

F 2969

Norbert Sack, Ansgar Rose

Untersuchungen zur Umsetzbarkeit von druckentspanntem Isolierglas

F 2969

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2015

ISBN 978-3-8167-9579-7

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Untersuchungen zur Umsetzbarkeit von druckentspanntem Isolierglas





Abschlussbericht

Thema	Untersuchungen zur Umsetzbarkeit von druckentspanntem Isolierglas
Kurztitel	Druckentspanntes MIG
Gefördert durch	Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-12.12)
Forschungsstelle	ift gemeinnützige Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH Theodor-Gietl-Straße 7–9 83026 Rosenheim
Bearbeiter	Dr. Ansgar Rose
Projektleiter	Norbert Sack
Institutsleitung	Prof. Ulrich Sieberath

Rosenheim, Juli 2015



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation / Ziele	1
1.2	Ausgangslage	3
1.3	Projektgruppe	7
1.4	Messepräsentation	8
2	Entwicklung eines Untersuchungsprogramms	9
2.1	Anforderungen an Methoden zur Druckentspannung/-anpassung	9
2.2	Bewertung von Konzepten zur Druckentspannung/-anpassung	10
2.2.1	Dauerhafte Druckentspannung	10
2.2.2	Einmalige Druckanpassung	14
2.3	Untersuchungsprogramm	15
3	Rechenmodell zur Abschätzung der Druckreduzierung und Feuchteaufnahme in dauerhaft druckentspanntem MIG	17
3.1	Einleitung	17
3.2	Klimadaten	18
3.3	Modell	18
3.3.1	Dichtes MIG	19
3.3.2	Offenes MIG	19
3.3.3	Über Kapillare druckentspanntes MIG	20
3.3.4	Über Ventile druckentspanntes MIG	21
3.4	Beispiel für eine Druckentspannung	22
4	Experimentelle Untersuchungen zur dauerhaften Druckentspannung von Mehrscheiben-Isolierglas	25
4.1	Klimakammeruntersuchungen an dauerhaft druckentspanntem MIG	27
4.1.1	Durchbiegungsmessungen in der Klimakammer	27
4.1.2	Feuchteaufnahme in der Klimakammer	35
4.2	Freibewitterung von dauerhaft druckentspanntem MIG	38
4.2.1	Ziele und Planung	38
4.2.2	Probekörper und Durchführung	42
4.2.3	Ergebnisse	48
4.3	Schlussfolgerungen und Empfehlungen – Dauerhaft druckentspannte Systeme	53
5	Untersuchungen zur einmaligen Druckanpassung in Mehrscheiben-Isolierglas	57
5.1	Einleitung	57
5.2	Derzeitige Verfahren zur einmaligen Druckanpassung	57
5.3	Rechenmodelle zur Druckanpassung über Kapillare	61

5.3.1	Akzeptable Ortshöhendifferenzen zwischen dem Herstell- und Einbauort ohne Druckanpassung	61
5.3.2	Strömungsverhalten bei der Druckanpassung	64
5.3.3	Druckanpassung über eine bei der Auffahrt zum Einbauort geöffnete Kapillare	67
5.4	Handhabung von Kapillaren	71
5.4.1	Einbau von Kapillaren in MIG	71
5.4.2	Öffnen und Verschließen von Kapillaren	72
5.5	Dauerhaftigkeit von Systemen zur einmaligen Druckanpassung	74
5.6	Schlussfolgerungen und Empfehlungen – Einmalig druckangepasste Systeme	77
6	Literaturverzeichnis	81
7	Danksagung	83



Zusammenfassung

Konventionelles Mehrscheiben-Isolierglas besteht aus mehreren planparallelen Glasscheiben, die über ein Randverbundsystem miteinander verbunden sind. Die entstehenden Scheibenzwischenräume (SZR) sind hermetisch abgeschlossen. Dies ist notwendig, um die Luftfeuchtigkeit in den SZR so gering wie möglich halten zu können und somit die Entstehung von Tauwasser sowie die Korrosion der aufgedampften metallischen low-e-Beschichtungen zu verhindern. Außerdem soll ein Entweichen des Füllgases vermieden werden.

Dieses Konstruktionsprinzip hat auch Nachteile: Es verhindert einen Druckausgleich zwischen dem SZR und der umgebenden Atmosphäre. Ändern sich der Luftdruck oder die Temperatur im SZR, so entsteht ein Druckunterschied zwischen dem SZR und der Atmosphäre. Die Glasscheiben bauchen sich ein oder aus und werden dabei Biegespannungen ausgesetzt. Der Randverbund wird auf Druck oder Zug belastet. Neben den mechanischen Belastungen kann ein Einbauchen der Scheiben auch dazu führen, dass im SZR eingebrachte bewegliche Systeme, wie z.B. Sonnenschutzsysteme, eingeklemmt und beschädigt werden.

Je größer der Scheibenzwischenraum, desto größer wird die Belastung auf Glas und Randverbund, wenn sich der Luftdruck oder die Temperatur im SZR ändern. Damit ist die Bautiefe von konventionellem Mehrscheiben-Isolierglas konstruktionsbedingt beschränkt. Würde ein Druckausgleich zwischen dem Scheibenzwischenraum und der Umgebung ermöglicht, so wären diese Beschränkungen aufgehoben. Folgende Vorteile könnten erzielt werden:

- Leichtere und vielfältigere Integration von Bauteilen jeglicher Art in den SZR (z.B. Sonnenschutzsysteme)
- Realisierung von Isolierglas mit mehr als drei Scheiben ohne wesentliche Beschränkung der Scheibenabstände
- Größere Bautiefe und somit Verringerung der geometrischen Wärmebrücke am Baukörperanschluss
- Reduzierung des Wärmedurchgangskoeffizienten im Vergleich zu konventionellem Zwei- und Dreifachglas
- Verbesserung der Luftschalldämmung (diese steigt mit zunehmendem SZR)
- Mögliche Reduzierung der Glasdicken, da verminderte Klimalasten auf die Scheiben einwirken

Eine Untergruppe der druckentspannten Systeme sind Isoliergläser, bei denen nur eine einmalige Druckanpassung auf die Ortshöhe des Einbauortes vorgenommen werden muss. Dies ist notwendig bei konventionellen MIG, wenn der Höhenunterschied zwischen Herstellungs- und Einbauort bestimmte, von Aufbau und Format des Isolierglases abhängige, Grenzwerte überschreitet. Die Druckanpassung kann bereits durch entsprechende Gasbefüllung bei der Herstellung erfolgen oder durch ein kurzzeitiges Öffnen der Scheibenzwischenräume am Einbauort. In beiden Fällen werden die Scheibenzwischenräume

anschließend hermetisch verschlossen. Diese Isoliergläser fallen in den Anwendungsbereich der Produktnorm EN 1279 [1], insbesondere müssen sie auch alle Anforderungen an die Dauerhaftigkeit erfüllen. Eine Argonfüllung ist möglich und üblich bei einmalig druckangepassten Systemen.

Dieses Forschungsvorhaben hatte das Ziel, zu untersuchen, ob und durch welche technischen Maßnahmen permanent druckentspanntes sowie (einmalig) druckangepasstes Isolierglas für eine breite Anwendung im Bauwesen umgesetzt werden können. Neben der eigentlichen technischen Umsetzbarkeit der Druckentspannung bzw. -anpassung unter üblichen Fertigungs-, Einbau- und Nutzungsbedingungen standen immer auch Fragen zur Dauerhaftigkeit der Isoliergläser im Vordergrund. Bei den permanent geöffneten Systemen war die Feuchtaufnahme kritisch zu betrachten, bei den einmalig druckangepassten Systemen im Wesentlichen die Gasdichtheit.

Die meisten Fragestellungen wurden experimentell angegangen. Das betrifft die eigentliche technische Umsetzung der Druckentspannung bzw. -anpassung sowie die Prüfung der Dauerhaftigkeit solcher Systeme. Zur Vorbereitung und Auswertung der Experimente war es aber auch notwendig, umfangreiche numerische Simulationsrechnungen anzustellen.

Folgende Aufgaben wurden im Verlauf des Forschungsvorhabens bearbeitet:

Dauerhafte Druckentspannung über Kapillare

- Erstellung eines Rechenmodells zur Simulation der dauerhaften Druckentspannung eines MIG über eine Kapillare, um den Grad der Druckentspannung und die Feuchtaufnahme abschätzen zu können und geeignete Kapillardimensionen zu ermitteln
- Experimentelle Prüfung der Druckentspannung und Feuchtaufnahme an MIG-Probekörpern in einer Klimakammer
- Experimentelle Prüfung der Feuchtaufnahme an druckentspannten MIG-Probekörpern in einer Freibewitterung

Einmalige Druckanpassung über Kapillare

- Erstellung eines Rechenmodells zur Simulation der einmaligen Druckanpassung eines MIG über eine Kapillare
- Experimentelle Prüfung der Verarbeitbarkeit von Kapillaren verschiedenen Typs (Material, Dimensionen)
- Experimentelle Prüfung der eigentlichen Druckanpassung
- Experimentelle Prüfung der Dauerhaftigkeit von druckangepassten MIG mit Kapillaren verschiedenen Typs

Die durchgeführten Untersuchungen kamen zu folgenden Ergebnissen:



Dauerhafte Druckentspannung über Kapillare

Kapillare sind geeignet, eine dauerhafte Druckentspannung von Mehrscheiben-Isoliergläsern zu bewirken. Gleichzeitig begrenzen Kapillare die Feuchteaufnahme eines MIG erheblich, so dass akzeptable Nutzungsdauern (> 20 Jahre) realistisch erscheinen. Sowohl die Klimakammeruntersuchungen als auch die Freibewitterungen bestätigen die Vorhersagen des Rechenmodells, das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelt wurde.

Die Kapillardimensionen (Innendurchmesser, Länge) müssen an das Format und den Aufbau des MIG angepasst gewählt werden, um ein ausgewogenes Verhältnis von Druckentspannung und Feuchteaufnahme zu erzielen. Das Rechenmodell kann für eine solche Bemessung der Kapillare herangezogen werden.

Durch entsprechende Bemessung der Kapillare ist es möglich, den Koppelfeffekt, d.h. die mittragende Wirkung der inneren Scheibe bei Windlasten, in einem MIG zu erhalten bei gleichzeitig sehr hoher Druckentspannung und ausreichender Dauerhaftigkeit.

Das Kapillarmaterial (Edelstahl oder FEP-Kunststoff) hat keinen Einfluss auf die Feuchteaufnahme.

Ein wichtiger nächster Schritt auf dem Weg zur Entwicklung von druckentspannten Produkten wäre die Berechnung und Prüfung von großformatigen Probekörpern mit großem SZR (ca. 100 mm) und Einbauten (z.B. Sonnenschutz), die die Temperatur im SZR durch Absorption von Solarstrahlung zusätzlich erhöhen. Zunächst müssten die Kapillare und die benötigte Trockenmittelmenge mithilfe von Simulationsrechnungen bemessen werden, dann könnten entsprechende Probekörper gebaut werden und klimatischen Belastungen in der Klimakammer und der Freibewitterung ausgesetzt werden.

Weitere Fragestellungen für eine Fortführung des Themas sind:

- Wie groß ist der Beitrag der Feuchtediffusion durch den Randverbund zur Gesamtfeuchteaufnahme eines druckentspannten MIG?
- Sollte die Luft von außen oder vom Innenraum in den SZR eingesogen werden, um den langfristige Feuchteeintrag so gering wie möglich zu halten?

Einmalige Druckanpassung über Kapillare

Eine einmalige Druckanpassung über eine Kapillare ist prinzipiell möglich. Idealerweise erfolgt die Druckanpassung bereits während der Auf- bzw. Abfahrt auf/von einem Berg. Es ergeben sich jedoch Einschränkungen, die in erster Linie aus der technischen Umsetzbarkeit resultieren. Die automatisierte Fertigung (insbesondere Versiegelung) wird u.U. durch eine Metallkapillare im Randverbund behindert oder sogar unmöglich gemacht. Das gasdichte Verschließen von Metallkapillaren hat sich als schwierig erwiesen. Die Kapillare muss grundsätzlich als potenzielle Fehlstelle im Randverbund betrachtet werden. Der Durchbruch durch den Abstandhalterücken und die Grenzflächen zum Dichtstoff können

einen Pfad für entweichendes Gas und eindringende Feuchtigkeit bilden. Die Anforderungen an die Fertigungsqualität müssen bei einem MIG mit Metallkapillare noch höher angesetzt werden als bei einem konventionellen MIG. Kunststoffkapillare scheiden als Alternative aus. Sie lassen sich zwar gut verarbeiten, aber Kunststoffe sind nicht gasdicht. MIG mit Kunststoffkapillare können daher die Anforderungen der Norm EN 1279-3 nicht erfüllen.

Die Verarbeitbarkeit von Kapillaren schränkt den Bereich geeigneter Kapillarinnendurchmesser und Wandstärken erheblich ein. Das wiederum wirkt sich auf den Bereich der Scheibenformate und -aufbauten aus, für die grundsätzlich eine Druckanpassung über Kapillare in Frage kommt oder sinnvoll erscheint: Für kleine (350 mm x 500 mm) bis mittlere (700 mm x 1000 mm) Scheibenformate ist ein Druckausgleich über Kapillare möglich, erbringt eine erhebliche Reduzierung der mechanischen Scheibenbelastung und dauert nur Minuten. Bei großen Scheibenformaten (1000 mm x 2000 mm) ist die mechanische Scheibenbelastung wesentlich geringer, aber die Druckanpassung dauert sehr lange, bis zu mehreren Stunden.

Es gibt mehrere Ansatzpunkte für weitere Untersuchungen, u.a.:

- Analyse, wodurch die festgestellten Undichtheiten bei Metallkapillaren im Wesentlichen bedingt sind
- Andere Kapillartypen, insbesondere Materialien, z.B. Ni oder Al
- Verbesserung der Arbeitstechniken beim Einbau einer Kapillare in den Randverbund
- Die Verwendung von Kapillaren mit größerem Innendurchmesser sollte angestrebt werden, um strömungstechnische Beschränkungen (Zeit bis zur Druckanpassung) auf kleine und mittlere Formate aufzuheben
- Andere Methoden zur Druckanpassung, wie etwa Ventile, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht untersucht wurden, weil sie als weniger aussichtsreich und vergleichsweise teuer eingeschätzt wurden

Abstract

Conventional insulating glass units (IGUs) are made of several sheets of glass separated by a spacer and sealed hermetically around the edges. The cavity between panes is usually filled with argon. The seal keeps the ingress of moisture into the cavity low to prevent water condensing on the inside surfaces of the glass panes and to avoid any corrosion of metallic low-e coatings. Further, the seal prevents the fill gas from escaping.

There is a major drawback associated with this design: an exchange of gas or air between the cavity and the atmosphere is impossible. Thus, whenever the temperature in the cavity or the external air pressure changes, the pressure in the cavity changes as well. This causes the panes to bulge inwards or out, inducing flexural stresses in them. The edge seal is subjected to tensile or compressive loads. Further, moveable solar shading devices integrated in the IGU might get trapped and damaged by panes bulging inward.

Atmospheric effects as described above increase with the inter-pane spacing. Thus, the overall depth of conventional IGUs has to be restricted to avoid any damage caused by changes in air pressure or temperature. Such restrictions would not be necessary if pressure equalization between the IGU cavity and the atmosphere could be achieved: This would result in the following advantages:

- Simplified integration of various components into the IGU, e.g. solar shading systems
- Implementation of IGUs with more than three panes without substantial restrictions on the inter-pane spacing
- Larger overall depth and thus, less thermal bridging at the connection to the supporting structure
- Reduced heat transfer coefficient compared to conventional double and triple glazing
- Improved airborne sound insulation (increases with inter-pane spacing)
- Use of thinner glass panes possible.

One-off pressure-adjusted systems are a sub-group of pressure-equalized systems. These are conventional IGUs that require a single pressure equalization because the difference in altitude between the manufacturing site and the place of installation exceeds certain limits. These limits depend on the size, the aspect ratio and the inter-pane spacing of the IGU. The pressure adjustment can take place either at the manufacturing site by over- or under-filling the cavity, or at the place of installation by briefly opening the cavity to the atmosphere. In both cases, the cavity has to be sealed hermetically afterwards. One-off pressure adjusted systems must fulfill all requirements of the product standard EN 1279, including those related to durability. It is possible and customary to fill the cavities of these IGUs with argon.

The aim of this research project was to investigate whether and by which technical means permanently pressure-equalized IGUs and one-off pressure-adjusted IGUs could be implemented for general architectural applications. Beside the actual technical realization under usual manufacturing, installation and usage conditions, questions of durability had

to be addressed. For the permanently pressure-equalized systems, the moisture uptake is crucial, for the one-off pressure-adjusted systems, it is the gas retention.

Most questions were approached experimentally, the actual technical implementation of pressure equalization and pressure adjustment as well as the durability testing of these systems. However, extensive numerical simulations were required when preparing the experiments and when evaluating the experimental results.

The following tasks were addressed during the course of the project:

Permanent pressure equalization via a capillary tube

- Preparation of a calculation model for the simulation of a permanent pressure equalization via a capillary tube. The model was used to assess the degree of pressure equalization and the amount of moisture uptake as well as to determine suitable dimensions for capillary tubes.
- Experimental testing of pressure equalization and moisture uptake with IGU specimens in a climate chamber
- Experimental testing of the moisture uptake with IGU specimens during natural weathering.

One-off pressure adjustment via a capillary tube

- Preparation of a calculation model for the simulation of a one-off pressure adjustment via a capillary tube
- Experimental testing of the processability of various types of capillary tubes (material, dimensions)
- Experimental testing of the durability of pressure-adjusted IGUs.

The investigations led to the following findings:

Permanent pressure equalization via a capillary tube

Capillary tubes are suitable devices to implement a permanent pressure equalization of IGUs. At the same time, they will limit the moisture uptake of an IGU considerably, so that an acceptable operating life (longer than 20 years) appears realistic. The experiments with IGUs in the climate chamber and those under natural weathering conditions confirmed the predictions of the calculation model.

The capillary tube dimensions (internal diameter, length) must be chosen with regard to the IGU's construction (width, height, thickness of glass panes, inter-pane spacing) to achieve a well-balanced ratio between pressure equalization and moisture uptake. The calculation model can be used to determine suitable capillary tube dimensions.



It is possible to choose the dimensions of the capillary tube so that the load sharing between the glass panes of the IGU (caused by the air in the cavity acting as a spring) will be retained while combining the pressure equalization with sufficient durability.

The material of the capillary tube (stainless steel or FEP polymer) has no effect on the moisture uptake of an IGU.

An important next step in the development of a commercial product would be to test a large-sized IGU specimen with a large inter-pane spacing (about 100 mm) and integrated components (e.g. sun shading) that raise the temperature in the cavity because of the absorption of solar radiation. Initially, suitable capillary tube dimensions and the necessary amount of desiccant would have to be determined with the help of the calculation model. Afterwards, specimens could be built and tested in a climate chamber or during natural weathering.

Further questions that should be addressed in a continuation project are:

- What proportion of the total moisture uptake of a pressure-equalized IGU is caused by the diffusion of moisture through the edge seal?
- Does it affect the amount of moisture uptake if the air that is sucked into the cavity comes from indoors or from the outside?

One-off pressure adjustment via a capillary tube

A one-off pressure adjustment via a capillary tube is, in principle, possible. Ideally, the pressure adjustment should happen during the ascent or descent rather than at the destination. However, the processability of metal capillary tubes is causing limitations. A metal capillary tube sticking out of the spacer can be an obstacle to the sealing robot, may even cause it to stop. To pinch off and hermetically seal a metal capillary tube turned out to be difficult. The presence of any capillary tube creates a weak spot in the edge seal. Notably, the entry point into the spacer back and the interface with the sealant can provide a path for the escape of fill gas and the ingress of moisture. Therefore, the manufacturing quality for an IGU with a metal capillary tube in the edge seal has to be even higher than for a conventional IGU. Polymeric capillary tubes are no alternative. Although they are much easier to process, polymers are in principle not gas-tight. IGUs with a polymeric capillary tube in the edge seal cannot fulfill the requirements of the product standard EN 1279-3.

The processability of metal capillary tubes restricts their usage to a certain range of diameters and wall thicknesses. This in turn restricts the range of IGU sizes and constructions for which a one-off pressure adjustment can be realised with a capillary tube. For small- (350 mm x 500 mm) to medium-sized (700 mm x 1000 mm) IGUs, a pressure adjustment via a capillary tube is possible. Flexural loading of the glass panes is reduced considerably, and the process does not take more than a few minutes. For large-sized (1000 mm x 2000 mm) IGUs, the flexural loading of the glass panes is always much lower than for small- and medium-sized ones, but the pressure adjustment takes too long (up to several hours) to be practical at a building site.

Starting points for a continuation of the investigations are as follows:

- Analysis of the causes of gas leaks in the specimens with metal capillary tubes
- Other types of capillary tubes, especially other materials, e.g. Ni or Al
- Improvement of fitting of capillary tubes into the edge seal
- Use of wider capillary tubes is desirable to remove restrictions on IGU size and construction imposed by the limited flow of gas through a narrow capillary tube
- Other means of pressure adjustment, e.g. valves, that were considered not promising enough and/or too expensive to be followed up within the context of this project.

1 Einleitung

1.1 Motivation / Ziele

Konventionelles Mehrscheiben-Isolierglas besteht aus mehreren planparallelen Glasscheiben, die über ein Randverbundsystem miteinander verbunden sind. Die entstehenden Scheibenzwischenräume (SZR) sind hermetisch abgeschlossen. Dies ist notwendig, um die Luftfeuchtigkeit im SZR so gering wie möglich halten zu können und somit die Entstehung von Tauwasser sowie die Korrosion der aufgedampften metallischen low-e-Beschichtung zu verhindern. Außerdem soll ein Entweichen des Füllgases vermieden werden.

Dieses Konstruktionsprinzip hat auch Nachteile: Es verhindert einen Druckausgleich zwischen dem SZR und der umgebenden Atmosphäre. Ändern sich der Luftdruck oder die Temperatur im SZR, so entsteht ein Druckunterschied zwischen dem SZR und der Atmosphäre. Die Glasscheiben bauchen sich ein oder aus und werden dabei Biegespannungen ausgesetzt. Der Randverbund wird auf Druck oder Zug belastet. Zusammenfassend spricht man von den sogenannten Klimalasten (Abbildung 1). Neben den mechanischen Belastungen kann ein Einbauchen der Scheiben auch dazu führen, dass im SZR eingebrachte bewegliche Systeme, wie z.B. Sonnenschutzsysteme, eingeklemmt und beschädigt werden.

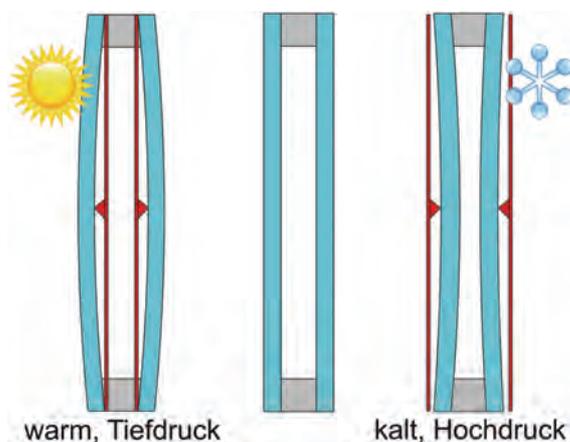


Abbildung 1 Verhalten von Isolierglas bei Klimalast

Ursache der Klimalasten ist das Ausdehnen bzw. Zusammenziehen des Gases im Scheibenzwischenraum. Je größer der Zwischenraum, desto mehr Gas ist enthalten und desto größer wird die Belastung auf Glas und Randverbund, wenn sich der Luftdruck oder die Temperatur im SZR ändern. Bei mehr als einem SZR ergibt sich der effektive SZR als Summe der einzelnen SZR (Abbildung 2). Damit ist die Bautiefe von Mehrscheiben-Isolierglas konstruktionsbedingt erheblich beschränkt. Für Dreifach-Isolierglas z.B. werden üblicherweise Scheibenzwischenräume von maximal 12 mm empfohlen. 16 mm oder gar 18 mm wären aber energetisch wünschenswert.

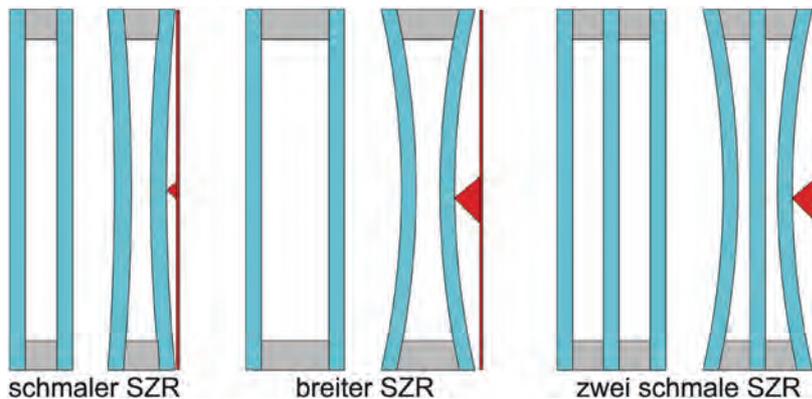


Abbildung 2 Ein größerer effektiver SZR führt zu größeren Durchbiegungen und höheren Spannungen

Würde ein Druckausgleich zwischen dem Scheibenzwischenraum und der Umgebung ermöglicht, so wären die Beschränkungen hinsichtlich des maximal möglichen Scheibenabstandes aufgehoben. Folgende Vorteile könnten erzielt werden:

- Leichtere und vielfältigere Integration von Bauteilen jeglicher Art in den SZR (z.B. Sonnenschutzsysteme)
- Realisierung von Isolierglas mit mehr als drei Scheiben ohne wesentliche Beschränkung der Scheibenabstände
- Größere Bautiefe und somit Verringerung der geometrischen Wärmebrücke am Baukörperanschluss
- Reduzierung des Wärmedurchgangskoeffizienten im Vergleich zu konventionellem Zwei- und Dreifachglas
- Verbesserung der Luftschalldämmung (diese steigt mit zunehmendem SZR)
- Mögliche Reduzierung der Glasdicken, da verminderte Klimalasten auf die Scheiben einwirken

Zwei Beispiele sollen zur Illustration dienen: 1.) Durch ein Isolierglas mit vier Scheiben bei Scheibenzwischenräumen von je 24 mm könnte ein Wärmedurchgangskoeffizient von $U_g = 0,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ erzielt werden. Dem steht bei einem konventionellen Dreifachglas ein Wert von 0,6–0,8 gegenüber. 2.) Ein Isolierglasaufbau bestehend aus 2 x 5 mm Scheiben mit einem SZR von 110 mm hätte eine Luftschalldämmung von ca. 40 dB. Ein Standardglas mit einem SZR von 16 mm hingegen erreicht nur einen Wert von ca. 31 dB. Beide Beispielsysteme könnten mit dem konventionellen hermetischen Aufbau nicht realisiert werden, da die großen SZR von 3 x 24 mm bzw. von 110 mm zu sehr hohen Klimalasten führen würden.

All die Vorteile eines dauerhaft geöffneten Systems ließen sich nur dann sinnvoll nutzen, wenn eine dem konventionellen MIG vergleichbare Dauerhaftigkeit gewährleistet wäre. Dabei geht es im Wesentlichen darum, die Luftfeuchtigkeit im SZR so gering wie möglich zu halten, um Kondensatbildung und Korrosion der Beschichtung zu vermeiden. Eine Argonfüllung wäre bei einem dauerhaft geöffneten System sinnlos, da das Argon sich innerhalb weniger Wochen in die umgebende Atmosphäre verflüchtigen würde.



Eine Untergruppe der druckentspannten Systeme sind Isoliergläser, bei denen nur eine einmalige Druckanpassung auf die Ortshöhe des Einbauortes vorgenommen werden muss. Dies ist notwendig bei konventionellen MIG, wenn der Höhenunterschied zwischen Herstellungs- und Einbauort bestimmte, von Aufbau und Format des Isolierglases abhängige, Grenzwerte überschreitet. Die Druckanpassung kann bereits durch entsprechende Gasbefüllung bei der Herstellung erfolgen oder durch ein kurzzeitiges Öffnen der Scheibenzwischenräume am Einbauort. In beiden Fällen werden die Scheibenzwischenräume anschließend hermetisch verschlossen. Diese Isoliergläser fallen in den Anwendungsbereich der Produktnorm EN 1279 [1]; insbesondere müssen sie auch alle Anforderungen an die Dauerhaftigkeit erfüllen. Eine Argonfüllung ist möglich und üblich bei einmalig druckangepassten Systemen.

Dieses Forschungsvorhaben hatte das Ziel, zu untersuchen, ob und durch welche technischen Maßnahmen permanent druckentspanntes sowie (einmalig) druckangepasstes Isolierglas für eine breite Anwendung im Bauwesen umgesetzt werden können. Neben der eigentlichen technischen Umsetzbarkeit der Druckentspannung bzw. -anpassung unter üblichen Fertigungs-, Einbau- und Nutzungsbedingungen standen immer auch Fragen zur Dauerhaftigkeit der Isoliergläser im Vordergrund. Bei den permanent geöffneten Systemen war die Feuchtigkeitsaufnahme kritisch zu betrachten, bei den einmalig druckangepassten Systemen im Wesentlichen die Gasdichtheit. Letztere reagiert nach den Erfahrungen der Forschungsstelle empfindlicher auf Undichtigkeiten im Randverbund.

Die meisten Fragestellungen wurden experimentell angegangen. Das betrifft die eigentliche technische Umsetzung der Druckentspannung bzw. -anpassung sowie die Prüfung der Dauerhaftigkeit solcher Systeme. Zur Vorbereitung und Auswertung der Experimente war es aber auch notwendig, umfangreiche numerische Simulationsrechnungen anzustellen. Der Grad der Druckentspannung sowie die langfristige Feuchteaufnahme mussten für dauerhaft offene Systeme geschätzt werden. Für die einmalige Druckanpassung galt es zunächst aufbau- und formatabhängige kritische Ortshöhendifferenzen zu berechnen. Dann musste die Zeit geschätzt werden, die bei einmaliger Öffnung des SZR am Einbauort des Isolierglases zum Druckausgleich notwendig wäre.

1.2 Ausgangslage

Gespräche mit Fachleuten aus der Branche und dem ift Rosenheim demonstrierten den Bedarf einer Aufarbeitung dieses Themas. Eine Recherche in der IRB Baudatenbank war negativ. F&E-Projekte zur konstruktiven Ausbildung von dauerhaft druckentspanntem bzw. einmalig druckangepasstem Mehrscheiben-Isolierglas sind dort nicht aufgeführt.

Einzelne Arbeiten haben sich jedoch bereits mit der Thematik auseinandergesetzt, und es gibt bzw. gab auch einzelne Produkte, die die Prinzipien der Druckentspannung anwenden.

Dauerhafte Druckentspannung über externe Komponenten

Ein Patent von 1987 [2] schlägt ein geschlossenes System vor, bei dem Raum für die Ausdehnung des Füllgases im Fensterrahmen bereitgestellt wird; und zwar in Form eines elastisch verformbaren Beutels, einer elastischen Membran oder eines Kolbensystems. Die Fa. VisionWall belüftet den Scheibenzwischenraum ihres Fenstersystems über eine externe, austauschbare Trockenmittelkartusche [3]. In einer Closed-Cavity-Fassade (CCF) [4] wird die Kondensatbildung im Raum zwischen der inneren und äußeren Fassade durch ständiges Spülen dieses Raumes mit trockener, gereinigter Luft verhindert. Alle drei Lösungen sind nicht ideal für eine breite Anwendung im Bauwesen (und eine Anwendung des CCF-Prinzips auf MIG ist auch nicht bekannt), da sie technisch aufwendig sind und Bauteile/Apparaturen außerhalb des eigentlichen Isolierglases erfordern.

Dauerhafte Druckentspannung über Ventile

Karagiozis kommt in einer Simulationsstudie [5] zu der Schlussfolgerung, dass auf den Einsatz von Trockenmittel im Randverbund verzichtet werden könne solange keine vollständige Druckentspannung angestrebt wird. Dazu müsste der Luftaustausch zwischen Scheibenzwischenraum und Atmosphäre durch Ventile begrenzt werden. Diese würden sich erst ab einem bestimmten, voreinstellbaren, Über- bzw. Unterdruck im Scheibenzwischenraum öffnen und Luft aus- bzw. einströmen lassen. Der Scheibeninnendruck würde also zwischen diesen beiden Werten schwanken. Allerdings räumt Karagiozis ein, dass, abhängig vom Klima, zumindest an einigen Tagen pro Jahr Kondenswasserbildung im SZR zu erwarten wäre. Wahrscheinlich ist dies der Grund, warum dieser Lösungsansatz nie in ein Produkt umgesetzt wurde. Zur Art der Ventile oder deren Integration in ein MIG äußert Karagiozis sich nicht, da es sich bei seiner Arbeit ausdrücklich um eine theoretische Studie handelt.

Dauerhafte Druckentspannung über Druckausgleichsröhren

Die Belüftung des Scheibenzwischenraumes kann auch über eine Druckausgleichsröhre erfolgen (Abbildung 3).

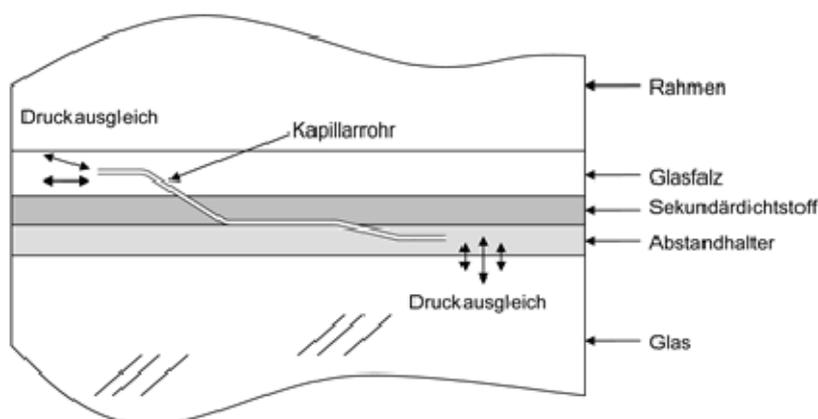


Abbildung 3 Druckausgleich über eine Druckausgleichsröhre (z.B. Kapillarrohr)

Der Luftaustausch mit der Atmosphäre wird durch den Strömungswiderstand der Röhre verzögert und idealerweise auch reduziert. Die Fa. Cardinal [6] verwendet Kapillarröhrchen aus Edelstahl (Innendurchmesser 0,25–0,50 mm, Länge 30 cm) zusammen mit Trockenmittel im Abstandhalter und empfiehlt den Einsatz nur für große Einbauhöhen mit relativ niedriger mittlerer Luftfeuchtigkeit. Die Fa. Advanced Glazings Ltd. hingegen kommt in ihrem ebenfalls über Kapillarröhrchen druckentspanntem Produkt Solera ohne Trockenmittel aus [7]. Es handelt sich bei Solera allerdings um ein transluzentes Isolierglas mit wasseradsorbierenden Einbauten im Scheibenzwischenraum. Dort befindet sich eine acrylbeschichtete Glasfasermatte, die zur Lichtstreuung dient, und die von einer Bienenwabenstruktur aus Acrylkunststoff gehalten wird. Die Autoren geben an, dass das Acryl durch Adsorption und Desorption von Wassermolekülen an seiner Oberfläche regulierend auf den Feuchtehaushalt im Scheibenzwischenraum wirkt, so dass auf Trockenmittel verzichtet werden kann. Dieses Konzept ließe sich nur dann auf transparente MIG übertragen, wenn eine ausreichende Menge an adsorbierendem Material in den SZR eingebracht werden könne, ohne die visuelle Erscheinung des MIG zu stören. Ein Sonnenschutzsystem aus Acryl wäre vielleicht denkbar. Technische Umsetzungen sind aber nicht bekannt. Im Hinblick auf das Forschungsvorhaben waren die dem Produkt Solera zugrunde liegenden Patente [8], [9] interessant, da sie zumindest Hinweise zur Funktion und Bemessung einer Kapillare für die dauerhafte Druckentspannung lieferten.

Küffner greift die Idee der Druckausgleichsröhre auf und schlägt in seiner Dissertation [10] und einem Patent [11] vor, den Abstandhalter selbst als Belüftungskanal zu verwenden. Der Abstandhalter darf nicht perforiert sein, es gibt nur eine Öffnung zur Atmosphäre und eine weitere, am anderen Ende, zum SZR. Die Luft muss also die gesamte Länge des Kanals durchströmen. Der Kanal ist mit Trockenmittel gefüllt, und neben den Kanaldimensionen bestimmen die Schüttdichte und Teilchengröße des Trockenmittels den Strömungswiderstand für die Luft. Die Gesamtmenge an Trockenmittel muss für die übliche Nutzungsdauer eines MIG ausreichen. Eine technische Umsetzung in ein Produkt ist nicht bekannt.

Nach Kenntnis der Forschungsstelle wurde Ende der 90er-Jahre durch die Fa. Glaswerke Arnold eine transparente Wärmedämmung auf den Prinzipien eines druckentspannten Isolierglases entwickelt und unter dem Namen Helioran vermarktet. Hierbei erfolgte die Druckentspannung über eine Edelstahlkapillare. Produktion und Vermarktung wurden zu Beginn der 2000er-Jahre eingestellt. Auf den einschlägigen Internetseiten sind keine Hinweise auf das Produkt mehr auffindbar.

Dauerhafte Druckentspannung über Diffusions- und Permeationsvorgänge

Das Konzept des „vitrage respirant“, auch Respirating Insulating Glas Unit, RIGU, genannt, wurde bereits Mitte der 1980er-Jahre in Frankreich entwickelt [12]. Es kommt ohne Trockenmittel aus, aber Einbauten im SZR, z.B. Sonnenschutzsysteme, müssen scheinbar hygroskopisch sein. Der Scheibenzwischenraum steht über eine Art Filter, z.B. ein feinmaschiges Polyamid- oder Edelstahlfasergewebe, mit der Atmosphäre in Verbindung. Dieser Filter erlaubt einerseits über Diffusions- und Strömungsvorgänge den Ausgleich

von Druckdifferenzen, insbesondere Wasserdampfpartialdruckdifferenzen, zwischen dem SZR und der Atmosphäre und verhindert andererseits das Eindringen von Staub und Insekten in den SZR.

Als Filter für das vitrage respirant könnten wahrscheinlich auch Belüftungselemente (protective vents) der Fa. Gore verwendet werden [13]. Diese protective vents sind in vielen elektronischen Geräten, Außenanlagen zur Telekommunikation und Fahrzeugbeleuchtungen eingebaut, um einen Druckausgleich zwischen dem Gehäuseinneren und der Atmosphäre bei plötzlichen Temperaturschwankungen zu ermöglichen. Dadurch werden Dichtungen entlastet, das Eindringen von Schmutz verhindert und Kondensation im Gehäuse vermieden. Im Prinzip werden also die gleichen Anforderungen erfüllt, wie sie auch an die Konstruktion eines druckentspannten Mehrscheiben-Isolierglases gestellt werden. Die wesentliche Komponente in einem Gore protective vent ist eine PTFE-Membran, durch die über Permeationsvorgänge der Druckausgleich erfolgt.

Die Self-Conditioning Fassade (SCF) der Fa. Seele [14] scheint in ähnlicher Weise zu funktionieren wie das vitrage respirant. Auch in der SCF wird kein Trockenmittel verwendet, und spezielle passive Lüftungselemente im Randverbund bewirken einen selbstständigen Ausgleich von Druck und Luftfeuchtigkeit zwischen dem Scheibenzwischenraum und der Atmosphäre. Der Einsatz der SCF wird vom Hersteller auf polare, subpolare und gemäßigte Klimazonen beschränkt.

Einmalige Druckanpassung

Ventile und Kapillare können nicht nur zur dauerhaften Druckentspannung eingesetzt werden, sondern auch zur einmaligen Druckanpassung an die Einbauhöhe. In einem Patent aus dem Jahr 2003 [15] präsentiert die Fa. Cardinal ein Ventil zur Druckanpassung, das in eine Bohrung in einer der Glasscheiben eines MIG eingesetzt wird. Die Fa. Vanguard hat ein Ventil unter dem Namen „HAART“ (High Altitude Argon Retention Technology) [16] entwickelt, das beim Transport eines MIG auf eine große Einbauhöhe kontinuierlich den Überdruck im SZR ablässt. Die Fa. Viridian öffnet den Scheibenzwischenraum am Einbauort über ein Kapillarröhrchen im TPS-Abstandhalter [17]. Nach dem Druckausgleich wird das Röhrchen entfernt und die Öffnung versiegelt. Ferner gibt es von der Fa. Meipa ein Zwei-Wege-Ventil [18] zur Druckanpassung. Dieses spricht allerdings erst bei sehr hohen Druckunterschieden an und könnte für den Flugtransport von Isoliergläsern gedacht sein.

Für die einmalige Druckanpassung an die Ortshöhe des MIG-Einbauortes sind auch spezielle Zubehörsysteme entwickelt worden, z.B. durch die Fa. Helantec [19] und die Fa. Rottler und Rüdiger [20]. Bei diesen Systemen wird nach der konventionellen Herstellung eines MIG der Randverbund durchbohrt und ein Ventilstopfen eingesetzt, der den SZR provisorisch verschließt. Später wird entweder am Herstellungsort oder am Einbauort eine Sonde durch den Ventilstopfen in den SZR eingeführt, um mithilfe einer elektronisch gesteuerten Pumpe den optimalen Gasdruck durch Aufpumpen oder Absaugen einzustellen. Nach der Druckanpassung wird der SZR dauerhaft versiegelt.



Zusammenfassung

Es gibt bisher keine Lösungsansätze zur dauerhaften Druckentspannung bzw. einmaligen Druckanpassung eines MIG, die eine breite Anwendung im Bauwesen gefunden haben.

Einzelne Lösungsansätze sind in Produkte umgesetzt worden. Zumeist sind diese Lösungen jedoch technisch aufwendig, erfordern regelmäßige Wartung und/oder dienen speziellen Anwendungen. Beispiele sind die Closed-Cavity Fassade [4], die austauschbare Trockenmittelpatrone von Visionwall [3], das transluzente MIG Solera [7] sowie das Zubehörsystem von Helantec [19].

Es gibt keine öffentlich zugänglichen Spezifikationen oder Berechnungsverfahren zur Auswahl und Dimensionierung von zum Beispiel Druckausgleichsröhren oder „self-conditioning“ Systemen wie dem „vitrage respirant“. Ebenso existieren keine zugänglichen und belastbaren Daten, die die Dauerhaftigkeit solcher Systeme belegen.

1.3 Projektgruppe

Das Forschungsvorhaben wurde mit Unterstützung der folgenden Industrieunternehmen durchgeführt:

SANCO Isolierglasgruppe, vertreten durch:

- Sanco Beratung Glas Trösch GmbH, Nördlingen
- Glas Müller Vetri, Bozen

Finstral AG

Der projektbegleitende Ausschuss wurde durch folgende Personen gebildet:

- Prof. Dr. Franz Feldmeier, Hochschule Rosenheim
- Dr. Roland Rossi, Glas Facade Engineering (GFE)
- Prof. Dr. Armin Schwab, Ingenieur- u. Sachverständigenbüro Schwab

Im Laufe des Projektes fanden folgende Besprechungen statt:

- Arbeitstreffen, 24. September 2012 in Rosenheim: Sanco Beratung, Glas Müller, ift
- Arbeitstreffen, 18. Dezember 2012 in Rosenheim: Finstral, ift
- Arbeitstreffen, 13. Februar 2013 in Nördlingen: Sanco Beratung, Glas Müller, ift
- 1. Projekttreffen (Auftaktsitzung), 30. April 2013 in Rosenheim
- 1. Webmeeting, 24. September 2013
- 2. Webmeeting, 11. Dezember 2013
- 3. Webmeeting, 10. Juli 2014
- Statt Webmeeting: Kurzbericht, 16. Dezember 2014
- 2. Projekttreffen (Abschlusssitzung), 27. Mai 2015 in Rosenheim

1.4 Messepräsentation

Das Forschungsvorhaben wurde mit einem Exponat auf der fensterbau frontale 2014 vorgestellt:



Abbildung 4 Über eine Kapillare dauerhaft druckentspanntes Isolierglas mit integriertem Sonnenschutz (Exponat auf der fensterbau frontale 2014, zur Verfügung gestellt von Fa. Rosenheimer Glastec GmbH)



2 Entwicklung eines Untersuchungsprogramms

2.1 Anforderungen an Methoden zur Druckentspannung/-anpassung

Die bereits genannten generellen Ziele des Forschungsvorhabens wurden in der Projektgruppe, insbesondere zusammen mit den Industriepartnern, konkretisiert. Es ergaben sich folgende Anforderungen an Prozesse und Produkte zur dauerhaften Druckentspannung bzw. einmaligen Druckanpassung von MIG:

- Eine technische Umsetzung sollte auf eine möglichst breite Anwendung im Bauwesen ausgerichtet sein.
- Die jetzigen Fertigungsabläufe sollten nicht wesentlich gestört werden. Insbesondere sollten die automatisierten Abläufe möglichst nicht durch zusätzliche manuelle Eingriffe unterbrochen werden müssen.
- Das optische Erscheinungsbild des MIG darf nicht gestört werden.
- Es sollen möglichst wenige zusätzliche Komponenten notwendig werden. Idealerweise sollten diese Komponenten in den Randverbund oder Glasfalz integrierbar sein. Dauerhaft notwendige Komponenten/Apparaturen außerhalb des Fensterrahmens sind nicht wünschenswert.
- Für die einmalige Druckanpassung: Idealerweise ist der Mechanismus zur Druckanpassung zugänglich, ohne das MIG aus dem Rahmen ausbauen zu müssen.
- Die technische Umsetzung muss praktisch wartungsfrei über die normale Gebrauchsdauer eines MIG funktionieren.
- Der Koppel- oder Kathedereffekt soll für kurzfristige Belastungen wie Windstöße erhalten bleiben: In einem konventionellen MIG sind die einzelnen Scheiben über die Luft im SZR miteinander gekoppelt. Dadurch wird eine äußere Belastung senkrecht zur Scheibenebene, z.B. eine Windlast, auf alle Scheiben gemäß ihrer Dicken verteilt. Man kommt dadurch in einem MIG mit geringeren Scheibendicken aus als für eine Einzelscheibe unter derselben Last notwendig wäre. Die Erhaltung der Scheibenkoppelung bei kurzfristigen Belastungen wie Windstößen hat zwei Vorteile: 1.) Kurzfristige Lastspitzen (Windstöße) werden von allen Scheiben getragen. 2.) Es findet kein „Atmen“ des MIG im Takt häufiger Windstöße statt, mit dem damit verbundenen Austausch von Luft und Eintrag von Feuchtigkeit in den SZR.
- Die technische Umsetzung soll vom Prinzip her möglichst generell anwendbar, also nicht auf bestimmte Formate, Aufbauten oder klimatische Bedingungen beschränkt sein.
- Die technische Umsetzung muss bemessbar sein. Das bedeutet z.B. die Dimensionen einer Druckausgleichsröhre oder die charakteristischen Eigenschaften einer Membran (für ein protective vent) müssen sich nach einem Modell aus den individuellen Anwendungsbedingungen (wie Scheibenaufbau, Scheibenformat, klimatische Belastungen etc.) ableiten bzw. berechnen lassen.

- Die Dauerhaftigkeit eines druckentspannten bzw. druckangepassten MIG muss gewährleistet sein. Die relevanten Anforderungen der Produktnorm EN 1279 [1] müssen erfüllt werden. Auch wenn permanent druckentspanntes MIG definitionsgemäß nicht unter die Produktnorm fällt, müssen die Anforderungen bezüglich der Feuchtigkeitsaufnahme erfüllt werden, um eine für MIG übliche Nutzungsdauer sicherzustellen. Einmalig druckangepasstes MIG fällt unter die Produktnorm und muss daher auch die einschlägigen Anforderungen bezüglich der Gasverlustrate erfüllen.
- Es wäre vorteilhaft, wenn derselbe Lösungsansatz sowohl für die dauerhafte Druckentspannung als auch für die einmalige Druckanpassung genutzt werden könnte.

2.2 Bewertung von Konzepten zur Druckentspannung/-anpassung

2.2.1 Dauerhafte Druckentspannung

Die grundlegenden Konzepte zur dauerhaften Druckentspannung von MIG sind bereits in den Ausführungen zur Ausgangslage des Forschungsvorhabens (Kap. 1.2) enthalten. Diese Konzepte bedurften einer Bewertung hinsichtlich ihres Potenzials einer breiten Umsetzung im Bauwesen mit dem Ziel, ein erfolgversprechendes Untersuchungsprogramm zu entwickeln. Zur Bewertung dienten die in Kap. 2.1 festgelegten Anforderungen an ein dauerhaft druckentspanntes Isolierglassystem. Technisch aufwendige Lösungsansätze mit externen Komponenten (Ausdehnungsgefäß, Trockenmittelkartusche, CCF) konnten somit gleich zu Anfang von den Untersuchungen ausgeschlossen werden.

Konzept des partiellen Druckausgleichs

Ein Druckausgleich zwischen dem SZR und der Atmosphäre erfordert einen Luftstrom, je nach Temperatur- und Luftdruckbedingungen, von innen nach außen oder umgekehrt. Die in den SZR einströmende Luft enthält normalerweise auch einen gewissen Anteil Feuchtigkeit. Diese wird vom Trockenmittel aufgenommen; die Luft im SZR wird also getrocknet. Ausströmende Luft enthält praktisch keine Feuchtigkeit.

Durch z.B. tages- und jahreszeitliche Temperatur- und Luftdruckänderungen wird wiederholt Luft zwischen dem SZR und der Atmosphäre ausgetauscht. Jedes Mal wird Feuchtigkeit in den SZR eingebracht. Nach vielen Luftwechseln ist schließlich die Kapazität des Trockenmittels überschritten. Es tritt Kondensatbildung auf, und das MIG hat das Ende seiner Nutzungsdauer erreicht. Besteht ein vollständiger Druckausgleich zur Atmosphäre, und ist das MIG mit der für konventionelle MIG üblichen Trockenmittelmenge befüllt, so wird die Feuchteaufnahmekapazität des Trockenmittels, je nach klimatischen Bedingungen, bereits nach wenigen Jahren oder gar Monaten erreicht. Eine akzeptable Dauerhaftigkeit des druckentspannten MIG ist nicht gegeben.

Um die Nutzungsdauer des MIG zu verlängern, könnte man die Trockenmittelmenge erhöhen, z.B. alle vier Seiten des Abstandhalters befüllen anstatt nur zwei Seiten. Der Effekt einer solchen Maßnahme wäre durch das Gesamtvolumens des Abstandhalters be-



schränkt. Als Alternative oder zusätzlich könnte man den Luftstrom zwischen der Atmosphäre und dem SZR begrenzen. Dann würde weniger neue, mit Feuchtigkeit beladene Luft in den SZR eindringen. Aber es würde auch kein vollständiger Druckausgleich stattfinden. Es stellt sich also die Frage, wie viel Druckausgleich ist denn überhaupt notwendig?

Darauf kann es verschiedene Antworten geben: Steht die mechanische Belastung der Scheiben im Vordergrund, so darf die nach einem partiellen Druckausgleich verbleibende maximale Scheibenspannung den Grenzwert der Bemessungsvorschrift [21] nicht überschreiten. Gilt es dagegen das Einklemmen von Einbauten, z.B. zum Sonnenschutz, oder starke optische Verzerrungen von Reflektionen zu vermeiden, so muss auch die Scheibendurchbiegung begrenzt werden, wobei auch hier die mechanischen Spannungen unterhalb der Grenzwerte bleiben müssen.

Eine Begrenzung des Druckausgleichs muss also im Hinblick auf die spezielle Nutzungssituation des MIG erfolgen. Außerdem werden Aufbau und Format, insbesondere die Scheibensteifigkeit, zu berücksichtigen sein, sobald nur ein partieller Druckausgleich angestrebt wird; also eine gewisse Ein- bzw. Ausbauchung der Scheiben zugelassen werden soll.

Partieller Druckausgleich über Ventile

Der prinzipiell einfachste Weg, den Druckausgleich zu begrenzen, führt über zwei Ventile, ein Überdruck- oder Auslassventil und ein Unterdruck- oder Einlassventil. Die Öffnungsdrücke der Ventile könnten in Abhängigkeit von Format und Aufbau sowie der erwarteten Belastungssituation des MIG voreingestellt werden. (Dabei beziehen sich Ausdrücke wie „Öffnungsdruck“ und „Innendruck“ immer auf die Differenz zwischen dem Druck im SZR und dem Druck außerhalb des SZR!) Erwärmt sich das MIG, so steigt der Innendruck zunächst an; die Scheiben bauchen sich aus. Sobald der Scheibeninnendruck den Öffnungsdruck des Auslassventils erreicht, öffnet es sich und Luft strömt nach außen. Sinkt der Innendruck wieder unter den Grenzwert, z.B. weil sich das MIG abkühlt, so schließt sich das Auslassventil. Weitere Abkühlung führt zu einem weiteren Abfall des Innendrucks und einem Einbauchen der Scheiben, bis der Öffnungsdruck des Einlassventils erreicht ist. Dieses öffnet sich und Luft strömt in den SZR.

Die Öffnungsdrücke der Ventile ließen sich so einstellen, dass bestimmte Scheibenspannungen bzw. -durchbiegungen nicht überschritten würden. Der Luftaustausch zwischen SZR und Atmosphäre bliebe auf Situationen beschränkt, in denen entweder das eine oder das andere Ventil geöffnet ist. Bei Drücken im SZR zwischen dem Öffnungsdruck des Einlassventils und dem Öffnungsdruck des Auslassventils würde keine Luft mit der Atmosphäre ausgetauscht.

Das Geschilderte entspricht dem bereits erwähnten Vorschlag von Karagiozis [5]. Er zeigt in seiner Simulationsstudie, dass Ventile zur Druckentspannung prinzipiell funktionieren können, ohne allerdings sein Rechenmodell im Detail darzustellen oder aus dem Rechenmodell resultierende Bemessungsregeln für die Ventile zu präsentieren. Außerdem

verzichtet Karagiozis in seinem Modell auf Trockenmittel. Er nimmt stattdessen an, dass einige Tage mit Kondensatbildung pro Jahr akzeptabel wären. Es stellt sich also noch die Frage, ob durch eine Kombination von Ventilen und Trockenmittel eine kondensatfreie Nutzungsdauer üblicher Länge erzielbar wäre.

Ein weiteres und vielleicht schwerwiegenderes Problem in diesem Lösungsansatz ist die Verfügbarkeit von geeigneten Ventilen. Bei großformatigen Isoliergläsern haben die Scheiben nur eine geringe Steifigkeit, und der sich aufbauende Über- bzw. Unterdruck im SZR beträgt nur wenige mbar. Gleichzeitig muss aber ein vergleichsweise großes Volumen ein- oder ausströmen. Es gibt nicht viele Ventiltypen, die diese Anforderungen erfüllen können. Spezialprodukte, die teuer sind und eventuell sogar eine externe Ansteuerung erfordern [22], sind nicht wünschenswert für eine breite Anwendung im Bauwesen. Und relativ preiswerte elastomere Überdruckventile (Typ Umbrella oder Duckbill) weisen große Streuungen (bis 20 %) ihres Ansprechdruckes auf oder tendieren zum Verkleben im Laufe der Zeit [23].

Aus den eben genannten Gründen erschien es wenig aussichtsreich, Ventile als Lösungsansatz für die Umsetzung von druckentspanntem MIG experimentell zu verfolgen. Allerdings hat sich im Verlauf der Projektarbeit schon früh gezeigt, dass sich die Wirkung von Ventilen relativ leicht in einem Rechenmodell zur Druckentspannung und Feuchteaufnahme umsetzen lässt. Deshalb wurden entsprechende Berechnungen weitergeführt. Die Ergebnisse werden in einem späteren Kapitel präsentiert.

Partieller Druckausgleich über Druckausgleichsröhren/Kapillare

Eine weitere Möglichkeit, den Druckausgleich zwischen dem SZR und der Atmosphäre zu begrenzen, besteht darin, die Luft durch eine Druckausgleichsröhre strömen zu lassen. Der Strömungswiderstand der Röhre verzögert den Luftaustausch. Wenn der Strömungswiderstand der Röhre abgestimmt ist auf Format und Aufbau sowie die Belastungssituation des MIG, dann wird auch die ausgetauschte Luftmenge verringert, und damit die in den SZR eingebrachte Menge an Feuchtigkeit. Ist der Strömungswiderstand zu klein, so erfolgt zwar eine sehr gute Druckentspannung, aber es wird auch sehr viel Luft mit der Atmosphäre ausgetauscht und entsprechend viel Feuchtigkeit in den SZR eingebracht. Ist der Strömungswiderstand zu groß, so ist die Situation umgekehrt: niedrige Druckentspannung, aber auch niedriger Feuchtigkeitseintrag. Es gilt also, einen optimalen Strömungswiderstand einzustellen.

Der Strömungswiderstand einer Röhre wird bestimmt von Durchmesser und Länge der Röhre, der Rauigkeit der Innenfläche sowie den Widerständen beim Ein- und Austritt der Luft. Handelt es sich um eine Röhre mit großer Länge im Verhältnis zum Durchmesser und ist die Innenfläche glatt, so entsteht eine laminare Strömung in der Röhre, und Effekte der Eintritts- und Austrittsstelle können vernachlässigt werden. Laminare Strömungen durch Röhren/Kapillare werden durch das Gesetz von Hagen-Poiseuille beschrieben [24] (s.a. Kap.3.1). Die dem Produkt Solera zugrunde liegenden Patente [8], [9] verweisen auf dieses Gesetz, ohne allerdings eine konkrete Rechenvorschrift für die Festlegung der



optimalen Kapillardimensionen (Durchmesser, Länge) in Bezug auf den Aufbau und das Format sowie die Belastungssituation eines MIG bereitzustellen.

Das Gesetz von Hagen-Poiseuille bietet die Möglichkeit, die Wirkung einer Kapillare zur dauerhaften Druckentspannung in einem Rechenmodell zu simulieren, ähnlich dem Rechenmodell von Karagiozis [5]. Eingangsgrößen sind dabei, neben Aufbau und Format des MIG, periodische Temperatur- und Luftdruckwerte (stündlich oder minütlich), die die klimatische Belastung des MIG z.B. über ein Jahr beschreiben. Von Periode zu Periode kann mit Hilfe von Hagen-Poiseuille berechnet werden, wie viel Luft durch die Kapillare in den SZR hinein oder aus dem SZR heraus strömt, und wie sich dadurch der Druck im SZR verändert. Aus der einströmenden Luftmenge und der relativen Feuchtigkeit dieser Luft ergibt sich die pro Periode in den SZR eingebrachte Feuchtigkeitsmenge. Variiert man in einem solchen Rechenmodell die Kapillarparameter (Durchmesser, Länge), so sieht man die Effekte auf den Druck im SZR und die eingebrachte Feuchtigkeitsmenge. Die Kapillare ist also durch ein solches Rechenmodell bemessbar.

Kapillare sind in vielen Durchmessern und verschiedenen Werkstoffen (Metall, Kunststoff) preiswert verfügbar, und zumindest einige Varianten lassen sich relativ einfach in den Randverbund eines MIG einbauen. Die aus dem Randverbund herausragende Länge kann im Glasfalz untergebracht werden (Abbildung 3). Diese Faktoren zusammen mit der im vorigen Absatz beschriebenen Bemessbarkeit ließen Kapillare als aussichtsreich für eine technische Umsetzung der dauerhaften Druckentspannung erscheinen.

Eine Variante der gerade erläuterten Kapillarrohrlösung zur dauerhaften Druckentspannung ist Küffners [10], [11] Vorschlag, einen nicht perforierten und mit Trockenmittel gefüllten Abstandhalter als Druckausgleichsröhre zu verwenden. Es handelt sich ebenfalls um eine Röhre, die der Luft einen Strömungswiderstand bietet. Allerdings ist die Bemessung eines solchen Belüftungskanals wesentlich schwieriger als die Bemessung einer Kapillare über die Hagen-Poiseuille-Gleichung. Eventuell muss der Strömungswiderstand sogar experimentell ermittelt werden. Küffners Lösungsansatz hat aber auch einen Vorteil gegenüber der einfachen Kapillare: Einströmende Luft muss die gesamte Trockenmittelsäule durchlaufen, bevor sie in den SZR gelangt. Die Luft ist also bereits getrocknet, wenn sie in den SZR eindringt. Lokale Kondensatbildung ist praktisch nicht möglich. Bei der Kapillarrohrlösung gemäß Abbildung 3 dagegen kann zumindest ein Teil der neuen, feuchtigkeitsbeladene Luft zunächst in den SZR gelangen, bevor diese Luft wieder durch die Perforierung des Abstandhalters mit dem Trockenmittel in Kontakt kommt und ihr die Feuchtigkeit entzogen wird. Lokale Kondensatbildung in der Nähe des Kapillarendes im Abstandhalter erscheint möglich, auch wenn zur Zeit keine quantitativen Aussagen zum Ausmaß oder zur Wahrscheinlichkeit gemacht werden können.

Die im Vergleich zur Kapillare schwierige Bemessbarkeit war der Hauptgrund, warum Küffners Lösungsansatz im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht weiter verfolgt wurde.

Die mangelnde Bemessbarkeit ist auch das Kernproblem einer Druckentspannung über ein einfaches Loch im Randverbund oder in einer der Scheiben. Man könnte erwägen, eine Kapillare mit einem bestimmten Strömungswiderstand auf ein kleines Loch mit demselben Strömungswiderstand zu reduzieren. Aber die Voraussetzungen für eine laminare Strömung und die Anwendbarkeit der Hagen-Poiseuille-Gleichung wären wahrscheinlich nicht mehr gegeben.

Druckausgleich über Diffusions-/Permeationsvorgänge

Die Mechanismen des „vitrage respirant“ [12], der Self-Conditioning Fassade [14] und der Gore-Belüftungselemente [13] sind in der Literatur sehr vage dargestellt. Zur Auswahl bzw. Bemessung dieser Systeme für spezielle Anwendungen gibt es praktisch keine Hinweise. Obwohl das „vitrage respirant“ in Frankreich weit verbreitet zu sein scheint [12], findet man nur eine Veröffentlichung auf Englisch.

Insbesondere im Vergleich zum Lösungsansatz über Kapillare erschien die technische Umsetzung einer dauerhaften Druckentspannung über Diffusions- und Permeationsvorgänge im Rahmen dieses Forschungsvorhabens weniger aussichtsreich. Dieses Thema wurde daher nicht weiter verfolgt.

2.2.2 Einmalige Druckanpassung

Von den in Kap. 2.1 definierten Anforderungen an einen Mechanismus zur einmaligen Druckanpassung sind zwei Anforderungen besonders hervorzuheben: 1.) Nach der Druckanpassung muss das MIG gasdicht verschließbar sein. Es müssen alle Anforderungen der EN 1279 bezüglich der Dauerhaftigkeit erfüllt werden. 2.) Immer mehr MIG werden bereits im Herstellwerk in Fensterrahmen eingeklebt. Es ist also wünschenswert, dass der Mechanismus zur Druckanpassung zugänglich ist, ohne dass das MIG wieder aus dem Rahmen entfernt werden muss. Das Lösen einer Glashalteleiste wäre akzeptabel.

Kapillare erschienen im Prinzip geeignet, diese beiden und die übrigen Anforderungen zu erfüllen. Eine relativ lange Kapillare könnte in den Randverbund eingebaut werden, mit einem offenen Ende im Abstandhalter liegend. Das andere Ende würde im Herstellwerk gasdicht verschlossen und beim Einbau/Einkleben des MIG in einen Fensterrahmen in den Glasfalz gelegt werden. Am Einbauort des Fensters, z.B. auf einem Berg, würde die entsprechende Glashalteleiste gelöst, die Kapillare für eine geeignete Zeit geöffnet und dann wieder gasdicht verschlossen werden. Anschließend würde die Kapillare wieder in den Glasfalz gedrückt und dieser mit der Glashalteleiste verschlossen werden. Die Zeitspanne, notwendig zur Druckanpassung, ließe sich über das Gesetz von Hagen-Poiseuille berechnen. Fragen zur Handhabung einer Kapillare, sowohl beim Einbau in ein MIG als auch bei der eigentlichen Druckanpassung am Einbauort des Fensters sowie Fragen zur Dauerhaftigkeit müssten experimentell angegangen werden.

Belüftungselemente wie die der Fa. Gore [13] ließen sich zwar vielleicht relativ einfach in eine Bohrung im Randverbund einsetzen, eventuell auch durch einen automatischen Pro-



zess, aber die gasdichte Versiegelung am Einbauort des Fensters wäre schwierig, wahrscheinlich ohne den Ausbau des MIG aus dem Rahmen unmöglich.

Ventile wie in Kap. 1.2 (Ausgangslage) beschrieben erscheinen sehr aufwendig für eine einmalige Verwendung. Außerdem stellt sich die Frage der langfristigen Gasdichtheit.

2.3 Untersuchungsprogramm

Nach der Bewertung der verschiedenen Konzepte zur dauerhaften Druckentspannung bzw. einmaligen Druckanpassung wurde das folgende Untersuchungsprogramm aufgestellt. Die Untersuchungen werden hier nur in groben Zügen dargestellt. Details und Ergebnisse sind in den einschlägigen, nachfolgenden Kapiteln zu finden.

Dauerhafte Druckentspannung über Kapillare

- Erstellung eines Rechenmodells zur Simulation der dauerhaften Druckentspannung eines MIG über eine Kapillare: Zweck des Rechenmodells war es, die Zusammenhänge zu ermitteln zwischen dem Aufbau und dem Format des MIG, der klimatischen Belastung des MIG, den Dimensionen der Kapillare (Innendurchmesser, Länge) und der zu erwartenden Druckentspannung und Feuchteaufnahme über eine längere Periode. Das Modell sollte somit auch der Bemessung der Kapillare dienen, d.h. der Auswahl geeigneter Kapillardimensionen, um unter gegebenen Umständen von Aufbau, Format und klimatischer Belastung eines MIG eine angemessene Druckentspannung bei akzeptabler Gesamtnutzungsdauer (Dauerhaftigkeit) zu erzielen.
- Experimentelle Prüfung der Druckentspannung und Feuchteaufnahme an MIG-Probekörpern in einer Klimakammer, dabei auch Überprüfung der Gültigkeit des Rechenmodells
- Experimentelle Prüfung der Druckentspannung und Feuchteaufnahme an MIG-Probekörpern, die in einer weitgehend realen Einbausituation einer Freibewitterung über einen längeren Zeitraum ausgesetzt sind, dabei auch Überprüfung des Rechenmodells

Einmalige Druckanpassung über Kapillare

- Erstellung eines Rechenmodells zur Simulation der einmaligen Druckanpassung eines MIG über eine Kapillare: Zweck des Rechenmodells war es, festzustellen, unter welchen Umständen (Aufbau, Format, Ortshöhendifferenz) eine Druckanpassung notwendig ist und wie sie mit einer Kapillare erzielt werden kann. Es sollte also ermittelt werden, welche Kapillardimensionen (Innendurchmesser, Länge) notwendig sind, um bei gegebenem Aufbau und Format eines MIG und gegebener Ortshöhendifferenz eine angemessene Druckanpassung in akzeptabler Zeit zu erzielen. Das Rechenmodell dient also der Bemessung der Kapillare.

- Experimentelle Prüfung der Verarbeitbarkeit von Kapillaren verschiedenen Typs (Material, Dimensionen): Einbau der Kapillare in den Randverbund, Handhabung der Kapillare bei der Druckanpassung am Einsatzort des MIG
- Experimentelle Prüfung der eigentlichen Druckanpassung, d.h. Messung der zur Druckanpassung notwendigen Zeit und Vergleich mit dem Rechenmodell
- Experimentelle Prüfung der Dauerhaftigkeit von druckangepassten MIG mit Kapillaren verschiedenen Typs

3 Rechenmodell zur Abschätzung der Druckreduzierung und Feuchteaufnahme in dauerhaft druckentspanntem MIG

3.1 Einleitung

Wie bereits im vorigen Kapitel ausführlich erläutert, ist der Zweck des Rechenmodells, das Verhalten eines dauerhaft druckentspannten MIG hinsichtlich des Grades der Druckentspannung und hinsichtlich der Feuchteaufnahme zu simulieren.

Das MIG, genauer gesagt ein Zweischeiben-Isolierglas, ist in dem Modell spezifiziert über sein Format und seinen Aufbau, d.h. Länge, Breite, Scheibendicken und Scheibenabstand. Zwei Arten von Bauelementen zur Druckentspannung werden rechnerisch abgebildet, Kapillare und Ventile.

Eine Kapillare wird in dem Modell charakterisiert durch den Innendurchmesser und die Länge. Ventile sind durch ihren Einlass- bzw. Auslassdifferenzdruck ausreichend bestimmt. Des Weiteren gibt es noch einige Parameter wie: den Elastizitätsmodul von Glas sowie die Dichte und Viskosität von Luft. Die Trockenmittelmenge im MIG kann über die Fülldichte für den angenommenen Abstandhalter und die Anzahl der gefüllten Kanten vorgegeben werden.

Die im Modell umgesetzten Gleichungen zur klimatischen Belastung durch Temperatur- und Luftdruckänderungen und zur daraus resultierenden Verformung des MIG stammen von Feldmeier [25]. Dort aufgeführte tabellierte Beiwerte (Volumen, Durchbiegung, Spannung) sind als Näherungspolynome in dem Modell hinterlegt. Die TRLV [26] und die DIN 18008 [21] beschreiben gleichfalls, wenn auch verkürzt, einige der grundlegenden Zusammenhänge.

Diffusionsvorgänge durch den Randverbund oder in einer Kapillare werden in dem Modell nicht nachgebildet.

Die Simulation ist umgesetzt als Tabellenkalkulation (Abbildung 5).

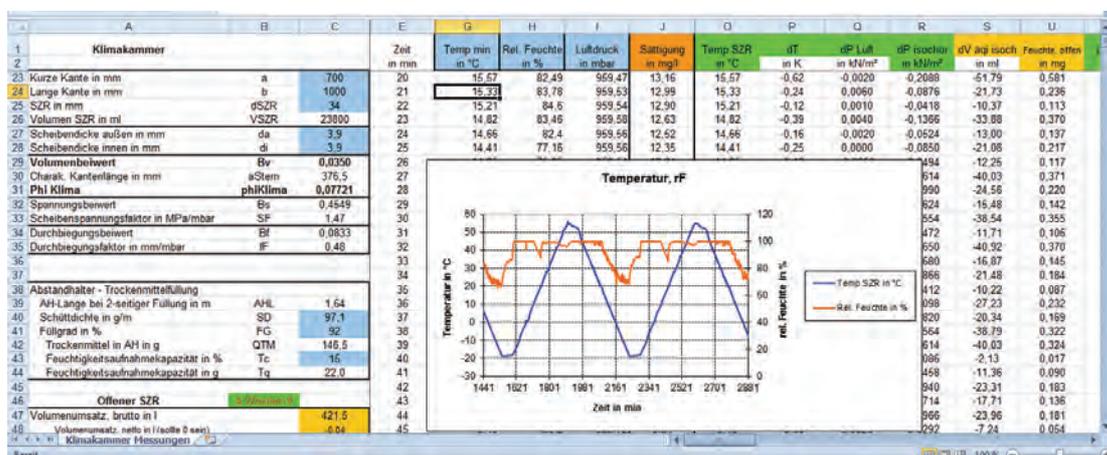


Abbildung 5 Ausschnitt aus Rechenmodell

3.2 Klimadaten

Das Modell benötigt klimatische Daten: Temperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchtigkeit. Reale Messdaten können in das Modell (die Tabelle) hineinkopiert werden. Die Daten müssen periodisch sein; das Zeitintervall ist innerhalb gewisser Grenzen frei wählbar, z.B. 1 min, 10 min oder 1 h. Zwei verschiedene Temperaturen werden berücksichtigt, die Temperatur im SZR und die Temperatur in der Umgebung des MIG. Die Temperatur im SZR, oder genauer, deren Änderung von Zeitintervall zu Zeitintervall, dient dazu, das Luftvolumen zu berechnen, das zwischen dem SZR und der Umgebung pro Zeitintervall ausgetauscht wird. Aus diesem Luftvolumen, der Umgebungstemperatur sowie der relativen Luftfeuchtigkeit (der Umgebung), wird die Feuchtemenge berechnet, die mit einströmender Luft pro Zeitintervall in den SZR eingebracht wird. Die dazu benötigte temperaturabhängige Sättigungsfeuchte der Luft ist im Modell als Näherungspolynom hinterlegt.

Es wird angenommen, dass alle von einströmender Luft eingebrachten Feuchtemengen sofort und vollständig vom Trockenmittel absorbiert werden. Der gesamte Feuchteeintrag während eines Simulationszeitraumes von z.B. 4 Wochen oder 1 Jahr ergibt sich also als die Summe der in den einzelnen Zeitintervallen eingebrachten Feuchtemengen.

In der ersten Version des Rechenmodells kann ein Klimadatensatz rechnerisch durch die Überlagerung mehrerer periodischer mathematischer Funktionen erzeugt werden. Der Datensatz stellt ein Jahr in 1-Stunden-Intervallen dar. Zu seiner Berechnung wird den mittleren Monatstemperaturen einer Region eine Sinusfunktion mit einer Periode von 12 Monaten angepasst, um jahreszeitliche Temperaturänderungen darzustellen. Dem überlagert wird eine weitere Sinusfunktion mit einer Periode von 24 Stunden, um tageszeitliche Temperaturänderungen zu berücksichtigen. Eine Sinus-Halbfunktion bildete schließlich Temperaturerhöhungen im SZR durch solare Einstrahlung während des Tages nach. Mit dem Luftdruck und der Luftfeuchtigkeit lässt sich in ähnlicher Weise verfahren.

Ein solch künstlicher Datensatz ist nicht besonders realitätsnah, denn bei seiner Erzeugung werden viele Annahmen und Vereinfachungen gemacht. Jedoch erleichterte das regelmäßige, zyklische Erscheinungsbild die weitere Entwicklung des Rechenmodells, da die Kurvenform von Zwischen- oder Ergebnisgrößen gedanklich leichter vorhersehbar bzw. nachvollziehbar war.

3.3 Modell

Hier zu Anfang gleich der Hinweis: Wenn vom „Druck“ oder „internen Druck“ im SZR die Rede ist, dann handelt es sich immer um den Differenzdruck zur äußeren Atmosphäre.

Des Weiteren: Zustandsänderungen eines MIG – das sind Temperaturänderungen im SZR und/oder Änderungen des äußeren Luftdrucks – werden bei der Bemessung von MIG immer zu einer isochoren Druckänderung zusammengefasst [25][26][21]. Das geschieht auch hier.

Die Simulationsrechnung beginnt bei den periodischen Klimadaten: Temperatur im SZR und in der Umgebung, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit. Aus den Temperaturänderungen im SZR und den Änderungen des äußeren Luftdrucks von einem zum nächsten Zeitintervall werden zunächst isochore Druckänderungen dp_{isochor} berechnet. Und aus diesen wiederum können durch Multiplikation mit dem Isolierglasfaktor Phi die Änderungen des Drucks im (dichten) SZR dp_{Phi} berechnet werden. (Hier noch mal zur Erinnerung: dp_{Phi} ist eigentlich die Änderung eines Differenzdrucks zwischen SZR und Atmosphäre!)

Der Isolierglasfaktor beschreibt die Steifigkeit der Isolierglasscheiben, also die Umsetzung isochorer Druckänderungen in Scheibendurchbiegungen und Änderungen des internen Drucks. Er errechnet sich aus Format und Aufbau des MIG. [25][26][21]

Soweit entsprechen die durchgeführten Berechnungen denen, die zur Bemessung von Isolierglas ausgeführt werden, auch wenn dort größere Temperatur- und Luftdruckdifferenzen angenommen werden als sie hier in der Simulation von Zeitintervall zu Zeitintervall auftreten.

3.3.1 Dichtes MIG

Der Druck beim Start der Simulation kann auf einen beliebigen Wert, z.B. auch auf Null, gesetzt werden. Addiert man nun alle dp_{Phi} bis zu einem bestimmten Zeitpunkt dazu, so ergibt sich der interne Druck p_{dicht} zu diesem Zeitpunkt.

Der interne Druck eines dichten MIG lässt sich jetzt als Funktion der Zeit darstellen. Diese Kurve dient als Referenz zur Beurteilung des Grades einer Druckentspannung. Das dichte MIG nimmt gemäß diesem Modell keine Feuchtigkeit auf.

3.3.2 Offenes MIG

Die Gasgesetze erlauben die Umrechnung einer isochoren Druckänderung in eine äquivalente isobare Volumenänderung dV_{isobar} . Es gilt näherungsweise:

$$\frac{dV_{\text{isobar}}}{V_{\text{SZR}}} = \frac{dp_{\text{isochor}}}{p_{\text{Luft}}} \quad (\text{Gl. 1})$$

dV_{isobar} : isobare Volumenänderung, V_{SZR} : Volumen des SZR, dp_{isochor} : isochore Druckänderung, p_{Luft} : Luftdruck

dV_{isobar} ist das Luftvolumen, um das sich die Luft im SZR ausdehnt bzw. zusammenzieht, wenn ein offenes MIG der Zustandsänderung dp_{isochor} ausgesetzt wird. Für den Fall, dass die Luft in den SZR einströmt, ergibt sich die eingetragene Feuchtemenge dF aus dem Volumen dV_{isobar} sowie der Temperatur und relativen Feuchte der Umgebungsluft. Für ausströmende Luft ist $dF = 0$. Summiert man alle dF auf, so erhält man den Gesamtfeuch-

teeintrag F während einer Simulationsperiode. Dieser dient als Referenzwert, um die Reduzierung des Feuchteeintrags durch Kapillare oder Ventile zu beurteilen.

3.3.3 Über Kapillare druckentspanntes MIG

Der Volumenstrom durch eine Kapillare kann durch das Gesetz von Hagen-Poiseuille [24] beschrieben werden:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \Delta p}{128 \cdot \eta \cdot l} \quad (\text{Gl. 2})$$

dV/dt : Volumenstrom durch die Kapillare, d : Innendurchmesser der Kapillare, l : Länge der Kapillare, η : dynamische Viskosität der Luft, Δp : Druckdifferenz zwischen Anfang und Ende der Kapillare

Es resultiert eine exponentielle Abnahme der Druckdifferenz Δp zwischen dem SZR und der Umgebung:

$$\Delta p(t) = \Delta p_0 \cdot e^{(-t/\tau)} \quad (\text{Gl. 3})$$

$\Delta p(t)$: Druckdifferenz zum Zeitpunkt t , Δp_0 : Ausgangsdruckdifferenz, t : Zeit, τ : Zeitkonstante

Die Zeitkonstante τ beschreibt den exponentiellen Vorgang quantitativ. Zur Veranschaulichung, nach der Zeit $0,5 \tau$ ist eine Druckdifferenz auf etwa 60 % des Ausgangswertes abgefallen, nach der Zeit τ auf 37 %, und nach 3τ beträgt die Druckdifferenz nur noch etwa 5 % des Ausgangswertes.

Berechnen lässt sich die Zeitkonstante aus dem Scheibenformat und der Scheibendicke sowie den Dimensionen der Kapillare (Innendurchmesser, Länge).

Die Zeitkonstante ist umgekehrt proportional zur vierten Potenz des Kapillardurchmessers und proportional zur Kapillarlänge. Das bedeutet, z.B., wird der Kapillardurchmesser halbiert, so vergrößert sich die Zeitkonstante um den Faktor $16 = (1/0,5)^4$. Oder anders ausgedrückt: halbiert man den Kapillardurchmesser, so muss die Kapillare auf das Sechzehnfache verlängert werden, damit sie wieder die gleiche Wirkung hat.

Die beschriebenen Gesetzmäßigkeiten gelten nur, wenn die Strömung durch die Kapillare laminar ist. Dieses wird in dem Modell durch Berechnung der Reynoldszahl [27] geprüft. Bei allen durchgeführten Simulationsrechnungen lag die Reynoldszahl im zweistelligen Bereich, also im Bereich laminarer Strömungen. Als Grenzwert für den Übergang von einer laminaren zu einer turbulenten Strömung gilt eine Reynoldszahl im Bereich von 1800 bis 2000.



Interner Druck

Die Berechnung des internen Drucks (Differenzdruck zwischen SZR und Umgebung) gestaltet sich komplizierter als bei einem geschlossenen SZR, da das Ein- oder Ausströmen von Luft durch die Kapillare berücksichtigt werden muss. Dies geschieht im Prinzip über die Gleichungen 2 und 3 für jedes Zeitintervall. Das Resultat ist der interne Druck p_{Kap} in einem über eine Kapillare druckentspanntem MIG als Funktion der Zeit.

Feuchteaufnahme

In Abschnitt 3.3.1 wurde die Spalte dp_{Phi} des Rechenmodells benutzt, um durch fortlaufende Summation den internen Druck p_{dicht} im dichten MIG als Funktion der Zeit zu berechnen. Bei einem über eine Kapillare geöffneten MIG muss in umgekehrter Reihenfolge vorgegangen werden: Es wird zunächst – wie im vorigen Abschnitt „Interner Druck“ beschrieben – der interne Druck p_{Kap} als Funktion der Zeit ermittelt und dann durch fortlaufende Differenzbildung die Spalte dp_{Kap} erzeugt. Diese Spalte enthält die Druckänderungen pro Zeitintervall in einem MIG mit Kapillare.

Jedes dp_{Phi} wird verursacht von den jeweiligen Temperatur- und Luftdruckänderungen in dem betreffenden Zeitintervall. Jedes dp_{Kap} wird von den jeweiligen Temperatur- und Luftdruckänderungen in dem betreffenden Zeitintervall PLUS dem Effekt der Kapillare verursacht. Also lässt sich der Effekt der Kapillare als Differenz der beiden Spalten darstellen, nämlich als Druckdifferenz pro Zeitintervall.

Diese Druckdifferenzen können, basierend auf Gleichung A3 im Anhang von [25], in Volumendifferenzen umgerechnet werden. Und dieses sind die Volumina, die zwischen dem SZR und der Umgebung pro Zeitintervall über die Kapillare ausgetauscht werden. Genau wie beim offenen MIG lassen sich jetzt die Feuchteinträge in den SZR mit Hilfe der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft berechnen. Durch Summation erhält man den Gesamtfeuchteeintrag während der Simulationsperiode.

3.3.4 Über Ventile druckentspanntes MIG

Die Simulation der Druckentspannung über Ventile ist im Vergleich zur Druckentspannung über Kapillare relativ einfach. Man setzt einen Einlass- und einen Auslassdruck für die Ventile und fängt an, wie beim dichten MIG, die Druckänderungen dp_{Phi} und den internen Druck p_{dicht} zu berechnen. Ist $dp_{isochor}$ z.B. negativ, so sinkt der Druck im SZR. Erreicht der interne Druck p_{dicht} den Öffnungsdruck des Einlassventils, so wird es geöffnet, Luft strömt in den SZR. Jede weitere isochore Druckerniedrigung $dp_{isochor}$ wird, wie beim offenen MIG, in isobare Volumenänderungen dV_{isobar} umgerechnet, die Luftvolumina, die in den SZR einströmen. Wiederum genau wie beim offenen MIG kann daraus der Feuchteeintrag berechnet werden.

Sobald dp_{isochor} und damit auch dp_{Phi} positiv werden, schließt sich das Einlassventil. Das MIG verhält sich wieder wie ein dichtes MIG, bis schließlich der Öffnungsdruck des Auslassventils erreicht wird und der Vorgang sich wiederholt.

3.4 Beispiel für eine Druckentspannung

Es soll nur ein typisches Beispiel präsentiert werden, um die Druckentspannung über eine Kapillare bzw. über Ventile zu illustrieren. Weitere Beispiele werden in Kapitel 4.2.1 ausführlich erläutert (Tabelle 3, Abbildung 15). Dort dienen die Simulationsrechnungen dazu, geeignete Probekörper für die Freibewitterung auszuwählen.

Das Beispiel hier bezieht sich auf einen MIG-Probekörper mit dem Format 700 mm x 1000 mm und dem Aufbau 4-36-4. Der Temperaturverlauf (Abbildung 6) wurde erzeugt durch die Überlagerung von Sinusfunktionen, wie in Kapitel 3.2 beschrieben. Die Abbildung 6 zeigt zwei Tage im Juli, die Stunden 4800 bis 4848 des Jahres. Im Juli sind die Klimabelastungen (in dem gewählten Klimamodell), bedingt durch sommerliche Temperaturen, am höchsten. Über den Zeitraum von zwei Tagen ändert sich der Luftdruck so wenig, dass er hier ganz weggelassen werden konnte.

Abbildung 7 zeigt die aus dem Temperaturverlauf resultierenden Drücke im SZR, für das dichte MIG sowie für MIG, die über eine Kapillare (p_{Kap}) bzw. Ventile (p_{Vent}) druckentspannt sind. Die Parameter der Kapillare und der Ventile wurden so gewählt, dass die Maximaldrücke ähnlich sind.

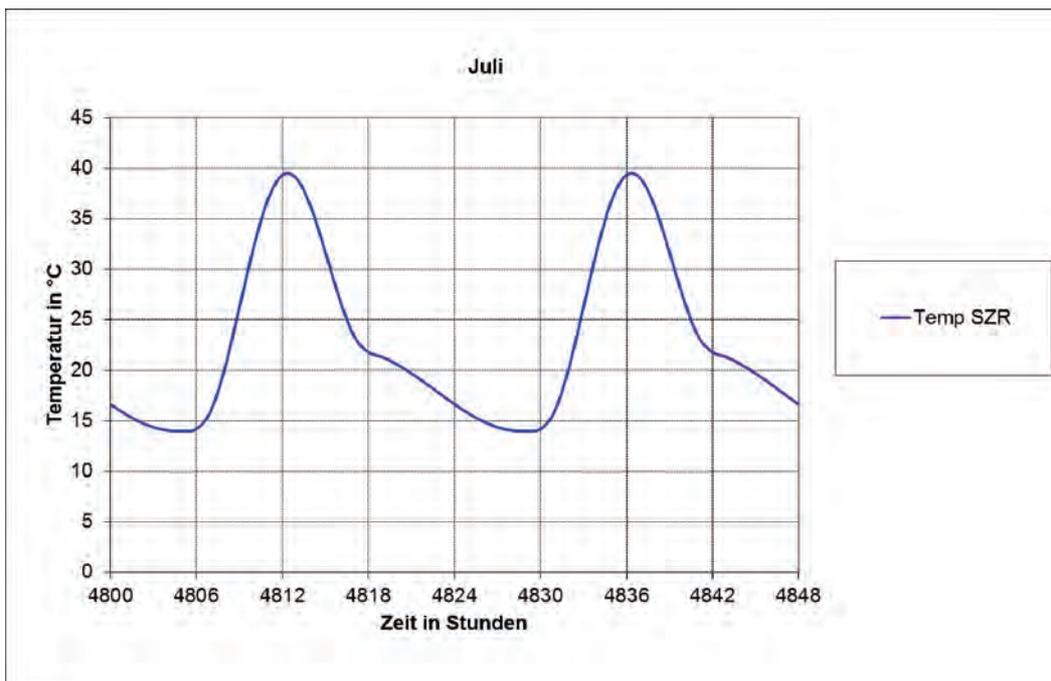


Abbildung 6 Durch Überlagerung von Sinusfunktionen erzeugter Temperaturverlauf (s. Kapitel 3.2). Dargestellt ist die Temperatur an zwei Tagen im Juli.

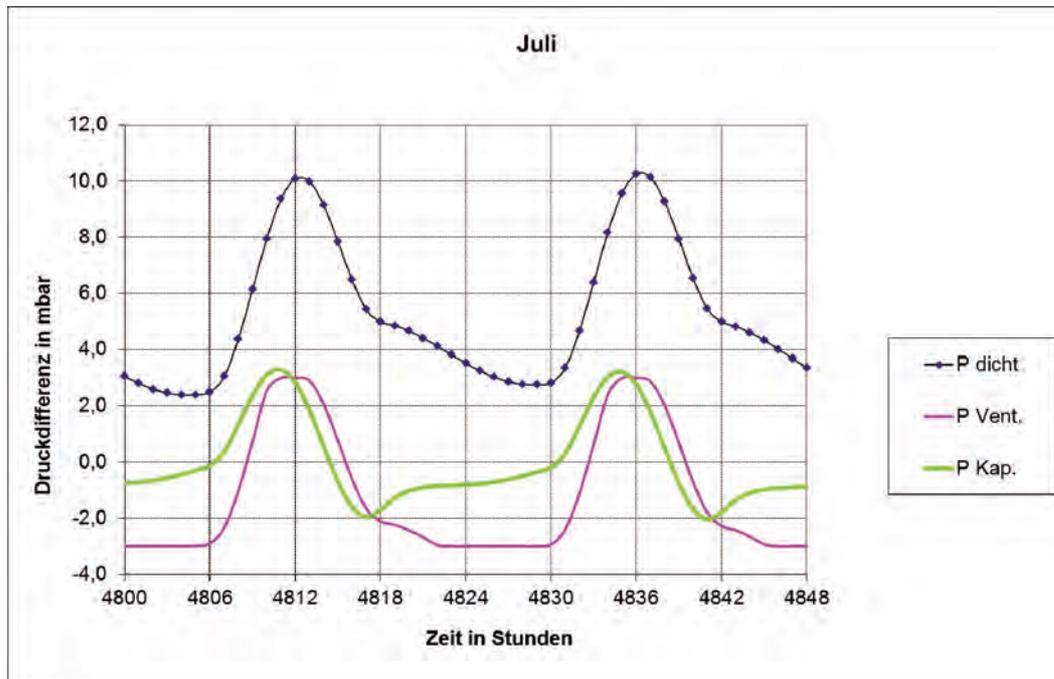


Abbildung 7 Aus dem in Abbildung 6 dargestellten Temperaturverlauf resultierende Druckverläufe

Ein- und Auslassdruck der Ventile betragen -3 mbar und $+3$ mbar; Werte, die man auch aus dem Diagramm ablesen kann. Die Kapillare hat einen Innendurchmesser von $0,5$ mm, eine Länge von 300 mm, und daraus resultierend eine Zeitkonstante von etwa 150 min. Die druckmindernde Wirkung der Kapillare bzw. der Ventile ist offensichtlich in Abbildung 7. Während das dichte MIG einem maximalen Druck von 10 mbar ausgesetzt ist, beträgt der Druck in den druckentspannten MIG nur etwa 3 mbar.

Während des simulierten Jahres werden folgende Feuchtemengen aufgenommen:

Offenes MIG	6,9 g
MIG mit Kapillare	4,4 g
MIG mit Ventilen	1,0 g

Diese Modellrechnung und andere haben gezeigt, dass mit Ventilen immer eine niedrigere Feuchteaufnahme erzielt werden kann, bei ähnlicher oder sogar geringerer Druckbelastung, als sie durch eine Kapillare möglich ist. Aber wie bereits im vorigen Kapitel erwähnt wäre es schwierig geeignete Ventile zu finden, die bei den geringen Drücken langfristig zuverlässig ansprechen.



4 Experimentelle Untersuchungen zur dauerhaften Druckentspannung von Mehrscheiben-Isolierglas

Das Rechenmodell hat gezeigt, dass Kapillare grundsätzlich geeignet sein sollten, die Druckentspannung eines MIG zu realisieren, ohne die Dauerhaftigkeit auf ein für den bautechnischen Einsatz unakzeptables Maß zu reduzieren.

Zweck der experimentellen Untersuchungen war es, das Rechenmodell auf seine Gültigkeit zu prüfen und die Funktionsfähigkeit von Kapillaren zur dauerhaften Druckentspannung in baupraxisnahen Tests zu demonstrieren. Es sollte eine baupraktisch akzeptable Balance zwischen Druckentspannung und Dauerhaftigkeit angestrebt werden.

Die experimentellen Untersuchungen an MIG-Probekörpern mussten im Wesentlichen zwei Größen betrachten: Scheibendurchbiegung und Feuchteaufnahme. Die Scheibendurchbiegung ist eine Kenngröße für die mechanische Belastung des MIG, und zwar nicht nur die mechanische Belastung der Glasscheiben, sondern (indirekt) auch die mechanische Belastung des Randverbundes. Die Feuchteaufnahme ist eine Kenngröße für die Dauerhaftigkeit des MIG.

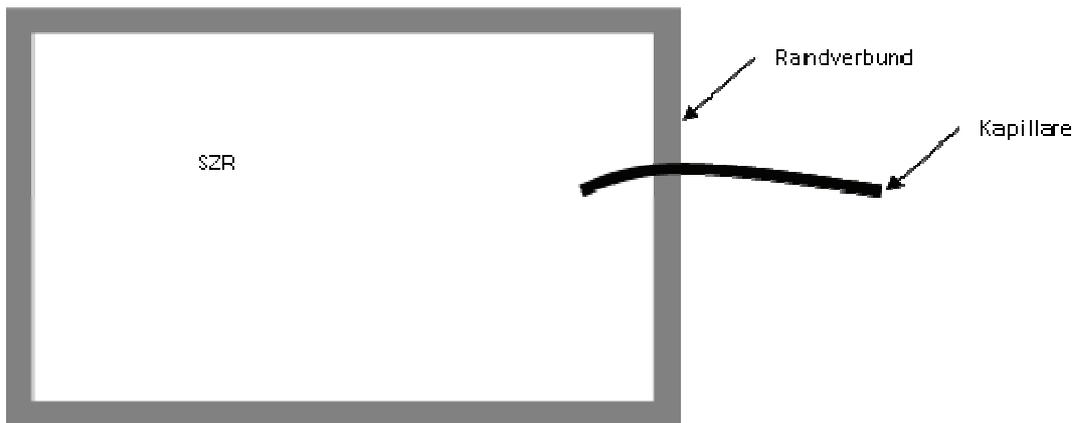
Zwei Arten von Tests kamen in Frage: Freibewitterung und Untersuchungen in einer Klimakammer. Eine Freibewitterung ist letztendlich die überzeugendste Demonstration der Funktionsfähigkeit eines Konzeptes bzw. der technischen Umsetzung eines solchen, aber Freibewitterungen dauern i.d.R. sehr lange und es gibt häufig Einschränkungen hinsichtlich der messtechnischen Erfassung wichtiger Parameter. Letzteres war auch hier der Fall. Es stellte sich heraus, dass es im Rahmen des Untersuchungsprogrammes schwierig sein würde, die Scheibendurchbiegung an freibewitterten Probekörpern über einen repräsentativen Zeitraum zu erfassen. Deshalb wurde beschlossen, Durchbiegungsmessungen ausschließlich in einer Klimakammer durchzuführen. Bestimmungen der Feuchteaufnahme sollten dagegen sowohl nach einer längeren Freibewitterung als auch nach einer mehrwöchigen Klimakammerbelastung erfolgen.

Die MIG-Probekörper sollten einen verhältnismäßig großen Scheibenabstand aufweisen. Um dies technisch zu realisieren, wurden die Probekörper als 3-fach MIG mit konventionellen Abstandhaltern ausgeführt, und mit einem großen Durchbruch (10 cm Durchmesser) in der mittleren Scheibe (Abbildung 8). Auf diese Weise waren beide SZR miteinander verbunden und konnten für Berechnungen und experimentelle Untersuchungen als ein effektiver SZR betrachtet werden. Im Folgenden wird bei Angaben zum Aufbau eines Probekörpers immer auf den effektiven SZR Bezug genommen, also die Summe der miteinander verbundenen SZR.



Abbildung 8 Bohrung in mittlerer Scheibe eines 3-fach MIG-Probekörpers

Kapillare wurden der Einfachheit halber durch eine Bohrung im Randverbund in den SZR geschoben (Abbildung 9a und b). Die Durchgangsstelle wurde mit Dichtstoff versiegelt, so dass Luft nur durch die Kapillare in den SZR hinein- bzw. aus ihm herausströmen konnte.



a.)



b.)

Abbildung 9 MIG-Probekörper mit Kapillare durch den Randverbund in den SZR



4.1 Klimakammeruntersuchungen an dauerhaft druckentspanntem MIG

Für die Untersuchungen in einer Klimakammer bot sich eine Belastung in Anlehnung an die Produktnorm EN 1279-2 an, d.h. eine zyklische Temperaturänderung zwischen -18 °C und $+53\text{ °C}$ mit einer Zyklusdauer von 12 Stunden. Für die Ermittlung der Feuchteaufnahme von Probekörpern konnten ebenfalls die Vorgaben der Norm hinsichtlich der relativen Luftfeuchtigkeit während der Temperaturzyklen übernommen werden – im Prinzip also sehr hohe relative Feuchtigkeit bei hohen Temperaturen und niedrige relative Feuchtigkeit bei niedrigen Temperaturen. Abbildung 10 zeigt den Verlauf von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit in der Klimakammer über 24 Stunden.

Berechnungen mit dem Rechenmodell ergaben, dass eine Belastungsdauer von vier Wochen, also 56 Zyklen, ausreichen sollte, um den Effekt der Belüftung über Kapillare auf die Feuchteaufnahme sichtbar zu machen.

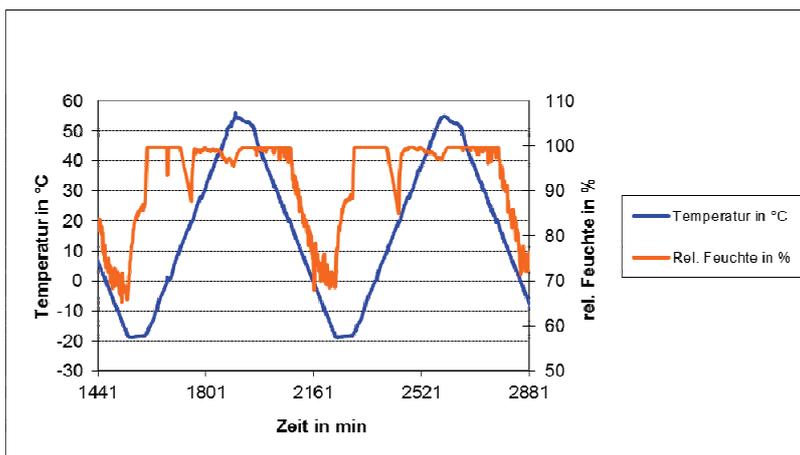


Abbildung 10 Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit in Klimakammer über 24 Stunden, in Anlehnung an EN 1279-2

Für Durchbiegungsmessungen musste eine hohe relative Luftfeuchtigkeit vermieden werden, um eine elektrische Beschädigung der Wegaufnehmer durch Kondensatbildung oder Korrosionsschäden auszuschließen. Das oben beschriebene Temperaturprogramm wurde zu diesem Zweck bei einer relativen Feuchtigkeit von 50 % gefahren.

4.1.1 Durchbiegungsmessungen in der Klimakammer

Probekörperbeschreibung

- Format 700 mm x 1000 mm
- Aufbau 4-34-4
- Kapillare durch den Randverbund in den SZR (Abbildung 9a und b)
- Trockenmittel im Abstandhalter
- Kapillare: Material FEP, Innendurchmesser 0,5 mm, Längen 90 bis 180 mm

Die Probekörper wurden in einen speziell für diesen Zweck angefertigten Rahmen gestellt (Abbildung 11a.), der die Verformung der Scheiben möglichst wenig behindern konnte. Sowohl in den Scheibenmitten als auch an der Mitte einer langen Kante wurden Wegaufnehmer (Typ Megatron SPR-18) aufgesetzt. Die Wegaufnehmer an der Kante sollten etwaige Bewegungen, z.B. ein Verkippen, des Probekörpers, aufzeigen. Auf der einen Seite des Probekörpers war in der Nähe des Wegaufnehmers in der Scheibenmitte ein Oberflächenthermoelement aufgeklebt (Abbildung 11b.), um die Temperatur des Probekörpers zu messen. Die Weg- und Temperatursignale wurden mit einer konventionellen Datenloggingstation im Minutenrhythmus aufgezeichnet.

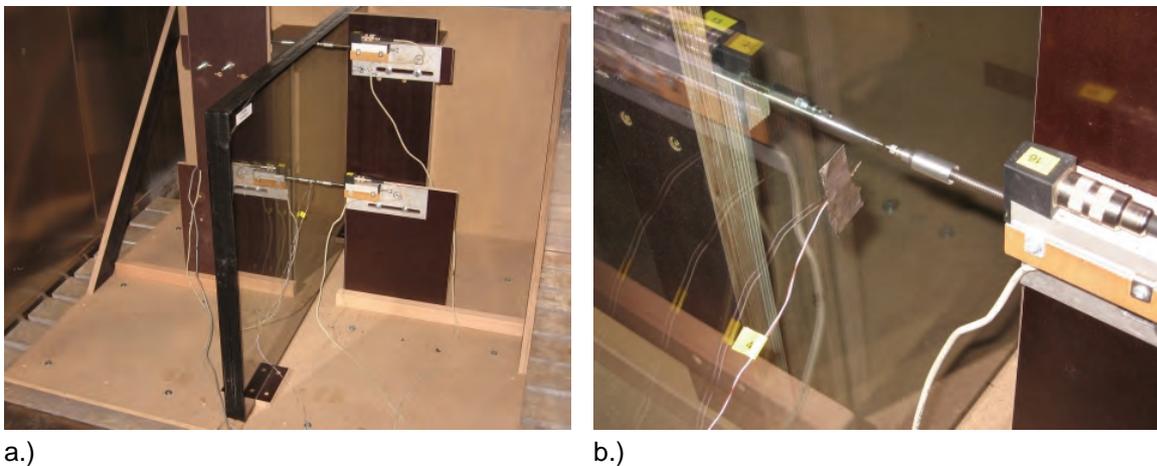


Abbildung 11 a.) MIG-Probekörper mit Wegaufnehmern in Scheibenmitte und an der oberen Kante
b.) Scheibenmitte mit aufgesetztem Wegaufnehmer und aufgeklebtem Thermoelement

In Abbildung 12a-e sind die Messergebnisse von einem Probekörper dargestellt. Die Messung dauerte insgesamt etwa 8,5 Tage. Abbildung 12a zeigt als Überblick die Messkurven für die gesamte Zeit. In den folgenden vier Graphen (b bis e) sind zeitlich aufeinanderfolgende Ausschnitte von jeweils zwei Tagen zu sehen. Alle vier Ausschnitte sind im selben Maßstab dargestellt.

Für etwas mehr als zwei Tage war die Kapillare verschlossen. Der Probekörper sollte sich also wie ein konventionell versiegeltes MIG verhalten. Dann wurde die Kapillare durch Abschneiden des äußeren versiegelten Endes geöffnet. Die Kapillarlänge betrug dann etwa 180 mm. Nach weiteren zwei Tagen wurde die Kapillare nochmals durchtrennt, ungefähr in der Mitte ihrer Länge. Es verblieben etwa 95 mm als aktive Kapillare in dem Probekörper. Nach weiteren etwa 2,5 Tagen wurde der Randverbund mit einem 10-mm-Bohrer durchbohrt, was zum sofortigen Druckausgleich mit der Atmosphäre führte.

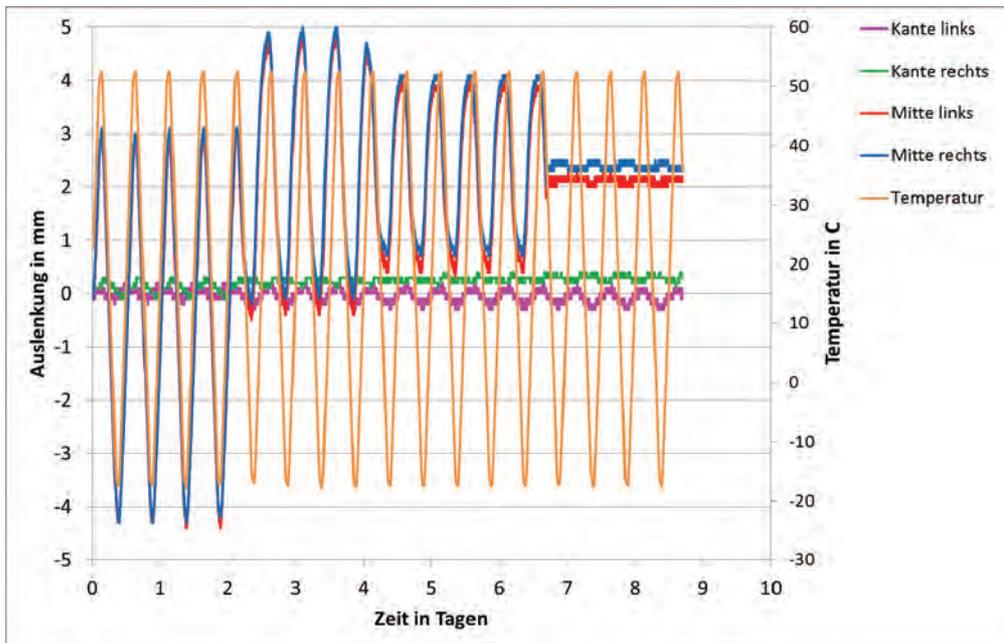


Abbildung 12a Scheibendurchbiegung und Temperatur an einem MIG-Probekörper in einer Klimakammer

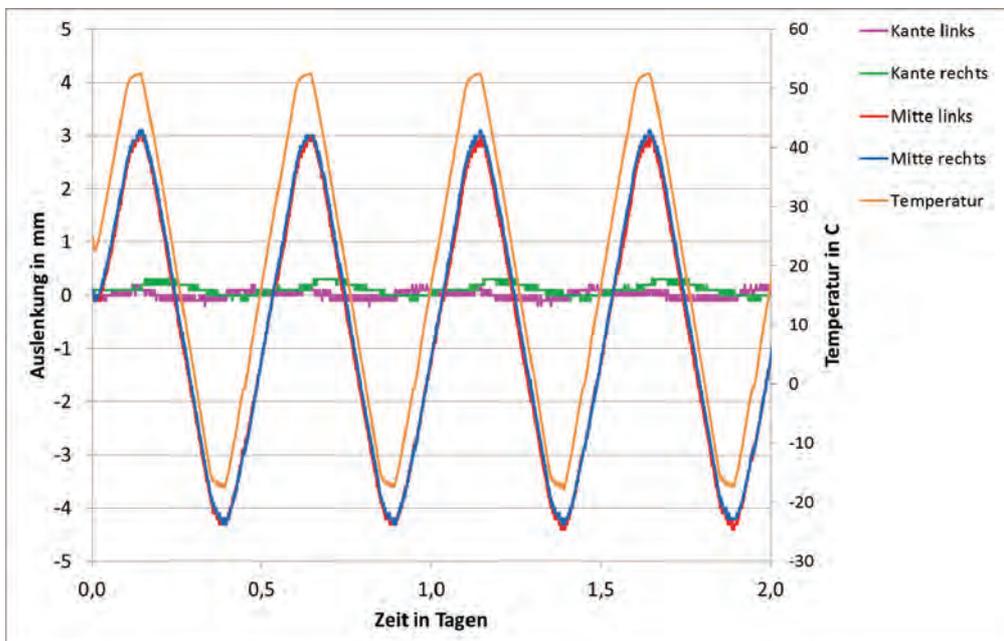


Abbildung 12b Ausschnitt aus Abbildung 12a., Tage 1 und 2, Probekörper ist dicht

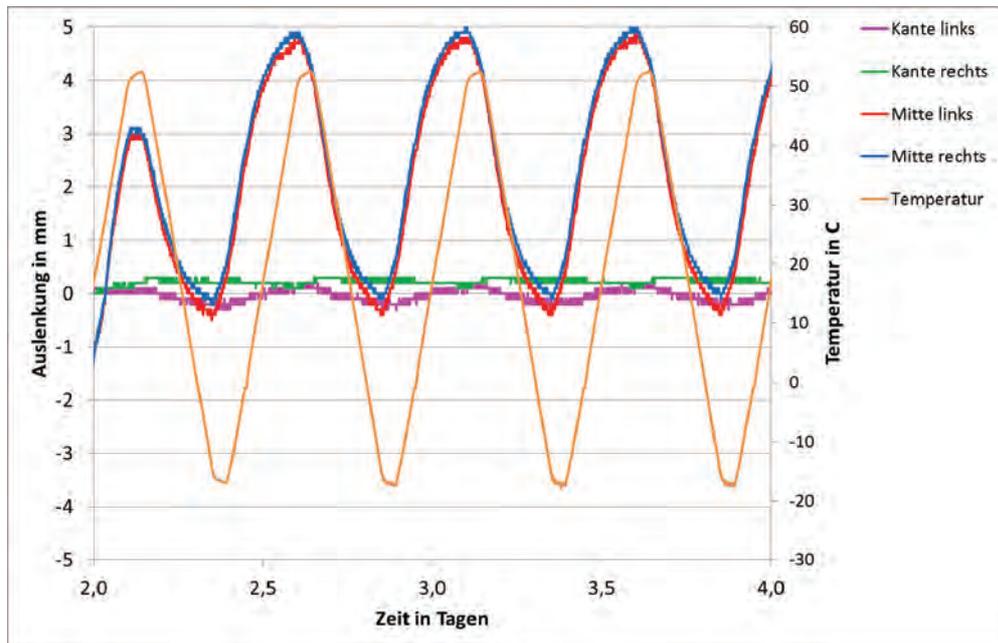


Abbildung 12c Ausschnitt aus Abbildung 12a., Tage 3 und 4, Druckausgleich über 180 mm lange Kapillare

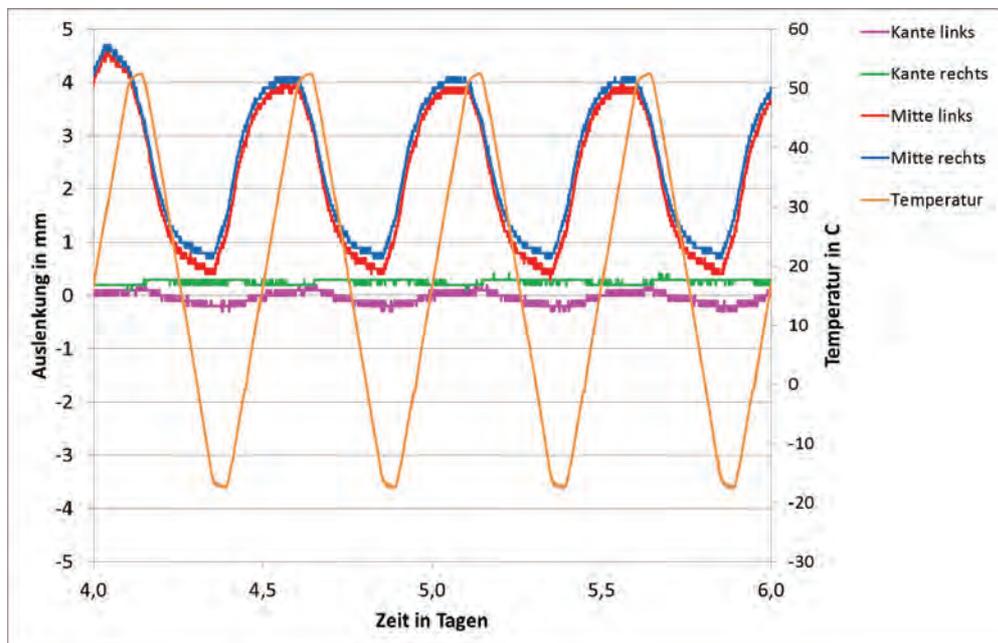


Abbildung 12d Ausschnitt aus Abbildung 12a., Tage 5 und 6, Druckausgleich über 95 mm lange Kapillare

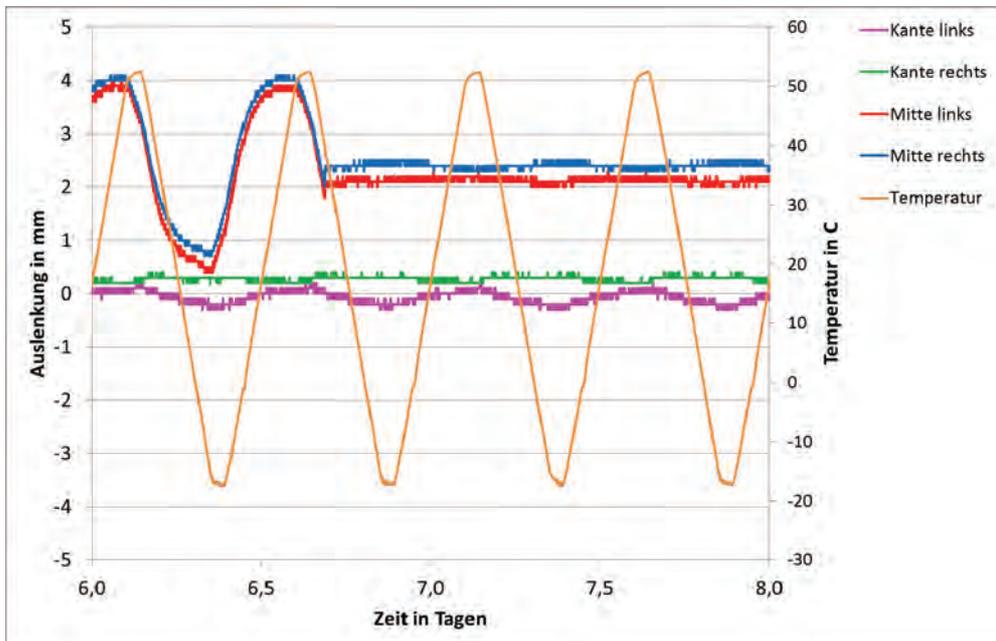


Abbildung 12e Ausschnitt aus Abbildung 12a., Tage 7 und 8, Druckausgleich zunächst über 95 mm lange Kapillare, dann über Bohrung durch den Randverbund

Die orange Temperaturkurve zeigt die Temperatur des Oberflächenthermoelementes an. Die Temperatur variiert zyklisch mit einer Periode von 12 Stunden von -17 °C bis $+52\text{ °C}$ während der gesamten Prüfdauer von 8,5 Tagen.

Die lilafarbene und die grüne Kurve („Kante links“ und „Kante rechts“) zeigen eine leichte zyklische Bewegung um die Nulllinie. Der Betrag dieser Auslenkungen ist zu Anfang sehr klein und nimmt im Verlauf des Experimentes bis auf etwa 0,2 bis 0,3 mm zu. Die Auslenkungen dieser beiden Wegaufnehmer sind gegenläufig: d.h. sie werden nicht durch eine thermische Ausdehnung bzw. Schrumpfung der Probekörperkante hervorgerufen, sondern durch eine Art Verkippen des Probekörpers gegenüber dem Halterahmen. Bei den ersten Probeläufen der Messeinrichtung war dieses Verhalten erheblich stärker ausgeprägt. Eine zusätzliche Versteifung der Grundplatte des Halterahmens reduzierte die Auslenkungen auf das hier sichtbare Maß. Im Verhältnis zu den Signalen von der Scheibenmitte (rote und blaue Kurve) erscheint das „Verkippen“ der Kante vernachlässigbar. Außerdem ist der Betrag des „Verkippens“ auf der Höhe der Scheibenmitte, also auf halber Höhe im Vergleich zur Kante, wahrscheinlich auch nur noch halb so hoch. Deshalb wurden die zyklischen Auslenkungen an der Kante nicht weiter in der Auswertung der Messdaten berücksichtigt.

Die rote und die blaue Kurve zeigen die Auslenkungen der Wegaufnehmer in Scheibenmitte. Dabei bedeutet ein positiver Wert eine Verschiebung des Tasters aus der Startposition in das Wegaufnehmergehäuse hinein, ein negativer Wert entsprechend eine Bewegung aus dem Gehäuse heraus. Zur Illustration, Abbildung 12b, mit dem anfänglichen Temperaturanstieg dehnt sich die Luft im SZR aus, die Scheiben bauchen sich nach au-

ßen, die Taster der Wegaufnehmer werden in ihre Gehäuse hineingedrückt, die Auslenkungen sind positiv. Vernachlässigt man die Startposition (Null auf der Y-Achse) so gilt grundsätzlich, eine positive Änderung des Kurvenwertes bedeutet eine Bewegung des Tasters in das Gehäuse hinein, eine negative Änderung des Kurvenwertes eine Bewegung aus dem Gehäuse heraus.

Die rote und die blaue Kurve (Wegaufnehmer Scheibenmitte) verlaufen zu einem hohen Grad deckungsgleich, d.h. beide Scheiben verformen sich weitgehend gleichartig. Und die Kurven folgen grundsätzlich dem Temperaturverlauf, wenn auch bei geöffneter Kapillare mit einer Phasenverschiebung. Auf Letztere wird später noch näher eingegangen.

Betrachten wir zunächst den dichten Probekörper, Abbildung 12b. Die Scheibenverformungen (rote und blaue Kurve) sind in Phase mit der Temperatur. Wenn die Temperatur ihr Maximum erreicht, dann ist auch die Auslenkung der Wegaufnehmer maximal. Wenn die Temperatur ihr Minimum erreicht, dann ist auch die Auslenkung der Wegaufnehmer minimal. Anstieg und Abfall der Kurven vor und nach einem Maximum bzw. Minimum sind symmetrisch. Auffällig ist, dass die Kurven nicht symmetrisch zur Nulllinie liegen. Die Maxima sind näher an der Nulllinie als die Minima. Das liegt daran, dass die Starttemperatur von etwa 23 °C nicht genau in der Mitte zwischen den Extremtemperaturen von -18 °C und +53 °C lag. Von der Starttemperatur aus gerechnet erfolgte eine Erwärmung von ungefähr 30K, aber eine Abkühlung von ungefähr 40K. Zusammenfassend kann man sagen, dass das beobachtete Verformungsverhalten dem zu erwartenden für ein geschlossenes MIG entspricht.

Sobald die Kapillare geöffnet wird, verschieben sich die Durchbiegungskurven der Scheiben nach oben (Abbildung 12a). Die Durchbiegung ist dann um eine mittlere Auslenkung der Wegaufnehmer von knapp über +2 mm zentriert. Dieser Wert bleibt bis zum Ende des Versuches bestehen, wenn durch Aufbohren des Randverbundes ein vollständiger Druckausgleich bewirkt wird (Abbildung 12a und e). Dieser Auslenkungswert von knapp über +2 mm entspricht also der plan-parallelen Position der Scheiben. Das bedeutet, zu Anfang des Versuches, als der Probekörper noch verschlossen war, waren die Scheiben nach innen gebaucht.

Die Amplitude der Durchbiegungskurven verringert sich, sobald die Kapillare geöffnet wird (vgl. Tage 3 u. 4 mit Tagen 1 u. 2), und nimmt mit Halbierung der Kapillarlänge noch weiter ab (Tage 5 u. 6). Eine quantitative Auswertung folgt später. Die Auslenkungskurven folgen weiterhin dem Temperaturverlauf, allerdings mit einer Phasenverschiebung. Die Kurvenform ändert sich auch: Die Symmetrie geht verloren, die Kurvenabschnitte vor und nach einem Maximum bzw. Minimum nehmen einen exponentiellen Verlauf an. (Vgl. Abbildung 12c und d mit b)

Hinweis: Im Folgenden wird häufiger die Bezeichnung „Druck“ verwandt. Physikalisch korrekt handelt sich um einen Differenzdruck, nämlich dem Differenzdruck zwischen dem SZR und der umgebenden Atmosphäre.



Alle drei Veränderungen (Verkleinerung der Amplitude, Verlust der Symmetrie, Phasendifferenz) sind in Einklang mit dem zu erwartenden Verhalten für die Druckentspannung über eine Kapillare. Sobald mit ansteigender Temperatur der Druck im SZR ansteigt (und den äußeren Luftdruck übersteigt), wird Luft aus dem SZR durch die Kapillare nach außen gedrückt, und zwar umso mehr, je höher die Druckdifferenz ist. Der Druckanstieg im SZR kann also nicht mehr so hoch ausfallen wie bei einem dichten MIG. Die maximale Durchbiegung wird auch entsprechend niedriger sein. Wenn die Temperatur sich dann (langsam) dem programmierten Maximum nähert, wird der durch den Temperaturanstieg verursachte Druckanstieg im SZR überkompensiert von dem durch das Ausströmen der Luft bedingten Druckverlust. Das Maximum des Druckes (und damit das Maximum der Durchbiegung) wird vor dem Maximum der Temperatur erreicht. Es ergibt sich eine Phasendifferenz zwischen Temperatur und Druck bzw. Durchbiegung. Wenn die Temperatur dann wieder von ihrem Maximum sinkt, herrscht zunächst noch ein Überdruck im SZR; d.h. es wird weiterhin Luft nach außen gedrückt. In dieser Phase addieren sich der Druckverlust durch das Ausströmen der Luft und der Druckverlust durch das Sinken der Temperatur. Es ergibt sich ein steiler (negativer) Kurvenverlauf für die Durchbiegung. Der Verlauf bei weiterer Abkühlung ist mit umgekehrten Vorzeichen im Prinzip der Gleiche wie bei der Erwärmung.

Quantitative Auswertung

Am einfachsten ist es für die drei Phasen „Probekörper dicht“, „Druckausgleich über 180 mm lange Kapillare“ und „Druckausgleich über 95 mm lange Kapillare“ aus den Auslenkungskurven (Abbildung 12b, c und d) die Maxima und Minima abzulesen, aus deren Differenzen die Spitze-Tal-Werte zu berechnen und mit den entsprechenden Werten aus dem Rechenmodell zu vergleichen. Dabei wurden im Modell die jeweils an der Probenoberfläche gemessenen Temperaturen verwendet. Es wurden auch die lokalen Luftdruckwerte eingesetzt. Der Effekt der Luftdruckänderungen im Messzeitraum war allerdings vernachlässigbar gegenüber dem Effekt der programmierten Temperaturänderungen (< 2 %). Ferner wurden in den Modellrechnungen ein aus Messungen gemittelter Wert von 3,85 mm für die Scheibendicke und der nominelle Scheibenabstand von 34 mm eingesetzt.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Neben den Ergebnissen für den soeben beschriebenen Probekörper (K4 in der Tabelle) sind auch die Ergebnisse von drei weiteren Versuchsläufen an anderen Probekörpern wiedergegeben.

Tabelle 1 Vergleich experimentell ermittelter Scheibendurchbiegungen mit Modellrechnungen

Es handelt sich bei den „Scheibendurchbiegungen“ um Spitze-Tal-Werte (doppelte Amplitude) der Durchbiegungen während der oben beschriebenen Klimabelastung in Anlehnung an EN 1279-2. Für die Modellrechnungen wurden die realen Klimadaten aus der Prüfung verwandt.

Probe- körper		Kapillare		Scheibendurchbiegung in Scheibenmitte			
				Messung		Modell	
		InnenØ / Länge	Zeit- konstante	Wegaufnehmer		Messung	Modell-
				links	rechts	Mittelwert	rechnung
mm	min	mm	mm	mm	mm		
K1	dicht	–	–	7,4	7,8	7,6	8,9
K2	dicht	–	–	8,5	8,0	8,3	8,9
	Kapillare	0,5 / 167	97	5,1	4,7	4,9	5,3
K3	dicht	–	–	8,1	8,3	8,2	9,0
	Kapillare	0,5 / 170	99	5,6	5,6	5,6	5,3
K4	dicht	–	–	7,4	7,4	7,4	8,8
	Kapillare	0,5 / 180	105	5,1	5,1	5,1	5,5
		0,5 / 95	55	3,6	3,4	3,5	3,3

Zunächst zu den gemessenen Werten: Die Übereinstimmung zwischen dem linken und dem rechten Wegaufnehmer ist insgesamt gut. Es treten zwar auch einige Differenzen bis zu 0,4 mm auf, aber die Differenzen liegen in allen Fällen unter 10 % der jeweiligen Messwerte. Die Messunsicherheit der Wegaufnehmer liegt bei etwa 0,1 mm. Eventuell würden die Differenzen zwischen der linken und rechten Seite nach einer rechnerischen Korrektur der bereits oben diskutierten „Verkippung“ um 0,1 bis 0,2 mm besser ausfallen.

Im Weiteren werden die Mittelwerte der Messungen betrachtet und mit den Ergebnissen der Modellrechnung verglichen:

Da alle vier Probekörper nominal identisch (Format, Aufbau) und die tatsächlichen Klimabelastungen ebenfalls sehr ähnlich waren, ergeben sich auch bei der Modellrechnung nahe beieinander liegende Durchbiegungswerte für den dichten Zustand, 8,8 bis 9,0 mm. Das Rechenmodell bildet im Prinzip die Kirchhoffsche Plattentheorie ab [25]. Membranspannungen werden zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht berücksichtigt. Mit einem Bemessungsprogramm für Isolierglas, wie Üko Professional 3S, kann man aber den Effekt von Membranspannungen auf die Scheibendurchbiegung für die experimentellen Probekörper abschätzen. Es ergibt sich dann (für den dichten Zustand des MIG) ein Wert von 8,8 mm gemäß Kirchhoff und 8,2 mm unter Berücksichtigung von Membranspannungen. Der Wert von 8,2 mm stimmt sehr gut mit den gemessenen Werten für die Probekörper K2 und K3



überein. Dies zeigt, dass in einer zukünftigen Version des Rechenmodells Membranspannungen berücksichtigt werden sollten. Die niedrigen gemessenen Werte von 7,6 und 7,4 mm für die dichten Probekörper K1 und K4 können aber trotzdem nicht erklärt werden.

Die experimentell ermittelten und die mit dem Modell berechneten Durchbiegungswerte für die Druckentspannung über Kapillare stimmen im Rahmen der Mess- und Modellunsicherheit gut überein, auch wenn es Differenzen bis zu 0,4 mm gibt. Alle Differenzen zwischen gemessenen und berechneten Werten liegen für Kapillare unter 10 % der jeweils gemessenen bzw. nach Modell berechneten Werte für die Durchbiegung.

Zusammenfassend kann man aus den Durchbiegungsuntersuchungen in der Klimakammer schließen:

- Kapillare sind geeignet, eine Druckentspannung von Mehrscheiben-Isoliergläsern zu bewirken.
- Die Vorhersagen des Rechenmodells sind bestätigt worden. Potenzial für eine Verfeinerung des Modells liegt z.B. in der Berücksichtigung von Membranspannungen.

4.1.2 Feuchteaufnahme in der Klimakammer

Probekörperbeschreibung

- Format 700 mm x 1000 mm
- Aufbau 4-34-4
- Kapillare durch den Randverbund in den SZR (Abbildung 9a und b)
- Trockenmittel im Abstandhalter
- Sechs Probekörper mit Kapillare: Material FEP, Innendurchmesser 0,5 mm, Länge 150 mm, Lieferung mit verschlossenen Kapillaren
- Sechs Probekörper konventionell versiegelt

Die Probekörper wurden in eine Klimakammer gestellt (Abbildung 13a) und vier Wochen lang einer Klimawechselbelastung gemäß EN 1279-2 ausgesetzt (s.a. Kapitel 4.1). Dabei blieben drei Probekörper konventionell versiegelt wie geliefert, und drei Probekörper wurden vor der Klimabelastung aufgebohrt (Abbildung 13c), um eine vollständige Druckentspannung durchzuführen und einen freien Austausch zwischen SZR und Atmosphäre zu ermöglichen. Bei den sechs Probekörpern mit Kapillare (Abbildung 13b) wurde die Kapillare erst unmittelbar vor dem Start der Klimabelastung geöffnet.

Nach der Klimabelastung wurde der Feuchtegehalt des Trockenmittels bestimmt. Dies geschah ebenfalls in konventioneller Weise, wie in der genannten Norm vorgeschrieben. Allerdings wurde besonders darauf geachtet, das Trockenmittel schnell und so vollständig wie möglich zu entnehmen. Denn bei dieser Untersuchung war es wichtig, den absoluten Wert der aufgenommenen Feuchte (Masse in g) zu bestimmen. Bei den üblichen Prüfungen gemäß EN1279-2 dagegen geht es in erster Linie um die relative Beladung des Tro-

ckenmittels. Es ist also nicht kritisch, wenn etwas Trockenmittel im Abstandhalter verbleibt oder sonst wie verloren geht. Von der absoluten Feuchtemenge im Trockenmittel wurde dann ein Referenzwert für die Anfangsbeladung abgezogen. Dieser Referenzwert war an einer separaten Probe des bei der Fertigung der Probekörper verwendeten Trockenmittels ermittelt worden. Als Resultat erhält man die Feuchtemenge, die ein Probekörper während der Klimawechselbelastung aufgenommen hat. Diese Resultate sind in Tabelle 2 zusammen mit einigen zusätzlichen Probekörperdaten präsentiert.



a.)



b.)



c.)

Abbildung 13 Probekörper in der Klimakammer zur Bestimmung der Feuchtaufnahme
a.) Alle zwölf Probekörper
b.) Probekörper mit Kapillaren
c.) Probekörper mit Bohrung



Tabelle 2 Vergleich experimentell ermittelter Feuchtaufnahmen mit Modellrechnungen
Die Probekörper wurden einer vierwöchigen Klimawechsellast gemäß EN1279-2 ausgesetzt. Für die Modellrechnungen wurden die realen Klimadaten aus der Prüfung verwandt.

Probe- körper	Kapillare		Trockenmittel		Feuchtaufnahme durch Bewitterung	
	0,5 mm InnenØ		Menge	Beladung	Messung	Model
	Länge	Zeit- konstante	trocken	nach Bewitterung		
mm	min	g	%	g	g	
Format: 700 mm x 1000 mm TM: nominell 150 g						
K7	-	∞	160	2,0	1,1	-
K8	dicht		157	2,0	1,0	
K9			161	2,0	1,1	
K5	-	0	163	26	39	12
K10	Bohrung, 10 mm		157	26	39	
K11			159	28	43	
K2	150	87	156	2,7	2,2	2,1
K6	145	85	151	2,7	2,1	2,2
K12	157	92	157	2,6	2,1	2,0
K13	158	92	154	2,6	2,0	1,9
K14	159	93	132	2,9	2,2	1,9
K15	154	90	153	2,6	2,0	2,0

Die wichtigsten Informationen dieser Tabelle sind in der Spalte „Feuchtaufnahme durch Bewitterung“ enthalten. Mit der Bewitterung ist hier die vierwöchige Klimawechsellast gemeint. Die Modellrechnungen wurden mit den während der Prüfung aufgezeichneten Daten der Klimawechsellast durchgeführt.

Für die dichten Probekörper (K7, 8 u. 9) lassen sich keine Modellrechnungen anstellen, da das Modell auf dem Austausch von Luft zwischen der Atmosphäre und dem SZR beruht. Die Messungen wurden durchgeführt, um Orientierungswerte für den konventionellen Zustand (dicht versiegelter SZR) zu erhalten. Es wurde etwa 1 g Feuchtigkeit aufgenommen, wahrscheinlich hauptsächlich über Diffusionsprozesse.

Die offenen Probekörper (K5, 10 u. 11) nehmen etwa das 3,5-fache der von dem Modell vorhergesagten Feuchtigkeitsmenge auf. Daraus kann man aber noch nicht schließen, dass das Modell fehlerhaft ist. Denn es berücksichtigt keine Diffusionsvorgänge, und es ist davon auszugehen, dass, bedingt durch die relativ große Bohrung im Randverbund (Abbildung 13), starke Diffusionsprozesse abgelaufen sind. Man hätte vielleicht den Abstandhalter nicht direkt über eine Bohrung mit der Atmosphäre verbinden sollen, sondern über einen mehrere Meter langen Schlauch mit demselben Innendurchmesser wie die Bohrung. Dann wären Diffusionsprozesse durch das geringe Konzentrationsgefälle in dem langen Schlauch erheblich verlangsamt worden. Andererseits ist es auch interessant, einen Orientierungswert für die Dauerhaftigkeit eines offenen MIG zu haben.

Am wichtigsten sind die Ergebnisse für die Probekörper mit Kapillaren (K2, 6, 12, 13, 14 u. 15 in Tabelle 2): Messung und Modellrechnung stimmen sehr gut überein. Es darf aber nicht vergessen werden, dass auch bei diesen Probekörpern ein Teil der Feuchtigkeit über Diffusionsprozesse durch den Randverbund eingedrungen sein muss. Einen ersten Schätzwert für die Diffusion könnten die dichten Probekörper (K7, 8 u.9) liefern, also etwa 1 g. Allerdings unterlagen die dichten Probekörper wesentlich höheren Klimlasten und damit auch Randlasten als die über Kapillare druckentspannten Probekörper. Der Einfluss von Randlasten auf die Diffusion durch den Randverbund ist gegenwärtig nicht bekannt.

Die Kapillare haben die Feuchtaufnahme erheblich begrenzt. Gleichzeitig wurde die mechanische Belastung durch die Klimawechsellast erheblich reduziert. Das Ausmaß der Entlastung kann in Tabelle 1 abgelesen werden. Die jeweils verwendeten Probekörper waren identisch in Format und Aufbau, und die Zeitkonstanten der Kapillare waren sehr ähnlich. (Hier nur zur Erinnerung: die Zeitkonstante in Minuten angegeben beschreibt, wie schnell ein Druckausgleich über eine Kapillare erfolgt. Als Faustregel gilt: Nach drei Zeitkonstanten ist die Druckdifferenz auf knapp unter 5 % des Ausgangswertes abgefallen.)

Zusammenfassend kann man aus den Untersuchungen zur Feuchtaufnahme in der Klimakammer schließen:

- Kapillare begrenzen, bei gleichzeitiger Druckentspannung (s. Kapitel 4.1.1), die Feuchtaufnahme eines MIG erheblich.
- Die Vorhersagen des Rechenmodells zur Feuchtaufnahme über eine Kapillare sind recht gut bestätigt worden. Potenzial für eine Verfeinerung des Modells liegt z.B. in der Berücksichtigung von Feuchtediffusion durch den Randverbund.

4.2 Freibewitterung von dauerhaft druckentspanntem MIG

4.2.1 Ziele und Planung

Ziele

Wie bereits zu Anfang des Kapitels 4 betont, war der Zweck der experimentellen Untersuchungen, das Rechenmodell auf seine Gültigkeit zu prüfen und die Funktionsfähigkeit von Kapillaren zur dauerhaften Druckentspannung in baupraxisnahen Tests zu demonstrieren. Zwei Größen mussten betrachtet werden: die Scheibendurchbiegung als Maß für die Druckentspannung und die Feuchtaufnahme als Maß für die Dauerhaftigkeit. Scheibendurchbiegungen konnten in der Außenbewitterung nicht über einen längeren Zeitraum erfasst werden. Umso mehr stand die Dauerhaftigkeit im Vordergrund. Aber auch zwei weitere Themen sollten in diesem Zusammenhang adressiert werden:

1.) Hat das Material der Kapillare einen Einfluss auf die Feuchtaufnahme?

Während eines Projekttreffens wurde die Idee vorgetragen, dass Edelstahl eine „aktive“ Oberfläche hat, die zu einer Reduzierung der Feuchtaufnahme genutzt werden könnte. An der Innenfläche einer Edelstahlkapillare sollten demnach beim Einströmen feuchter



Luft in den SZR Wassermoleküle adsorbiert werden. Die Feuchtigkeit der einströmenden Luft würde also reduziert. Im SZR wird die Luft dann durch das Trockenmittel im Randverbund weiter getrocknet. Wenn die trockene Luft wieder ausströmt, fände eine Desorption der an der Kapillarenfläche angelagerten Wassermoleküle statt. Die Edelstahloberfläche im Inneren der Kapillare würde wieder regeneriert. Vom Prinzip her erscheint dieser Mechanismus plausibel, es war aber keine Literatur zu diesem Thema auffindbar. Daher wurde beschlossen, diese Fragestellung experimentell anzugehen. Zum Vergleich sollten auch Kapillare aus einem inerten Material in die Untersuchung einbezogen werden. FEP, ein Teflon-artiger Kunststoff, bot sich an. FEP-Kapillare und -Schläuche werden in der Chemie und der Medizintechnik vielfach eingesetzt. Insbesondere für die Chromatographie sind Kapillare verschiedener Durchmesser erhältlich.

2.) Maximale Druckentspannung und Koppeleffekt

Eine möglichst hohe Druckentspannung ist wünschenswert, aber einer solchen sind nicht nur von Seiten der Dauerhaftigkeit Grenzen gesetzt. Gemäß den in Kapitel 2.1 definierten Anforderungen an Methoden zur Druckentspannung soll der Koppeleffekt bei kurzfristigen Belastungen wie Windstößen erhalten bleiben. Windstöße dauern von einigen Sekunden bis zu wenigen Minuten. Während einer solchen Zeitspanne darf also kein wesentlicher Druckausgleich erfolgen. Sicherheitshalber haben wir die Untergrenze der Zeitkonstante bei 20 min angesiedelt. Damit ist auf alle Fälle die Wirkung des Koppeleffektes bei kurzfristigen Belastungen gewährleistet, und zusätzlich sollte zumindest eine gewisse Reduzierung der Feuchteaufnahme auftreten.

Planung der Untersuchungen

An der Forschungsstelle stand eine Pfosten-Riegel-Fassade (Abbildung 14) zur Verfügung, die schon bei vorherigen Forschungsprojekten genutzt worden war. Damit waren die Anzahl und die Dimensionen dieser Probekörper vorgegeben, nämlich 15 Probekörper mit den Dimensionen 669 mm x 1849 mm. Des Weiteren sollten Probekörper auf einer Freifläche der Forschungsstelle aufgestellt werden. Die Fa. Finstral bot auch an, einige Probekörper einer Freibewitterung auszusetzen. Formate von 700 mm x 1000 mm und 1000 mm x 2000 mm erschienen praxisnah. Und so wurden Modellrechnungen angestellt, um die experimentellen Untersuchungen zu planen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt.



Abbildung 14 Pfosten-Riegel-Fassade für die Freibewitterung von druckentspannten MIG

Tabelle 3 Ergebnisse der Modellrechnungen zur Planung der Freibewitterungen von druckentspannten MIG

	Kapillare			Differenzdruck zur Atmosphäre von ... bis ...	Feuchte- aufnahme g/Jahr
	InnenØ	Länge	Zeit- konstante		
	mm	mm	min		
Format: 669 mm x 1849 mm Aufbau: 4-36-4					
dicht	-	-	-	1,7 bis 6,1	-
offen	-	-	-	-	9,7
Kapillare	1,50	1200	20	-0,3 bis 0,3	8,5
	1,00	240	20	-0,3 bis 0,3	8,5
	0,75	450	120	-1,0 bis 1,6	6,9
	0,50	530	720	-1,2 bis 2,9	1,6
Format: 700 mm x 1000 mm Aufbau: 4-34-4					
dicht	-	-	-	2,3 bis 8,3	-
offen	-	-	-	-	5,2
Kapillare	0,50	950	480	-1,6 bis 3,7	1,3
	0,25	60	480	-1,6 bis 3,7	1,3
Format: 1000 mm x 2000 mm Aufbau: 4-34-4					
dicht	-	-	-	0,4 bis 1,5	-
offen	-	-	-	-	14,7
Kapillare	0,50	110	960	-0,3 bis 0,7	1,9

Die Modellrechnungen erfolgten mit der sinusartigen Simulation des Wetterverlaufes für Rosenheim für den Zeitraum von einem Jahr. Die Differenzdruckangaben gelten für den Monat Juli, in dem bedingt durch die sommerliche Wärme die Drücke in einem dichten MIG am höchsten sind. Ein Differenzdruck von z.B. „1,7 bis 6,1 mbar“ bedeutet eine tägliche Druckschwankung im Juli des simulierten Jahres zwischen 1,7 mbar nachts und 6,1 mbar am frühen Nachmittag (Abbildung 15).

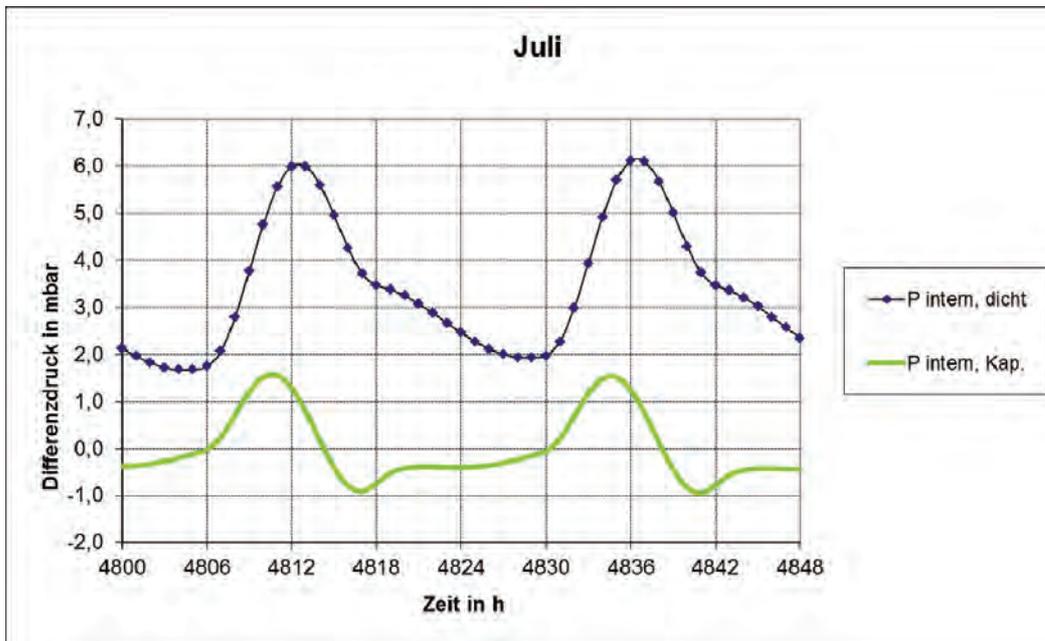


Abbildung 15 Modellrechnung: Interner Druck in einem dichten MIG und einem über eine Kapillare druckentspannten MIG. Format 669 mm x 1849 mm, Aufbau 4-36-4. Die Kurven beruhen auf einem sinusartig simulierten Wetterverlauf. Die Zeit ist in Stunden eines Jahres angegeben: 4800 entspricht 0:00 Uhr.

Zu den Rechenergebnissen in Tabelle 3:

Format 669 mm x 1849 mm, Aufbau 4-36-4:

Mit diesen Probekörpern in der Pfosten-Riegel-Fassade sollten insbesondere die Wirkung niedriger Zeitkonstanten und der Einfluss des Kapillarmaterials untersucht werden. Aus Tabelle 3 und Abbildung 15 entnimmt man, dass in einer dichten Scheibe der Druck im „simulierten“ Juli im Tagesverlauf zwischen 1,7 und 6,1 mbar schwankt. Bei einer Kapillare mit einer Zeitkonstante von 20 min werden die Drücke ganz erheblich reduziert: auf einen Betrag von 0,3 mbar. Dafür ist dann die Feuchtaufnahme auch noch recht hoch mit 8,5 g im Vergleich zu 9,7 g bei einem vollständig offenen MIG. Die Zeitkonstante von 20 min kann über Kapillare mit verschiedenen Kombinationen von Innendurchmesser und Länge realisiert werden. Man hat einerseits eine große Luftmenge (niedrige Zeitkonstante), die über die Kapillarinne fließt, und kann andererseits auch noch die Größe der Kapillarinne, die zur vermeintlichen Adsorption von Wassermolekülen zur Verfügung steht, über die Kombination von Kapillardurchmesser und -länge variieren. Bei größer werdender Zeitkonstante (hier 120 und 720 min) entstehen höhere Drücke im SZR, aber es wird auch weniger Feuchte aufgenommen. Es stellt sich auch die Frage, ob relativ geringe Unterschiede in der Feuchtaufnahme, wie sie zwischen dem offenen MIG und den MIG mit Zeitkonstanten von 20 bzw. 120 min vorliegen (gemäß Modellrechnung), überhaupt in einer experimentellen Untersuchung auflösbar sind.

Format 700 mm x 1000 mm, Aufbau 4-34-4:

Hier geht es darum eine Balance zwischen Druckentspannung und Feuchtaufnahme zu erreichen. Außerdem kann wie auch schon bei dem vorhergehenden Format die Äquivalenz von zwei Kapillaren unterschiedlicher Dimensionen, aber gleicher Zeitkonstante getestet werden.

Format 1000 mm x 2000 mm, Aufbau 4-34-4:

Hier geht es ebenfalls um eine Balance zwischen Druckentspannung und Feuchtaufnahme. Allerdings geht es bei diesen großen Formaten weniger um die eigentliche Druckreduzierung, sondern vielmehr um die, genau wie die mechanische Spannung, zum Druck proportionale Durchbiegung. Nach der Modellrechnung würde die maximale Durchbiegung hier im Verhältnis 0,7 zu 1,5 reduziert, also praktisch halbiert werden. Die Feuchtaufnahme ist ebenfalls wesentlich kleiner als bei einem offenen MIG.

4.2.2 Probekörper und Durchführung

Aus den vorangegangenen Überlegungen zu den Ergebnissen der Modellrechnungen wurde folgende Liste von Probekörper für eine Freibewitterung festgelegt:

**Tabelle 4** Probekörperliste für die Freibewitterung

Probekörpergruppen	Kapillare				Anzahl Probekörper
	Material	InnenØ	Länge	Zeitkonstante	
		mm	mm	min	
Format: 669 mm x 1849 mm Aufbau: 4-36-4					
Einbau in Pfosten-und-Riegel Fassade am ift Rosenheim					
R1	Bohrung durch AH	(10)	-	0	3
R2	Edelstahl	1,50	1200	20	3
R3	Edelstahl	1,00	240	20	3
R4	FEP	1,00	240	20	3
R5	FEP	0,75	450	120	3
Format: 700 mm x 1000 mm Aufbau: 4-34-4					
Einbau in Flügelrahmen und Aufstellung auf Freigelände am ift Rosenheim					
D1	Bohrung durch AH	(10)	-	0	6
D2	Edelstahl	0,50	950	480	6
D3	FEP	0,50	950	480	6
D4	FEP	0,25	60	480	6
Format: 1000 mm x 2000 mm Aufbau: 4-34-4					
Einbau in Flügelrahmen und Aufstellung auf Freigelände am ift Rosenheim					
D5	FEP	0,50	110	960	3
Format: 1000 mm x 2000 mm Aufbau: 4-34-4					
Einbau in Flügelrahmen und Aufstellung auf Freigelände der Fa. Finstral					
Fin A	Bohr. AH	(10)	-	0	1
Fin B	FEP	0,50	110	960	1

Probekörper (Tabelle 4)

Gruppen R1 bis R5: Alle 15 Probekörper wurden in die nach Südwesten ausgerichtete und Sonnen-beschienene Pfosten-Riegel-Fassade (Abbildung 14) eingebaut. Die äußeren Kapillarenden verblieben offen im Glasfalz (Abbildung 16).



Abbildung 16 Kapillarende im Glasfalz der Pfosten-Riegel-Fassade

Gruppen D1 bis D4: Die Probekörper wurden in Flügelrahmen eingesetzt, und diese wurden in Holzrahmen auf dem Freigelände aufgestellt, ebenfalls nach Südwesten ausgerichtet und dem direkten Sonnenschein ausgesetzt. (Abbildung 17)



a.)



b.)

Abbildung 17 MIG Probekörper in der Freibewitterung
a.) 24 Probekörper der Gruppen D1 bis D4
b.) Einer dieser Probekörper mit Kapillare im SZR

Gruppe D5: Wie bei den Gruppen D1 bis D4 wurden die Probekörper in Flügelrahmen eingesetzt, und diese wurden in Holzrahmen auf dem Freigelände aufgestellt, ebenfalls nach Südwesten ausgerichtet und dem direkten Sonnenschein ausgesetzt. (Abbildung 18)



Abbildung 18 Probekörper der Gruppe D5 in der Freibewitterung

Gruppe Fin: Die Probekörper wurden auf einem Freigelände der Fa. Finstral in Südtirol aufgestellt (Abbildung 19). Die Ortshöhe betrug etwa 1450 m ü. NN, und damit liegt dieses Freigelände etwa 1000 m über der Ortshöhe von Rosenheim (Forschungsstelle). Die Ortshöhe selber und der dort herrschende mittlere Luftdruck sind aber irrelevant. Wirksam für den Luftaustausch zwischen SZR und Atmosphäre sind die Luftdruckänderungen. Und deren Einfluss ist normalerweise auch wesentlich geringer als der von lokalen Temperaturänderungen.



Abbildung 19 Probekörper der Gruppe Fin in der Freibewitterung

Durchführung

Die Probekörper wurden etwas länger als ein Jahr der Freibewitterung ausgesetzt. Dabei wurden an zwei offenen Probekörpern die Temperatur im SZR, die Temperatur in der Umgebung, die relative Luftfeuchtigkeit und der lokale Luftdruck aufgezeichnet. Die bei-

den Probekörper waren einer aus der Gruppe D1 (Abbildung 17), repräsentativ für alle Probekörpergruppen an der Forschungsstelle, und der offene Probekörper der Gruppe Fin (Abbildung 19), repräsentativ für die beiden Probekörper auf dem Freigelände der Fa. Finstral.

Zur Erfassung der Wetterdaten dienen MSR145 Mini-Datenlogger der Fa. MSR Electronics GmbH (Abbildung 20). Das externe Thermoelement wurde über die große Bohrung im Randverbund (Abbildung 21) etwa 30 bis 40 cm in den SZR eingeführt. Um eine Erwärmung der Thermoelemente durch direkte Sonneneinstrahlung zu vermeiden, wurden sie beschattet. In dem einen Fall mit außen auf die Scheibe aufgeklebten Bögen von Aluminium-Klebeband, in dem anderen Fall durch eine schmale Holzleiste (Abbildung 22).

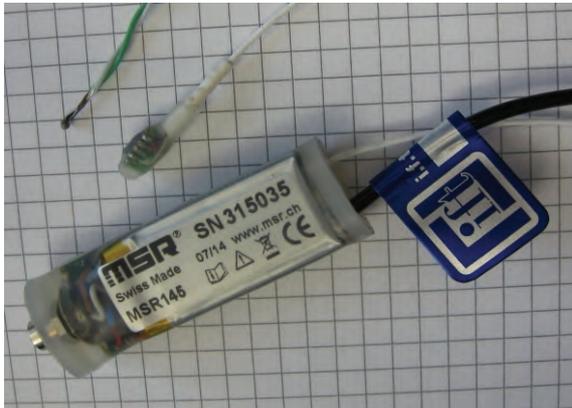


Abbildung 20 MSR-Mini-Datenlogger, darüber externer Feuchte-/Temperatursensor und externes Thermoelement

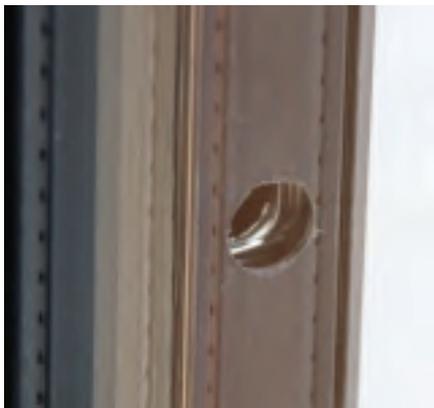


Abbildung 21 10 mm-Bohrung durch den Randverbund



a.)

b.)

Abbildung 22 Beschattung des Thermoelements im SZR
 a.) durch außen aufgeklebte Bögen von Aluminium-Klebeband
 b.) durch Abdeckung mit Holzleiste

Ein externer Feuchtigkeits-/Temperatursensor (Abbildung 20) war nur für den Probekörper der Gruppe D1 vorhanden. Er wurde im Glasfalz knapp unterhalb der Bohrung positioniert. Der Sensor war klein genug, Luftbewegungen im Glasfalz zum und vom SZR nicht wesentlich zu beeinträchtigen. Und er hat die Temperatur und Luftfeuchtigkeit in der Nähe der Einstromöffnung zum SZR erfasst. Bei dem Probekörper der Gruppe Fin zeichnete ein Sensor im Gehäuse des Datenloggers die Luftfeuchtigkeit auf. Im Gehäuse befinden sich auch ein Luftdrucksensor und ein weiterer Temperatursensor. Beide Datenlogger waren in der Nähe der Probekörper vor Sonneneinstrahlung und Niederschlag geschützt angebracht. Abbildung 23 zeigt ein Beispiel für die Aufzeichnungen der Datenlogger. Die Aufzeichnung erfolgte alle 10 min. Die Daten sind als Textdatei auslesbar.

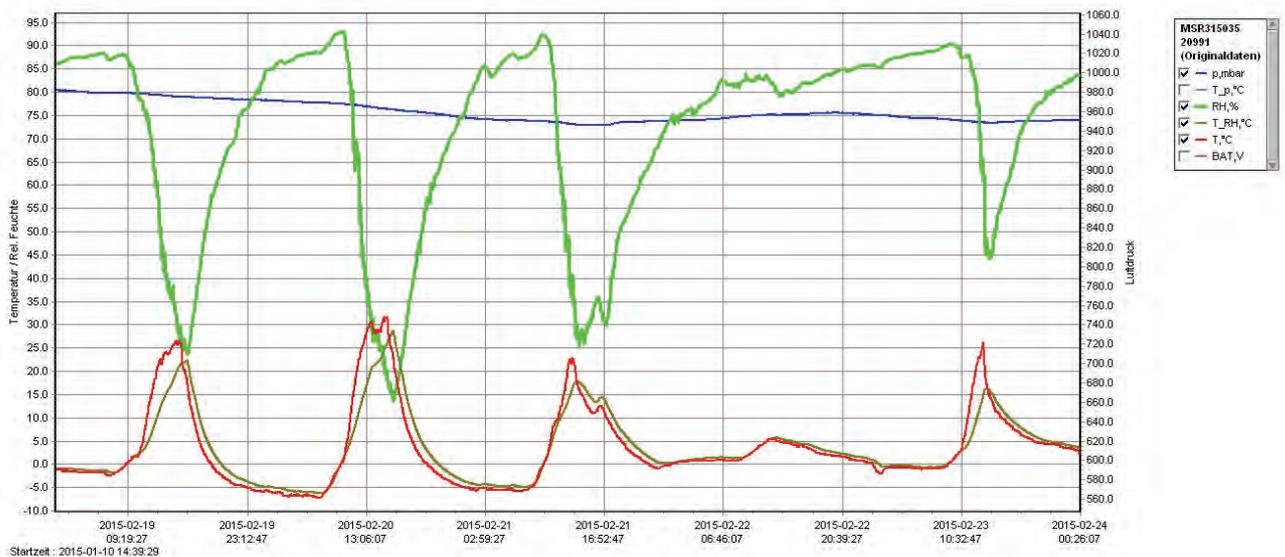


Abbildung 23 Beispiel für die Aufzeichnungen eines MSR145-Datenloggers an einem Probekörper der Gruppe D1

Die „Wetterdaten“ der Datenlogger dienen zur Berechnung der Feuchtaufnahmen mit dem Modell, die Daten aus dem D1-Probekörper für die Gruppen D1 bis D5 sowie die Gruppen R1 bis R5, die Daten aus dem Fin-Probekörper für die beiden Probekörper der Gruppe Fin.

Vor der Entnahme des Trockenmittels zur Feuchtebestimmung wurde noch der Taupunkt an einem Probekörper pro Gruppe bestimmt. Dabei wurde auch darauf geachtet, ob die low-e Beschichtungen (auf den Positionen 2 und 5) Zeichen von Korrosion aufwiesen.

Genau wie bei den Probekörpern aus den Klimakammeruntersuchungen (Kapitel 4.1.2) erfolgte die Trockenmittelentnahme (Abbildung 24) mit großer Sorgfalt, damit möglichst keine Reste im Abstandhalter verblieben. Die Feuchtwerte wurden, ebenfalls genau wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben, für die Anfangsbeladung korrigiert, d.h. die an einer separaten Probe ermittelte Anfangsbeladung wurde von den gemessenen Werten subtrahiert.



Abbildung 24 Trockenmittelentnahme an einem Probekörper aus der Pfosten-Riegel-Fassade (R-Gruppen)

Einige der aufgestellten Probekörper sollen noch über das Ende dieses Forschungsvorhabens hinaus in der Freibewitterung bleiben. Es ist geplant, ihre Feuchtaufnahmen nach insgesamt etwa zwei Jahren Bewitterung zu bestimmen.

4.2.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Tabelle 5, Tabelle 6 und Tabelle 7 zusammengestellt. Die wichtigsten Informationen sind in der Spalte „Feuchtaufnahme durch Bewitterung“ zu finden. Hier werden die tatsächlich gemessenen Feuchtwerte verglichen mit den Modellrechnungen. Für die Modellrechnungen wurden die während der Freibewitterung an den Probekörpern aufgezeichneten Wetterdaten verwendet. Dabei dienen die Temperaturänderungen der Thermoelemente in den SZR dazu, die Volumenströme zu berechnen. Aus den Daten des externen Feuchte-/Temperatursensors im Glasfalz (Gruppe D1) wurde der Feuchtegehalt pro Volumeneinheit der in den SZR einströmenden Luft ermittelt. Für die Gruppe Fin lie-



ferten die Sensoren im Gehäuse des Datenloggers die entsprechenden Temperaturen und relativen Luftfechtigkeiten.

Die Spalte „Nutzungsdauer“ gibt an, wie lange die Probekörper der Freibewitterung hätten ausgesetzt werden können bis zur Sättigung des Trockenmittels, wenn die vorhandenen Abstandhalter vollständig mit Trockenmittel gefüllt gewesen wären. Es wird bei der Berechnung der Nutzungsdauer angenommen, dass sich das gleiche Wettergeschehen Jahr für Jahr wiederholt. Das ist zwar unrealistisch, aber dennoch kann die so ermittelte „Nutzungsdauer“ der groben Orientierung bzgl. der Dauerhaftigkeit einer Konfiguration aus MIG (Format, Aufbau) und Kapillare (Zeitkonstante) dienen.

Tabelle 5 Feuchtaufnahme während Freibewitterung, Gruppen R1 bis R5

Probekörpergruppe	Kapillare	Taupunkt	Trockenmittel		Feuchtaufnahme		Nutzungsdauer extrapoliert für max. Trockenmittelmenge
	Material InnenØ / Länge in mm Zeitkonstante in min	nach Bewitterung	Menge trocken	Beladung nach Bewitterung	durch Bewitterung		
		KT: kein Taupunkt bis Temp.			Messung	Model	
			°C	g	%	g	
Format: 669 mm x 1849 mm Trockenmittel: nominell 136 g, max. das 4-fache möglich							
R1	Bohrung	-7	136	23	28,8	14,9	4
	10 mm		134	23	28,5		4
	0						
R2	Edelstahl	KT, -65	129	10	11,2	9,8	10
	1,5 / 1200		130	9	10,4		10
	20						
R3	Edelstahl	KT, -65	98	12	10,8	9,8	10
	1,0 / 240		129	10	10,9		10
	20						
R4	FEP	KT, -65	126	10	11,1	9,8	10
	1,0 / 240		104	12	10,7		10
	20						
R5	FEP	KT, -65	102	10	8,8	7,0	12
	0,75 / 450		129	8	8,3		13
	120						

Zu Gruppen R1 bis R5:

Für die offenen Probekörper (R1) war die Feuchtaufnahme wesentlich höher als von dem Rechenmodell vorhergesagt. Das liegt sicherlich teilweise an der in dem Modell nicht berücksichtigten Diffusion durch die Bohrung. Zusätzlich wirken aber auch kurze Druck-

schwankungen durch Windböen im Bereich von Sekunden. MIG mit Kapillare sprechen auf solche Druckschwankungen nicht an (Koppeleffekt), wohl aber offene MIG. Es gab keine Anzeichen für eine Korrosion der low-e Beschichtungen.

Die Messergebnisse für die Gruppen R2, R3 und R4 (gleiche Zeitkonstante, 20 min) sind untereinander sehr ähnlich, und sie liegen um etwa 1 g über dem berechneten Wert. Letzteres könnte wieder der Einfluss der Diffusion durch den Randverbund sein. Die Diffusion durch die Kapillare selber sollte, bedingt durch ihre Längen und die damit niedrigen Konzentrationsgefälle, vernachlässigbar sein.

Das Kapillarmaterial (Edelstahl oder FEP) hat offensichtlich keinen Einfluss auf die Feuchteaufnahme. Edelstahl und FEP-Kapillare führen zu sehr ähnlichen Feuchtwerten.

In den Gruppen R2 und R3 ist die gleiche Zeitkonstante über zwei verschiedene Kombinationen von Innendurchmesser und Länge der Kapillare realisiert. Es gibt keinen signifikanten Unterschied in den Messergebnissen.

Trotz der niedrigen Zeitkonstante von 20 min ergeben sich Nutzungsdauern von zehn Jahren. Würde man Abstandhalter mit größerem Volumen verwenden, so könnte die Nutzungsdauer auf die von konventionellem MIG verlängert werden. Und wahrscheinlich wäre die Entwicklung neuer Abstandhalter mit größerer Höhe und damit auch größerem Volumen notwendig, wollte man MIG diesen Formats und Aufbaus in der Baupraxis verwenden.

Das soeben Gesagte bedeutet auch, dass es möglich ist, den Koppeleffekt zu erhalten, und bei einem hohen Grad der Druckentspannung eine für die Baupraxis akzeptable Nutzungsdauer zu erreichen.

Bei einer Zeitkonstante von 120 min (R5) ist die Feuchteaufnahme geringer als bei 20 min. Der gemessene Wert liegt auch wieder höher als der berechnete Wert. Die voraussichtliche Nutzungsdauer wird nur um zwei Jahre gegenüber den Gruppen R1 bis R4 verlängert. Der Scheibeninnendruck hingegen (Spalte „Differenzdruck zur Atmosphäre“ in Tabelle 3) wird gemäß Rechenmodell verfünffacht.

Die Taupunkte entsprechen den Feuchtebeladungen. Das Trockenmittel in R1 ist gesättigt, der Taupunkt ist hoch. Bei den anderen Probekörpern trat keine Erhöhung des Taupunktes auf.

**Tabelle 6** Feuchtaufnahme während Freibewitterung, Gruppen D1 bis D4

Probe- körper- gruppe	Kapillare	Taupunkt	Trockenmittel		Feuchtaufnahme		Nutzungsdauer extrapoliert für max. Trocken- mittelmenge
	Material	nach	Menge	Beladung	durch Bewitterung		
		Bewitterung	trocken	nach	Messung	Model	
		InnenØ / Länge	Bewitterung				
in mm	KT: kein Taupunkt						
Zeitkonstante	bis Temp.						
in min	°C	g	%	g	g	Jahre	
Format: 700 mm x 1000 mm Trockenmittel: nominell 150 g, max. das 2-fache möglich							
D1	Bohrung	-4	162	23	34,1	7,7	2
	10 mm		126	23	26,7		2
	0		160	23	33,9		2
D2	Edelstahl	KT, -65	134	4	2,9	1,5	21
	0,5 / 950		162	3	2,7		23
	480		159	6	6,7		9
D3	FEP	KT, -65	159	4	4,1	1,5	15
	0,5 / 950		162	2	0,9		67
	480		161	3	3,1		20
D4	FEP	KT, -65	91	4	2,6	1,5	23
	0,25 / 60		137	3	2,7		22
	480		131	3	2,6		23

Zu den Gruppen D1 bis D4:

Für die offenen Probekörper (D1) liegt die gemessene Feuchtaufnahme wieder ganz erheblich über dem berechneten Wert. Anzeichen für eine Korrosion der low-e Beschichtungen waren nicht sichtbar.

Auch bei den Gruppen D2 bis D4 sind die gemessenen Werte höher als die berechneten. Außerdem ist die Streuung der Messwerte innerhalb der Gruppen D2 und D3 recht hoch. Vielleicht ist der Wert 6,7 in D2 aber auch nur ein Ausreißer, denn die beiden anderen stimmen sehr gut mit der Gruppe D4 überein. Der Wert 0,9 in D3 erscheint sehr niedrig. Er könnte durch eine verstopfte oder abgeknickte Kapillare verursacht worden sein. Aber all diese Aussagen sind Spekulationen. Idealerweise sollten mehr Probekörper untersucht werden, und es sollte die Scheibendurchbiegung während der gesamten Bewitterung oder zumindest für längere Zeiträume während der Bewitterungsperiode erfasst werden.

Die Gruppen D2 bis D4 weisen die gleiche Zeitkonstante auf. Es ist kein Einfluss des Kapillarmaterials (Edelstahl, FEP) auf die Feuchtaufnahme erkennbar. Kapillardurchmesser und -länge zeigen, bei gleicher Zeitkonstante, auch keinen Einfluss.

Die Nutzungsdauern erreichen schon mehr als zwanzig Jahre. Ein neu entwickelter Abstandhalter mit größerem Volumen würde die voraussichtliche Nutzungsdauer weiter steigern.

Die Taupunkte entsprechen wiederum den Feuchtebelastungen. Das Trockenmittel in D1 ist gesättigt, der Taupunkt ist hoch. Bei den anderen Probekörpern trat keine Erhöhung des Taupunktes auf.

Tabelle 7 Feuchtaufnahme während Freibewitterung, Gruppen D5 und Fin

Probe- körper- gruppe	Kapillare	Taupunkt	Trockenmittel		Feuchtaufnahme		Nutzungsdauer extrapoliert für max. Trocken- mittelmenge
		nach	Menge	Beladung	durch Bewitterung		
	Material	Bewitterung	trocken	nach	Messung	Model	
	InnenØ / Länge			Bewitterung			
	in mm	KT: kein Taupunkt					
	Zeitkonstante	bis Temp.					
	in min	°C	g	%	g	g	Jahre
Format: 1000 mm x 2000 mm Trockenmittel: nominell 268 g, max. das 2-fache möglich							
D5	FEP	KT, -65	173	3	2,5	2,5	44
	0,5 / 110	KT, -65	281	3	4,0		27
	960						
Fin	Bohrung	-10	194	21	38,6	22,6	3
	10 mm						
	0						
	FEP	KT, -65	286	3	3,7	2,4	29
	0,5 / 110						
	960						

Zu den Gruppen D5 und Fin:

Auch hier ist bei dem offenen Probekörper die Feuchtaufnahme wesentlich höher als vom Modell vorhergesagt: Das Trockenmittel ist gesättigt, die Taupunkttemperatur hoch. Wiederum gab es keine Anzeichen für eine Korrosion der low-e Beschichtungen.

Die über Kapillare geöffneten Probekörper weisen relativ geringe Feuchtaufnahmewerte auf, so dass auch mit den konventionellen Abstandhaltern lange Nutzungsdauern vorhergesagt werden. Die gemessenen Werte liegen auch wieder über den berechneten.

Zusammenfassend kann man aus den Untersuchungen an freibewitterten Probekörpern schließen:



- Kapillare begrenzen die Feuchteaufnahme eines MIG erheblich. Lange Nutzungsdauern erscheinen möglich; insbesondere, wenn neue Abstandhaltertypen mit größerem Fassungsvermögen für Trockenmittel zum Einsatz kämen.
- Selbst für sehr niedrige Zeitkonstanten (20 min), die gerade noch die Wirksamkeit des Koppeleffekts gewährleisten, können aus den experimentellen Daten Nutzungsdauern von zehn Jahren vorhergesagt werden. Entsprechend großvolumige Abstandhalter würden diese erheblich verlängern.
- Es ist kein Einfluss des Kapillarmaterials (Edelstahl oder FEP) erkennbar.
- Die Zeitkonstante einer Kapillare war bestimmend für deren Effekt. Innendurchmesser und Länge waren frei wählbar, solange die Kombination aus beiden zur selben Zeitkonstante führte. (Innerhalb der hier gewählten experimentellen Grenzen.)
- Bei einem offenen SZR (10 mm Bohrung durch den Randverbund) macht das Rechenmodell keine sinnvollen Vorhersagen, da die Diffusion durch diese große Öffnung in dem Modell nicht berücksichtigt ist. Wahrscheinlich wäre es besser gewesen, die offenen Probekörper nicht direkt über eine Bohrung mit der Atmosphäre zu verbinden, sondern über einen langen Schlauch (mehrere Meter) mit gleichem Innendurchmesser wie die Bohrung. Durch das geringe Konzentrationsgefälle von außen nach innen sollte die Diffusion durch die Öffnung stark eingeschränkt sein.
- Die Vorhersagen des Rechenmodells zur Feuchteaufnahme über eine Kapillare sind insgesamt recht gut bestätigt worden. Allerdings fällt auf, dass die gemessenen Werte immer etwas, 1–2 g, über den berechneten Werten liegen. Es liegt nahe, diese Differenz der Diffusion durch den Abstandhalterrücken zuzuschreiben. Weitere Untersuchungen zu diesem Thema wären sinnvoll, um das Rechenmodell entsprechend um Diffusionsbeiträge erweitern zu können.

4.3 Schlussfolgerungen und Empfehlungen – Dauerhaft druckentspannte Systeme

Kapillare sind geeignet, eine dauerhafte Druckentspannung von Mehrscheibenisoliertgläsern zu bewirken. Dieses konnte experimentell bei Untersuchungen in einer Klimakammer gezeigt werden. Gleichzeitig begrenzen Kapillare die Feuchteaufnahme eines MIG erheblich im Vergleich zu einem offenen MIG. Letzteres wurde experimentell bei Untersuchungen in einer Klimakammer und durch einjährige Freibewitterungen von MIG-Probekörpern gezeigt. Lange Nutzungsdauern (größer 20 Jahre) druckentspannter MIG erscheinen realistisch. Sowohl die Klimakammeruntersuchungen als auch die Freibewitterungen bestätigen weitgehend die Vorhersagen eines Rechenmodells, das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelt wurde.

Das Rechenmodell simuliert die Vorgänge in einem MIG unter Klimabelastung. Eingangsgrößen sind, neben den Klimadaten, Format und Aufbau des MIG sowie die Kapillardimensionen, Innendurchmesser und Länge. Die Klimadaten umfassen die Temperatur im

SZR sowie Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Luftdruck der Umgebung. Das Modell berechnet sowohl die zeitlichen Verläufe der mechanischen Größen Scheibeninnendruck, Scheibendurchbiegung und Scheibenspannung als auch die Feuchteaufnahme während der Simulationsperiode.

Das Modell basiert auf der Berechnung der laminaren Strömungen durch die Kapillare gemäß dem Gesetz von Hagen-Poiseuille. Diffusionsvorgänge durch den Randverbund werden aktuell nicht berücksichtigt.

Die Kapillardimensionen (Innendurchmesser, Länge) müssen an das Format und den Aufbau des MIG angepasst gewählt werden, um ein ausgewogenes Verhältnis von Druckentspannung und Feuchteaufnahme zu erzielen. Das Rechenmodell kann für eine solche Bemessung der Kapillare herangezogen werden.

Durch entsprechende Bemessung der Kapillare ist es möglich, den Koppeleffekt, d.h. die mittragende Wirkung der inneren Scheibe bei Windlasten, in einem MIG zu erhalten bei gleichzeitig sehr hoher Druckentspannung und ausreichender Dauerhaftigkeit.

Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass das Kapillarmaterial (Edelstahl oder FEP-Kunststoff) keinen Einfluss auf die Feuchteaufnahme hat.

Ansatzpunkte zur Fortführung der Untersuchungen:

Modellrechnungen und Experimente haben gezeigt, dass die Druckentspannung über eine Kapillare grundsätzlich funktioniert. Die verwendeten Probekörper waren zwar bereits großformatig (1000 mm x 2000 mm), aber hatten immer noch relativ kleine Scheibenzwischenräume von 34 bis 36 mm und keine Einbauten, die u.U. Solarstrahlung absorbieren und so zu einer signifikant erhöhten Temperatur im SZR beitragen. Ein wichtiger nächster Schritt auf dem Weg zur Entwicklung von druckentspannten Produkten wäre die Berechnung und Prüfung von großformatigen Probekörpern mit großem SZR (ca. 100 mm) und Einbauten (z.B. Sonnenschutz), die die Temperatur im SZR durch Absorption von Solarstrahlung zusätzlich erhöhen. Zunächst müssten die Kapillare und die benötigte Trockenmittelmenge mit Hilfe von Simulationsrechnungen bemessen werden. Dann könnten entsprechende Probekörper gebaut werden und klimatischen Belastungen in einer Klimakammer und/oder in einer Freibewitterung ausgesetzt werden.

Einige weitere Ansatzpunkte für die Fortführung der Untersuchungen:

- Das Modell basiert letztendlich auf der Kirchhoffschen Plattentheorie, um die mechanischen Belastungen eines MIG zu berechnen. Die Einführung von Membranspannungen könnte das Modell, gerade für großformatige Aufbauten, etwas verbessern. Wahrscheinlich würde sich aber nichts an den grundsätzlichen Aussagen ändern.
- Interessanter und sinnvoller wäre es, die Diffusion durch den Randverbund in dem Modell zu berücksichtigen. Das ist aber extrem schwierig, da es sich nicht nur um eine relativ einfach zu modellierende Diffusion durch eine Materialschicht handelt, sondern



wahrscheinlich zu einem relativ großen Anteil um Grenzflächendifusionsvorgänge. Die Herstellungsqualität hat einen sehr großen Einfluss auf das Ausmaß dieser Diffusion. Des Weiteren spielt die Randlast eine wichtige Rolle, und zwar sowohl bei der Grenzflächendifusion als auch bei der Diffusion durch die Dichtstoffschicht.

- Wahrscheinlich wäre es einfacher, Fragen zum Anteil der Diffusion über den Randverbund an der gesamten Feuchteaufnahme experimentell anzugehen. Zwei Wege kommen in Frage. Im Prinzip wird in beiden Fällen das Experiment zur Bestimmung der Feuchteaufnahme in der Freibewitterung und/oder der Klimakammer wiederholt. Aber es wird entweder die Feuchtediffusion durch den Randverbund oder der Feuchteeintrag über die Luftströmung unterbunden:
 - Ersteres sollte möglich sein, in dem man den Randverbund mit Aluminiumklebeband abklebt. Druckentspannung und Feuchteeintrag würden nur noch über die Kapillare erfolgen.
 - Letzteres ließe sich durch eine der Kapillare vorgeschaltete Trockenmittelpatrone realisieren. In den SZR einströmende Luft enthält dann keine Feuchtigkeit mehr. Die Druckentspannung des MIG über die Kapillare bleibt erhalten. Die Patrone mit der darin befindlichen Trockenmittelfüllung müsste so bemessen sein, dass sie praktisch keinen zusätzlichen Strömungswiderstand darstellt.
- Außerdem stellt sich noch die Frage, von wo Luft in den SZR eingesogen werden sollte, von außen oder vom Innenraum? In welchem Fall ist der langfristige Feuchteeintrag geringer?



5 Untersuchungen zur einmaligen Druckanpassung in Mehrscheiben-Isolierglas

5.1 Einleitung

Eine einmalige Druckanpassung wird i.d.R. vorgenommen, wenn ein erheblicher Ortshöhenunterschied zwischen dem Herstellungs- und dem Einbauort eines Isolierglases besteht. Mit der Ortshöhe ändert sich der mittlere Luftdruck gemäß der barometrischen Höhenformel [28]. Für die Baupraxis gilt in guter Näherung: pro 100 m Höhenzunahme nimmt der mittlere Luftdruck um 12 hPa ab. Die ortshöhenbedingte Luftdruckänderung führt, ähnlich wie klimatische Luftdruck- oder Temperaturänderungen, zu einem Aus- oder Einbauchen der Scheiben. Die ortshöhenbedingten Belastungen der Scheiben und des Randverbundes addieren sich zu den klimatisch bedingten Belastungen. Als Folge steigt das Bruchrisiko der Scheiben und eventuell wird auch die Dauerhaftigkeit des Randverbundes beeinträchtigt.

Nach Angaben der industriellen Projektpartner ist das Erreichen unzulässiger Spannungen im Glas und das damit verbundene erhöhte Bruchrisiko der Hauptgrund für Druckanpassungen bei Isoliergläsern. Durch die Durchbiegung der Scheiben auftretende optische Verzerrungen und ästhetische Aspekte spielen nur untergeordnete Rollen. Gegenwärtig erfolgt die Druckanpassung nach von Hersteller zu Hersteller variierenden Faustregeln. Einige nehmen eine Druckanpassung ab 500 m Höhenunterschied vor, andere erst ab 1000 m. Scheibenformat und -aufbau werden dabei eher nicht berücksichtigt. Aus Sicht der Isolierglashersteller wären zuverlässigere Regeln, die Aufbau und Format sowie Klima- und Windlasten am Einbauort berücksichtigen, sinnvoll. Dadurch ließen sich Produktion und Einbau so planen, dass nur die MIG einer aufwendigen Druckanpassung unterzogen würden, für die es auch erforderlich ist.

5.2 Derzeitige Verfahren zur einmaligen Druckanpassung

Mehrere Methoden zur Druckanpassung sind bereits im Einsatz bzw. sind denkbar und werden im Folgenden kurz dargestellt:

1. Aufbohren, gefolgt von Versiegeln mit Dichtstoff. Diese Methode gilt gemeinhin als Notlösung, da sie fehleranfällig ist und häufig keinen gasdichten Verschluss des Scheibenzwischenraumes gewährleistet. (Abbildung 25)
2. Herausziehen und Wiedereinsetzen eines Abdichtungsstopfens, gefolgt von Versiegeln mit Dichtstoff. (Abbildung 26)
3. Aufschneiden, gefolgt von Verschweißen eines aus dem Randverbund herausragenden Kunststoffschlauchs (Abbildung 27). Kunststoffe sind nicht gasdicht. Daher muss je nach Art und Länge des Kunststoffschlauches mit Undichtigkeiten gerechnet werden. Der Kunststoffschlauch muss flexibel genug sein, um einen Versiegelungsautomaten nicht in seiner Bewegung zu behindern. Ein möglichst dünner Schlauch wäre

daher wünschenswert. Außerdem hat ein dünner Schlauch eine kleinere Wandfläche, durch die Gas permeieren kann. Ein geringer Innendurchmesser reduziert aber auch den Gasstrom aus dem bzw. in den Scheibenzwischenraum. Es stellt sich die Frage, wie lange ein Schlauch geöffnet sein muss, um einen Druckausgleich zu gewährleisten.

4. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollten ebenso Metallkapillare (Edelstahl, Kupfer) an Stelle der Kunststoffschläuche (Abbildung 28) verwendet werden. Diese haben den Vorteil, dass sie gasdicht sind. Andererseits ist die Verarbeitung von Metallen schwieriger als die von Kunststoffen. Insbesondere das baustellengerechte Öffnen und Verschließen von Metallkapillaren könnte schwierig sein. Außerdem könnten sich Metallkapillare als zu steif für eine Verarbeitung auf Versiegelungsautomaten erweisen. Die Frage nach der Zeit zum Druckausgleich stellt sich genauso wie bei Kunststoffschläuchen.
5. Es gibt Zubehörsysteme, die speziell für die Druckanpassung entwickelt wurden (Fa. Helantec [19], Fa. Rottler und Rüdiger [20]). Diese verwenden spezielle Ventil-, Signal- und Verschlussstopfen sowie eine Sonde, die durch den Ventilstopfen in den SZR eingeführt wird, um mit Hilfe einer elektronisch gesteuerten Pumpe den optimalen Gasdruck durch Aufpumpen oder Absaugen einzustellen (Abbildung 29). Diese Systeme sind technisch aufwendig und werden, obwohl sie portabel sind, i.d.R. am Herstellungsort der Isoliergläser eingesetzt.
6. Komponenten der im vorangehenden Absatz beschriebenen Systeme könnten u. U. auch zu einer vereinfachten Druckanpassung auf der Baustelle genutzt werden. Hierbei würde, wie gehabt, der Signalstopfen gezogen, dann aber der Ventilstopfen anstatt mit der Sonde mit einer Hohlneedle durchstoßen. Nach dem erfolgten Druckausgleich über die Hohlneedle würden auch hier der Verschlussstopfen eingesetzt und die Versiegelung aufgebracht werden. Ähnlich wie bei Kunststoffschlauch und Metallkapillare bestimmt das Strömungsverhalten des Gases die Zeit zum Druckausgleich.

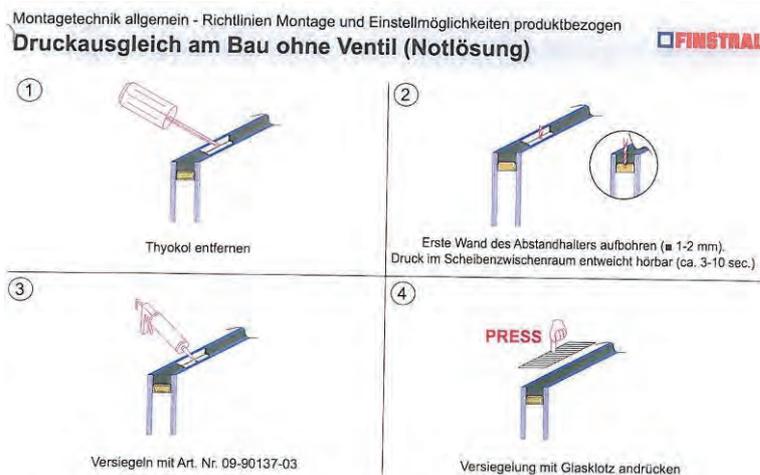


Abbildung 25 Druckanpassung durch Aufbohren und Versiegeln

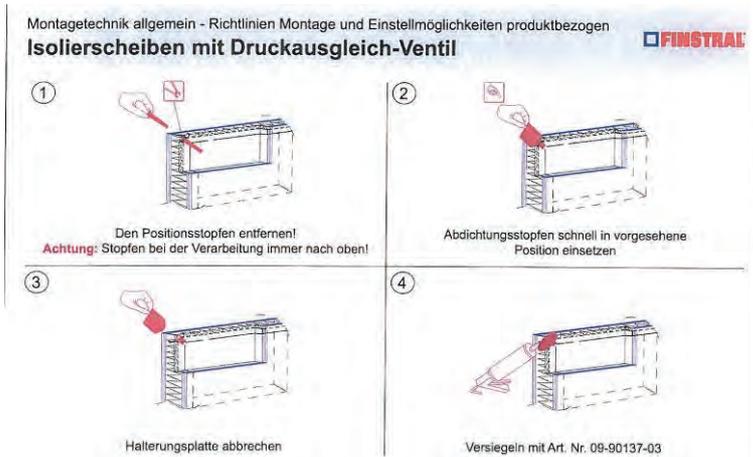


Abbildung 26 Druckanpassung über Abdichtungsstopfen



Abbildung 27 Druckanpassung über Kunststoffschlauch

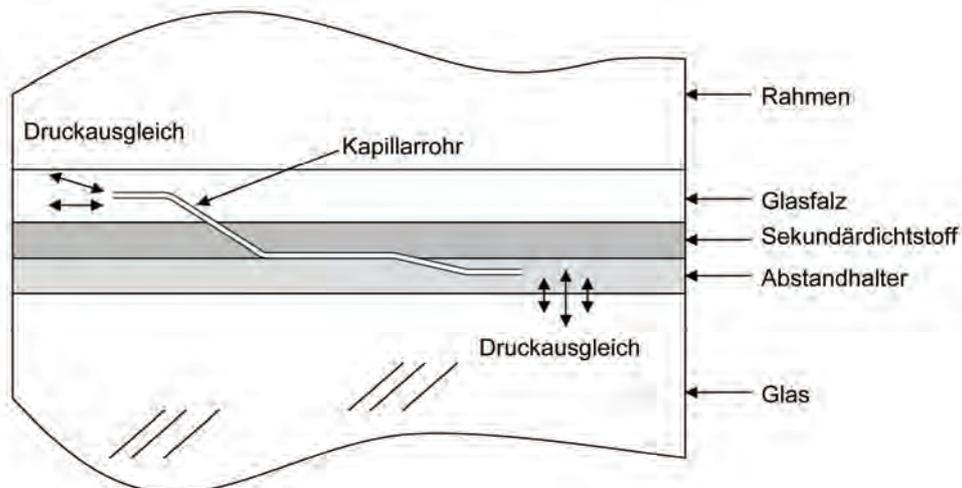
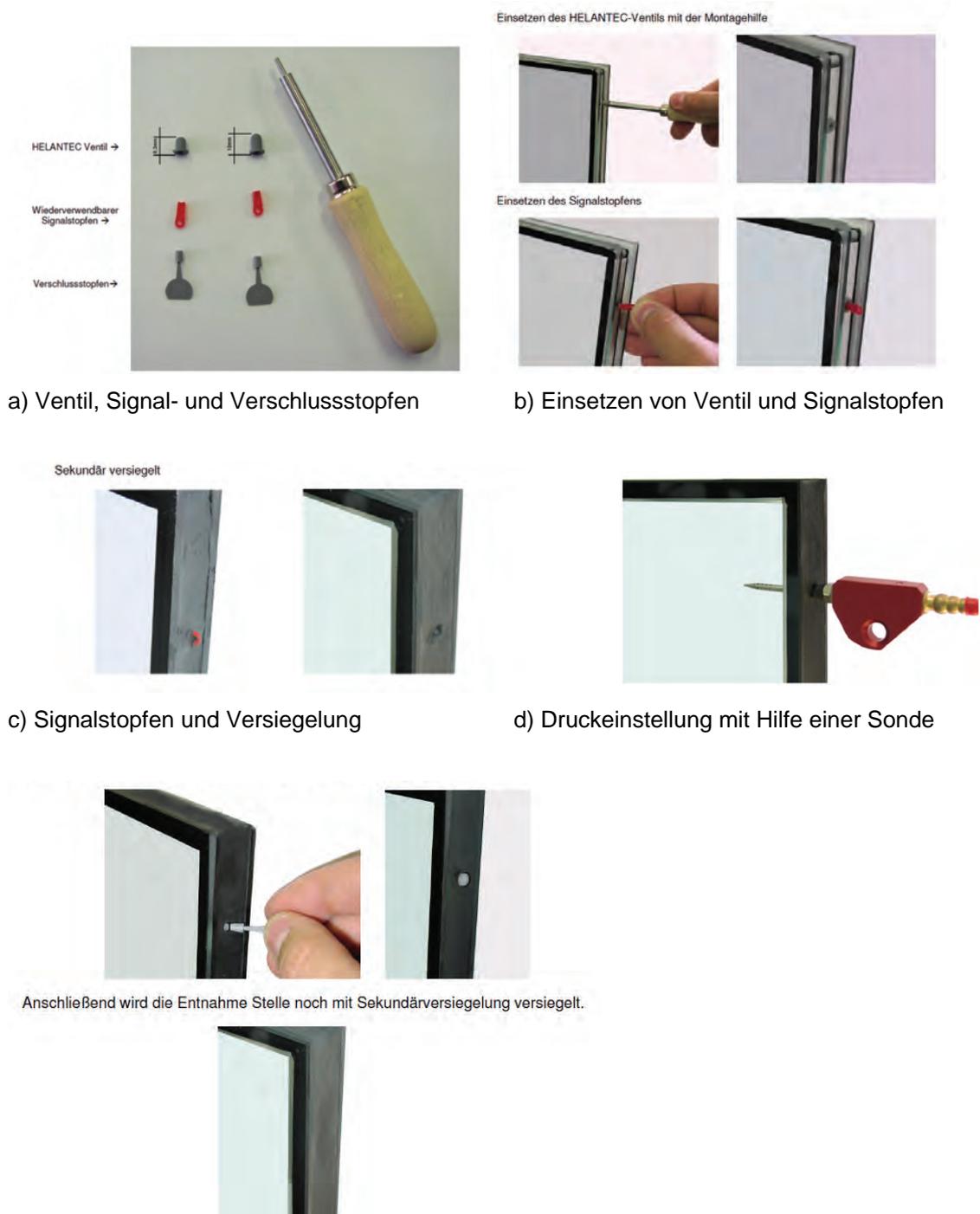


Abbildung 28 Druckanpassung über Kapillarrohr



e) Einsetzen des Verschlussstopfens und Sekundärversiegelung

Abbildung 29 Helantec-System zur einmaligen Druckanpassung (Quelle: www.helantec.de)

Nach Aussagen der Industriepartner ist eine Methode der Druckanpassung wünschenswert, die mit einfachen Mitteln baustellengerecht am Einbauort ausgeführt werden kann. Ein dazu eventuell in den Randverbund zu integrierendes Bauteil sollte den Produktionsablauf des MIG nicht wesentlich stören. Und es sollte am Einbauort des Fensters leicht zugänglich sein, damit auf ein weiteres Aus- und wieder Einglasen des MIG verzichtet



werden kann. Hier ist auch anzumerken, dass immer mehr MIG bereits im Herstellungswerk in Fensterrahmen eingeklebt werden. Ein Aus- und wieder Einglasen am Einbauort des Fensters ist also gar nicht mehr möglich.

Da im Glasfalz nur ein sehr begrenzter Raum, etwa für die Anwendung von Werkzeugen, zur Verfügung steht, wird grundsätzlich eine Umsetzung der Druckanpassung, die einen „direkten“ Zugang zum Randverbund des MIG erfordert, als nicht wünschenswert gesehen. Ideal wären ein dünner Schlauch oder eine Kapillare, der/die aus dem SZR herausragt, so dass durch Aufschneiden und Wiederverschließen eine Druckanpassung am Einbauort möglich wäre. Baustellengerecht sollten die Arbeitsschritte pro MIG nur wenige Minuten in Anspruch nehmen. Für den eigentlichen Druckausgleich wären 30 – 60 s ideal, dann könnte der Monteur auf den Druckausgleich warten bzw. am MIG daneben arbeiten. Maximal akzeptabel für den Druckausgleich wären 20 bis 30 min, während derer der Monteur andere Aufgaben erledigen könnte, um dann wieder zu dem betreffenden MIG zurückzukehren.

Das visuelle Erscheinungsbild des Fensters darf durch Bauteile, die der Druckanpassung dienen, nicht beeinträchtigt werden. Das Erscheinungsbild muss für den Kunden akzeptabel bleiben. Darüber hinaus muss das Isolierglas nach der Druckanpassung die Anforderungen der Produktnorm EN 1279, insbesondere hinsichtlich der Dauerhaftigkeit, erfüllen.

Aus diesem kurzen Überblick druckangepasster Systeme ergaben sich neben der Problematik der technisch/handwerklichen Umsetzbarkeit mehrere Fragestellungen, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens zu adressieren waren:

- a. Ab welcher Ortshöhendifferenz zwischen Herstell- und Einbauort ist eine Druckanpassung notwendig? Welchen Einfluss haben Aufbau und Format des Isolierglases?
- b. Wie lange muss der Scheibenzwischenraum geöffnet sein, um einen Druckausgleich durch Aus- oder Einströmen des Gases bzw. der Luft zu garantieren? Welchen Einfluss haben Aufbau und Format des Isolierglases und die Schlauch-/Kapillardimensionen?
- c. Lässt sich der Einbau von Metallkapillaren und Kunststoffschläuchen in den Herstellungsprozess von Isolierglas integrieren und ist die Handhabung dieser Druckanpassungssysteme baustellengerecht?
- d. Ist die Dauerhaftigkeit gemäß EN 1279 nach dem Öffnen und Wiederverschließen des SZR gewährleistet?

5.3 Rechenmodelle zur Druckanpassung über Kapillare

5.3.1 Akzeptable Ortshöhendifferenzen zwischen dem Herstell- und Einbauort ohne Druckanpassung

Akzeptable Höhenunterschiede wurden für mehrere Formate und Aufbauten mit Hilfe der Bemessungssoftware „Üko Professionell 3S“ berechnet. Dabei wurde angenommen, dass sich Klimlasten, Windlasten und Höhenunterschiede ungünstig überlagern.

Im Detail wurden folgende Annahmen bzgl. der Klima- und Windlasten gemacht:

Lastfall Sommer: +25 K, -40 hPa

Lastfall Winter: -25 K, +40 hPa

Diese Temperatur- und Luftdruckbelastungen wurden in Anlehnung an die Lastfallannahmen der TRLV [26] ausgewählt und kombiniert mit

Windlasten von 0 kN/m², 1 kN/m² sowie 2 kN/m².

Für jeden dieser Lastfälle (Klima + Wind) wurde dann die Ortshöhendifferenz zwischen Herstell- und Einbauort schrittweise (100 m Schritte) erhöht, bis die zulässige Biegezugspannung in einer der Scheiben als überschritten angezeigt wurde. Die vorhergehende Ortshöhendifferenz (100 m weniger), bei der die Biegezugspannungen in den Scheiben noch zulässig waren, ist als „akzeptable Höhendifferenz“ in der Tabelle 8 ablesbar.

Tabelle 8 Akzeptable Höhendifferenzen

Aufbau	Wind kN/m ²	Akzeptable Höhendifferenz in m							
		350 mm x 500 mm		500 mm x 700 mm		700 mm x 1000 mm		1000 mm x 2000 mm	
		Float	ESG	Float	ESG	Float	ESG	Float	ESG
4 / 16 / 4	0	300	2100	900	3000	2600	3000	3000	3000
	1	150	2000	600	3000	1900	3000	1000	3000
	2	*	1800	300	3000	1000	3000	*	3000
4 / 12 / 4 / 12 / 4	0	0	1500	300	2500	1400	3000	3000	3000
	1	*	1400	200	2400	1100	3000	1300	3000
	2	*	1300	0	2200	600	3000	*	3000
4 / 16 / 4 / 16 / 4	0	*	1200	0	1800	900	2600	2200	3000
	1	*	1100	*	1700	600	2400	700	3000
	2	*	1000	*	1600	250	2200	*	3000
8 / 16 / 4 / 16 / 4	0	*	1000	*	1200	200	1500	1000	3000
	1	*	1000	*	1200	100	1400	600	3000
	2	*	1000	*	1100	100	1400	*	2800

Berechnungen mit Üko Professional 3S Vers.9.1

Membranspannungen berücksichtigt

Isochorer Druck

Lastfall Sommer: 25 K -40 hPa

12,50 kN/m²

Lastfall Winter: -25 K 40 hPa

-12,50 kN/m²

... Akzeptable Höhendifferenz < 1000 m. Druckanpassung oder ESG erforderlich

* (Klima + Wind) nicht bemessbar, auch wenn Höhendifferenz = 0. ESG erforderlich.

Beispiel zum Lesen der Tabelle, Aufbau 4/16/4, Format 500 mm x 700 mm, Floatglas: Ohne Windbelastung (Wind 0 kN/m²) kann ein solches Isolierglas einen Höhenunterschied zwischen Produktions- und Einbauort von 900 m verkraften. Bei Windlasten von 1 bzw. 2 kN/m² sind nur 600 m bzw. 300 m Höhenunterschied akzeptabel.



Für die dunkelgelben und mit einem * markierten Felder in Tabelle 8 führt bereits die Kombination aus Klima- und Windlasten zu einer Überschreitung der zulässigen Biegezugspannung in einer der Scheiben. Diese MIG sind nicht bemessbar. Es müsste entweder eine größere Scheibendicke oder ESG gewählt werden, oder eine permanente Druckentspannung.

Akzeptable Höhendifferenzen größer als 3000 m sind als „3000 m“ ausgewiesen.

Kritisch im Sinne von geringerer akzeptabler Höhendifferenz sind kleine Formate, größere Scheibenzwischenräume und asymmetrische Aufbauten. Bei großen Formaten ist eine zunehmende Windbelastung kritisch.

Mit ESG können alle in der Tabelle aufgeführten Aufbauten/Formate bis zu einer Höhendifferenz von mindestens 1000 m realisiert werden, viele sogar bis zu wesentlich größeren Höhendifferenzen.

Hellgelb unterlegte Felder zeigen akzeptable Höhenunterschiede kleiner als 1000 m an. Es handelt sich um Isoliergläser, bei denen die Ausführung in ESG erwogen werden sollte oder eventuell sogar zwingend ist. (Der Grenzwert „1000 m“ ist hier willkürlich gewählt und könnte von Hersteller zu Hersteller je nach Produktionshöhe und Liefergebiet individuell festgelegt werden.)

Den Industriepartnern erscheinen die berechneten akzeptablen Höhenunterschiede teilweise zu niedrig. In der Praxis erfahren MIG häufig größere Ortshöhenunterschiede, ohne Glasbruch zu erleiden. Eine Ursache für diesen scheinbaren Widerspruch könnte in dem probabilistischen Konzept liegen, dass die TRLV zur Festlegung der zulässigen Biegezugspannung zu Grunde legt. So beruht der Wert der zulässigen Biegezugspannung von 18 MPa auf einer Versagenswahrscheinlichkeit von ungefähr 10^{-6} [29]. Das bedeutet, dass nur bei einem von einer Million Probekörpern damit zu rechnen ist, dass er bei einer Spannung von 18 MPa wirklich bricht. Die Versagenswahrscheinlichkeit steigt mit der wirkenden Belastung an. Bei einer resultierenden Biegezugspannung > 30 MPa geht die Versagenswahrscheinlichkeit gegen 1 [29]; d.h. fast alle Probekörper einer Stichprobe würden versagen.

Akzeptiert man eine höhere Versagenswahrscheinlichkeit, etwa von 10^{-5} oder 10^{-4} , so wird eine höhere zulässige Spannung in die Berechnungen einfließen, und man erhält größere Werte für die akzeptablen Höhendifferenzen; Werte, die besser mit den Erfahrungen aus der Praxis übereinstimmen. Allerdings müsste man dann die erhöhte Versagenswahrscheinlichkeit auch während der normalen Lebensdauer des Isolierglases akzeptieren. Gemäß Feldmeier [29] wird die Thematik der Bruchwahrscheinlichkeiten im Rahmen der Weiterentwicklung der DIN 18008 [21] in den zuständigen Gremien nochmals diskutiert werden. Aktuell können im Rahmen dieses Forschungsvorhabens keine weiteren Aussagen getroffen werden.

5.3.2 Strömungsverhalten bei der Druckanpassung

Der Volumenstrom dV/dt eines Gases durch ein Rohr / eine Kapillare wird nach Hagen und Poiseuille [24] beschrieben durch:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \Delta p}{128 \cdot \eta \cdot l}$$

dV/dt : Volumenstrom durch die Kapillare, d : Innendurchmesser der Kapillare, l : Länge der Kapillare, η : dynamische Viskosität der Luft, Δp : Druckdifferenz zwischen Anfang und Ende der Kapillare

Besonders zu beachten ist, dass der Volumenstrom proportional zur vierten Potenz des Rohrdurchmessers d ist; d.h., wird der Durchmesser z.B. halbiert, so fällt der Volumenstrom auf $2^{-4} = 1/16$ ab. Dieser Effekt ist in Abbildung 30 veranschaulicht. Des Weiteren gehen noch die Rohrlänge l sowie die Viskosität η des Gases in die Gleichung ein.

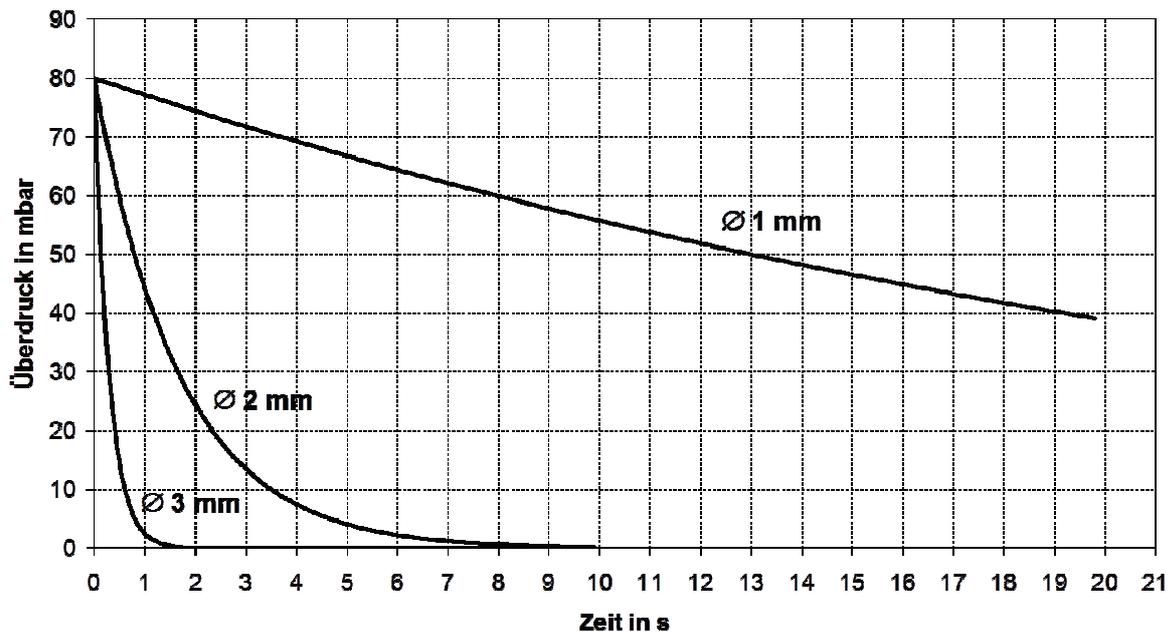


Abbildung 30 Druckabbau über Rohre unterschiedlicher Innendurchmesser

Basierend auf der Hagen-Poiseuille-Gleichung wurde ein Rechenmodell erstellt, mit dem für einen ortshöhenbedingten Anfangsdruckunterschied und in Abhängigkeit von Scheibenformat und -aufbau sowie Rohrdurchmesser und -länge die Scheibenspannung als Funktion der Zeit ermittelt wird.

Die Hagen-Poiseuille-Gleichung gilt nur für laminare Strömungen. Deshalb muss bei jeder Anwendung der Gleichung geprüft werden, ob die Bedingungen für eine laminare Strömung erfüllt sind.

mung vorliegen. Dies geschieht in dem Rechenmodell durch Berechnung der sogenannten Reynoldszahl [27]. Wenn die Bedingungen für eine laminare Strömung erfüllt sind, dann ist die Reynoldszahl kleiner 2000.

Tabelle 9 zeigt die Ergebnisse einiger Berechnungen, die gemacht wurden in der Absicht, einen Druckausgleich in 30 – 60 s zu erzielen. Aufgeführt ist die Scheibenspannung nach Ausströmzeiten von 30 und 60 s.

Tabelle 9 Druckabbau im SZR über Kapillare

Aufbau 4 / SZR / 4		Für dH 500 m	Für Kapillare mit Länge 100 mm u. Durchmesser d						
			d = 1,0 mm		d = 2,0 mm		d = 2,5 mm		
Format mm	SZR mm	Sigma MPa	Sigma in MPa nach Ausströmzeit						
			30 s	60 s	30 s	60 s	30 s	60 s	
350 x 500	16	8,3	0						
	32	11,8	0						
500 x 700	16	5,9	1,2	0,2	0				
	32	10,1	1,8	0,3	0				
700 x 1000	16	3,4	2,7	2,2	0				
	32	6,3	5,1	4,1	0				
1000 x 2000	16	1,5	1,5	1,5	1,3	1,1	1,0	0,6	
	32	3,1	3,1	3,0	2,6	2,1	1,9	1,2	

Es zeigt sich, dass eine Kapillare mit einem Innendurchmesser von 1 mm nur bei relativ kleinen Formaten einen Druckausgleich in 30 – 60 s ermöglicht. Bei mittel- und großformatigen Scheiben (700 mm x 1000 mm, 1000 mm x 2000 mm) sind größere Innendurchmesser (2 bis 3 mm) erforderlich. Dies liegt daran, dass die das Ausströmen antreibende Druckdifferenz bei großformatigen Scheiben relativ klein ist, das ausströmende Volumen dagegen groß.

Die theoretischen Ergebnisse konnten, im Prinzip, in einem Experiment eines der Industriepartner bestätigt werden. Ein Isolierglas, 700 mm x 1000 mm, 4/16/4, wurde auf 250 m ü. NN hergestellt und auf eine Höhe von 1350 m transportiert. Dort wurde eine Druckanpassung über den für diesen Zweck üblichen FEP-Schlauch mit 0,8 mm Innendurchmesser durchgeführt und dabei die Scheibendurchbiegung beobachtet. Erst nach mehr als 40 min waren die Scheiben wieder plan, d.h. war der Druckausgleich abgeschlossen.

Einfluss des Abstandhalters

Das auf der Hagen-Poiseuille-Gleichung basierende Rechenmodell für die Ausströmzeiten berücksichtigt nur laminare Strömungen in einem Rohr (Schlauch, Kapillare). In einem Isolierglas wird das Strömungsverhalten aber auch durch den Abstandhalter, insbesondere dessen Perforierung, und eventuell auch durch die Schüttung des Trockenmittels beeinflusst. Es sind längere Zeiten zum Druckausgleich zu erwarten als nach Hagen-Poiseuille berechnet.

Der Einfluss des Abstandhalters auf die Geschwindigkeit des Druckausgleichs wurde experimentell untersucht [30]. Die verwendeten Probekörper waren im Format 700 mm x 1000 mm, und der Aufbau war 4-16-4. Zwei Anschlüsse wurden in den Randverbund der Probekörper montiert, einer für eine Luftpumpe (Pos. 4 in Abbildung 31), und einer für eine Kapillare, durch die der Druckausgleich erfolgte (Pos. 6). Die Kapillare endete entweder im Abstandhalter oder sie war über eine Bohrung durch den Abstandhalter direkt in den SZR gelegt. Im ersten Fall musste die ausströmende Luft zuerst die Perforierung des Abstandhalters durchdringen, bevor sie durch die Kapillare nach außen strömen konnte. Im zweiten Fall war nur der Strömungswiderstand der Kapillare zu überwinden. Die Scheibendurchbiegung wurde beidseitig mittig mit Wegaufnehmern gemessen (Pos. 8).

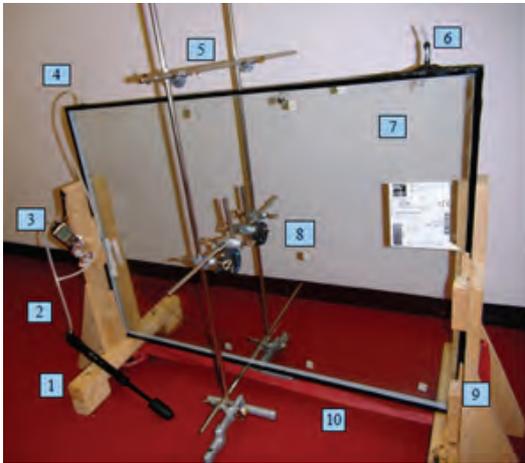


Abbildung 31 Versuchsaufbau um den Einfluss des Abstandhalters auf den Druckausgleich zu bestimmen

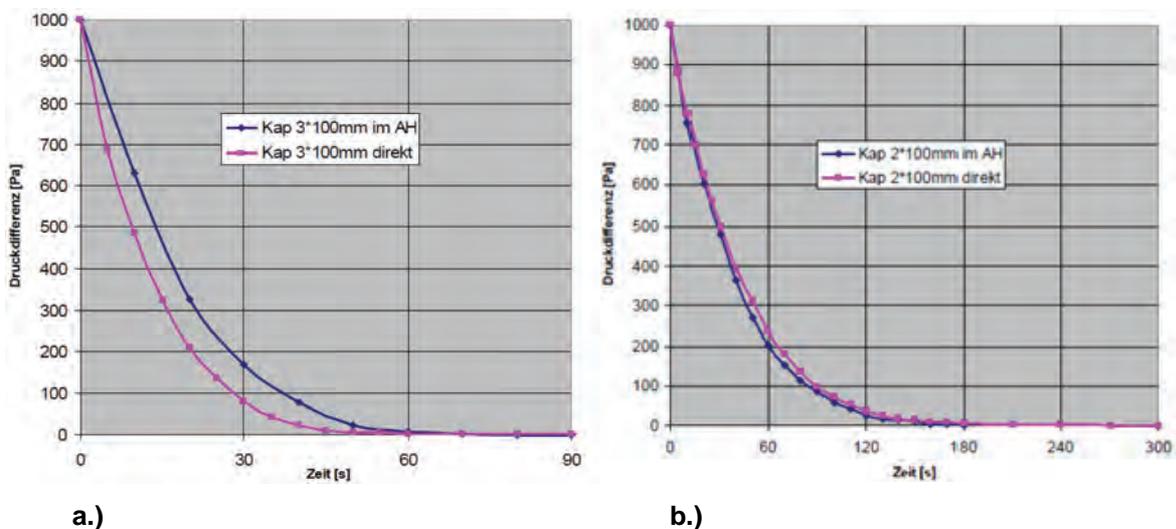


Abbildung 32 Einfluss des Abstandhalters auf den Druckausgleich
a.) Kapillare 100 mm lang, Innendurchmesser 3 mm
b.) Kapillare 100 mm lang, Innendurchmesser 2 mm



Nach Aufpumpen der Scheibe auf einen Differenzdruck von 1000 Pa wurde die montierte Kapillare geöffnet und der Innendruck als Funktion der Zeit bis zum Druckausgleich aufgezeichnet. Abbildung 32 zeigt die Ergebnisse.

Bei einem Kapillarinnendurchmesser von 3 mm macht sich die Perforierung des Abstandhalters bemerkbar. Der Druckausgleich über den Abstandhalter ist langsamer als der direkte Druckausgleich durch die Kapillare (Abbildung 32a). Bei einem Kapillarinnendurchmesser von 2 mm dagegen tritt kein signifikanter Unterschied auf (Abbildung 32b). Offensichtlich ist der Strömungswiderstand der Kapillare der zeitbestimmende Faktor. Dies würde natürlich umso mehr auch für dünnere Kapillare gelten. Wie sich später noch zeigen wird, waren von den untersuchten Metallkapillaren, diejenigen mit einem Innendurchmesser größer als 1 mm nicht verarbeitbar, weil sie zu steif sind und den Versiegelungsautomaten stoppen. Das bedeutet, für die praktisch einsetzbaren Kapillare (Durchmesser < 2 mm) ist die Abstandhalterperforierung bzgl. des Ausströmverhaltens vernachlässigbar.

5.3.3 Druckanpassung über eine bei der Auffahrt zum Einbauort geöffnete Kapillare

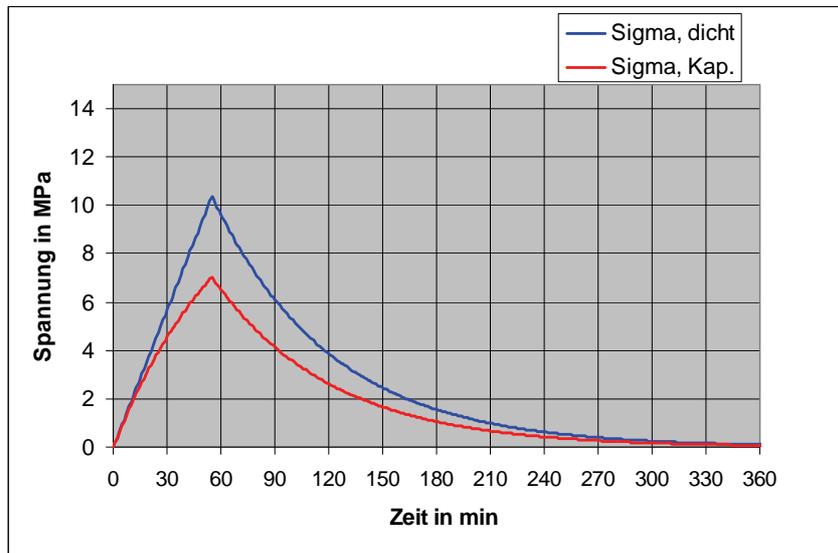
Im vorigen Kapitel hatte sich gezeigt, dass die Druckanpassung über eine Kapillare bei großformatigen MIG mit großem SZR in 30 – 60 s nicht erreichbar ist. Im Prinzip könnte man eine Kapillare mit größerem Durchmesser verwenden; aber wie sich im nächsten Kapitel noch zeigen wird, treten dann Probleme bei Verarbeitung und Dichtheit auf. Als Alternative zur Kapillare mit großem Durchmesser könnte man dem MIG mehr Zeit zum Druckausgleich geben, indem man die Kapillare schon zu Beginn der Auffahrt öffnet. Es würde dann ein kontinuierlicher Druckausgleich bereits während der Auffahrt erfolgen. Ein zusätzlicher Vorteil wäre, dass die MIG nie einer höheren Belastung durch einen großen Ortshöhenunterschied ausgesetzt würden. Ein Verdünnen des Argons im SZR durch eindringende Luft erscheint unwahrscheinlich. Erstens nimmt der Luftdruck bei der Auffahrt ab und Gas wird fortwährend aus dem SZR herausgedrückt. Zweitens, in einer relativ langen Kapillare ist das Konzentrationsgefälle gering, so dass auch der Einfluss der Diffusion gering sein sollte.

Rechenmodell zur einmaligen Druckanpassung

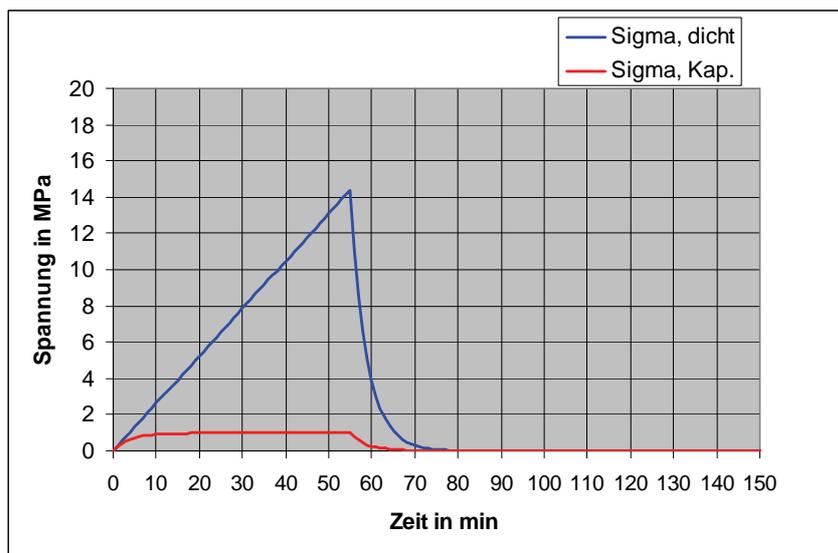
Das Rechenmodell simuliert eine Bergfahrt mit geöffneter Kapillare. Dabei werden ein Höhengradient von 20 m/min und ein Höhenunterschied von 1100 m angenommen. Die Scheibenspannung wird als Funktion der Zeit berechnet. Im Folgenden sind Ergebnisse für verschiedene MIG-Formate und Aufbauten in Tabelle 10 und Abbildung 33 präsentiert. Zum Vergleich sind auch Ergebnisse für die Auffahrt mit geschlossener Kapillare und anschließender Öffnung der Kapillare auf dem Berg aufgeführt.

Zwei Beispiele sind zur Veranschaulichung in Abbildung 33 grafisch dargestellt:

- Rote Kurven: Auffahrt mit geöffneter Kapillare
- Blaue Kurven: Auffahrt mit geschlossener Kapillare, dann Öffnung auf der Höhe



a.) 1000 mm x 2000 mm, 4-48-4



b.) 700 mm x 1000 mm, 4-32-4

Abbildung 33 Druckanpassung bei Auffahrt mit geöffneter bzw. geschlossener Kapillare
Kapillare: Innendurchmesser 1,3 mm, Länge 300 mm

Die Kurven in Abbildung 33 zeigen den Spannungsverlauf in den Scheiben eines MIG bei der Auffahrt und danach, bis der Druckausgleich vollständig erreicht ist. Die oberen (blauen) Kurven repräsentieren dichte MIG. Der Druck im SZR und die Scheibenspannung steigen während der Auffahrt kontinuierlich an. Nach 55 min (1100 m Höhenunterschied, 20 m/min) ist das Ziel erreicht. Die Scheibenspannung hat ihr Maximum. Dieses liegt mit über 10 bzw. 14 MPa recht hoch. Eine Druckanpassung wäre notwendig. Die Kapillare werden jetzt geöffnet, Gas strömt aus und der Druck fällt exponentiell ab. Der vollständige Druckausgleich dauert bei dem kleinen Format (Abbildung 33b) nur etwa 10 min, bei dem großen Format dagegen etwa 2 - 3 Stunden (Abbildung 33a). Letzteres liegt an dem großen Volumen, das Ausströmen muss, und dem geringen (Über-)Druck im SZR, der als treibende Kraft wirkt.



Öffnet man die Kapillare bereits zu Beginn der Auffahrt (untere, rote Kurven), so findet die Druckanpassung, zumindest teilweise, bereits bei der Auffahrt statt. Bei dem kleinen Format ist der Druckausgleich während der Auffahrt praktisch sofort und vollständig. Die Scheibenspannung steigt nie wesentlich an. Bei dem großen Format wird die Maximalspannung in den Scheiben reduziert, der vollständige Druckausgleich dauert aber praktisch genauso lange wie bei der Auffahrt mit der dichten Kapillare. Man könnte den Druckausgleich beschleunigen durch eine oder zwei zusätzliche Kapillare desselben Durchmessers oder eine Kapillare größeren Innendurchmessers. Beide Lösungsansätze bringen Probleme anderer Art mit sich, die in den folgenden Kapiteln ausführlicher behandelt werden. Dickere Kapillare sind zu steif und daher praktisch nicht mehr montierbar. Sie behindern die Bewegung des Versiegelungsautomaten und sie lassen sich auch nicht gasdicht verschließen. Mehrere (dünne) Kapillare bedeuten mehr Aufwand bei der Fertigung. Dünne Kapillare werden vom Versiegelungsautomaten in den Dichtstoff gedrückt und müssen dann wieder von Hand aus diesem befreit und gereinigt werden. Außerdem bedeuten mehr Kapillare auch mehr potentiell undichte Stellen im Randverbund.

In der nachfolgenden Tabelle 10 sind die Ergebnisse weiterer Modellrechnungen zusammengefasst. Angegeben sind die maximal erreichten Scheibenspannungen und die Zeit bis zum Druckausgleich gerechnet vom Beginn der Auffahrt. Dabei wird eine Druckanpassung als vollendet angenommen, wenn die Scheibenspannung unter 2 MPa gefallen ist. Das ist zwar eine willkürliche Festlegung, sie erscheint aber sinnvoll im Verhältnis zu den 18 MPa, die i.d.R. bei der Bemessung von Glasscheiben nach der TRLV als maximal zulässig angesetzt werden.

Die Berechnungen wurden für zwei Kapillartypen durchgeführt, die am aussichtsreichsten erschienen, praktische Probleme der Handhabung und der Gasdichtheit zu überkommen. Dies waren eine Kupferkapillare mit einem Innendurchmesser von etwa 1,3 mm und eine Edelstahlkapillare (SS) mit einem Innendurchmesser von 1 mm.

Tabelle 10 Druckanpassung über Kapillare nach bzw. während einer Bergfahrt
 Maximale Scheibenspannung und Zeit bis zur Druckanpassung bei Bergfahrt mit dichter bzw. offener Kapillare, 1100 m Höhenunterschied, Höhengradient 20 m/min

Format mm	Aufbau mm	Kapillare bei Auffahrt	Kapillare 300 mm lang			
			ID 1,321 mm (Cu)		ID 1,0 mm (SS)	
			Max. Scheiben- spannung MPa	Zeit bis Druck- anpassung min	Max. Scheiben- spannung MPa	Zeit bis Druck- anpassung min
350 x 500	4-16-4	dicht	18,6	1	18,6	1
		offen	0	0	0	0
	4-32-4	dicht	26,5	1	26,5	1
		offen	0	0	0	0
700 x 1000	4-16-4	dicht	7,5	5	7,5	16
		offen	0,5	0	1,6	0
	4-32-4	dicht	14,4	8	14,4	23
		offen	1,0	0	3,0	5
1000 x 2000	4-16-4	dicht	3,5	37	3,5	113
		offen	2,4	11	3,1	85
	4-32-4	dicht	7,0	82	7,0	251
		offen	4,7	57	6,1	225

Tabelle 10 zeigt: kleine und mittlere Formate, insbesondere mit großem Scheibenabstand, werden mechanisch stark belastet, aber ein Druckausgleich erfolgt schnell. Durch eine Auffahrt mit geöffneter Kapillare können Spannungsspitzen ganz vermieden werden, und die Kapillare kann am Zielort praktisch sofort verschlossen werden.

Große Formate sind geringeren Spannungen ausgesetzt, aber der Druckausgleich dauert sehr lange, insbesondere bei großem Scheibenabstand. Selbst wenn die Kapillare bei der Auffahrt geöffnet ist, sind lange Wartezeiten notwendig, bis der Druckausgleich erfolgt ist. Kapillare mit größerem Durchmesser würden die Zeit bis zum Druckausgleich erheblich verringern. Aber, wie bereits erwähnt und in den folgenden Kapiteln weiter ausgeführt, sie bereiten Probleme bei der Verarbeitung (Blockierung des Versiegelungsautomaten), und sie lassen sich nicht dicht verschließen.

Eine Kapillare größeren Durchmessers ließe sich strömungstechnisch ersetzen durch mehrere Kapillare kleineren Durchmessers. Diese wären zwar an sich verarbeitbar und verschließbar, aber der Einbau mehrerer Kapillare in den Randverbund wäre sehr arbeitsintensiv und es könnten Dichtungsprobleme durch vermehrte Grenzflächen auftreten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, die Auffahrt mit geöffneter Kapillare kann für kleine und mittlere Formate sinnvoll sein. Spannungsspitzen im Glas werden vermieden, und die MIG können nach der Auffahrt praktisch sofort dauerhaft verschlossen werden. Bei großformatigen MIG bleiben auch bei einer Auffahrt mit geöffneter Kapillare lange Wartezeiten am Einbauort bis zum Druckausgleich.



5.4 Handhabung von Kapillaren

5.4.1 Einbau von Kapillaren in MIG

Abbildung 34 zeigt den Einbau einer Kapillare in den Randverbund. Die Kapillare wird durch eine Bohrung im Abstandhalterrücken in den Abstandhalter geschoben. Die Durchtrittsstelle muss mit Butyl abgedichtet werden. Dann erfolgt die Versiegelung, nach Möglichkeit auf dem Versiegelungsautomaten. Probleme treten auf, wenn die Kapillare zu steif ist – der Versiegelungsautomat wird gestoppt, oder wenn die Kapillare zu flexibel ist – die Kapillare wird in den Dichtstoff gedrückt und muss manuell befreit und gereinigt werden. In beiden Fällen ist eine zeitaufwendige Handversiegelung notwendig.



a.)



b.)

Abbildung 34 a.) Kapillare im Abstandhalter b.) Kapillare ragt aus der Versiegelung heraus

Ein Einbau einer Kapillare, wie in Abbildung 34 dargestellt, resultiert nicht in einer guten mechanischen Verankerung der Kapillare im Randverbund. Wird an dem freien Kapillarende (Abbildung 34b) hantiert, etwa um die Kapillare zu öffnen oder zu verschließen, so muss damit gerechnet werden, dass die Butylierung an der Durchtrittsstelle durch den Abstandhalterrücken geöffnet wird, und/oder dass Spalte zwischen der Kapillaroberfläche und dem Dichtstoff entstehen oder vergrößert werden. Die Gasdichtheit des Randverbundes wäre nicht mehr gewährleistet.

Eine Verbesserung der Situation bringt ein Einbau der Kapillare wie in Abbildung 35 dargestellt. Die Kapillare liegt über eine Strecke von etwa 10 cm auf dem Abstandhalterrücken auf und ist in den Dichtstoff eingebettet. Ein Hantieren am freien Kapillarende führt nicht gleich zu einer Bewegung der ganzen Kapillare bis hin zur Durchtrittsstelle in den Abstandhalter.

Diese Bauweise wurde bei Kupferkapillaren (Abbildung 35b) angewendet, um Probekörper für die Gasverlustratenbestimmung gemäß EN 1279-3 herzustellen. (s. Kapitel 5.5)



a.)



b.)

Abbildung 35 Kapillare in Randverbund, über eine Länge von etwa 10 cm eingebettet in Dichtstoff, um eine sichere mechanische Verankerung zu gewährleisten
a.) Prinzipskizze
b.) Beispiel mit zwei Kupferkapillaren (Probekörper für EN 1279-3 Prüfung)

5.4.2 Öffnen und Verschließen von Kapillaren

Für das Öffnen und Verschließen von Metallkapillaren gibt es spezielle Werkzeuge. Mit einer Kapillarschneidezange kann eine Kapillare durchtrennt werden ohne den Querschnitt zu verformen. Solche Zangen sind im Laborhandel (Gaschromatographie) relativ preiswert erhältlich.

Mit einer Schließzange kann eine Kapillare durch Verquetschen verschlossen werden, wobei idealerweise ein Kaltverschweißen auftritt. Um ein Kaltverschweißen gleichbleibender, hoher Qualität zu gewährleisten, müssen verschiedene Parameter aufeinander abgestimmt werden. Neben dem Kapillarmaterial und dessen Wärmebehandlung sind der Schneidenwinkel und das Schneidenprofil der Schließzange sowie der Anpressdruck kritisch [31]. Hydraulisch angetriebene Schließzangen sind Handgeräten grundsätzlich überlegen, da sie eine höhere Schließkraft erzeugen können.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens stand keine hydraulisch betriebene Kapillarschließzange zur Verfügung. Stattdessen wurde ein Zangenschlüssel verwendet, der die aufgebrachte Handkraft zehnfach verstärkt. Es wurden damit Kupfer- und Edelstahlkapillare im weichgeglühten Zustand verschlossen (Abbildung 36).

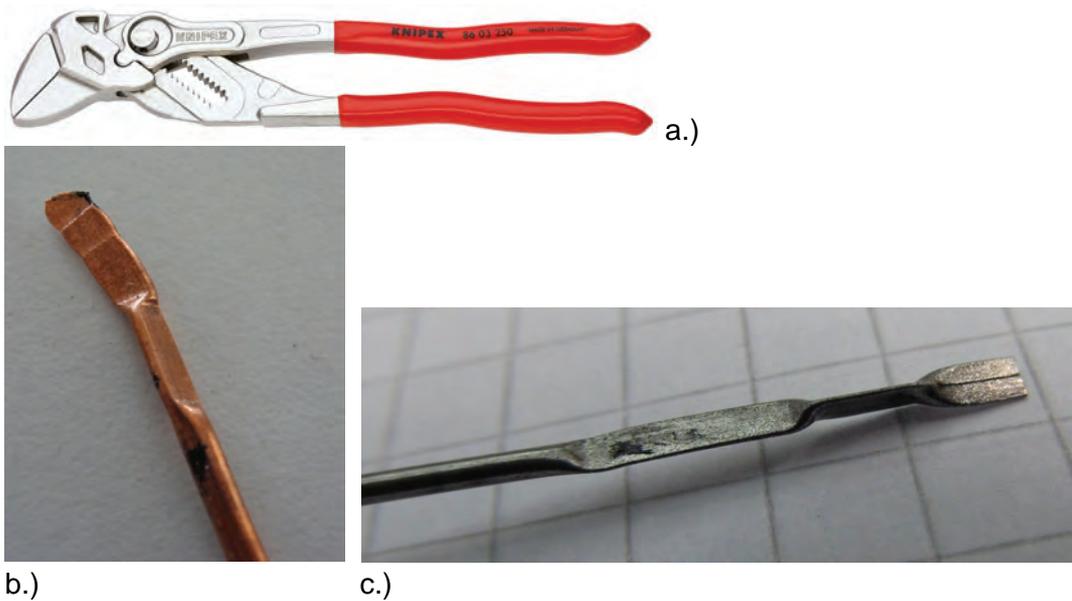


Abbildung 36 Mit Zangenschlüssel gasdicht verschlossene Kapillare
 a.) Zangenschlüssel b.) Kupferkapillare b.) Edelstahlkapillare

Die Gasdichtheit der Kapillare in Abbildung 36 wurde geprüft mit einem Versuchsaufbau gemäß Abbildung 37. Das verschlossene Ende der Kapillare steckt in einer mit Helium durchspülten Probenkammer. Die Eintrittsstelle der Kapillare in die Kammer ist mit Butyl abgedichtet. Die Kapillare ist mit Argongas beaufschlagt. Ist die Kapillare undicht, so dringt Argongas in die Probenkammer. Dort wird es von dem Heliumstrom mitgenommen und mit Hilfe eines Gaschromatographen nachgewiesen.

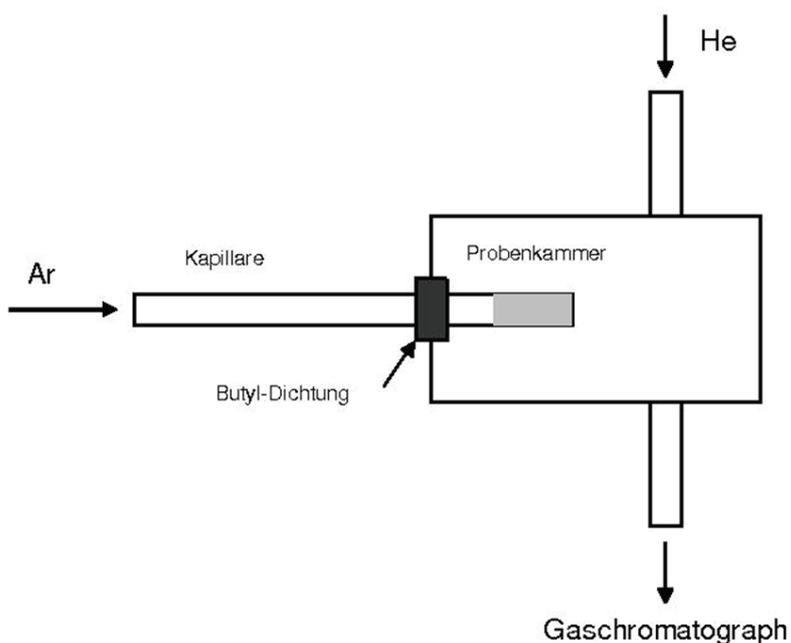


Abbildung 37 Versuchsaufbau zur Prüfung der Gasdichtheit einer Kapillare

Nur wenn eine Kapillare sich in diesem Test als gasdicht verschließbar erwiesen hat, macht es Sinn, Probekörper für eine Gasverlustenmessung gemäß EN 1279-3 herzustellen und zu prüfen.

5.5 Dauerhaftigkeit von Systemen zur einmaligen Druckanpassung

Nach den Erfahrungen der Forschungsstelle ist die Gasverlustrate (EN 1279-3) ein empfindlicherer Indikator für Undichtigkeiten (des Randverbundes) eines MIG als die Feuchtigkeitsaufnahme (EN 1279-2). Deshalb wurden die zu prüfenden Systeme den Klimabelastungen und der Gasverlustenmessung gemäß EN 1279-3 unterzogen. Abweichend von der Prüfnorm wurde die Gasverlustrate an drei statt zwei Probekörpern gemessen.

Im Verlauf des Forschungsvorhabens wurden folgende Systeme zur einmaligen Druckanpassung auf ihre Gasdichtheit hin geprüft:

1. FEP-Schlauch
2. Helantec
3. Kupferkapillare

Probekörperbeschreibung:

- 350 mm x 500 mm
- 4/16/4, Float
- Beschichtung auf Pos. 3
- Argonfüllung
- Abstandhalter Chromatech Ultra
- 1. Dichtstufe: Butyl
- 2. Dichtstufe: Polysulfid

In den Randverbund waren jeweils mehrere Schläuche/Kapillare bzw. Verschlüsse eingebaut, um die statistische Aussagekraft der Untersuchungen zu erhöhen:

1. Vier FEP-Schläuche, s. Abbildung 38a
2. Acht finale Helantec-Verschlüsse, s. Abbildung 38b
3. Zwei Kupferkapillare, s. Abbildung 35. Hier wurde versucht, durch eine gute Einbettung und Verankerung der Kapillare im Dichtstoff das Ausmaß einer eventuell auftretenden Grenzflächendiffusion gering zu halten. Die Kupferkapillaren konnten nur auf einer (langen) Seite des MIG eingebaut werden. Ansonsten hätten die Probekörper nicht in die Messrahmen für die Gasverlustenbestimmung gepasst.

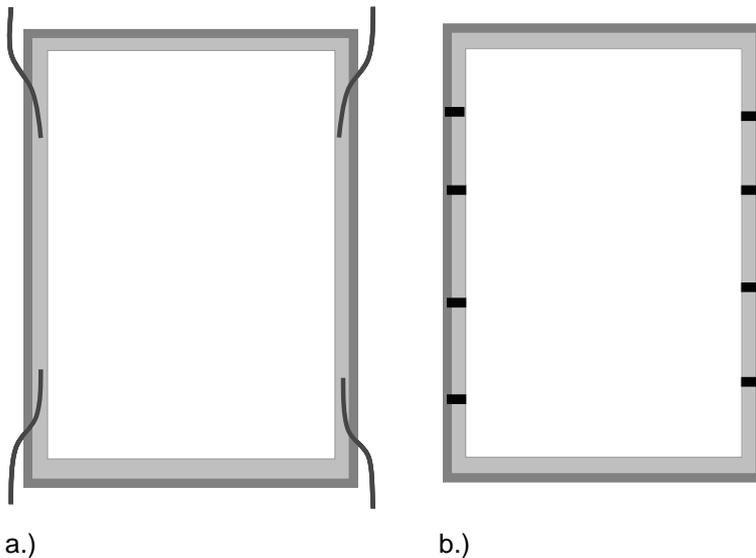


Abbildung 38 Probekörper für Dauerhaftigkeitsuntersuchungen
a) mit FEP-Schlauch
b) mit Helantec-Verschlussstopfen

Die Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsprüfungen gemäß EN 1279-3 sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Zum Vergleich sind am Ende der Tabelle auch noch mal die Anforderungen gemäß der Norm (Sollwerte) aufgeführt.

Tabelle 11 Ergebnisse der Prüfung nach EN 1279-3 an jeweils 3 Probekörpern

FEP Schlauch				
Gasverlustrate	%/a	zwischen 8 u. 10 %, keine Stabilisierung		
Gasvolumenanteil	%	45	51	21
Helantec				
Gasverlustrate	%/a	1,7	1,4	1,6
Gasvolumenanteil	%	93	92	92
Kupferkapillare				
Gasverlustrate	%/a	6,2	0,96	3,1
Gasvolumenanteil	%	86	90	85
Sollwerte				
Gasverlustrate	%/a	< 1		
Gasvolumenanteil	%	90 (+10, -5)		

Genau wie erwartet, erwiesen sich die FEP-Schläuche als undicht für Argongas. Selbst bei den nicht gealterten Rückstellmustern war der Gasvolumenanteil nach einigen Wochen der Lagerung in Normalklima auf unter 70 % gefallen. Das bedeutet FEP-Schläuche sind nicht geeignet zur einmaligen Druckanpassung. Die Anforderungen der Produktnorm EN 1279-3 bzgl. der Gasverlustrate können nicht eingehalten werden.

Die mit den jeweils acht finalen Helantec-Verschlüssen ausgestatteten Probekörper erfüllen die Anforderungen der Norm nicht ganz. Wenn man aber berücksichtigt, dass, nach den Erfahrungen der Prüfstelle ähnlich aufgebaute Probekörper ohne Helantec-Verschlüsse Gasverlusten von 0,7 bis 0,8 %/a aufweisen, dann erscheint es durchaus plausibel, dass ein Probekörper mit einem einzelnen Helantec-Verschluss die Anforderungen der Norm erfüllen würde.

Bei den Probekörpern mit jeweils zwei eingebauten Kupferkapillaren sind die Ergebnisse nicht eindeutig. Aber zumindest einer der Probekörper hat die Anforderungen der EN 1279-3 erfüllt. Bei den beiden anderen ist nicht klar, warum sie die Grenzwerte überschritten haben. Es sind keine auffälligen Fehlstellen an den Probekörpern sichtbar. Eventuell hätte man die Kapillaren nach der Gasverlustbestimmung ausbauen können, um sie einer individuellen Dichtheitsprüfung wie in Kapitel 5.4.2 beschrieben zu unterziehen. Damit hätte man zumindest eine potentielle Ursache für die Undichtigkeit der Probekörper ermitteln bzw. ausschließen können.

Das Helantec-System (Methode 5 in Kapitel 5.2) bedarf noch einer ergänzenden Bemerkung. Bei diesem System zur Druckanpassung wird das Isolierglas zunächst mit einem provisorischen Verschluss ausgestattet. Dieser bleibt i.d.R. nur einige Tage bis wenige Wochen im Isolierglas, bis die eigentliche Druckanpassung vorgenommen wird. Trotzdem könnte dieser provisorische Verschluss die Ursache eines Argonverlustes sein. Deshalb erschien eine experimentelle Prüfung der Gasdichtheit sinnvoll.

Die Probekörper waren genauso aufgebaut wie zu Anfang dieses Kapitels (5.5) beschrieben, jedoch mit acht provisorischen an Stelle der finalen Verschlussstopfen. Die Ar-Konzentrationen wurden sofort nach der Anlieferung und dann wieder nach einer Woche Lagerung in Wechselklima gemäß EN 1279 bzw. Normalklima gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 zusammengefasst:



Tabelle 12 Argonvolumenanteil in % in MIG-Probekörpern mit acht eingebauten provisorischen Helantec-Verschlüssen
Im Anlieferungszustand und nach einer Woche Wechselklima bzw. Normalklima.
Gemessen zerstörungsfrei mit „Gasglass Handheld V2“ der Fa. Sparklike

PK-Nr.:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Anlieferungszustand									
	94	95	92	93	93	94	97	91	96	94
	Nach 1 Woche EN 1279 Wechselklima					Nach 1 Woche Normalklima				
	93	94	92	93	92	94	97	91	96	94

Es sind keine signifikanten Änderungen der Ar-Konzentrationen erkennbar, der provisorische Verschluss kann für kurze Zeiträume (einige Tage bis wenige Wochen) als ausreichend gasdicht betrachtet werden.

5.6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen – Einmalig druckangepasste Systeme

Eine einmalige Druckanpassung über eine Kapillare ist prinzipiell möglich. Idealerweise erfolgt die Druckanpassung bereits während der Auf- bzw. Abfahrt auf/von einem Berg. Es ergeben sich jedoch Einschränkungen, die in erster Linie aus der technischen Umsetzbarkeit resultieren. Die automatisierte Fertigung wird u.U. durch eine Metallkapillare im Randverbund behindert oder sogar unmöglich gemacht. Das gasdichte Verschließen von Metallkapillaren hat sich als schwierig erwiesen. Die Kapillare muss grundsätzlich als potenzielle Fehlstelle im Randverbund betrachtet werden. Selbst wenn es gelingt, die Kapillare gasdicht zu verschließen, so können doch der Durchbruch durch den Abstandhalterücken und die Grenzflächen zum Dichtstoff einen Pfad für entweichendes Gas und eindringende Feuchtigkeit bilden. Die Anforderungen an die Fertigungsqualität müssen bei einem MIG mit Metallkapillare noch höher angesetzt werden als bei einem konventionellen MIG. Kunststoffkapillare scheiden als Alternative aus. Sie lassen sich zwar gut verarbeiten, aber Kunststoffe sind nicht gasdicht. MIG mit Kunststoffkapillare können daher die Anforderungen der Norm EN 1279-3 nicht erfüllen.

Tabelle 13 fasst die Erfahrungen und Ergebnisse zusammen, die mit den im Rahmen dieses Forschungsvorhabens geprüften Systemen gewonnen wurden.

Tabelle 13 Verarbeitbarkeit und Dichtheit von Kapillaren

Innendurchmesser / Außendurchmesser in mm	Versiegelung mit Automat	Kapillare verschließbar mit Zangenschlüssel	MIG Probekörper erfüllt EN1279-3
Edelstahl			
3,0 / 4,0	Automat bleibt stehen, Handversiegelung	nein	-
2,0 / 3,0	akzeptabel	nein	-
1,0 / 1,6	Kap. wird in Dichtstoff gedrückt, Handversiegelung	schwierig	-
1,0 / 1,2	Kap. wird in Dichtstoff gedrückt, Handversiegelung	ja	-
Kupfer			
1,3 / 2,3	Automat bleibt stehen, Handversiegelung	ja	2 neg., 1 pos. Resultat
FEP			
1,0 / 1,6	Kap. wird in Dichtstoff gedrückt, Handversiegelung	-	nein
Helantec (zum Vergleich)	-	-	ja

Die Verarbeitbarkeit von Kapillaren schränkt den Bereich geeigneter Kapillarinnendurchmesser und Wandstärken erheblich ein. Das wiederum wirkt sich auf den Bereich der Scheibenformate und -aufbauten aus, für die grundsätzlich eine Druckanpassung über Kapillare in Frage kommt oder sinnvoll erscheint:

- Für kleine (350 mm x 500 mm) bis mittlere (700 mm x 1000 mm) Scheibenformate ist ein Druckausgleich über Kapillare möglich. Die Kapillare sollte vor der Auffahrt auf einen Berg geöffnet werden. Dadurch werden, insbesondere bei kleinen Formaten und großen Scheibenzwischenräumen, Spannungsspitzen in den Glasscheiben vermieden. Kurz nach Ankunft am Einbauort ist der Druckausgleich abgeschlossen, so dass das MIG (bzw. die Kapillare) praktisch sofort final verschlossen werden kann.
- Bei großen Scheibenformaten (1000 mm x 2000 mm) ist die mechanische Belastung der Scheiben wesentlich geringer, aber die Druckanpassung dauert vergleichsweise lange. Selbst wenn die Kapillare bei der Auffahrt auf einen Berg geöffnet ist, kann die Zeit bis zum Druckausgleich noch im Stundenbereich liegen.

Die vorausgegangenen Aussagen sind stark generalisiert. Im Einzelfall sollte eine Überprüfung der auftretenden Scheibenspannungen und der benötigten Zeiten zum Druckausgleich mit dem Rechenmodell erfolgen.



Ansatzpunkte zur Fortführung der Untersuchungen:

- Analyse, wodurch die festgestellten Undichtheiten bei MIG-Probekörpern mit Metallkapillaren im Wesentlichen bedingt sind (Undichtigkeit des „Verschlusses“ der Kapillare, Gasdiffusion an der Grenzfläche zwischen Kapillare und Dichtstoff, Undichtigkeit des Durchbruchs durch den Abstandhalterrücken)
- Andere Kapillartypen, insbesondere Materialien, z.B. Ni oder Al
- Eventuell auch metallisierte Kunststoffschläuche/-kapillare. (Eine erste Internetrecherche im Rahmen dieses Forschungsvorhabens brachte hierzu keine Ergebnisse.)
- Anderes Werkzeug zum Verschließen – nach Möglichkeit Kaltverschweißen – der Kapillare
- Verbesserung der Arbeitstechniken beim Einbau einer Kapillare in den Randverbund:
 - Fixierung der Kapillare auf dem Abstandhalterrücken vor der Versiegelung
 - Butylierung der Durchtrittsstelle im Abstandhalterrücken
 - Parameter bei der automatischen Versiegelung, z.B. Winkel zwischen Kapillare und Kante (damit der Automat nicht durch das herausragende Kapillarende gestoppt wird)
 - Oberflächenbehandlung der Kapillare, um bessere Haftung zum Dichtstoff zu erzielen
- Verwendung von Kapillaren mit größerem Innendurchmesser sollte ermöglicht werden, damit die strömungstechnischen Beschränkungen auf kleine und mittlere Formate aufgehoben werden
- Andere Methoden zur Druckanpassung, wie etwa Ventile, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht untersucht wurden, weil sie als weniger aussichtsreich und vergleichsweise teuer eingeschätzt wurden



6 Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 1279
Glas im Bauwesen – Mehrscheiben-Isolierglas
Berlin, Beuth Verlag GmbH
- [2] Patent DE 35 36 387 A1
Deutsches Patentamt, 1987
- [3] VisionWall – High performance window and curtain wall systems
EnVision (Shanghai) Co. Ltd.
www.envisionwall.com
- [4] Closed-Cavity Fassade
http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Fassade-Closed-Cavity-Fassade_2996313.html
- [5] Karagiozis A. N.
Pressure equalized insulated glass units in exterior building envelopes
ASHRAE 2007, Building X, Seite 1 bis 12
- [6] Capillary tubes & breather tubes
Technical Service Bulletin IG13 – 05/08
www.cardinalcorp.com
- [7] Internal moisture dynamics in Solera TGU's
www.advancedglazings.com
- [8] Patent US 2012/0017524 A1
US Patent Office, 2012
- [9] Patent US 8.782.971 B2
US Patent Office, 2014
- [10] Küffner P.
Überlegungen und Experimente zur Entwicklung einer druckentspannten Isolierglasscheibe
Dissertation, Universität Dortmund, 1998
- [11] Patent DE 38 08 907 A1
Deutsches Patentamt, 1989
- [12] Cossavella M., Panait A.
"Vitragé Respirant": A new type of insulating glass allowing for improved thermal and acoustic insulation
Glass Performance Days Finland 2009
- [13] Belüftungselemente (protective vents) von W.L. Gore & Associates Inc.
http://www.gore.com/en_xx/products/venting/protective/index.html?rdct=ijdgpvmtgurl
- [14] Self-conditioning Fassade
<http://www.iconic-skin.com/scf/technik/#c225>
- [15] Patent US 6,553,728 B1
US Patent Office, 2003
- [16] HAART valve (High Altitude Argon Retention Technology)
Vanguard Windows
www.ppiws.com/vanguard
- [17] Viridian, CDR Performance Systems
www.viridianglass.com
- [18] Meipa AL7 Two-Way Valve
Technical Data Sheet SCTVTW Rev. 01, 01.01.2012
www.al7.it

- [19] Helantec Ventil, Helantec GmbH
www.helantec.de
- [20] Altimeter, Rottler und Rüdiger und Partner GmbH
www.rotter-ruediger.de
- [21] DIN 18008-2: Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 2: Linienförmig gelagerte Verglasungen
- [22] Steuer- und Regelungssysteme für Flüssigkeiten und Gase:
<https://www.buerkert.de/de/>
<http://www.sensortechnics.com/de/produkte/weitere-produkte/miniatur-magnetventile/>
<http://www.theleeco.com/products.cfm>
- [23] Elastomerventile:
<http://www.minivalve.com/>
- [24] Gesetz von Hagen-Poiseuille:
http://de.wikipedia.org/wiki/Gesetz_von_Hagen-Poiseuille
- [25] Feldmeier, F.
Klimabelastung und Lastverteilung bei Isolierglas,
Stahlbau 75 (2006), Heft 6, Seite 467 bis 478
- [26] Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen (TRLV); Deutsches Institut für Bautechnik, August 2006
- [27] <http://de.wikipedia.org/wiki/Reynolds-Zahl>
- [28] Barometrische Höhenformel
http://de.wikipedia.org/wiki/Barometrische_H%C3%B6henformel
- [29] Kommentare von Herrn Prof. Feldmeier während des 1. Projekttreffens am 30.04.2013 und des 2. Projekttreffens am 27.05.2015
- [30] Huber, M.
Untersuchungen zum Druckausgleich bei druckangepassten Isolierglassystemen
Diplomarbeit, Hochschule Rosenheim, Dezember 2013
- [31] Norton, J.
Choosing the right tools for cold welding
www.chem.info, Dezember 2013

7 Danksagung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumordnung gefördert (Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-12.12).

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Das Forschungsprojekt wurde in beratender Funktion durch eine projektbegleitende Arbeitsgruppe betreut. Den Mitgliedern des Beratergremiums gilt besonderer Dank:

Prof. Dr. Franz Feldmeier	Hochschule Rosenheim
Dr. Roland Rossi	Glas Facade Engineering (GFE)
Prof. Dr. Armin Schwab	Ingenieur- u. Sachverständigenbüro Schwab
Dr. Michael Brüggemann	Forschungsinitiative Zukunft Bau

Besonderer Dank gebührt auch folgenden Industriepartnern, die das gesamte Projekt sowohl ideell als auch finanziell unterstützten und somit zum Gelingen beitrugen:

SANCO[®]

SANCO Isolierglasgruppe
vertreten durch:
Sanco Beratung Glas Trösch GmbH,
Nördlingen
Glas Müller Vetri, Bozen

Fenster, Türen und Glasanbauten
FINSTRAL[®]

Finstral AG, Unterinn

Wir bedanken uns auch bei der Fa. RAICO Bautechnik GmbH, Pfaffenhausen, für die unentgeltliche Bereitstellung einer Fassadenaufsatzkonstruktion vom Typ THERM+, H-V Standard. Ferner hat uns die Fa. FEINROHREN SPA, Passirano (Brescia), Kupferkapillare kostenlos zur Verfügung gestellt.



ift Rosenheim
Theodor-Gietl-Straße 7-9
83026 Rosenheim

Tel.: +49 (0) 80 31 / 261-0
Fax: +49 (0) 80 31 / 261-290
E-Mail: info@ift-rosenheim.de
www.ift-rosenheim.de

© ift Rosenheim 2015