmeschutzglas, relativ hohe g-Werte auf und erzielt dadurch in der Energiebilanz höhere solare Warmegewinne (Tab. 1).



Mit optisch kaum wahrnehmbaren Stützen, exzellenten Dämmeigenschaften sowie in unterschiedlichen Glas-Aufbauten (Float, ESG, VSG) soll Vakuumglas bereits in wenigen Jahren marktreif sein. Von Neubauten (Niedrigenergie- und Passivhäuser) über sanierte Altbauten, Leichtglaskonstruktionen bis hin zu Fahrzeugen und Kühlgeräten könnte das Einsatzspektrum reichen.

Das Forschungsprojekt konzentriert sich aktuell auf die Entwicklung von Vakuumverglasungen für Fassadensysteme und Überdachungen. In beiden Bereichen gibt es noch keine auf dem Markt erhältlichen Rahmenkonstruktionen, die die Vorteile des Vakuumglases optimal nutzen könnten. Im oben beschriebenen Forschungsprojekt HWFF liegt eine Konstruktion mit einem  $U_g$ -Wert für den Rahmen von  $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$  vor. Die Dämmwerte sind mit denen der Verglasung in Passivhäusern vergleichbar. Der Systemaufbau von 90 mm ist jedoch wesentlich schlanker als von in Passivhäusern verwendeten Aufbauten mit einer Breiten von 110–130 mm.

In Zukunft soll Vakuumglas auch als Sonnenschutzverglasung sowie Verbundsicherheitsglas erhältlich sein. Kombinationen dieser Verglasung mit anderen Scheiben oder Platten sind ebenfalls von Interesse. So wird etwa im Bereich der Solarthermie über eine mögliche Anwendung von Vakuumisoliertglas nachgedacht. Dieses könnte als hochwärmedämmende Abdeckscheibe im Kollektor dienen und so die Effizienz erhöhen.



Abb. 4: Die Stützen sind nur aus nächster Nähe erkennbar.  
Quelle: www.vig-info.de

**Fazit**

Die beschriebenen wissenschaftlichen Projekte haben bereits wesentliche Voraussetzungen für eine Markteinführung von Produkten aus Vakuumglas geschaffen. Weiterer Entwicklungsbedarf besteht noch in geeigneten Rahmenkonstruktionen sowie in der Herstellung von Vakuumgläsern.

Mit seinen guten Werten bei Wärmedämmung und Schallschutz ist diese Verglasungsart auf jeden Fall eine zeitgemäße Entwicklung. Vor allem wenn man die weiteren Entwicklungen der Wärmeschutzstandards berücksichtigt, die in wenigen Jahren Dämmwerte verlangen, die heute nur Dreischeiben-Isolierglas erreicht. Ab 2010 sollen Produkte aus Vakuumglas am Markt erhältlich sein.

**Projektorganisation**

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 11019 Berlin

**Projekträger Jülich**

Forschungszentrum Jülich GmbH  
Dr Hendrik Wust  
52425 Jülich

**Herausgeber des BINE projektinfos 01/08**

FIZ Karlsruhe

**Autorin**

Birgit Schneider

Aus der Energieforschung in die Praxis. Der BINE Informationsdienst informiert zu Erneuerbaren Energien und innovativen Energiespartechiken: Photovoltaik, Solarthermie, Windkraft, innovative Baukonzepte und Gebäudetechnik.

Kostenfreie Informationen unter:

BINE Informationsdienst  
FIZ Karlsruhe, Büro Bonn  
53113 Bonn, Kaiserstr. 185–197  
fon: +49 228 92379-0  
fax: +49 228 92379 29  
email: bine@fiz-karlsruhe.de  
www.bine.info

Verglasungsart	Aufbau* (Glasdicke, Scheiben-zwischenraum), [mm]	$U_g$ -Wert [W/m <sup>2</sup> K]	g-Wert [Gesamtenergie durchlassgrad]	$\tau_v$ [Transmissionsgrad]
2 WSV, Argon	4/12 – 16/#4	1,4 – 1,1	0,63 – 0,53	0,80 – 0,75
3 WSV, Krypton	4#/8 – 12/4/8 – 12/#4	0,7 – 0,5	0,55 – 0,47	0,72 – 0,68
<b>zum Vergleich:</b>				
2 Vakuum	4/0,7/#4	0,5	0,54	0,73

Tab. 1: Thermische und optische Kennwerte für Wärmeschutzverglasungen auf Basis verschiedener Herstellerangaben. Quelle: BINE projektinfo 01/08

\* von außen nach innen  
WSV = Wärmeschutzverglasung,  
# = Lage der Low-ε-Schicht(en)