

F 2858

Norbert Sack, Ansgar Rose

Energieeffizientes Mehrscheiben-Isolierglas Untersuchungen von technischen Maßnahmen zur Reduzierung des Flächengewichtes



Fraunhofer IRB Verlag

F 2858

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2013

ISBN 978-3-8167-9109-6

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/bauforschung

Bitte beachten:

Fehlende Seiten sind **Leerseiten**, die bei Erstellung der PDF-Datei für den Download nicht berücksichtigt wurden

Fraunhofer IRB Verlag



.

. .



Flächengewicht Mehrscheiben-Isolierglas Abschlussbericht

. . .

1.1

Thema	Energieeffizientes Mehrscheiben-Isolierglas – Untersuchungen von technischen Maßnahmen zur Reduzierung des Flächengewichtes
Kurztitel	Flächengewicht Mehrscheiben-Isolierglas
Gefördert durch	Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raum- forschung (Aktenzeichen: SF-10.08.18.7-10.13)
Forschungsstelle	ift gemeinnützige Forschungs- und Entwicklungs- gesellschaft mbH Theodor-Gietl-Straße 7–9 83026 Rosenheim
Projektleitung	DiplPhys. Norbert Sack
Projektbearbeitung	Dr. Ansgar Rose

Rosenheim, Dezember 2012

Inhaltsverzeichnis

.

10 A 1



Inhaltsverzeichnis	Seite
Zusammenfassung	1
Abstract	5
1 Einleitung	9
1.1 Motivation	9
1.2 Ausgangsbasis für das Vorhaben	10
1.3 Projektgruppe	11
2 Prinzipielle Möglichkeiten zur Reduzierung des Flächengewicht	s 13
2.1 Allgemeine Anforderungen an Mehrscheiben-Isoliergläser	13
2.2 Einsatz von dünnen Gläsern	14
2.3 Kunststofffolie als Ersatz der mittleren Scheibe	16
2.4 Kunststoffplatte als Ersatz der mittleren Scheibe	17
2.5 Kunststoffplatten als Ersatz der äußeren Scheiben	18
2.6 Kombination aus den genannten Möglichkeiten	19
2.7 Mögliche Gewichtsreduzierung	19
2.8 Priorisierung im Rahmen des Forschungsvorhabens	20
3 Dünne Glasscheiben	23
3.1 Untersuchungsprogramm spezifisch zur Produktgruppe	23
3.2 Überprüfung der statischen Dimensionierungsregeln	25
3.2.1 Physikalische und mechanische Prinzipien	25
3.2.2 Planung der experimentellen Untersuchungen	28
3.3 Symmetrische Aufbauten – Untersuchungen und Ergebnisse	30
3.3.1 Untersuchungen	30
3.3.2 Ergebnisse – Symmetrische Aufbauten	38
3.4 Asymmetrische Aufbauten – Untersuchungen und Ergebnisse	50
3.4.1 Untersuchungen	50
3.4.2 Ergebnisse - Asymmetrische Aufbauten	52
3.5 Erstellung von Vorbemessungsdiagrammen	54
3.6 Bestimmung spektraler Kenndaten	70
4 Kunststofffolie als Ersatz der mittleren Scheibe	73

Flächengewicht Mehrscheiben-Isolierglas
Inhaltsverzeichnis

.

.

.

. .

.

. . .

📭	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	
ROSENH	IEIM	
4.1	Untersuchungsprogramm spezifisch zur Produktgruppe	73
4.2	Bestimmung des Haftverhaltens zwischen Folie und Dichtstoff	74
	4.2.1 Auswahl der Folie/Dichtstoff Kombinationen	
	und der Untersuchungsmethoden	74
	4.2.2 Schälversuch in Anlehnung an ift-Richtlinie DI-01/1	76
	4.2.3 Haftungsprüfung in Anlehnung an EN 1279-4	81
	4.2.4 Auszugversuch	85
	4.2.5 Kriech-/Relaxationsversuch	87
4.3	Ermittlung der Dauerhaftigkeit gemäß EN 1279	91
	4.3.1 Untersuchungen	91
	4.3.2 Ergebnisse	92
5 K	unststoffplatte als mittlere Scheibe	95
5.1	Untersuchungsprogramm spezifisch zur Produktgruppe	95
5.2	Berechnung wärmetechnischer Kennwerte des Randverbundes	97
5.3	Ermittlung der Dauerhaftigkeit gemäß EN 1279	100
	5.3.1 Untersuchungen	100
	5.3.2 Ergebnisse	100
5.4	Bestimmung spektraler Kenndaten und Berechnung	
	der Temperatur im Scheibenzwischenraum	101
	5.4.1 Untersuchungen	101
	5.4.2 Ergebnisse	102
5.5	Wasserabgabe aus Kunststoffplatten	105
	5.5.1 Untersuchungen	105
	5.5.2 Ergebnisse	106
6 E	influss flächengewichtreduzierender Maßnahmen auf	
b	auphysikalische Kennwerte	109
6.1	Energetische Kenndaten	109
6.2	Luftschalldämmung	115
7 L	iteraturverzeichnis	121
8 D	anksagung	123

•

÷

.

. .



Zusammenfassung

Durch weitere Verschärfungen der energetischen Anforderungen an die Gebäudehülle ist zu erwarten, dass in naher Zukunft Dreifach-Isolierglas in Fenstern und Fenstertüren zum Standard werden. Ebenso werden auch die Anforderungen an den Schallschutz, die Einbruchhemmung, den Feuerwiderstand und andere Leistungseigenschaften zunehmen. Der Trend zu größeren, öffenbaren Fenstern/Fenstertüren und Fassadenelementen wird durch die moderne Architektur vorangetrieben. Geschosshohe Elemente wie z.B. Fenstertüren werden mehr und mehr auch im privaten Wohnungsbau eingesetzt.

Durch die genannten Entwicklungen erhöht sich das Gewicht des verwendeten Mehrscheiben-Isolierglases und infolgedessen des kompletten Bauelementes signifikant. Das Forschungsvorhaben hatte daher das Ziel, zu untersuchen, welche technischen Maßnahmen das Flächengewicht von Mehrscheibenisolierglas reduzieren könnten und welche Auswirkungen sich hieraus ergäben. Entsprechende Untersuchungen wurden hierzu für folgende konstruktive Maßnahmen durchgeführt:

- 1. Einsatz von dünnerem Glas
- 2. Einsatz von transparenten Kunststoffen in Form von Folien
- 3. Einsatz von transparenten Kunststoffen in Form von Platten

Die Untersuchungen sollten hierbei Antworten auf u.a. folgende Fragestellungen geben:

- Welchen Einfluss haben flächengewichtreduzierende Maßnahmen, im speziellen die Verwendung von dünnerem Glas, auf die Gültigkeit der Dimensionierungsregeln für Mehrscheibenisolierglas?
- Welchen Einfluss haben flächengewichtreduzierende Maßnahmen, im Speziellen der Einsatz von Kunststofffolien oder -platten, auf die Dauerhaftigkeit des Isolierglases? Hier wären beispielhaft zu nennen die Sicherstellung der Anforderungen an die Gasverlustrate sowie die Feuchtigkeitsaufnahme des Trocknungsmittels.
- Welchen Einfluss haben die konstruktiven Maßnahmen auf weitere Leistungseigenschaften wie z.B. Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert), Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert), Luftschalldämmung, Lichttransmission?

ROSENHEIM







Die aufgegriffenen Fragestellungen wurden im Wesentlichen experimentell bearbeitet, wo möglich und sinnvoll aber auch durch numerische Simulationen ergänzt.

Die durchgeführten Untersuchungen kamen zu folgenden Ergebnissen:

Mehrscheiben-Isolierglas mit dünnen Gläsern

Dimensionierungsregeln:

- Für äußere Lasten (Wind): Die nicht-lineare Theorie ergibt signifikant niedrigere Werte für die Spannung und Durchbiegung. Bei großformatigen Isoliergläsern ist die Windlast im Regelfall die maßgebliche Last.
- Für innere Lasten (Klima): Die nicht-lineare und die Kirchhoff-Theorie ergeben ähnliche Resultate. Die Anwendung der nicht-linearen Theorie hat keine Vorteile. Bei kleinformatigen Isoliergläsern ist die Klimalast im Regelfall die maßgebliche Last.
- Für schmale, lange Formate: Die nicht-lineare und die Kirchhoff-Theorie ergeben ähnliche Resultate. Die Anwendung der nicht-linearen Theorie hat keine Vorteile.

Vorspannbedarf:

- Für Scheiben mit einer kurzen Kante unter ca. 65 cm besteht sowohl bei 4 mm als auch bei 3 mm Scheibendicke Vorspannbedarf.
- Für dünne Scheiben besteht im Vergleich zu 4 mm Float kein signifikant erhöhter Bedarf zum Vorspannen aufgrund einer Bemessung für Wind- und Klimalasten.
- U.U. ergibt sich Vorspannbedarf auch aufgrund des Scheibenhandlings oder thermischer Belastungen.

Strahlungsphysikalische Eigenschaften:

• Für Isolierglas mit thermisch vorgespannten Glasscheiben können die spektralen Transmissions- und Reflexionsgrade von nicht vorgespanntem Floatglas zugrunde gelegt werden.



Mehrscheiben-Isolierglas mit Folie

- Aufbauten mit Folie als Ersatz der mittleren Scheibe sind komplexe Systeme. Die Qualifizierung von Folie/Dichtstoff/Abstandhalter-Kombinationen erfordert die Anwendung mehrerer Untersuchungsmethoden.
- Obwohl die im Rahmen des Forschungsprojektes untersuchten Probekörper individuell nicht alle Anforderungen der EN 1279 an die Gasverlustrate und Feuchtigkeitsaufnahme erfüllen konnten, weist die Gesamtheit der ermittelten Ergebnisse darauf hin, dass eine Erfüllung der Anforderungen grundsätzlich möglich ist.
- Es trat kein Fogging auf, auch nicht bei erhöhter Prüftemperatur.

Mehrscheiben-Isolierglas mit Kunststoffplatte

- Kunststoffplatten als mittlere Scheibe erfordern eine spezielle Lagerung, die eine thermische Ausdehnung der Platten erlaubt, ohne den Randverbund zu belasten. Bei den untersuchten Probekörpern war hierzu ein Sonderprofil in den Randverbund integriert, welches eine schwimmende Lagerung der Kunststoffplatte ermöglicht.
- Bei den beiden untersuchten Kunststoffarten, Polycarbonat und PMMA, trat kein Fogging auf, auch nicht bei erhöhter Prüftemperatur.
- Bei der Verwendung von Kunststoffplatten als mittlerer Scheibe muss berücksichtigt werden, dass Feuchtigkeit aus dem Kunststoff freigesetzt und in den SZR abgegeben werden kann. Es ist entweder eine Trocknung der Kunststoffplatten vor dem Einbau oder eine entsprechende Dimensionierung der Trockenmittelmenge notwendig.
- Die im Rahmen des Forschungsprojektes untersuchten Probekörper mit einem wärmetechnisch verbesserten Randverbund haben den von der EN 1279-3 vorgegebenen Grenzwert für die Gasverlustrate geringfügig überschritten. Der von der EN 1279-2 vorgegebenen Grenzwert für die Feuchtigkeitsaufnahme wurde erheblich überschritten; diese Überschreitung hätte jedoch durch eine Feuchtigkeitsabgabe aus den Kunststoffplatten (s. vorigen Spiegelpunkt) verursacht sein können. Eine abschließende Beurteilung des untersuchten Systems hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen aus EN 1279-2 und -3 ist daher nicht möglich.

Zusammenfassung



Bauphysikalische Kennwerte

Energetische Kenndaten:

 Der Wärmedurchgangskoeffizient, der Gesamtenergiedurchlassgrad sowie der Lichttransmissionsgrad von den im Vorhaben untersuchten flächengewichtreduzierten Aufbauten sind vergleichbar mit denen von konventionellem Dreifach-Isolierglas.

Luftschalldämmung:

- Dünne Glasscheiben in symmetrischen Aufbauten reduzieren grundsätzlich die Luftschalldämmung bedingt durch ihre geringere Masse, im Speziellen zum Standardaufbau 4/12/4/12/4. Dieser Nachteil kann jedoch durch einen asymmetrischen Aufbau (4/12/2/12/3) des MIG ausgeglichen werden.
- Die Ausbildung der mittleren Scheibe, ob dünnes Glas, Folie oder Kunststoffplatte, hat keinen signifikanten Effekt auf die Luftschalldämmung.

1	. •	1			•		÷.,	•	•	•											•		÷.,	•	•	•		÷.,	•
				Fl	äch	nen	gev	vicł	nt N	leh	rsc	he	ibe	n-ls	soli	erg	las												
				Ak	osti	ract	t																						

Abstract

Due to further tightening of the energetic requirements for building envelopes, it is likely that triple insulating glazing in windows and glazed doors will become the standard in the near future. Likewise, requirements for sound insulation, burglar resistance, fire resistance and other performance parameters will become more exacting. The trend towards larger openable windows/casement doors and facade units is a prominent feature in modern architecture. Floor-toceiling elements such as casement doors are increasingly popular, also in private residential dwellings.

Due to these developments, the weight of insulating glas units and therefore entire building components is increasing significantly. In consequence, the objectives of this research project were to find out which technical measures could reduce the mass per unit area of insulating glass units and what the resulting effects would be.

Accordingly, the following constructive measures were investigated:

- 1. The use of thin glas panes
- 2. The use of polymeric films
- 3. The use of polymeric sheets/panes

The insvestigations were addressing, amongst others, the following questions:

- What are the effects of weight-reducing measures, especially the use of thin glas panes, on the validity of the design rules for insulating glass units?
- What are the effects of weight-reducing measures, especially the use of plastic films or panes, on the durability of insulating glass units? For example, the requirements concerning gas leakage and moisture penetration have to be met.
- What are the effects of the different constructive measures on other performance characteristics such as thermal transmittance (U-value), total energy transmittance (g-value), airborne sound attenuation, light transmission?

Most issues were addressed experimentally and, where possible and apropriate, supplemented by numerical simulations.

ROSENHEIM

Abstract



t <u>-----</u>

The investigation yielded the following results:

Insulating glass units with thin glass panes

Design rules:

- For external loads (wind): The non-linear theory results in significantly lower values for stress and deflection than the linear theory. For large-format insulating glass units, the wind load is usually the crucial factor.
- For internal loads (climate): The non-linear and the Kirchhoff theories produce similar results. There is no particular advantage in applying the nonlinear theory. For small-format insulating glass units, the climate load is usually the crucial factor.
- For narrow, long formats: The non-linear and the Kirchhoff theories produce similar results. There is no particular advantage in applying the non-linear theory.

Need for thermal toughening:

- For panes with a short edge of less than about 65 cm, thermal toughening is required for both 4 mm and 3 mm-thick glass panes.
- Compared to 4 mm thick float glass, thinner glass panes do not have a significantly greater requirement for thermal toughening based on design calculations for wind and climate loads.
- There may, however, be a need for thermal toughening in order to enable a safe handling of thin panes and to increase their resistance to thermal loads (stresses due to thermal expansion and contraction)

Radiation physics characteristics:

• Insulating glass units with thermally toughened glass panes can be assumed to have the same spectral transmittance and reflectance properties as those of non toughened float glass.

Insulating glass units with film

• Glass configurations with film instead of a central pane are complex systems. The assessment of a combination of film, sealant and spacer requires the application of several different investigation methods.



- Although the specimens tested as part of the research project did not meet all requirements of EN 1279 regarding the loss of fill gas and the ingress of moisture, the sum total of the results obtained indicates that, in principle, it is possible to meet all these requirements.
- There were no fogging effects, not even at increased test temperature.

Insulating glass units with plastic panes

- A plastic pane in the centre of an insulating glass unit requires a special support which allows for thermal expansion of the pane without causing shear stresses on the edge seal. To achieve this effect a special profile had been integrated into the edge seal of the investigated test specimens which provided for a floating support of the plastic pane.
- There was no fogging effect for the two types of plastics tested polycarbonate and PMMA – not even at higher test temperature.
- When using a plastic pane in the centre of a glass unit, it is important to take into consideration that the plastic may release moisture into the cavity. It is therefore necessary to subject the plastic panes to a drying process prior to installation or to insert an appropriate amount of desiccant.
- The specimens with a thermally improved edge seal did exceed the limit for the gas leakage rate, as specified in EN 1279-3, slightly. The limit for the moisture penetration index, as specified in EN 1279-2, was exceeded considerably; however, it is quite possible that the excess water within the unit was the result of moisture being released from the plastic panes (see previous bullet point). It is therefore not possible at this stage to arrive at a fully conclusive assessment of the tested system with respect to compliance with the requirements specified in EN 1279-2 and -3.

Building physics parameters

Energy-related parameters:

• The thermal transmittance, the total energy transmittance and the light transmittance of the weight-reduced configurations investigated are comparable to those of conventional triple-glass units.

ROSENHEIN

•	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	•	÷	÷	÷	•		÷	÷	÷	÷			÷			•	÷	•	÷	÷	÷		÷	÷	•	•
				1	1					÷					÷				1			•					•		•				•				•
						÷	÷	÷		÷	÷	•	÷	•	÷	•		•	\cdot	÷		•	÷				•	÷	•		•	÷	÷	÷			•
																	F	äcł	nen	ge\	vic	ht l	Mel	nrso	che	ibe	n-ls	soli	erg	Ias	5						
																												At	ostr	act							

Airborne sound insulation:

ROSENHEIM

- Generally speaking thin glass panes in a symmetrical configuration result in reduced airborne sound insulation due to the reduction in mass compared to the standard 4/12/4/12/4 configuration. However, this disadvantage can be compensated for by an asymmetrical configuration (4/12/2/12/3) of the IGU.
- The type of central divider be it thin glass, film or a plastic pane has no significant effect on airborne sound insulation.



1 Einleitung

1.1 Motivation

Durch die Novellierung der Energieeinsparverordnung EnEV 2009 [1] und weitere Verschärfungen der energetischen Anforderungen an Gebäude in der EU-Richtlinie 2010/31 [2] ist zu erwarten, dass in naher Zukunft Dreifach-Isolierglas in Fenstern und Fenstertüren zum Standard werden wird. Ebenso werden auch die Anforderungen an den Schallschutz, die Einbruchhemmung, den Feuerwiderstand etc. zunehmen. Der Trend zu größeren, öffenbaren Fenstern/Fenstertüren und Fassadenelementen wird durch die moderne Architektur vorangetrieben. Geschosshohe Elemente wie z.B. Fenstertüren werden mehr und mehr auch im privaten Wohnungsbau eingesetzt.

Durch die genannten Entwicklungen erhöht sich das Gewicht des verwendeten Mehrscheiben-Isolierglases und infolgedessen des kompletten Bauelementes signifikant. Diese Gewichtserhöhung hat u.a. folgende Auswirkungen:

- Erhöhte Belastungen der Rahmenkonstruktionen
- Erhöhte Belastungen der Beschläge und damit die Notwendigkeit f
 ür aufwändigere Konstruktionen sowie eine Erh
 öhung der Gefahr des Versagens von Beschl
 ägen
- Erhöhter Bedarf an Hebewerkzeugen zur Verteilung und Installation der Bauelemente auf der Baustelle
- Erhöhte Belastungen der Bauarbeiter und Monteure bei der Handhabung der Bauelemente und die sich hieraus ergebenden gesundheitlichen Gefährdungen sowie die Erhöhung des Risikos von Unfällen

Ein Reduzierung des Flächengewichts von Mehrscheiben-Isolierglas und somit eine Reduzierung der o.g. Belastungen scheint sinnvoll und wäre prinzipiell über zwei Strategien realisierbar:

- 1. Einsatz von dünnerem Glas
- 2. Einsatz von transparenten Kunststoffen, entweder als Platte oder als Folie

Dünneres Glas könnte in allen drei Ebenen eingesetzt werden, d.h. auf der Außenseite, der Raumseite sowie als mittlere Scheibe. Dies gilt prinzipiell auch für Kunststoffe. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass beim Außen- bzw. raumseitigen Einsatz von Kunststoffen glasinhärente Eigenschaften wie Gasdichtheit oder Kratzfestigkeit sichergestellt werden müssten. Außerdem ist die thermische Aus-

ROSENHEIM

1 Einleitung



dehnung von Kunststoffen ein Mehrfaches der von Glas, was insbesondere bei der Kombination von Glas und Kunststoff Probleme verursachen könnte. Neben diesen sehr materialspezifischen Anforderungen sind weitere Fragestellungen zu adressieren:

- Einfluss der flächengewichtreduzierenden Ma
 ßnahmen auf die G
 ültigkeit der Dimensionierungsregeln f
 ür Mehrscheiben-Isolierglas
- Einfluss der Maßnahmen auf die Dauerhaftigkeit des Isolierglases
- Einfluss auf den generellen Aufbau des Isolierglases (Scheibendicke, Randverbund etc.)
- Einfluss auf weitere Leistungseigenschaften wie z.B. Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert), Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert), Luftschalldämmung, Lichttransmission, optische Erscheinung

Dieses Forschungsvorhaben hatte daher das Ziel zu untersuchen, welche technischen Maßnahmen das Flächengewicht von Mehrscheibenisolierglas reduzieren könnten und welche Auswirkungen sich hieraus ergäben. Die im Rahmen des Vorhabens aufgegriffenen Fragestellungen wurden im Wesentlichen experimentell angegangen. Dies betrifft z.B. Fragen zur Dauerhaftigkeit, Verträglichkeit, Luftschalldämmung, Lichttransmission etc. Wo es möglich und sinnvoll erschien, wurden die experimentellen Untersuchungen durch numerische Simulationen ergänzt.

1.2 Ausgangsbasis für das Vorhaben

Gespräche mit Fachleuten aus der Branche und dem **ift** Rosenheim demonstrierten den Bedarf einer Aufarbeitung des Themas. Eine Recherche in der IRB-Baudatenbank war negativ; es sind keine F&E Projekte zur Reduzierung des Flächengewichtes von Mehrscheibenisolierglas aufgeführt. Nur Arbeiten, die sich mit Teilbereichen des Themas beschäftigen sind, zu finden, z.B. das Forschungsvorhaben "*Anlage zur Herstellung von 2 mm ESG*" [3].

Der Einsatz von dünnerem Glas, typischerweise 3 mm und 2 mm ist eine offensichtliche Möglichkeit zur Reduzierung des Flächengewichtes. 3 mm Glas wird bereits teilweise im Bereich von Dachflächenfenstern als thermisch vorgespanntes Glas eingesetzt; die Abmessungen sind hierbei jedoch i.d.R. eingeschränkt. Thermisch vorgespanntes Glas mit 2 mm Dicke wird in der Praxis noch nicht eingesetzt. Es existieren jedoch erste Anlagen zur thermischen Vorspannung von 2 mm Glas.



Auf dem Markt existieren auch bereits Isolierglasprodukte, in denen Glas mit anderen Werkstoffen kombiniert wird. Diese Produkte wurden zwar nicht zum Zwecke der Flächengewichtsreduzierung entwickelt, einige bieten jedoch das Potential zur Weiterentwicklung unter dem speziellen Aspekt der Gewichtsreduzierung. Beispiele für diese Produkte sind:

- Verbundscheiben aus Float, ESG und TVG mit polymeren Zwischenschichten
- Kunststofffolien und -platten als mittlere "Scheiben" in einem Dreifachglas
- Verbundscheiben mit Zwischenschichten aus anderen Materialien wie z.B. Alkalisilikaten (Anwendung Brandschutz)

Für Mehrscheiben-Isolierglas gilt seit 2007 die Produktnorm EN 1279 [4]. Sie beschreibt die wesentlichen Anforderungen an Mehrscheiben-Isolierglas. Diese Anforderungen sind selbstverständlich auch von "gewichtsreduzierten" MIG zu erfüllen. Die in EN 1279 definierten Nachweismethoden konnten daher als eine Grundlage für die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Untersuchungen dienen. Hierbei war jedoch zu beachten, dass die in EN 1279 definierten Randbedingungen für "konventionelle" Aufbauten gelten. Für neue, unkonventionelle Aufbauten müssen Prüfparameter wie z.B. Abmessung, Temperatur, Lasten etc. angepasst werden.

1.3 Projektgruppe

Das Forschungsvorhaben wurde mit Unterstützung des Bundesverbandes Flachglas e.V. (BF) durchgeführt. Als Mitglieder des BF wirkten folgende Industrieunternehmen am Vorhaben mit:

- Isophon Glas GmbH, Hann. Münden
- Southwall Europe GmbH, Großröhrsdorf
- Winterglas GmbH, Leiben

Der projektbegleitende Ausschuss wurde durch folgende Personen gebildet:

- Prof. Dr. Franz Feldmeier, Hochschule Rosenheim
- Dr. Wolfgang Wittwer, Kömmerling Chemische Fabrik GmbH

Im Laufe des Projektes fanden folgende Besprechungen statt:

- 1. Projekttreffen (Auftaktsitzung) am 9. Dezember 2010 in Rosenheim
- 1. Webmeeting am 29. Juni 2011

ROSENHEIM

1.1	÷.,	1.1	12	1.	1.1	12	1.	12	1.1	1.1	1.	1.1	1.1	1.	1.	12	1	12.	1.	1.	12	1.	12	12	1.1	1.	12	1.	1.	1.	12	1.	1.1	1.1	12	1.	12.	•
•	•	÷	÷	÷	•	•	÷	÷	•		÷	÷	•	÷	•	÷	•	•	•	•	•	•	÷	÷	÷	÷	÷	•	•	•	÷	÷	÷	÷	÷	÷	•	
•	•	÷	÷	÷	•	•	÷	÷	•		÷	÷	•	•	•	÷	•	•	•	•	•	•	÷	÷	÷	÷	÷	•	•	•	÷	÷	÷	÷	÷	÷	•	÷
																		FI	äcł	nen	gev	vic	ht I	Neł	nrso	che	ibe	n-ls	soli	erg	Jlas	•						
					_																						1	E	inl	eitu	ung	J						
	•	•	•	•	R	DSEN	f	t IM	•	•		•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•
					_	2.	We	əbn	nee	ətin	g a	m :	23.	Se	pte	emb	ber	20	11																			

- 2. Projekttreffen am 14. Dezember 2011 in Rosenheim
- 3. Webmeeting am 24. April 2012
- 4, Webmeeting am 9. August 2012
- 3. Projekttreffen (Abschlusssitzung) am 20. September 2012 in Rosenheim
- 5. Webmeeting am 6. Dezember 2012



2 Prinzipielle Möglichkeiten zur Reduzierung des Flächengewichts

Die prinzipiellen Möglichkeiten zur Reduzierung des Flächengewichts sind schon genannt worden, nämlich der Einsatz von dünnem Glas und der Einsatz von transparenten Kunststoffen. Letztere können als Platte oder als Folie eingesetzt werden. Eine Kombination von dünnem Glas mit Kunststoffen ist auch möglich. Jede Produktlösung, ob auf dünnem Glas oder Kunststoff basierend, bringt Besonderheiten in Bezug auf die Erfüllung der Produktnorm EN 1279 und die Bemessung mit sich, selbst einige neue Anforderungen ergeben sich. Nach einer Auflistung der wesentlichen generellen Anforderungen an Mehrscheiben-Isoliergläser (Kap. 2.1), erfolgt daher eine kurze Beschreibung der besonderen Anforderungen, die sich aus den speziellen Produktlösungen ergeben (Kap. 2.2 bis 2.6). Diese Informationen zusammen mit den Potenzialen zur Gewichtreduzierung (Kap. 2.7) dienten der Projektgruppe als Richtlinie zur Formulierung der Untersuchungsschwerpunkt (Kap.2.8)

2.1 Allgemeine Anforderungen an Mehrscheiben-Isoliergläser

Im Folgenden sind typische Anforderungen an und Leistungsmerkmale von Mehrscheiben-Isolierglas aufgelistet. Einige Anforderungen, wie z.B. die in der EN 1279 [4] definierte Dauerhaftigkeit, müssen auf alle Fälle erfüllt werden. Andere Anforderung und Leistungsmerkmale sind je nach Einsatzzweck des MIG von Bedeutung, z.B. Anforderungen bzgl. Luftschalldämmung oder spektraler Eigenschaften.

Bemessung

Die Bemessung von Mehrscheiben-Isolierglas erfolgt nach der TRLV [8]. Seit Dezember 2010 existiert auch die DIN 18008 [9], die jedoch vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) noch nicht als verbindliches Regelwerk eingeführt worden ist. Beide Regelwerke legen die maximal zulässige Biegezugspannung im Glas fest; die DIN 18008 beschränkt zusätzlich auch die maximale Durchbiegung von Glasscheiben.

Energetische Anforderungen

Energetische Anforderungen werden im Wesentlichen durch den Wärmedurchgangskoeffizient U und den Gesamtenergiedurchlassgrad g beschrieben und resultieren hauptsächlich aus der EnEV 2009 [1]. Für die Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fenstern sind neben dem Wärmedurchgangskoeffi-



2 Prinzipielle Möglichkeiten zur Reduzierung des Flächengewichts

zienten des Isolierglases auch die wärmetechnischen Kennwerte des Randverbundes zu beachten. Hier haben sich in den letzten Jahren sogenannte wärmetechnisch verbesserte Randverbundsysteme mehr und mehr etabliert.

Dauerhaftigkeit, Anforderungen und Prüfmethoden, Produktnorm EN 1279 [4]

- Feuchtigkeitsaufnahme
- Gasverlustrate
- Fogging
- Festigkeit des Randverbundes (Haftvermögen Dichtstoff-Glas, Kohäsionsfestigkeit des Dichtstoffes)

Weitere wichtige Leistungsmerkmale

- Mechanische Beständigkeit gegen Wind-, Schnee-, Dauer- und Nutzlasten
- Widerstand gegen Aufprall, Einbruch, Durchschuss, Explosionsdruckwelle
- Brucheigenschaften
- Brandschutz, Brandverhalten
- Luftschalldämmung
- Spektrale Kenndaten
- Optisches Erscheinungsbild
- Ökobilanz

2.2 Einsatz von dünnen Gläsern

Standardmäßig werden Float-Gläser mit einer Dicke von mindestens 4 mm zu MIG verarbeitet. Durch die Verwendung von dünneren Gläsern von 3 mm oder auch 2 mm könnte das Flächengewicht erheblich reduziert werden. Bei der Anwendung von dünnem Glas stellt sich aber die Frage, ob die jetzt geltenden Bemessungsregeln dann noch anwendbar sind. Diese Regeln basieren auf der Kirchhoffschen Plattentheorie, die davon ausgeht, dass eine Klima- oder Windlastbedingte Durchbiegung nicht größer als die Scheibendicke ist. Das erscheint bei dünnen Gläsern aber unwahrscheinlich. Es sind Durchbiegungen zu erwarten, die größer sind als die Scheibendicke.



Des Weiteren müssten dünnere Gläser wahrscheinlich vorgespannt werden, um das durch höhere Biegezugspannungen bedingte erhöhte Glasbruchrisiko zu reduzieren. Das Vorspannen erfolgt im Regelfall thermisch.

Das thermische Vorspannen ist umso schwieriger, je dünner die Gläser sind. Dies liegt darin begründet, dass bei dünneren Scheiben ein schnelleres Abkühlen der Scheibenoberflächen notwendig ist, um den erforderlichen Temperaturgradienten in der Glasscheibe zu erzeugen. Ebenso ist der Transport von dünnen Scheiben im ESG-Ofen nicht trivial. Für 3-mm-Glas sind entsprechende Techniken verfügbar. Für 2-mm-Glas sollten solche Techniken im Rahmen eines Forschungsvorhabens der Bergakademie Freiberg entwickelt werden [3]. Mittlerweile stehen solche Anlagen zur industriellen Herstellung von 2 mm vorgespanntem Glas zur Verfügung (z.B. Lisec Flatbed Vorspannanlage).

Chemisches Vorspannen durch lonenaustausch ist prinzipiell auch auf dünne Scheiben anwendbar, ist aber deutlich teurer als das thermische Vorspannen, so dass ein großflächiger Einsatz im Moment nicht wahrscheinlich erscheint.

Beim derzeit üblichen Einsatz von nicht vorgespanntem Float-Glas in 3-fach-MIG liegt die Wärmeschutzbeschichtung im Regelfall auf Pos. 2 und Pos. 5. Eine Beschichtung auf Pos. 3 oder 4 ist aufgrund der erhöhten thermischen Belastung der mittleren Scheibe und der somit erhöhten Glasbruchgefahr nicht üblich. Wenn beim Einsatz von dünnen Gläsern die Scheiben ohnehin vorgespannt werden müssten (s.o.), wären auch Beschichtungen auf Pos. 3 bzw. Pos. 4. möglich. Beim Einsatz von dünneren Gläsern kann davon ausgegangen werden, dass hierdurch keine negativen Einflüsse auf die Dauerhaftigkeit des Isolierglasrandverbundes entstehen. Aufgrund der höheren Durchbiegung der Gläser sinkt die Belastung des Randverbundes. Dies bedeutet, dass für solche Aufbauten keine Untersuchungen hinsichtlich der Wasserdampfdiffusion sowie der Gasverlustrate nach EN 1279 notwendig erscheinen.

Bei der Produktion von MIG mit dünnen Scheiben können prinzipiell die bereits vorhandenen Produktionsanlagen genutzt werden. Eventuell sind Anpassungen bei der Handhabung sowohl der dünnen Gläser als auch der kompletten MIG notwendig.



Abbildung 1 Einsatz von dünnen Gläsern

2.3 Kunststofffolie als Ersatz der mittleren Scheibe

Eine Folie, die als mittlere Scheibe in einem Mehrscheiben-Isolierglas dienen soll, muss bei der Herstellung des MIG gespannt werden, da jeglicher Faltenwurf der Folie im Endprodukt sichtbar und völlig unakzeptabel wäre. Die Spannung könnte im Prinzip durch eine mechanische Vorrichtung aufgebracht werden. Eleganter und einfacher ist es jedoch eine biaxial gereckte Folie zu verwenden, diese verhältnismäßig schlaff in den MIG-Aufbau einzukleben, und dann das ganze Mehrscheiben-Isolierglas einer thermischen Behandlung zu unterziehen, die zur Schrumpfung und damit zur Straffung der Folie führt. Dabei werden mechanische Spannungen in der Folie aufgebaut, die dauerhaft von der Verklebung der Folie im Randverbund aufgenommen werden müssen. Es stellen sich also Fragen nach der Dauerhaftigkeit, insbesondere der Kriechfestigkeit der Folie, der Verklebung und des gesamten Randverbundes; nicht nur bei Raumtemperatur, sondern auch bei den für MIG typischen Temperaturzyklen.

Heutzutage gebräuchliche Produktionsanlagen können in eingeschränktem Umfang für die Herstellung von MIG mit Folie verwandt werden. Eine vollautomatische Legung der Folien ist nach aktuellem Kenntnisstand noch nicht möglich. Die jetzt übliche manuelle Fertigung scheint nicht geeignet für eine Massenproduktion. U.U. bedingt eine manuelle Fertigung eine höhere Streuung der Fertigungsqualität.

Des Weiteren muss eine Folie für ein Mehrscheiben-Isolierglas UV-beständig und vergilbungsstabil sein, sie darf kein Fogging verursachen, und Funktionsschichten wie z.B. low e-Schichten sollten sich aufbringen lassen.



Abbildung 2 Einsatz von Folien als Ersatz der mittleren Scheibe

2.4 Kunststoffplatte als Ersatz der mittleren Scheibe

Beim Einsatz von transparenten Kunststoffplatten ist primär zu beachten, dass die thermischen Ausdehnungen von Kunststoffen und Glas sehr unterschiedlich sind. So besitzt Float-Glas einen thermischen Längenausdehnungskoeffizienten α von etwa $9x10^{-6}K^{-1}$ [5], Polycarbonat hingegen von etwa $70x10^{-6}K^{-1}$ [6]; d.h. der Kunststoff dehnt sich etwa achtmal so stark aus wie das Glas. Eine 2 m lange Glasplatte wird sich bei Erwärmung um 50 K um ca. 0,9 mm verlängern, eine Polycarbonatplatte um ca. 7 mm. Dieser Effekt muss bei der konstruktiven Integration einer Kunststoffplatte in das MIG berücksichtigt werden, etwa durch die schwimmende Lagerung der Kunststoffplatte im Isolierglas. Andernfalls werden hohe Scherlasten im Randverbund hervorgerufen. Dabei wären große Formate wesentlich stärker belastet als kleine Formate. Ein "einfacher" Ersatz der mittleren Floatscheibe durch eine Kunststoffplatte, unter Ausnutzung derselben Fügetechnik (identischer Randverbund), ist also nicht möglich.

Prinzipiell könnten auch auf der Kunststoffplatte Funktionsschichten, wie z.B. low e-Beschichtungen, aufgebracht werden. Ebenso wie bei Kunststofffolien dürfen bei Kunststoffplatten keine Inhaltsstoffe aus dem Kunststoff austreten, die bei hermetisch geschlossenem Isolierglas zum Fogging führen könnten. Eine hohe UV-Beständigkeit und Vergilbungsstabilität sind gleichfalls notwendig.

Des Weiteren ist zu beachten, dass viele Kunststoffe Wasser in ihr Molekülgefüge einlagern können, z.B. während der Lagerung der Kunststoffplatten vor dem Einbau in ein MIG. Dieses Wasser könnte dann bei erhöhten Temperaturen wieder in den Scheibenzwischenraum freigesetzt werden. Eine solche zusätzliche Feuchtigkeitsbelastung muss bei der Dimensionierung des Volumens des Trockenmittels beachtet werden. Evtl. müssten die Platten vor dem Einbau in das MIG auch ausgeheizt werden.



Abbildung 3 Einsatz von Kunststoffplatten als Ersatz der mittleren Scheibe

2.5 Kunststoffplatten als Ersatz der äußeren Scheiben

Sollten Kunststoffplatten auf der Außenseite von Mehrscheiben-Isolierglas eingesetzt werden, so sind an solche Platten weitere Anforderungen zu stellen. Im Besonderen wäre die Kratzfestigkeit und die Diffusion von Füllgasen (von innen nach außen) sowie Wasserdampf (von außen nach innen) zu beachten.

Um diese beiden Anforderungen zu erfüllen, wäre eine Beschichtung der Kunststoffplatten mit Dünnglas denkbar. Hierdurch wäre sowohl die Kratzfestigkeit sichergestellt als auch eine mögliche Gasdiffusion durch die "Außenscheiben" verhindert. Die Laminierung müsste beidseitig und symmetrisch erfolgen, um eine Krümmung der Platte bei Temperaturänderungen (Bimetalleffekt) zu vermeiden. Als Nebeneffekt würde auch die thermische Längenausdehnung reduziert werden. Das wäre äußerst sinnvoll im Falle einer Glasscheibe als mittlerer Scheibe, um Scherbelastungen des Randverbundes so klein wie möglich zu halten. Es sind bereits Laminate aus Dünnglas und Polymerfolie (in der Mitte) für Spezialanwendungen erhältlich, z.B. die SentryGlass Produkte von der Fa. Dupont [7].



Abbildung 4 Einsatz von kratzfest beschichteten Kunststoffplatten als Ersatz der äußeren Scheiben



2.6 Kombination aus den genannten Möglichkeiten

Durch die Kombination aus den bisher dargestellten Möglichkeiten wäre eine Optimierung des Flächengewichtes möglich. Exemplarisch ist in Abbildung 5 eine Kombination von dünnem Glas und Kunststofffolie sowie die Verwendung von Kunststoffplatten als Ersatz der mittleren und der beiden äußeren Scheiben dargestellt.





2.7 Mögliche Gewichtsreduzierung

Tabelle 1 zeigt exemplarisch verschiedene Aufbauten mit den resultierenden Flächengewichten. Hierbei wurde das 2-fach MIG als Referenz angenommen und folgende Daten und Annahmen der Berechnung zugrunde gelegt.

- Der Gewichtseinfluss des Randverbundes ist vernachlässigbar.
- Das Flächengewicht von Float beträgt 2,5 kg/(m² mm) [5].
- Das Flächengewicht von Kunststoffen beträgt 1,2 kg/(m² mm) [6].
- Das Gewicht der Kunststofffolien mit einer Dicke von ca. 0,1 mm ist vernachlässigbar.

•	2	1	•	1	2	1	•	2		1	1	2	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	÷.,
•	\mathbf{r}_{i}	•		•	÷.,			÷.,		÷.,	÷.,	÷.,		\mathbf{r}_{i}													÷.,	÷.,	÷.,		÷.,	\mathbf{r}		÷.,
•	÷	÷	÷	•	÷	•	÷	÷	•	÷	÷	÷	÷	÷	•	÷	÷	÷	•	÷	÷	÷	÷	÷	•	÷	÷	÷	÷	•	÷	÷	÷	•
					_	_				_			_	Fla	äcł	nen	gev	vicl	ht I	/le h	nrso	che	ibe	n-ls	soli	erg	las	5						
	-				2	2 F	Prin	zip	oiell	e N	lög	licl	ıke	iter	า ฆ	Jr F	led	uzi	eru	ng	de	s F	läc	her	ge	wic	hts							
•		i	f	t-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

ROSENHEIM

Tabelle 1 Exemplarische Berechnungen zur möglichen Gewichtsreduzierung

	Aufbau	Flächengewicht	Relativ
2-fach-MIG Referenz	4/16/4	20 kg/m ²	100 %
3-fach-MIG Standard	4/12/4/12/4	30 kg/m ²	150 %
3-fach-MIG dünnes Glas	3/12/3/12/3 3/12/2/12/3	22,5 kg/m ² 20 kg/m ²	112,5 % 100 %
3-fach-MIG Kunststoffplatte	4/12/PC2/12/4	22,5 kg/m ²	112,5 %
3-fach-MIG Kunststofffolie	4/12/PET0,1/12/4	20 kg/m ²	100 %
3-fach-MIG Kombination dünnes Glas + Folie	3/12/PET0,1/12/3	15 kg/m ²	75 %

2.8 Priorisierung im Rahmen des Forschungsvorhabens

Im Rahmen der ersten Projektsitzung wurden in Abstimmung mit der Projektgruppe die Schwerpunkte des Forschungsvorhabens wie folgt festgelegt:

- Einsatz von dünnen Gläsern
- Einsatz von Folien als Ersatz der mittleren Scheibe
- Einsatz von Kunststoffplatten als Ersatz der mittleren Scheibe

Der Einsatz von Kunststoffplatten (beschichtet mit Dünnglas) als Ersatz für die äußeren Scheiben ließ sich nicht untersuchen, da im Rahmen des Projektes keine Industriepartner gewonnen werden konnten, die die für die experimentellen Untersuchung notwendigen Probekörper zur Verfügung hätten stellen können.

Kombinationen aus dünnen Gläsern und Kunststoffen wurden auch nicht untersucht. Der mögliche Zugewinn an Erkenntnissen wurde von der Projektgruppe als relativ gering eingeschätzt.

Weitere Erläuterungen zur Auswahl der jeweiligen Untersuchungsschwerpunkte finden sich in den einleitenden Sektionen der Kapitel 3, 4 und 5. Bei der Auswahl der Schwerpunkte wurden die in den Abschnitten 2.2, 2.3 und 2.4 angesprochenen Besonderheiten der Aufbauten in den Mittelpunkt gestellt.

Zusätzlich zu diesen produktlösungsspezifischen Untersuchungen wurden auch Leistungsmerkmale von allgemeiner Bedeutung ermittelt und verglichen (Kapitel 6),



an erster Stelle die energetischen Kenndaten und dann die häufig ebenso wichtige Luftschalldämmung.

Die Probekörper für die drei Untersuchungsschwerpunkte wurden durch folgende Mitglieder des Bundesverbandes Flachglas bereitgestellt:

- Dünne Gläser Winterglas GmbH
- Kunststofffolie als mittlere Scheibe Southwall Europe GmbH

Isophon Glas GmbH

Kunststoffplatte als mittlere Scheibe



3 Dünne Glasscheiben



3 Dünne Glasscheiben

3.1 Untersuchungsprogramm spezifisch zur Produktgruppe

Eine der Kernfragen bei der Verwendung von dünnen Glasscheiben in Mehrscheiben-Isolierglas ist die nach der Gültigkeit der Bemessungsregeln. Die Technischen Regeln für die Verwendung linienförmig gelagerter Verglasungen TRLV [8] machen hierzu keine einschränkenden Vorgaben. Lediglich die Nachweiserleichterungen nach Abschnitt 5.4. verlangen eine Mindestglasdicke von 4 mm. DIN 18008 [9] gilt für Nennglasdicken von 3 bis 19 mm und somit auch für die vorliegenden dünnen Scheiben von 3,2 mm. Noch dünnere Scheiben von 2,1 mm liegen jedoch außerhalb des Anwendungsbereichs von DIN 18008.

Bei der Ermittlung von Materialspannung und Verformung sind Rechenmodelle anzuwenden, welche die statisch-konstruktiven Verhältnisse auf der sicheren Seite liegend erfassen. Dabei sind ungünstig wirkende, geometrisch nicht lineare Effekte zu berücksichtigen (DIN 18008-1 Abschnitt 7.1.3).

Beim Einsatz von dünnen Gläsern im MIG ist bedingt durch die geringere Steifigkeit der Scheiben eine größere Durchbiegung sowohl bei Windbelastung als auch bei Temperatur- bzw. Luftdruckeinwirkungen die Regel. Die Durchbiegung könnte sogar so groß sein, dass sie die Gebrauchstauglichkeit einschränkt.

Um die Frage nach der Gültigkeit der theoretischen Modelle letztlich zu entscheiden, wurden einige experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Die Grundidee war, MIG Probekörper zu belasten, dabei die Durchbiegung der Scheiben und den Druck in den Scheibenzwischenräumen zu messen, und dann die experimentellen Ergebnisse mit theoretisch ermittelten Werten zu vergleichen. Dabei wurden zwei Methoden angewandt, um die Belastung aufzubringen:

- Eine Erwärmung von MIG Probekörpern in einer Klimakammer: Es können sowohl symmetrische als auch asymmetrische Aufbauten geprüft werden.
- Das "Aufpumpen" der MIG Probekörper mithilfe einer Luftpumpe. Dies ist nur möglich mit symmetrischen Aufbauten (siehe Abschnitt 3.2.2).

Die theoretischen Vergleichswerte wurden sowohl nach der linearen Kirchhoffschen Plattentheorie (Theorie erster Ordnung) als auch nach einer erwei-

Flächengewicht Mehrscheiben-Isolierglas 3 Dünne Glasscheiben



terten, nicht-linearen Plattentheorie zur Berücksichtigung von Membranspannungen berechnet.

Außerdem wurden Vorbemessungsdiagramme für einige Aufbauten erstellt (siehe Abschnitt 3.5). Diese Diagramme stellen für einen vorgegebenen Aufbau und einen vorgegebenen Belastungsfall (Klima-, Windlast) die maximale Biegezugspannung und die maximale Durchbiegung in den Glasscheiben in Abhängigkeit von der Scheibengröße dar. Sie geben somit auch Auskunft darüber, ob dünne Gläser vorgespannt werden müssen und/oder ob eventuell deren Durchbiegung die Gebrauchstauglichkeit beschränkt.

Wenn dünne Scheiben vermehrt vorgespannt werden müssen, bekommt die Frage nach dem Einfluss einer Vorspannung auf die spektralen Kenndaten eines MIG (Transmission, Reflexion) eine größere Relevanz. Bisher wurde immer angenommen, dass eine thermische Vorspannung keinen Einfluss auf diese optischen Eigenschaften hat; es finden sich jedoch keine experimentellen Belege dafür in der Literatur. Deshalb wurden im Rahmen dieses Projektes Transmissions- und Reflektionswerte von Float und thermisch vorgespannten Scheiben verschiedener Dicke ermittelt und miteinander verglichen.

Die Dauerhaftigkeit eines Mehrscheiben-Isolierglases mit dünnen Scheiben wird üblicherweise nach der Produktnorm EN 1279 geprüft. Es ist jedoch nicht zu erwarten, dass die Feuchtigkeitsaufnahme (EN 1279-2), die Gasdichtheit des Randverbundes (EN 1279-3) oder das Foggingverhalten (EN 1279-6) durch die Verwendung dünnerer Gläser verschlechtert werden. Eher im Gegenteil: durch die geringere Steifigkeit dünner Gläser ist deren Durchbiegung bei einer Erwärmung des MIG größer, und damit die Druckerhöhung im Scheibenzwischenraum geringer. Der Randverbund wird durch das temperaturbedingte "Pumpen" des Mehrscheiben-Isolierglases weniger belastet. Es wurde deshalb von der Projektgruppe beschlossen, keine Dauerhaftigkeitsprüfungen gemäß EN 1279 an MIG mit dünnen Gläsern durchzuführen.

Die Fa. Winterglas GmbH stellte die Probekörper für die Untersuchungen zur Verfügung.





3.2.1 Physikalische und mechanische Prinzipien

Für die Erläuterung und Begründung der Untersuchungen erscheint es sinnvoll, zunächst einige physikalische und mechanische Prinzipien kurz zu erwähnen, nämlich das Verhalten von Gasen bei Temperaturänderung und die Biegesteifigkeit von Scheiben. Eine erschöpfende Darstellung des Verhaltens von MIG unter verschiedenen Belastungen (Temperatur, Wind, Luftdruck, etc.) soll hier nicht gegeben werden. Dazu wird auf die einschlägigen Veröffentlichungen verwiesen ([10], [11]).

Ist eine bestimmte Menge eines Gases (Anzahl der Gasmoleküle n) eingeschlossen in ein Gefäß (so wie das Gas in einem Scheibenzwischenraum), so stehen Volumen V, Druck p und Temperatur T in einem bestimmten Verhältnis zueinander, mathematisch beschrieben durch die sogenannte Allgemeine Zustandsgleichung für Gase $p \times V = (n \times R) \times T$. Das Produkt aus Druck und Volumen ist proportional zur Temperatur T. Der Proportionalitätsfaktor (n x R) hängt nur von der (im Scheibenzwischenraum) eingeschlossenen Gasmenge n ab; R ist eine physikalische Konstante. Da ein Scheibenzwischenraum im Prinzip hermetisch verschlossen ist, kann sich die Anzahl der Gasmoleküle nicht ändern, d.h. der Proportionalitätsfaktor (n x R) ist für ein gegebenes MIG konstant.

(Streng genommen gilt die Allgemeine Zustandsgleichung für sogenannte Ideale Gase; näherungsweise ist die Gleichung jedoch auch auf den Fall der realen Gase im MIG sehr gut anwendbar.)

Ändert sich die Temperatur, so ändert sich auch das Produkt aus Druck und Volumen. Wird z.B. die Temperatur erhöht, so muss das Produkt aus Druck und Volumen des eingeschlossenen Gases entsprechend des Proportionalitätsfaktors größer werden. Dies kann auf dreierlei Weisen geschehen.

1.) Der Druck bleibt konstant und nur das Volumen vergrößert sich. Dies wäre z.B. in einem Gefäß mit einem leicht beweglichen Deckel möglich, einem Deckel, der zwar den Austausch von Gas zwischen dem Inneren und der Umgebung verhindert, aber der Volumenänderung des Gases in dem Gefäß praktisch keinen Widerstand entgegensetzt, also sehr leicht "hoch und runter" oder "vor und zurück" gleitet. Dieser Fall ist für MIG nicht relevant, da alle Komponenten (Scheiben und Randverbund) miteinander verklebt sind.

ROSENHEIN

Flächengewicht Mehrscheiben-Isolierglas 3 Dünne Glasscheiben



- 2.) Das Volumen bleibt konstant und nur der Druck erhöht sich. Dies wäre z.B. in einem Gefäß mit steifen Wänden und fest verschraubtem Deckel möglich. Das analoge MIG ist eines mit sehr dicken – und damit biegesteifen – Scheiben und einem steifen Randverbund.
- 3.) Beide, Druck und Volumen, erhöhen sich. Dies ist der übliche Fall in Isoliergläsern: Eine Druckerhöhung im Scheibenzwischenraum ist gleichzusetzen mit einer Flächenlast auf den Scheiben. Entsprechend ihrer Biegesteifigkeit wölben sich die Scheiben nach außen. Dadurch wird das Volumen des Scheibenzwischenraumes erhöht. Gleichzeitig bauen sich mit zunehmender Durchbiegung der Scheiben aber auch mechanische Spannungen in den Scheiben auf, die der weiteren Durchbiegung entgegenwirken. Für jede Temperaturerhöhung stellt sich daher ein (anderes) Gleichgewicht aus Volumen- und Druckerhöhung ein.

Bei einer Temperaturerniedrigung verhält sich ein MIG im Prinzip wie im Fall 3.), aber mit umgekehrten Vorzeichen, d.h. das Volumen des Gases (nicht die Menge) im Scheibenzwischenraum verringert sich und die Scheiben wölben sich nach innen.

Aus dem bisher beschriebenen Verhalten von Isoliergläsern ergeben sich Fragen nach dem Einfluss von MIG-Format und -Aufbau. Insbesondere der Einfluss von Scheibengröße, Scheibendicke, Scheibenabstand und Art des Randverbundes sollen diskutiert und untersucht werden.

Intuitiv verständlich ist, dass die Steifigkeit einer Glasscheibe mit ihrer Dicke zunimmt. Für die Dimensionierung von Scheiben ist es jedoch ganz wesentlich, dass diese Zunahme nicht linear, sondern mit der dritten Potenz der Dicke erfolgt. Das bedeutet, bei z.B. einer Verdopplung der Scheibendicke erhöht sich die Steifigkeit um den Faktor $2 \times 2 \times 2 = 8$. Umgekehrt heißt das auch, dass bei einer Reduzierung der Scheibendicke von den konventionell 4 mm auf 2 mm, die Biegesteifigkeit der Scheibe auf **1/8**, d.h. auf 12.5%, reduziert wird. Eine 3-mm-Scheibe besitzt noch 42% der Steifigkeit einer 4-mm-Scheibe.

Was bedeutet das in den vorigen Absätzen Gesagte für ein MIG, wenn sich die Temperatur z.B. durch Sonneneinstrahlung erhöht? Eine dünne und damit flexible Scheibe kann sich stark ausbauchen, also das Volumen des Scheibenzwischenraumes erhöhen; der Druckanstieg fällt gemäß der oben erläuterten Allgemeinen Zustandsgleichung moderat aus. Eine dickere und damit bie-



gesteifere Scheibe dagegen kann sich nur wenig ausbauchen; der Volumenanstieg ist gering, stattdessen wird der Druck im Scheibenzwischenraum erheblich ansteigen.

Die Ausbauchung einer Scheibe hängt aber nicht nur von der Scheibendicke ab, sondern auch vom Format der Scheibe. Eine große Scheibe wird vom Randverbund her weniger unterstützt, es wirken gewissermaßen "längere Hebelarme", die resultierende Ausbauchung ist größer als bei einer kleinformatigen Scheibe.

Auch der Scheibenabstand muss berücksichtigt werden, denn mit dem Scheibenabstand nimmt bei gleichem MIG-Format die im Scheibenzwischenraum eingeschlossene Gasmenge zu. Eine größere Gasmenge bedeutet eine größere absolute Änderung des Produktes p x V für eine vorgegebene Temperaturerhöhung. Da der Beitrag der Volumenzunahme durch Ausbauchung der Scheibe begrenzt ist, muss der Druck im Scheibenzwischenraum ansteigen. Das bedeutet, bei gleichem Format (und Scheibendicke) und vorgegebener Temperaturerhöhung werden Glasscheiben und Randverbund eines MIG umso mehr belastet, je größer der Scheibenzwischenraum ist.

Außerdem ist zu beachten, ob ein Mehrscheiben-Isolierglas symmetrisch oder asymmetrisch aufgebaut ist. Bei einem symmetrischen Aufbau sollten sich die beiden äußeren Scheiben bei klimatischer Belastung des MIG gleich stark durchbiegen, und die Mittelscheibe sollte gerade bleiben, da in beiden SZR der gleiche Druck herrscht. Für Floatglasscheiben ist das in guter Näherung gültig. ESG-Scheiben dagegen weisen, bedingt durch ihre Wärmebehandlung, starke Eigenspannungen und eventuell auch leichte Krümmungen auf, die je nachdem, in welcher Orientierung die Scheiben in das MIG eingebaut werden, zu Asymmetrien führen können.

Asymmetrische Aufbauten sind grundsätzlich komplizierter in ihrem Verformungsverhalten als symmetrische Aufbauten. Die beiden äußeren Scheiben verformen sich unterschiedlich stark, entsprechend ihrer unterschiedlichen Dicke und damit Steifigkeit. Daraus resultierend ergeben sich unterschiedliche Drücke in den Scheibenzwischenräumen und damit auch eine Auslenkung der mittleren Scheibe.





3.2.2 Planung der experimentellen Untersuchungen

Nach der qualitativen Analyse der Einflussfaktoren wurden mithilfe der Kirchhoffschen Plattentheorie Berechnungen zur Planung der experimentellen Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse für einige gängige Formate und Aufbauten mit dünnen Gläsern sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Wie zu erwarten war, treten die hohen Drücke und kleinen Durchbiegungen bei den dicken Scheiben und kleinen Formaten auf und umgekehrt, die niedrigen Drücke und großen Durchbiegungen bei den dünnen Scheiben und großen Formaten.

Basierend auf diesen Ergebnissen wurden Probekörper für die experimentellen Arbeiten ausgewählt. Zusätzlich zur Scheibendicke und dem Format des Isolierglases sollte auch ein möglicher Einfluss des Abstandhalters untersucht werden (siehe Tabelle 3).

Symmetrische Aufbauten sind geeignet für die "Simulation einer Klimalast" durch "Aufpumpen". Hierzu werden beide Scheibenzwischenräume über Bohrungen und Stutzen in den Randverbünden an eine Luftpumpe und ein Manometer angeschlossen. Dann wird mit der Pumpe der Druck in den Scheibenzwischenräumen in Stufen erhöht und die Durchbiegung der Scheiben gemessen. All dies kann unter normalen Laborbedingungen, d.h. bei Raumtemperatur, erfolgen. Dieses Vorgehen "simuliert" eine gleichmäßige Erwärmung eines symmetrischen MIG. Es ist nur sinnvoll bei einem symmetrischen Aufbau, da sich in diesem bei gleichmäßiger Erwärmung der gleiche Druck in beiden SZR einstellt. Die mittlere Scheibe bleibt also unbelastet.

Mit asymmetrischen Aufbauten ist dieses Vorgehen nicht möglich, denn selbst bei gleichmäßiger Erwärmung eines asymmetrischen MIG stellen sich unterschiedliche Drücke in den Scheibenzwischenräumen ein und ergeben sich unterschiedliche Durchbiegungen der Scheiben. Die mittlere Scheibe wird sich aufgrund der Druckdifferenz zwischen den beiden SZR ebenfalls wölben. Ein asymmetrischer Aufbau muss also in einer Klimakammer erwärmt werden. Dabei werden dann die Innendrücke in den Scheibenzwischenräumen und die Durchbiegungen der Scheiben gemessen.



. . . .

. .

100 A. 100 A.

3 Dünne Glasscheiben

. . .



Tabelle 2Berechnete Druckerhöhungen in den SZR und Mittendurchbiegungen der
äußeren Scheiben für eine Temperaturerhöhung von 40 K

. .

Aufbau	Format in mm x mm	Druckerhöhung SZR 1 in kPa	Durchbiegung Mitte Scheibe 1 in mm	Druckerhöhung SZR 2 in kPa	Durchbiegung Mitte Scheibe 3 in mm
Symmetrisch					
4/16/4/16/4	350x500	7,90	2,2		
	700x1000	1,07	4,7	wie SZR 1 u	nd Scheibe 1
	1000x1500 ⁽¹⁾	0,26	5,0		
2/16/2/16/2	350x500	1,98	4,4		
	700x1000	0,14	5,1	wie SZR 1 u	nd Scheibe 1
	1000x1500 ⁽¹⁾	0,03	5,1		
A a sum a stair a h					
Asymmetrisch					
3/16/3/16/8	350x500	6,44	4,2	8,77	0,3
	700x1000	0,84	8,8	1,22	0,7
	1000x1500 ⁽¹⁾	0,20	9,4	0,29	0,7
4/16/2/16/3	350x500	6,36	1,8	5,92	3,9
	700x1000	0,69	3,1	0,64	6,7
	1000x1500 ⁽¹⁾	0,16	3,2	0,15	7,0

(1): nicht für experimentelle Untersuchungen verwendet, da Format zu groß

Tabelle 3MIG Probekörper für die experimentelle Überprüfung
der statischen Dimensionierungsregeln

Aufbau	Format	Abstandhalter
	in mm x mm	
Symmetrisch		
ESG4 / 16 / ESG4 / 16 / ESG4	350 x 500	Edelstahl
		Polymer
	700 x 1000	Edelstahl
		Polymer
ESG3 / 16 / ESG3 / 16 / ESG3	350 x 500	Edelstahl
		Polymer
	700 x 1000	Edelstahl
		Polymer

3 Dünne Glasscheiben



ift –

Aufbau	Format	Abstandhalter
	in mm x mm	
TVG2 / 16 / TVG2 / 16 / TVG2	350 x 500	Edelstahl
		Polymer
	700 x 1000	Edelstahl
		Polymer
Asymmetrisch		
ESG3 / 16 / ESG3 / 16 / ESG8	350 x 500	Edelstahl
		Polymer
	700 x 1000	Edelstahl
		Polymer
ESG4 / 16 / ESG2 / 16 / ESG3	350 x 500	Edelstahl
		Polymer
	700 x 1000	Edelstahl
		Polymer

3.3 Symmetrische Aufbauten – Untersuchungen und Ergebnisse

3.3.1 Untersuchungen

Um ein Aufpumpen der MIG zu ermöglichen, mussten beide Scheibenzwischenräume an eine Pumpe und ein Manometer angeschlossen werden. Dies geschah über mit Butylband abgedichtete Einschraubschlauchtüllen im Randverbund und Silikonschläuche (Abbildung 6). Über einen T-Schlauchverbinder konnten beide Scheibenzwischenräume gleichzeitig aufgepumpt werden. Die Pumpe war eine gewöhnliche, manuell betätigte Fahrradpumpe, das Druckmessgerät vom Typ testo 510.
Flächengewicht Mehrscheiben-Isolierglas

3 Dünne Glasscheiben





Abbildung 6 Schlauchanschlüsse im Randverbund eines MIG

Die Messung der Verformung der Scheiben erfolgte mittels eines optischen, photogrammetrischen Verfahrens. Dazu wird das zu vermessende Objekt mit retro-reflektiven Markern beklebt (Abbildung 7). Dieses sind selbstklebende, kreisrunde Markierungen mit einem weißen, reflektierenden Feld im Zentrum (5 oder 10 mm Durchmesser) und einem schwarzen Ring darum herum. Letzterer erhöht den Kontrast zwischen der zentralen, reflektierenden Fläche und der Umgebung und verbessert damit die automatische Erkennbarkeit des Markers durch die Auswertesoftware.



Abbildung 7 Retro-reflektive Marker auf einem MIG, "Fähnchen" in der Ecke auf die Rückseite geklebt



Das Objekt mit den reflektierenden Markern wird mit Fotolampen angemessen ausgeleuchtet (Abbildung 8) und mit zwei Digitalkameras auf einem Stativ (Abbildung 9) fotografiert. Die relativen Positionen der beiden Kameras zueinander (Abstand und Winkel) sind durch die Kalibrierung mit einem Kalibrierkreuz (Abbildung 10) genau bekannt.



Abbildung 8 Großes MIG auf Tisch, ausgeleuchtet mit Fotolampen



Abbildung 9 Zwei Kameras auf einem Stativ, mit definiertem Abstand und Winkel zueinander



3 Dünne Glasscheiben





Abbildung 10 Kalibrierkreuz zur Bestimmung der relativen Positionen der beiden Kameras

Die beiden Kameras erzeugen zwei Bilder (Abbildung 11), die sich, bedingt durch den Abstand der Kameras, leicht unterscheiden. Ähnlich wie beim zweiäugigen Sehen, verbirgt sich räumliche Information in dem leichten Versatz der Bilder. Diese Information kann durch einen Rechenprozess extrahiert werden. Dazu werden die Pixel-Positionen eines jeden Markers, die durch ihre hohe Reflektivität für die Auswertesoftware leicht "erkennbar" sind, auf beiden Bildern bestimmt.



Abbildung 11 Die von den beiden Kameras erzeugten Bilder auf dem Bildschirm



Der Rest ist im Prinzip relativ einfache Geometrie, wie sie in der Geodäsie schon seit Langem verwendet wird (Triangulation): Die zwei Bilder eines Markers auf den Fotosensoren der beiden Kameras und der Marker selber bilden ein Dreieck. Kennt man die Winkel zwischen den Seiten eines Dreiecks und die Länge einer Dreiecksseite, so können die Längen der anderen Seiten und die Höhen im Dreieck berechnet werden.

In diesem Fall ergibt sich eine Seitenlänge des Dreiecks, nämlich der Abstand der beiden Markerbilder, im Prinzip aus dem Abstand der Kameras. Die Winkel zwischen dieser Basislänge und dem Marker auf der Scheibe ergeben sich im Prinzip aus den genauen Pixel-Positionen der Bilder auf den Fotosensoren der Kameras. Mehr Details müssen an dieser Stelle nicht diskutiert werden, denn andere Einflussgrößen wie etwa die Neigung der Kameras zueinander, die Größe der Sensoren und die Brennweiten der Objektive fließen in die Kalibrierung mit dem Kalibrierkreuz ein.

Die Auswertung erfolgt automatisch durch eine Software. Als Resultat erhält man die X-, Y- und Z-Koordinaten der Markerpunkte in einem willkürlich zu definierenden Koordinatensystem. Sinnvollerweise wählt man die beiden Kanten des MIG-Probekörpers als X- und Y-Achse, die Normale auf die Scheibe als Z-Achse und den Schnittpunkt der Z-Achse mit der Scheibenoberfläche im Ausgangszustand (ohne Druckbelastung) als Nullpunkt. Dann erhält man alle durch Aufpumpen des MIG hervorgerufenen Auswölbungen als Δ Z-Werte.

Die reflektiven Messmarken wurden platziert (Abbildung 12) auf den Ecken (Positionen 1 bis 4), den Mitten der Ränder (Positionen 5 bis 8), 1/6 der Diagonalen (Positionen 9 bis 12), 2/6 der Diagonalen (Positionen 13 bis 16) und der Scheibenmitte (3/6, Position 17). Die Positionen auf den Probekörpern wurden vor dem Aufkleben der Marker mit Hilfe eines Meterstabes angezeichnet, die Marker danach mit einer Pinzette platziert. Dadurch liegt die Genauigkeit der Positionierung der inneren Marker (9 bis 17) im Bereich von maximal +/- 2 mm. Das ist für den Vergleich mit theoretisch ermittelten Werten völlig ausreichend.



3 Dünne Glasscheiben





Abbildung 12 MIG-Probekörper mit reflektiven Messmarken

Zusätzlich zu diesen 17 Messmarken auf der Vorderseite der Probekörper wurden "Fähnchen" mit Messmarken an den Ecken auf die Rückseite geklebt (Abbildung 7). Außerdem gab es weitere Messmarken in der näheren Umgebung der Probekörper, auf fixen Gegenständen wie dem Scheibengestell, an das die Probekörper während der Messung angelehnt waren (Abbildung 13). All diese Extramessmarken erlauben etwaige unerwünschte Verschiebungen und Verkippung der Probekörper relativ zu den Kameras festzustellen und rechnerisch auszugleichen.

Flächengewicht Mehrscheiben-Isolierglas

3 Dünne Glasscheiben







Abbildung 13 MIG Probekörper mit zusätzlichen reflektiven Markern auf Fähnchen und in der Umgebung

Die photogrammetrischen Verformungsmessungen erfolgten mit dem von der Fa. GOM (Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH, Braunschweig) entwickelten PONTOS System. Ausgeführt wurden die Messungen vom Materialprüfungsamt für das Bauwesen der Technischen Universität München. Nach Aussagen der Fa. GOM und des Materialprüfamtes beträgt die Messunsicherheit in unserem Anwendungsfall etwa 4/100 mm.

Vor den PONTOS Messungen sind die Dicken von Scheiben und SZR an allen MIG Probekörpern bestimmt worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 zusammengefasst.



Tabelle 4 Dicken der MIG Probekörper für PONTOS Messungen

Aufbau (symmetrisch) Abstand- MIG Format halter Nr. Gesamt G1 SZR1 G2 SZR2	G3 3,8 0,1
	3,8 0,1
ESG4 / 16 / ESG4 / 16 / ESG4	3,8 0,1
350 mm x 500 mm Edelstahl 1 44,2 3,9 16,4 3,9 16,2	0,1
0,2 0,1 0,0 0,1 0,1	
Polymer 2 43,7 3,8 16,1 3,8 16,1	3,9
0,1 0,0 0,0 0,1 0,0	0,1
700 mm x 1000 mm Edelstahl 3 43,9 3,8 16,2 3,9 16,2	3,9
0,1 0,0 0,0 0,1 0,1	0,1
Polymer 4 44,5 3,8 16,3 3,8 16,8	3,9
0,2 0,1 0,1 0,1 0,3	0,1
350 mm x 500 mm Edelstahl 5 41,7 3,2 16,1 3,2 15,9	3,2
0,1 0,1 0,1 0,0 0,1	0,0
Polymer 6 42,0 3,2 16,2 3,2 16,2	3,2
0,2 0,0 0,1 0,0 0,1	0,0
700 mm x 1000 mm * 7 41,6 3,8* 15,9 3,2 15,5	3,2
0,1 0,1 0,1 0,0 0,0	0,1
Polymer 8 42,0 3,2 16,2 3,2 16,3	3,2
0,2 0,0 0,1 0,0 0,1	0,0
TVG2 / 16 / TVG2 / 16 / TVG2	
350 mm x 500 mm Edelstahl 9 38,1 2,1 15,8 2,1 15,9	2,1
0,1 0,1 0,1 0,0 0,1	0,1
Polymer 10 38,4 2,1 16,1 2,1 16,1	2,1
0,1 0,1 0,1 0,1 0,1	0,0
700 mm x 1000 mm Edelstahl 11 38,2 2,1 16,0 2,1 15,9	2,1
0,3 0,0 0,2 0,0 0,3	0,0
Polymer 12 38,3 2,1 16,1 2,1 16,0	2,1
0,2 0,1 0,1 0,1 0,1	0,0

*: Falsche Scheibe, "4mm" anstatt "3mm"; bei der Auswertung berücksichtigt



3.3.2 Ergebnisse – Symmetrische Aufbauten

Die Ergebnisse der photogrammetrischen Messungen werden in den nachfolgenden Abbildungen präsentiert. Abbildung 15 bis Abbildung 19 stellen die Verformung der vermessenen Scheiben in Abhängigkeit von dem durch Aufpumpen erzeugten Druck im Scheibenzwischenraum (Flächenlast) dar. Dabei ist mit "Verformung" die Verschiebung der reflektiven Marker senkrecht zur Scheibenebene (im unbelasteten Zustand) gemeint, so wie in 3.3.1 erläutert. "Eck", "Rand", "1/6", "2/6" und "3/6" stehen für die bereits in 3.3.1 erwähnten Messpositionen, die hier noch mal in Abbildung 14 zu sehen sind.



Abbildung 14 Messpositionen bei photogrammetrischen Messungen

Die Messwerte für die Positionen "Eck", "Rand", "1/6" und "2/6" wurden jeweils aus den vier zugehörigen Messpunkten gemittelt. Streng genommen ist das für den "Rand" nicht korrekt, da die lange und die kurze Kante unterschiedliche Steifigkeit aufweisen und daher für die lange Kante eine höhere Aufweitung zu erwarten ist als für die kurze Kante. Es zeigte sich jedoch, dass die Verschiebungen sowohl der Eckpunkte als auch der Randpunkte so gering waren, im Vergleich zu den Verschiebungen der anderen Punkte, dass sie zum Teil im Bereich der zu erwartenden Messunsicherheiten lagen. So zeigten die Eckpunkte eine Verschiebung "nach hinten", also eine Reduzierung



der Probekörperdicke an den Ecken, um maximal 0,15 mm, bei den meisten Probekörpern aber erheblich weniger. Der Rand zeigte eine Tendenz zu einer leichten Aufweitung, maximal 0,3 mm, auch hier in den meisten Fällen erheblich weniger. Zum Vergleich, die maximalen Durchbiegungen in Scheibenmitte, Position "3/6", lagen bei mehreren Millimetern. Die Eck- und Randpunkte wurden daher als gemittelte Werte in die Graphen aufgenommen, um zumindest größenordnungsmäßig die Unterschiede zwischen den Verformungen des MIG am äußeren Rand ("Eck", "Rand") und in der Mitte ("1/6", "2/6" und "3/6") zu zeigen. Ein weiterer rechnerischer Aufwand zur Unterscheidung von langen und kurzen Kanten schien nicht gerechtfertigt.

Zusätzlich zu den gemessenen Werten sind in den Verformungsgraphen auch noch die theoretischen Kurvenverläufe für die Positionen "1/6", "2/6" und "3/6" eingezeichnet. Genau wie bei den Messwerten handelt es sich um die Verschiebungen der Punkte senkrecht zur Scheibenebene (im unbelasteten Zustand). Die gestrichelten Kurven, z.B. T1/6, geben das Verformungsverhalten gemäß der Kirchhoffschen Plattentheorie wieder. Die durchgezogenen Kurven, z.B. T2/6nl, entsprechen dem nicht-linearen Ansatz unter Berücksichtigung von Membranspannungen (s. 3.5). Die Berechnungen erfolgten an der Hochschule Rosenheim durch Prof. Dr. Franz Feldmeier.

Ziel dieser Untersuchungen war es, festzustellen, ob das Verformungsverhalten auch von dünnen Glasscheiben durch das Kirchhoffsche Model noch ausreichend genau beschrieben werden kann, oder ob ein nicht-linearer Ansatz unter Berücksichtigung von Membranspannungen besser geeignet ist. Dementsprechend soll im Folgenden, in exemplarischer Weise, der durch Messpunkte gegebene Kurvenverlauf mit den Theoriekurven verglichen werden.

Einfluss des Abstandhalters

Abbildung 15 illustriert, dass die Art des Abstandhalters (Edelstahl bzw. Polymer) nur einen geringen Einfluss auf das Verformungsverhalten hat. In diesem Fall sind die beiden Graphen fast deckungsgleich. (Die Abweichung der gemessenen Werte von den Theoriekurven ist hier zunächst irrelevant.) Generell gilt: mit abnehmender Scheibendicke nimmt der Einfluss des Randverbundes ab, da die Flexibilität der Glasscheiben zunimmt. Eine Temperaturerhöhung führt zur Volumenvergrößerung des Scheibenzwischenraumes durch Wölbung der Glasscheibe; der Druckanstieg und damit die Belastung des Randverbundes bleiben gering. In der Praxis wird der Einfluss des Randverbundes noch dadurch weiter reduziert, dass das MIG in einen Rahmen eingespannt ist.

ROSENHEIM



Einfluss des Scheibenformates

Abbildung 16 zeigt die Verformungsgraphen von einem kleinformatigen (MIG 1) und einem großformatigen MIG (MIG 3) gleicher Scheibendicke. Die Skalierung der Flächenlastachsen ist unterschiedlich, aber wichtiger, die Skalierung der Verformungsachsen ist die Gleiche. Bei dem kleinformatigen MIG liegen die Theoriekurven sehr dicht beieinander und die Messpunkte liegen praktisch auf den Theoriekurven. Das bedeutet, dass die (einfachere) Kirchhoffsche Theorie ausreicht, um das Verformungsverhalten des kleinformatigen MIG zu beschreiben.

Bei dem großformatigen MIG sind die Kurven für die Kirchhoffsche und die nicht-lineare Theorie deutlich zu unterscheiden. Der Membraneffekt, der in der nicht-linearen Theorie berücksichtigt wird, macht sich in einem großformatigen MIG stärker bemerkbar als in einem kleinformatigen MIG, bei gleicher Scheibendicke. Die Messpunkte liegen dichter an den nicht-linearen Kurven. Das bedeutet die nicht-lineare Theorie beschreibt das Verformungsverhalten eines großformatigen MIG besser als die Kirchhoffsche Theorie.

Einfluss der Glasdicke

Der Einfluss der Glasdicke ist in Abbildung 17 und Abbildung 18 für klein- bzw. großformatige MIG erkennbar. Mit abnehmender Scheibendicke klaffen die Theoriekurven für die Kirchhoffsche und die nicht-lineare Theorie weiter auseinander. Die gemessenen Punkte liegen dichter an den nicht-linearen Theoriekurven als an den Kirchhoffschen Kurven. Das bedeutet: mit abnehmender Glasdicke beschreibt die nicht-lineare Theorie das Verformungsverhalten von MIG besser als die Kirchhoffsche Theorie.







Abbildung 15 Kein signifikanter Einfluss durch den Abstandhalter





Abbildung 16 Einfluss des Scheibenformats



3 Dünne Glasscheiben

ROSENHEIM





Abbildung 17 Einfluss der Glasdicke bei kleinformatigen MIG











Abbildung 18 Einfluss der Glasdicke bei großformatigen MIG



Abweichung von der Theorie

Im vorigen Abschnitt wurden in der Abbildung 18 nur großformatige MIG der Glasdicken 4 mm und 3 mm angeführt, um den Einfluss der Glasdicke zu illustrieren. Der Grund dafür ist, dass die beiden großformatigen Scheiben mit 2 mm Glasdicke in ihrem Verformungsverhalten von der Theorie abwichen. Abbildung 19 zeigt dies: Für MIG 11, mit Edelstahlabstandhalter, lagen die gemessenen Werte erheblich unter den Theoriekurven, für MIG 12, mit Polymerabstandhalter, lagen die gemessenen Werte über den nicht-linearen Kurven. Bezüglich der Abmessungen (Glasdicken, Scheibenzwischenräume) waren die beiden Probekörper praktisch gleich (Tabelle 4) Ein Einfluss des Abstandhalters (der einzige grundsätzliche Unterschied zwischen MIG 11 und MIG 12) erschien nach den vorausgegangenen Erfahrungen eher unwahrscheinlich. Deshalb wurden diese beiden MIG erneut aufgepumpt und die Mittendurchbiegungen (Position "3/6") mit einer Messuhr erfasst; und zwar auf beiden Seiten der Probekörper. Die Resultate der mechanischen Messungen sind zusammen mit denen der photogrammetrischen Messungen (PONTOS) in Abbildung 20 dargestellt.

Es wurden jeweils zwei Durchläufe mit mechanischen Messungen durchgeführt (1. und 2. in Abbildung 20). Zwischen den beiden Durchläufen lag eine Pause von etwa einer Stunde, so dass die Probekörper sich wieder vollständig entspannen konnten, die Messuhren wieder auf Null standen und der Innendruck wieder dem atmosphärischen Druck glich.

Die Kurven in Abbildung 20 illustrieren, erstens, dass die mechanischen Messungen sehr gut mit den photogrammetrischen Messungen übereinstimmen und, zweitens, dass die Probekörper nicht, wie ursprünglich angenommen, symmetrisch waren. Das Verformungsverhalten der Vorderseite unterscheidet sich in beiden Fällen (MIG 11 und 12) erheblich von dem der Rückseite. (Die Bezeichnungen "Vorder-" und "Rückseite" sind willkürlich gewählt. Die Seite, auf der die photogrammetrischen Messungen durchgeführt wurden, wurde als "Vorderseite" betrachtet.)

Die Auswahl der Seite für die photogrammetrischen Messungen erfolgte rein zufällig, und damit ergab sich dann auch die Richtung der Abweichung von der Theorie in Abbildung 19, einmal in die eine und einmal in die andere Richtung, rein zufällig.

ROSENHEIM



Es blieb also die Frage, warum die Probekörper asymmetrisch waren, warum die Glasscheiben der Vorder- und Rückseite sich in ihrer Steifigkeit unterschieden. Dickenunterschiede hätten dies erklären können, da die Scheibendicke in der dritten Potenz in die Berechnung der Scheibensteifigkeit einfließt, konnten aber durch zusätzliche Messungen ausgeschlossen werden. Vermutlich waren Unterschiede im Vorspannungszustand der TVG-Scheiben die Ursache für Unterschiede in der Steifigkeit und damit im Verformungsverhalten. Nach Erfahrungen aus 4-Schneiden-Biegeversuchen verhalten sich Floatscheiben gleicher Geometrie noch recht gleichförmig, während nach dem thermischen Vorspannen das mechanische Verhalten wesentlich stärker variieren kann. Auch führt das thermische Vorspannen häufig zu einer leichten Verkrümmung einer ursprünglich planen Floatglasscheibe, und je nachdem in welcher Orientierung eine verkrümmte Scheibe verarbeitet wird, variiert die Steifigkeit eines daraus hergestellten MIG Probekörpers.

Zur Ergänzung und zum Vergleich wurde noch ein weiterer Probekörper, genau wie MIG 11 und MIG 12, mechanisch nachgemessen. In diesem Fall ergab sich eine gute Übereinstimmung zwischen der Vorder- und der Rückseite, und ebenfalls wieder eine gute Übereinstimmung zwischen den mechanischen und den photogrammetrischen Messungen (Abbildung 21).







Abbildung 19 Abweichungen von der Theorie















Abbildung 21 Vergleich photogrammetrische (PONTOS) und mechanische Messungen (Messuhr) für Position 3/6 (Mittendurchbiegung)

Zusammenfassung

Im Vergleich zur nicht-linearen Theorie ergeben sich bei Berechnung nach der Kirchhoffschen Plattentheorie für Gläser dünner als 4 mm geringfügig höhere Durchbiegungen und Spannungen.

Für die untersuchten Aufbauten ist im Rahmen der Bemessung eine Berücksichtigung des Randverbundes nicht erforderlich. Dies wird auch in der Literatur bestätigt [12], [13].

÷.,	- 1 -1			12		- 11								1.2			12.		- 5-	1.1			12			- 5-						12				- 1 -1		- 1 -1
÷	÷	•	÷	÷	•	÷	÷	÷	•	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	•	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	•	÷	•	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷
																		FI	äcł	nen	gev	vic	ht I	Ne ł	nrse	che	ibe	n-l	soli	ierę	glas	5						
					_		_	_																3	Di	inn	e G	las	scl	hei	ben	Ì						
÷	÷	÷	÷	÷			f	4	•		•	÷	÷	÷	•	•	÷	•	÷		÷		÷	•	÷	÷		•		•	÷		÷	•		÷	÷	÷
					DC																																	
					KU	JSEP	NIL	IN																														

3.4 Asymmetrische Aufbauten – Untersuchungen und Ergebnisse

3.4.1 Untersuchungen

Die Erwärmung der asymmetrischen Aufbauten erfolgte in einer Klimakammer. Abbildung 22 zeigt einen Probekörper in einem Holzgestell in der Klimakammer stehend. Die Druckmessgeräte waren über Silikonschläuche und mit Butylband abgedichtete Einschraubschlauchtüllen mit den beiden Scheibenzwischenräumen des Probekörpers verbunden. Die Wegaufnehmer zur Messung der mittigen Scheibendurchbiegung waren an dem Holzgestell festgeschraubt, Abbildung 23.



Abbildung 22 Holzgestell mit eingebautem MIG Probekörper (700 mm x 1000 mm) in Klimakammer



Abbildung 23 Details aus Abbildung 22: Schlauchanschlüsse an SZR, Wegaufnehmer zur Messung der Durchbiegung und Messgeräte für Durchbiegung und Druck



Der ursprüngliche Plan sah vor, die Probekörper von Raumtemperatur ausgehend um 40 K, also auf etwa 60 °C, zu erwärmen. (Für diesen Fall waren die in Tabelle 2 dokumentierten Berechnungen angestellt worden.) Das ließ sich jedoch bei den kleinen Formaten (mit den stärkeren Druckanstiegen) nicht verwirklichen, da die Schlauchanschlüsse zwischen 40 °C und 50 °C, bedingt durch ein Fließen des Butylbandes, undicht wurden. Um in einem sicheren Temperaturbereich der Schlauchanschlüsse zu bleiben, wurden die kleinen Probekörper zunächst auf 5 °C heruntergekühlt und dann nur um 25 K bis 30 K erwärmt. Dementsprechend mussten auch die Berechnungen der theoretischen Werte korrigiert werden. Für jeden Einzelfall wurden die Druckanstiege und Durchbiegungen mit den jeweiligen Temperaturen und den jeweiligen Scheibendicken berechnet und zwar sowohl nach der linearen Kirchhoffschen Plattentheorie (Theorie erster Ordnung) als auch nach einer erweiterten, nichtlinearen Plattentheorie zur Berücksichtigung von Membranspannungen.

Die Gasdichtheit der Probekörper unter Druck, d.h. bei Temperaturerhöhung und über einen längeren Zeitraum, war kritisch für diese Untersuchungen. Deshalb wurde der Druckanstieg während des Aufheizens in der Klimakammer aufgezeichnet. Abbildung 24 illustriert exemplarisch die Druckanstiege in den Scheibenzwischenräumen von Probekörper MIG 21 während des Aufheizens von 5 °C auf 30 °C. Die Drücke stabilisierten sich nach etwa 90 Minuten, wenn der Probekörper die Endtemperatur angenommen hatte, d.h. die Scheibenzwischenräume konnten als gasdicht betrachtet werden.

Änderungen des atmosphärischen Luftdrucks wurden parallel zu den Untersuchungen in der Klimakammer beobachtet. Die absoluten Änderungen über die Zeitspanne der Untersuchungen lagen im Rahmen von 15 bis 75 Pa/Std. und betrugen für alle Probekörper weniger als 5 % der durch die Erwärmung hervorgerufenen Drucksteigerungen. Alle Ergebnisse wurden für Änderungen des atmosphärischen Luftdrucks korrigiert.

ROSENHEIM





Abbildung 24 Druckanstieg in den Scheibenzwischenräumen eines Mehrscheiben-Isolierglases

3.4.2 Ergebnisse – Asymmetrische Aufbauten

Tabelle 5 fasst die Ergebnisse der Untersuchungen an asymmetrischen MIG zusammen.

Flächengewicht Mehrscheiben-Isolierglas

.

3 Dünne Glasscheiben

.

. . .



		D	icken				SZR	1	SZR]	
Aufbau (nom.) Format (mm) Abstandhalter MIG Nr.	G1 mm	SZR1 mm	G2 mm	SZR2 mm	G3 mm	Temp erhöh.	Druck- diff. kPa	f mm	Druck- diff. kPa	f mm	
ESG3/16/ESG3/16/ESG8	3,2	15,4	3,2	16,8	7,9	25K	3,38	2,1	4,38	0,3	Messung
350 x 500							4,31	2,3	5,87	0,2	Kirchhoff
Stahl							4,38	2,2	5,91	0,2	Membran
21											
ESG3/16/ESG3/16/ESG8	3,1	16,2	3,2	15,7	7,8	25K	3,26	1,9	4,15	0,3	Messung
350 x 500							4,17	2,5	5,72	0,2	Kirchhoff
Polymer							4,25	2,4	5,77	0,2	Membran
22											
ESG4/16/TVG2/16/ESG3	3,9	15,9	2,1	16,2	3,2	31K	3,63	1,6	3,34	2,4	Messung
350 x 500							5,15	1,5	4,89	2,6	Kirchhoff
Stahl							5,22	1,5	4,97	2,5	Membran
25											
ESG4 / 16 / ESG2 / 16 / ESG3	3,8	15,8	2,1	16,6	3,2	30K	3,50	1,3	3,36	2,2	Messung
350 x 500							4,96	1,6	4,76	2,6	Kirchhoff
Polymer							5,02	1,6	4,83	2,5	Membran
26											
ESG3/16/ESG3/16/ESG8	3,2	15,8	3,2	16,1	8,1	40K	1,21	6,5	1,57	1,4	Messung
700 x 1000							0,99	8,6	1,44	0,8	Kirchhoff
Stahl							1,37	7,3	1,80	1,0	Membran
23											
ESG3/16/ESG3/16/ESG8	3,2	16,1	3,2	16,4	7,9	40K	1,17	5,8	1,53	1,4	Messung
700 x 1000							0,99	8,6	1,43	0,8	Kirchhoff
Polymer							1,35	7,2	1,78	1,0	Membran
24											
ESG4/16/ESG2/16/ESG3	3,8	16,0	2,1	15,8	3,2	40K	0,75	3,8	0,72	5,8	Messung
700 x 1000							0,73	3,8	0,69	6,0	Kirchhoff
Stahl							0,83	3,8	0,80	5,2	Membran
27											
ESG4/16/TVG2/16/ESG3	3,2	16,1	2,1	15,9	3,2	40K	0,62	4,7	0,63	4,7	Messung
700 x 1000	*						0,57	4,9	0,57	4,9	Kirchhoff
Polymer							0,66	4,6	0,66	4,6	Membran
28											

 Tabelle 5
 Druckerhöhungen und Durchbiegungen in asymmetrischen Aufbauten

.

. .

*: Falsche Scheibe, "3 mm" anstatt "4 mm"; bei der Auswertung berücksichtigt



Für die kleinformatigen MIG (350 mm x 500 mm) liegen die gemessenen Druckdifferenzen etwa 20 bis 30% unter den berechneten Druckdifferenzen. Es handelt sich bei diesen Druckdifferenzen um die Differenz zwischen dem Druck im SZR und dem äußeren Atmosphärendruck. Zur Beschreibung eines Gaszustandes mit der allgemeinen Gasgleichung (p x V = konstant) benötigt man aber den absoluten Druck. Der ergibt sich durch Addition des normalen Atmosphärendrucks zu den gemessenen bzw. berechneten Druckdifferenzen. Für eine Abschätzung genügt die Addition von 100 kPa. Damit liegen dann die gemessenen Werte nur etwa 1 % unter den berechneten Werten (ausgedrückt in absoluten Drücken). Nach der allgemeinen Gasgleichung geht ein Druckabfall von 1% einher mit einer Volumenvergrößerung von etwa 1%. Eine Volumenvergrößerung des SZR von 1% ergäbe sich aus einer Randaufweitung des MIG von etwa 1 %. Bei einem SZR von 16 mm sind das 0,16 mm. Das bedeutet, eine Randaufweitung von nur 0,1 bis 0,2 mm könnte schon die beobachteten Unterschiede zwischen den gemessenen und den berechneten Werten erklären.

Die nach der Kirchhoffschen-Theorie und nach der nicht-linearen Theorie berechneten Werte liegen dicht beieinander. Beide Theorien sind unter den gegebenen experimentellen Bedingungen ähnlich gut geeignet, den Druck im SZR und die Durchbiegung zu berechnen.

Für die größeren MIG (700 mm x 1000 mm) ist die Übereinstimmung zwischen Messung und Theorie besser als für die kleinformatigen MIG. Dies ist besonders deutlich bei den Aufbauten, die eine geringe Asymmetrie (4/16/2/16/3: MIG 27) aufweisen bzw. symmetrisch sind (3/16/2/16/3: MIG 28).

3.5 Erstellung von Vorbemessungsdiagrammen

Zur Bemessung von Glas bei Klima- und Windlast werden die maximale Biegezugspannung und u.U. auch die maximale Durchbiegung herangezogen. Um einen Überblick über die auftretenden Spannungen und Durchbiegungen von Dreischeiben-Isolierglas mit dünnen Scheiben bei üblichen Belastungen zu erhalten, wurden diese für mehrere Aufbauten berechnet und in Diagrammform als Funktion des Scheibenformats (Länge der kurzen und langen Scheibenkante, maximal 1,5 m x 2,5 m) dargestellt.

Dieses Kapitel wurde an der Hochschule Rosenheim durch Prof. Dr. Franz Feldmeier erstellt.



Die statischen Grundlagen und Berechnungsverfahren sind in [11] dargestellt. Die Lasten wurden entsprechend den Vorgaben der Arbeitsgruppe wie folgt angenommen:

- Klimalast: 16 kPa (isochorer Druck), gleich f
 ür beide Scheibenzwischenr
 äume
- Windlast: 0,50 kN/m², wirkend als Druck auf eine Außenscheibe

Die Überlagerung der Einwirkungen von Klima und Wind wurde jeweils ungünstig bezogen auf die Einzelscheibe angenommen. Der erhöhte Windsog an Gebäudekanten wird durch die Windlastannahme nicht erfasst. Zum Vergleich die zulässige maximale Spannung für Floatglas nach TRLV [8]:

- Bei Klimalast bzw. Windlast alleine: 18 N/mm²
- Bei Überlagerung von Klima- und Windlast, auch bei Scheibenflächen über 1,6 m², erhöht sich die zulässige Spannung um 25 % auf: 22,5 N/mm²

Für folgende Aufbauten wurden die maximale Biegzugspannung und Durchbiegung berechnet:

4/18/4/18/4 (Referenzaufbau) 3/18/2/18/3 4/18/2/18/3

Dabei wird die folgende Bezeichnung verwendet:

Nr1/SZR1/SNR2/SZR2/SNr3

- SNr.1 Scheibe-Nr. 1 (zum Außenraum)
- SZR1 Scheibenzwischenraum 1 (auch äußerer SZR)
- SNr.2 Scheibe-Nr. 2 (Mittelscheibe)
- SZR2 Scheibenzwischenraum 2 (auch innerer SZR)
- SNr.3 Scheibe-Nr. 3 (zum Innenraum)

Die Bezeichnungen "Innen" und "Außen" können sich sowohl auf den Raum als auch auf das Isolierglas beziehen und sind daher nicht eindeutig, z.B. kann Scheibe Nr.3 als "Innenscheibe" bzgl. eines Raumes, aber auch als "Außenscheibe" bzgl. eines Dreischeiben-Isolierglases bezeichnet werden. Es wird daher die simple Nummerierung benutzt.

Bei symmetrischen Aufbauten wird die der Windlast zugewandte Glasscheibe Nr. 1 im Vergleich zur abgewandten Scheibe Nr. 3 etwas stärker beansprucht; es genügt daher die Berechnung von Scheibe Nr. 1. Bei asymmetrischem



Scheibenaufbau sind die Belastungen der beiden Scheiben ungleich; es wurden daher Diagramme für beide Scheiben erstellt. Die mittlere Scheibe Nr. 2 ist generell weniger beansprucht und wird daher üblicherweise nicht berücksichtigt.

Statische Grundlagen

In der praktischen Bemessung von Isolierglas wird meist die geometrisch lineare *Kirchhoffsche Plattentheorie* für allseitig gelagerte rechteckige Platten bei gleichförmiger Flächenlast zugrunde gelegt. In der Technischen Richtlinie des Glaserhandwerks Nr. 2 "Windlast und Glasdicke" [14] wird die gleichwertige *Bachsche Plattenformel* verwendet. Diese Theorie ist gültig, so lange die maximale Verformung der Glasplatte (Durchbiegung in Scheibenmitte) nicht wesentlich größer als die Glasdicke ist. Bei größeren Verformungen liefert die Theorie zunehmend zu große, d.h. auf der sicheren Seite liegende Werte für Durchbiegung und Spannung.

Bei allseitiger Lagerung entstehen bei größerer Verformung zunehmend Membranspannungen, die Platte verformt sich weniger, sie wird steifer. Abbildung 25 zeigt das grundsätzliche statische Verhalten einer Platte bei größerer Durchbiegung bei allseitiger Lagerung. Durch die Sehnenverkürzung bildet sich ein umlaufender "Druckring", welcher den Aufbau von Membranzugspannungen in der Scheibenfläche ermöglicht. Hierdurch wird im Vergleich zur einfachen Biegetheorie (Kirchhoff) bei gleicher Belastung sowohl die Verformung als auch die Zugspannung reduziert, siehe Abbildung 26. Der Effekt ist bei quadratischen Platten am größten und verschwindet bei schmalen Formaten ab einem Seitenverhältnis von etwa 1:3. Bei zweiseitiger Lagerung (bzgl. Windlast) treten keine Membranspannungen auf.











Im allgemeinen Fall erfolgt eine ingenieurgemäße Berechnung heute rechnergestützt mit Finite-Elemente-Methoden und erfordert entsprechendes Fachwissen. Für den häufigen Fall der allseitig gelagerten Rechteckscheibe und unter Annahme einer allseitig linienförmigen, unnachgiebigen, aber frei drehbaren Lagerung bei niedergehaltenen Ecken wurden im Rahmen der Europäischen Normung zu EN 13474 Tabellen berechnet und später erweitert und publiziert [12]. Diese Tabellen wurden parametrisiert und liegen den geometrisch nicht linearen Berechnungen der hier vorliegenden Arbeit zugrunde.



Außerdem wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit gezeigt, dass die Anwendung der nicht-linearen Theorie (abgekürzt mit NL) besser mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen (siehe 3.3) übereinstimmt als die lineare Kirchhoffsche Theorie.

Beispiel lineare vs. Nicht-lineare Theorie

Zur Erläuterung des statischen Verhaltens von Dreischeiben-Isolierglas bei Wind und Klimalast wird der Referenzaufbau 4/18/4/18/4 detaillierter dargestellt. Da die NL-Effekte bei Seitenverhältnis 1:1 am deutlichsten sind, werden zuerst nur Quadratformate behandelt. Abbildung 27 zeigt die auf die drei Scheiben einwirkende Flächenlast, abhängig von der Kantenlänge. Die isochore Klimalast von 16 kPa wirkt bei Kantenlängen unter 20 cm voll auf Scheibe Nr. 1 und Nr. 3. Außerdem wirkt auf Scheibe Nr.1 noch die Windlast, welche hier ausnahmsweise mit 2 kPa angesetzt wurde, so dass sich eine Gesamtflächenlast von 18 kPa ergibt. Bei einer Kantenlänge von 50 cm (entspricht etwa der kritischen Kantenlänge) ist die Klimalast auf die Hälfte abgefallen und die Windlast verteilt sich auf alle drei Scheiben, d.h. auch die mittlere Scheibe Nr. 2 wird nun belastet. Bei einer Kantenlänge von 100 cm zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen linearer (blaue Kurven) und nicht linearer (rote Kurven) Theorie: die Berücksichtigung der Membranspannung führt zu einer geringeren Verformung und so zu einer höheren wirksamen Klimalast.

Die resultierende Durchbiegung für Scheibe Nr. 1 (jetzt wieder bei 0,5 kPa Windlast) ist für Wind, Klimalast und die Überlagerung aus beiden Einwirkungen in Abbildung 28 dargestellt. Ab einer Kantenlänge von ca. 60 cm liefert die NL-Berechnung (rote Kurven) zunehmend geringere Durchbiegung. Abbildung 29 zeigt die entsprechende Zugspannung von Scheibe Nr. 1. Hier führt die NL-Berechnung bei Kantenlängen zwischen 80 cm und 190 cm zu etwas höheren wenn auch unkritischen Spannungen. Diese unerwartete Situation gilt jedoch nur für quadratische Scheiben, bereits bei einem Seitenverhältnis von 1:1,1 liefert die NL-Berechnung eine geringere Zugspannung. Da quadratische Scheiben selten sind und die Abweichung nicht groß ist, liegt die einfache lineare Theorie für die Praxis auf der sicheren Seite.





Abbildung 27 Wirksame Flächenlast auf die Einzelscheiben (SNr. 1 ist die dem Winddruck zugewandte Scheibe, SNr. 2 die Mittelscheibe)



e = 1,0 3IG 4/18/4/18/4 SNr.1 Wind 0,5 kPa Klima: 16,0/16,0 kPa

Abbildung 28 Durchbiegung der Scheiben Nr. 1 bei Wind und Klima und der gleichzeitigen Einwirkung beider Lasten





Abbildung 29 Zugspannung der Scheiben Nr. 1 bei Wind und Klima und der gleichzeitigen Einwirkung beider Lasten

Glasdicke, Klimalast und Lastverteilung

Bei Einwirkung äußerer Lasten (Wind) ergeben sich schon bei relativ kleinen Formaten parallele Biegeflächen, gleichbedeutend mit einer Lastverteilung einsprechend der Plattensteifigkeit. Bei linearer Theorie ist die Spannung dann proportional zur Glasdicke, d.h. dicke Scheiben werden hoch, dünne Scheiben gering beansprucht. Wie Abbildung 30 zeigt, wird bei NL-Theorie die Proportionalität deutlich gemindert, jedoch bleibt die grundsätzliche Aussage "maßgebend ist die Spannung der Scheibe größter Dicke" weiterhin richtig.

Komplizierter sind die Verhältnisse bei interner Last (Klima). Hier wird die Last selbst durch die Steifigkeit bestimmt, so dass die dünnere Außenscheibe (also SNr.1 oder SNr.3) maßgebend wird. Die mittlere Scheibe SNr.2 ist wenig belastet, siehe Bild Abbildung 31.

Bei Überlagerung beider Lasten ergeben sich teilweise unübersichtliche, auch vom Seitenverhältnis abhängige Verhältnisse. Allgemein gilt, dass eine dünne mittlere Scheibe (SNR.2) wenig beansprucht wird. Bei asymmetrischem Aufbau wird die dünnere der beiden äußeren Scheiben (SNr. 1 bzw. SNr. 3) jedoch aufgrund der Klimalast i.d.R. für die Bemessung maßgebend, siehe Bilder



Abbildung 32 und Abbildung 33. Für große, sehr schmale Formate oder bei dominierender äußerer Last kann aber auch die dicke Scheibe maßgebend werden (Abbildung 34).



Abbildung 30 Asymmetrischer Aufbau, Spannung der Einzelscheiben aufgrund Windlast



Abbildung 31 Asymmetrischer Aufbau, Spannung der Einzelscheiben aufgrund Klimalast





Abbildung 32 Aufbau 4/18/2/18/3 für Seitenverhältnis 1:1 Spannungsverlauf SNr. 1 bis 3



Abbildung 33 Aufbau 4/18/2/18/3 für Seitenverhältnis 1:2 Spannungsverlauf SNr. 1 bis 3





Abbildung 34 Aufbau 4/18/2/18/3 für Seitenverhältnis 1:4 Spannungsverlauf SNr. 1 bis 3

Bemessungsdiagramme

Vorbemessungsdiagramme stellen die Verwendung eines bestimmten Scheibenaufbaus bei vorgegebener Einwirkung der Lasten übersichtlich dar. Abbildung 35 zeigt ein Beispiel für den Scheibenaufbau 3/18/3/18/3 bei Standardklimalast und 0,5 kPa Windlast (Windsog an Gebäudekanten wird damit nicht erfasst). Zugrunde liegt hier der Nachweis nach TRLV, d.h. eine zulässige Spannung 18 N/mm² (bei Überlagerung von Klima und Windlast +25 % bei Scheibenfläche bis zu 1,6 m²).

Liegt der Schnittpunkt der Linien zur langen und kurzen Kante der Isolierglasscheibe im hellen Bereich, so ist der statische Nachweis der Scheibe nach TRLV möglich. Liegt der Schnittpunkt im dunklen Bereich oben rechts, wird die zulässige Spannung bei Windlast überschritten. Liegt der Schnittpunkt in den achsenparallelen dunklen Bereichen, so wird die zulässige Spannung bei Klimalast überschritten. Hellgrau bedeutet Überschreitung der zulässigen Spannung von bis zu 50 %, dunkelgrau Überschreitung von mehr als 50 %. Vorbemessungsdiagramme werden daher auch als "Auslastungsdiagramme" bezeichnet.



Die Berechnung in Abbildung 35 erfolgte nach der linearen Plattentheorie (Theorie erster Ordnung). Abbildung 36 zeigt das entsprechende Diagramm bei Berücksichtigung von Membranspannungen. Die lineare Theorie liegt mit Ausnahme beim Format 65 cm x 65 cm "auf der sicheren Seite". Die Berücksichtigung von Membranspannungen erlaubt geringfügig kleinere Formate (Beispiel 0,6 x 0,7 m²), insbesondere aber entfällt die Begrenzung durch Windlast bei großen Formaten bis zu 2,5 x 1,5 m².



Abbildung 35 Vorbemessungsdiagramm auf Grundlage TRLV (lineare Theorie)



Abbildung 36 Vorbemessungsdiagramm auf Grundlage TRLV (NL-Theorie)



Ergebnisse

Das Berechnen von Vorbemessungsdiagrammen setzt ein Bemessungskriterium, z.B. eine "zulässige Spannung" nach TRLV, voraus. Mit DIN 18008 wird das einfache Verfahren nach TRLV durch ein weit komplexeres Bemessungsverfahren abgelöst. Im Folgenden wird deshalb das Ergebnis der statischen Berechnung von Durchbiegung und Spannung abhängig von den beiden Kantenlängen in Form von Konturdiagrammen dargestellt. Grundsätzlich ist die NL-Theorie zugrunde gelegt, d.h. Membranspannungen werden berücksichtigt.

Die Spannungs-Diagramme sind so skaliert, dass die Grenzen 18 MPa (Grenzlinie zwischen weißer und hellgrüner Fläche) und 23 MPa (Grenzlinie zwischen hellgrüner und gelber Fläche) erkennbar sind. Legt man die zulässige Spannung für Floatglas bei Überlagerung von Wind und Klimalast von 18 MPa + 25% zugrunde, so sind Formate in der weißen und hellgrünen Fläche zulässig. Die Durchbiegungsdiagramme sind informativ. Für die Durchbiegungen gelten bei vierseitiger Lagerung nach TRLV keine Einschränkungen. Abbildung 37 gibt ein Ablesebeispiel. Für das Format 75 cm x 100 cm kann eine Spannung ca. 21 MPa abgelesen werden. Scheiben mit einem Seitenverhältnis von 1:2 sind ab einer Größe von 65 cm x 130 cm bis zu 125 cm x 250 cm möglich. Die weiteren Ergebnisse sind in Abbildung 38 bis Abbildung 45 zusammengestellt.





Bei Kantenlängen 0,75 m x 1,00 m: Mitte der hellgrünen Fläche: die Spannung liegt zwischen 18 und 23 MPa, genauer bei 20 bis 21 MPa. Die grau angelegten Schnitte für ein Seitenverhältnis von 1:1 und 1.2 führen zu den Spannungsdiagrammen in Abbildung 32 und Abbildung 33.

ROSENHEIM



Aufbau 4/18/4/18/4

Bei Nachweis nach TRLV sind Scheiben von 70 cm x 70 cm bis zur Maximalgröße von 150 cm x 250 cm möglich



Abbildung 38 Konturplot der Durchbiegung SNr. 1



Abbildung 39 Konturplot der Spannung SNr. 1


Aufbau 3/18/2/18/3

Bei Nachweis nach TRLV sind Scheiben von 65 cm x 70 cm bis zur Maximalgröße von 150 cm x 250 cm möglich.







Abbildung 41 Konturplot der Spannung SNr. 1



Aufbau 4/18/2/18/3

Bei Nachweis nach TRLV sind Scheiben von 70 cm x 90 cm bis zur Maximalgröße von 150 cm x 250 cm möglich







Abbildung 43 Konturplot der Spannung SNr. 1





Abbildung 44 Konturplot der Durchbiegung SNr. 3



Abbildung 45 Konturplot der Spannung SNr. 3

ł	÷	:	÷	÷	:	÷	÷	1	÷	÷	ł	÷	÷	÷	ł	÷	ł	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	ł	÷	:	:	÷	÷	÷	÷	÷	÷	ł	:	÷
								_										FI	äcł	nen	geı	wic	ht l	Me ł 3	nrso Di	che inn	eibe le G	n-ls ilas	soli scl	erg neil	ilas ben							
•	•	•	•	•	RC		f	t -	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

3.6 Bestimmung spektraler Kenndaten

Der spektrale Transmissions- und der Reflektionsgrad von Floatglas- und thermisch vorgespannten Proben wurden nach EN 410 ermittelt. Ziel hierbei war es, zu untersuchen, ob die spektralen Daten signifikant vom Spannungszustand der Gläser abhängen. Proben gleicher Dicke stammten vom selben Bandmaß, um den Einfluss von Variationen der chemischen Zusammensetzung oder Dicke auszuschließen oder zumindest zu minimieren, und stattdessen den Effekt einer thermischen Vorspannung erfassen zu können.

Die gemessenen spektralen Transmissionsgrade sind in Abbildung 46 dargestellt für Gläser mit der nominellen Dicke von 2 mm, 3 mm, 4 mm sowie 6 mm. Das thermisch vorgespannte Glas hat hierbei die Bezeichnung " $T \times mm$ ", das nicht vorgespannte die Bezeichnung " $F \times mm$ ", wobei x für die jeweilige Glasdicke steht. (Hinweis: Bei den 3-mm-Proben handelte es sich um Weißglas, also eisenoxidarmes Glas.)



Abbildung 46 Ermittelte Transmissionsgrade für unterschiedliche Glasdicken für "normales" Float (F) sowie thermisch vorgespanntes Float (T) Bei den 3-mm-Proben handelte es sich um Weißglas, also eisenoxidarmes Glas.



Es ist zu erkennen, dass die spektralen Transmissionsgrade für alle untersuchten Glasdicken sehr gut übereinstimmen. Ein signifikanter Unterschied wurde nicht beobachtet.

Aus den messtechnisch ermittelten spektralen Transmissionsgraden ergeben sich die in Tabelle 6 dargestellten integralen Werte.

Glasdicke in mm	Behandlung	τ_{uv}	τ _v	τ _e
2	nicht vorgespannt	0,71	0,90	0,88
2	vorgespannt	0,70	0,90	0,88
2*	nicht vorgespannt	0,80	0,91	0,90
3	vorgespannt	0,80	0,91	0,91
Л	nicht vorgespannt	0,70	0,91	0,88
4	vorgespannt	0,70	0,91	0,88
6	nicht vorgespannt	0,62	0,90	0,85
Ö	vorgespannt	0,62	0,90	0,85

 Tabelle 6
 Integrale Werte der untersuchten Gläser

Legende:

 τ_{uv} UV-Transmissionsgrad

 τ_v Lichttransmissionsgrad

 τ_e Strahlungstransmissionsgrad

* Hinweis: Bei den 3-mm-Proben handelte es sich um Weißglas, also eisenoxidarmes Glas. Hierdurch erklären sich die erhöhten Transmissionsgrade.

Die in Tabelle 6 dargestellten Werte zeigen, dass die integralen Werte zwischen den Gläsern gleicher Dicke im Rahmen der Messgenauigkeit und unter Berücksichtigung von Rundungsfehlern sehr gut übereinstimmen. Vorhandene Unterschiede in den Einzelwerten bei der gleichen Glasstärke können sowohl durch Messungenauigkeiten als auch durch unterschiedliche Eigenschaften der vermessenen Proben, bedingt durch Entnahme aus unterschiedlichen Stellen eines "Bandmaßes", begründet sein.

Daher ist es ausreichend, wenn zur Berechnung der strahlungsphysikalischen Eigenschaften von Isolierglas mit thermisch vorgespannten Glasscheiben die spektralen Transmissions- und Reflexionsgrade von nicht vorgespanntem Floatglas zugrunde gelegt werden. Auf die Ermittlung der spektralen TransmissiFlächengewicht Mehrscheiben-Isolierglas 3 Dünne Glasscheiben





ons- und Reflexionsgrade vorgespannten Scheiben kann verzichtet werden. Um diese Aussage zu untermauern, wurden anhand der ermittelten spektralen Kenndaten die licht- und strahlungsphysikalischen Daten folgenden Isolierglasaufbaus berechnet:

• 3/12/3/12/3 mit 90 % Argonfüllung und low e-Beschichtung auf Pos. 2+5

Als low-e-Beschichtung wurde hierbei eine typische Wärmeschutzbeschichtung mit einem Emissionsgrad von $\varepsilon_n = 0,03$ angenommen. Diese wurde entsprechend EN 410 auf die vermessenen 3-mm-Substrate aufgerechnet.

Tabelle 7Licht und strahlungsphysikalische Daten eines Isolierglasaufbaus
3/12/3/12/3 unter Einsatz von thermisch nicht vorgespannten und
thermisch vorgespannten Scheiben.
Hinweis: Die Berechnungen beruhen auf den an Weißglas, also eisen-
oxidarmem Glas, ermittelten Daten, die in Abbildung 46 präsentiert
wurden.

		Nicht vorgespannt	Thermisch vorgespannt
Wärmedurchgangskoeffizient in W/(m ² K)	Ug	0,7	0,7
ultravioletter Transmissionsgrad	τ _{UV}	0,18	0,17
Lichttransmissionsgrad	τ_v	0,73	0,72
Lichtreflexionsgrad (außen)	ρ	0,19	0,19
Strahlungstransmissionsgrad	τ _e	0,48	0,47
Strahlungsreflexionsgrad (außen)	$ ho_{e}$	0,39	0,39
Sekundärer Wärmeabgabegrad nach innen	q _i	0,04	0,05
Gesamtenergiedurchlassgrad (g = $\tau_e + q_i$)	g	0,52	0,52

Die berechneten Werte sind in Tabelle 7 angegeben.



4 Kunststofffolie als Ersatz der mittleren Scheibe

4.1 Untersuchungsprogramm spezifisch zur Produktgruppe

Der Ersatz der mittleren Scheibe eines Dreifach-MIG durch eine weniger als 100 µm dicke Kunststofffolie bietet erhebliches Potenzial zur Gewichtseinsparung. Jedoch ergeben sich auch neue Herausforderungen an die Herstellung und Dauerhaftigkeit eines solchen Produktes. So muss die Folie bei der Herstellung korrekt platziert und gespannt werden. Dieses könnte im Prinzip durch eine mechanische Vorrichtung geschehen. Eleganter und einfacher ist es jedoch, eine biaxial gereckte Folie zu verwenden, diese (verhältnismäßig schlaff) in den Randverbund einzulegen, so dass eine Klebeverbindung zwischen Folie und Sekundärdichtstoff entsteht, und dann das ganze Mehrscheiben-Isolierglas einer thermischen Behandlung zu unterziehen, die zur Schrumpfung und damit zur Straffung der Folie führt.

Die Spannung der Folie muss dauerhaft erhalten bleiben; auch dann, wenn die Folie sich durch Temperaturänderungen im MIG wiederholt ausdehnt und zusammenzieht. Jeglicher Faltenwurf der Folie wäre sichtbar und aus Kundensicht unakzeptabel. Der Widerstand des Randverbundes gegen den Eintritt von Feuchtigkeit und den Verlust des Füllgases darf durch die Verklebung der Folie nicht beeinträchtigt werden.

Heutzutage gebräuchliche Produktionsanlagen eignen sich nur in eingeschränktem Umfang für die Herstellung von MIG mit Folie. Die jetzt übliche manuelle Legung der Folie ist nicht geeignet für eine Massenproduktion und wahrscheinlich anfällig für eine höhere Streuung der Fertigungsqualität. Nach Angaben des Projektpartners Southwall existiert eine prototypische Produktionsanlage, die ein automatisches Zuschneiden und Legen der Folie erlaubt. Aus dem bisher Gesagten ergeben sich zwei Hauptthemen für experimentelle Untersuchungen,

- a. die langfristige Haftung der Folie im Randverbund, insbesondere bei erhöhten Temperaturen und nach vielen Temperatur- und damit Lastzyklen und
- b. die Dauerhaftigkeit gemäß EN 1279-2 und -3, d.h. die Dichtheit des Randverbundes gegen das Eindringen von Feuchtigkeit bzw. den Verlust des Füllgases.

Des Weiteren ist, wie bei jeglichen Kunststoffprodukten im Scheibenzwischenraum, die Möglichkeit des Fogging in Erwägung zu ziehen und zu prüfen. Die Fa. Southwall Europe GmbH stellte die Probekörper für die Untersuchungen zur Verfügung.

ROSENHEIM



4.2 Bestimmung des Haftverhaltens zwischen Folie und Dichtstoff

4.2.1 Auswahl der Folie/Dichtstoff Kombinationen und der Untersuchungsmethoden

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens war es weder möglich noch beabsichtigt, eine vollständige, anwendungsspezifische Qualifizierung eines Folie/Dichtstoff-Systems durchzuführen. Vielmehr war die Absicht in exemplarischer Weise einige wichtige Aspekte zu beleuchten. Exemplarisch in zweierlei Hinsicht: Erstens, exemplarisch in Bezug auf die möglichen Kombinationen von Folientyp und Dichtstoff, und zweitens, exemplarisch in Bezug auf die experimentellen Verfahren zur Charakterisierung des Haftungsverhaltens. Die experimentellen Untersuchungen sollten eventuell vorhandene Unterschiede zwischen den Folie/Dichtstoff Kombinationen sichtbar machen und, falls vorhanden, den Einfluss einer Alterung zeigen.

Folie/Dichtstoff Kombinationen

ROSENHEIN

Bei den im Rahmen des Forschungsvorhabens untersuchten Folien handelt es sich um 75 µm dicken PET-Film mit einer Einfach-low e-Beschichtung. Nach Angaben der Fa. Southwall besteht die Beschichtung aus drei Lagen, von denen die mittlere eine Silberschicht ist, die anderen beiden sind Metalloxidschichten. Letztere sind praktisch identisch für alle Folientypen, die Silberschicht dagegen bestimmt durch ihre Dicke die wesentlichen Eigenschaften der Beschichtung / beschichteten Folie, so auch den Transmissionsgrad. Entsprechend ist HM88 eine Folie mit einer dünnen Silberschicht und einem Lichttransmissionsgrad von 88 %; HM22 dagegen hat eine wesentlich dickere Silberschicht und dadurch einen Lichttransmissionsgrad von 22 %. Diese beiden Folien wurden für die Projektuntersuchungen ausgewählt, da sie den Bereich der Beschichtungsdicken der im Handel befindlichen Produkte recht gut repräsentieren. Sie werden üblicherweise mit einem Polyurethan (PU) als Dichtstoff eingesetzt und sind in dieser Kombination von der Fa. Southwall qualifiziert.

HM88S erschien ebenfalls interessant für Untersuchungen, da durch eine zusätzliche Schicht Kompatibilität zu Silikonen besteht. Diese werden überall dort als Dichtstoff eingesetzt, wo hohe Anforderungen an die UV-Beständigkeit gestellt werden müssen, wie z.B. in SSG-Fassaden.



Zum Vergleich wurde auch noch eine von der Fa. Southwall grundsätzlich für ungeeignet befundene Kombination aus HM88 und einem Polysulfid (PS) in das Untersuchungsprogramm aufgenommen – in der Hoffnung, dass Unterschiede zwischen qualifizierten und unqualifizierten Systemen in den experimentellen Untersuchungen unmittelbar sichtbar würden.

Untersuchungsmethoden

Mehrere experimentelle Verfahren wurden ausgewählt, um das Haftverhalten der verschiedenen Folie/Dichtstoff-Kombinationen zu charakterisieren. Zwei der Verfahren boten sich an, da sie aus dem Umfeld der Mehrscheiben-Isolierglas-Prüfungen stammen und nur leichter Anpassungen bedurften. Dieses sind der Schälversuch (in Anlehnung an **ift**-Richtlinie DI-01/1 [26]) und die Haftungsprüfung (in Anlehnung an EN 1279-4 [4]). Details dieser Tests folgen in 4.2.2 und 4.2.3.

Beide Verfahren erfordern zwar speziell hergestellte Probekörper, dafür sind diese Tests sehr einfach in der Durchführung und die Probekörper klein und preiswert (im Vergleich zu Mehrscheiben-Isoliergläsern). Diese Tests könnten also durchaus als Screening-Verfahren interessant sein, um das Haftungsverhalten einer großen Anzahl von Folie/Dichtstoff-Kombinationen zu charakterisieren. Jedoch sind Einfachheit und Preis nicht die einzigen Kriterien für die Eignung als Screening- oder gar Qualifizierungsverfahren. Mindestens genauso wichtig ist, dass die Belastungs-/Spannungszustände im Test denen im realen Bauteil so weit wie möglich ähneln. Das ist bei diesen Tests sicherlich nur bedingt der Fall. Deshalb wurde auch beschlossen, zum Vergleich und zur Ergänzung Untersuchungen an MIG bzw. an Probekörpern, die aus MIG präpariert wurden, durchzuführen.

Prüfungen an MIG bzw. an Probekörpern, die aus einem MIG präpariert wurden, haben weitere Vorteile. Nicht nur sind die Probekörper allen Schritten der Herstellung von MIG, insbesondere auch der thermischen Behandlung zum Schrumpfen und Spannen der Folie, ausgesetzt worden, auch eine Alterung gemäß EN 1279 kann vor der eigentlichen Probekörperpräparation und Prüfung vorgenommen werden.

Aus einem MIG präparierte Probekörper wie in Abbildung 47 eignen sich sowohl für Auszug- als auch für Kriech-/Relaxationsversuche.





Abbildung 47 Aus MIG präparierter Probekörper für Auszug- und Kriechversuche

Details zu diesen Versuchen sind in 4.2.4 und 4.2.5 beschrieben. Hier soll nur ein kurzer Überblick gegeben werden. In einem Auszugversuch wird ermittelt, welche Kraft (pro Probenbreite) notwendig ist, um einen Streifen Folie aus dem Randverbund eines MIG herauszuziehen. Diese Kraft muss Mindestanforderungen genügen, um eine Folie sicher im Randverbund zu halten. Aber nicht nur diese Maximalkraft (pro Probenbreite) ist relevant. Auch relativ niedrige Spannungen können in Kunststoffen bleibende makroskopische Veränderungen bewirken. Insbesondere bei langer Einwirkungsdauer und erhöhter Temperatur verschieben sich die Makromoleküle dauerhaft gegeneinander: der Kunststoff kriecht. Als Folge einer geringen mechanischen Last dehnt sich ein Bauteil dauerhaft. (Und umgekehrt, bei einer vorgegebenen Dehnung wird sich die anfänglich vorhandene mechanische Spannung in einem Bauteil abbauen, es findet eine Relaxation statt.)

Die Präparation der Probekörper für Auszug- und Kriechversuche ist aufwendig und die Methoden zur Untersuchung von Kriechen/Relaxation sind anspruchsvoll bzgl. Instrumentation, Prüfdauer und Interpretation. Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnten Auszug- und Kriechuntersuchungen daher nicht umfassend behandelt werden, es wurde aber versucht, zumindest experimentelle Ansätze zu finden.

4.2.2 Schälversuch in Anlehnung an ift-Richtlinie DI-01/1

Die beiden folgenden Abbildungen illustrieren den Schälversuch und die dafür verwendeten Probekörper.





- Glas: 120 mm x 50 mm x 4 mm (L x B x D)
- Dichtstoff: ca. 3 mm dick
- Folie: 200 mm x 20 mm (L x B)

Abbildung 48 Probekörper für den Schälversuch



Abbildung 49 Schältest

Folgende Kombinationen aus Folie und Dichtstoff wurden untersucht:

- HM88, beschichtete Seite PU
- HM88, unbeschichtete Seite PU
- HM22, beschichtete Seite PU
 - HM88S, beschichtete Seite Silikon
- HM88, beschichtete Seite PS (von der Fa. Southwall für ungeeignet befundene Kombination)



Jeweils die Hälfte der Proben war vor dem Schältest einer Alterung (28 Tage, 70 °C) ausgesetzt, die andere Hälfte lagerte währenddessen in Normalklima. Eine Alterung durch ein Wechselklima gemäß EN 1279 [4] kam für diese Proben nicht in Frage, da die hohe Luftfeuchtigkeit der EN 1279-Alterung eventuell die Folienbeschichtungen von der Seite aus angegriffen hätte.

Ergebnisse

Abbildung 50 zeigt die Schälkurven für eine Folie/Dichtstoff-Kombination. Bedingt durch die hohe Streuung der Schälkräfte kann nur ein Schälkraftbereich als Ergebnis für eine Folie/Dichtstoff-Kombination angegeben werden; in diesem Beispiel liegt die Schälkraft etwa zwischen 20 und 70 N.



Abbildung 50 Schälkurven einer Folie/Dichtstoff-Kombination

Prinzipiell kann bei einem Schälversuch das Versagen des Probekörpers adhäsiv, kohäsiv oder in einer Mischform auftreten. Abbildung 51 illustriert das kohäsive Versagen in PU, Silikon und PS.



Abbildung 51 Schälproben: Kohäsives Versagen in PU, Silikon und PS (v. links n. rechts)

Die Ergebnisse der Schältests sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Die angegebenen Schälkräfte beziehen sich immer auf die Breite des Folienstreifens von 20 mm.

Alle Probekörper zeigten kohäsives Versagen. Das deutet grundsätzlich auf eine gute Haftung zwischen Folie und Dichtstoff hin. Auffällig ist, dass die von Southwall für ungeeignet befundene Kombination HM88/PS ähnlich hohe Schälkräfte erreicht wie die von Southwall qualifizierte Kombination HM88S/Silikon. Die Höhe der Schälkräfte lässt also nicht auf die Qualität einer Folie/Dichtstoff-Kombination schließen. Diese Aussage wird auch noch dadurch unterstützt, dass die Schälkräfte der drei durch Southwall qualifizierten Kombinationen mit PU zum Teil erheblich unter denen der qualifizierten Kombination mit Silikon liegen.

Bei den Kombinationen HM88(unbeschichtet)/PU und HM88S/Silikon scheint die Alterung einen signifikanten Effekt auf die Ergebnisse des Schältests zu haben, und zwar die Schälkraft erniedrigend für HM88(unbeschichtet)/PU und die Schälkraft erhöhend für HM88S/Silikon. Der Versagensmodus bleibt unverändert kohäsiv. Schlüsse über die Eignung der verschiedenen Folie/Dichtstoff-Kombinationen lassen sich aus den Alterungseffekten nicht ziehen.









Folie	Seite	Dichtstoff	Schälkraft in N	Schälkraft in N
			Nach 28 Tagen Normalklima	Nach 28 Tagen 70 °C
			(20 mm Breite)	(20 mm Breite)
HM88	beschichtet	PU	20 – 70 kohäsiv	20 – 60 kohäsiv
HM88	unbeschichtet	PU	40 — 60 kohäsiv	25 – 30 kohäsiv
HM22	beschichtet	PU	30 — 65 kohäsiv	25 — 60 kohäsiv
HM88S	Beschichtet	Silikon	60 – 85 kohäsiv	80 – 110 kohäsiv
HM88 *	beschichtet	PS *	80 – 110 kohäsiv	70 – 100 kohäsiv

* von der Fa. Southwall für ungeeignet befundene Kombination von Film und Dichtstoff

Zusammenfassung

Vergleicht man die Ergebnisse der Schältests mit den Einstufungen der Fa. Southwall, so lassen sich für die im Projekt untersuchten Kombinationen aus dem Schältest alleine keine Rückschlüsse auf die Eignung einer Kombination ziehen. Das heißt aber noch nicht, dass der Schältest grundsätzlich als Screeningtest ungeeignet ist. Wenn auch Resultate wie in diesen Untersuchungen keine positiven Aussagen über die Eignung einer Kombination erlauben, ein adhäsives Versagen, insbesondere bei niedriger Last, würde sicherlich die Eignung einer Folie/Dichtstoff Kombination unwahrscheinlich erscheinen lassen.

Die beobachteten Effekte einer Ofenalterung lassen keine Rückschlüsse auf die Eignung der Folie/Dichtstoff Kombinationen zu.



4.2.3 Haftungsprüfung in Anlehnung an EN 1279-4

Die beiden folgenden Abbildungen illustrieren die Haftungsprüfung und die dafür verwendeten Probekörper.



• Glas 75 mm x 12 mm x 6 mm (L x B x D)

Dichtstoff jeweils 50 mm x 12 mm x 6 mm

• Folie 75 mm x 12 mm x 75 μm

Abbildung 52 Probekörper für die Haftungsprüfung



Abbildung 53 Haftungsprüfung: Probekörper, mit Holzleisten verstärkt, in Prüfmaschine

Folgende Kombinationen aus Folie und Dichtstoff wurden untersucht:

- HM88 PU
- HM22 PU
- HM88S Silikon
- HM88 PS (von Southwall für ungeeignet befunden)

Jeweils die Hälfte der Proben war vor dem Schältest einer Alterung (28 Tage, 70 °C) ausgesetzt, die andere Hälfte lagerte währenddessen in Normalklima. Eine Alterung gemäß EN 1279 [4] kam für diese Proben nicht in Frage, da die hohe Luftfeuchtigkeit der EN 1279-Alterung eventuell die Folienbeschichtungen von der Seite aus angegriffen hätte.



Ergebnisse

Abbildung 54 zeigt die Kraft/Weg-Kurven der Haftungsprüfung für eine Folie/Dichtstoff Kombination. Die Maximalkraft wurde für jeden Prüfkörper aus dem zugehörigen Diagramm abgelesen; Durchschnittswert und Standardabweichung wurden für jede Kombination Folie/Dichtstoff berechnet.



Abbildung 54 Kraft/Weg Kurven einer Folie/Dichtstoff Kombination

Die Präparation der Probekörper hatte sich als aufwändiger erwiesen, als bei der Planung der Untersuchungen erwartet worden war. Insbesondere die plan-parallele Ausrichtung der Folie zu den Glasplatten war schwierig. Man kann oben rechts (HM22/PU) in Abbildung 55 anhand der Reflektionen erkennen, dass die Folie nicht plan-parallel ausgerichtet, sondern im mittleren Bereich etwas verdreht und damit zu den Glasplatten hin gebogen ist. Das könnte sich durchaus auf die Ergebnisse der Haftungsprüfung auswirken, es lässt sich aber aus den vorliegenden Ergebnissen nicht sagen, wie stark. Die Maximalkräfte und insbesondere die Versagensart hängen von mehreren Faktoren ab, die den Spannungszustand im Probekörper bestimmen; u.a. den Dimensionen des Probekörpers, der Oberflächenqualität des Dichtstoffes, dem Verformungsverhalten des Dichtstoffes und der plan-parallelen Ausrichtung der Folie zu den Glasplatten. Die Ergebnisse der Haftungsprüfungen sind in Tabelle 9 zusammengefasst. Auffällig ist, dass die von Southwall für ungeeignet



befundene Kombination HM88/PS die niedrigsten Maximalkräfte und die glattesten Bruchflächen aufweist; alle Probekörper dieser Kombination brachen eindeutig adhäsiv. Das von Southwall qualifizierte HM88S/Silikon dagegen weist die höchsten Maximalkräfte (6- bis 7-mal so hoch wie HM88/PS) und kohäsives Versagen in allen Probekörpern auf. Diese Befunde könnten bedeuten, dass die Haftungsprüfung ein besserer Indikator für die Eignung einer Folie/Dichtstoff-Kombination ist als der Schältest.

Allerdings ist die Lage für die beiden anderen, von Southwall qualifizierten Kombinationen, HM88/PU und HM22/PU, nicht so eindeutig. Die Maximalkräfte liegen im mittleren Bereich und die Versagensart war adhäsiv, aber nicht so eindeutig wie bei HM88/PS. Es blieben geringe Mengen von Dichtstoff an den Folien hängen (Abbildung 55). Durch die Alterung hat sich bei keiner der Folie/Dichtstoff-Kombinationen eine signifikante Änderung der Maximalkraft ergeben. Die Versagensart ist auch jeweils unverändert geblieben.



Abbildung 55 Haftungsprüfung: Bruchflächen typischer Probekörper

ROSENHEIM

•	•	•	•	•	•	•	÷	÷	÷	•	÷	÷	÷	÷	÷	•	•		•	÷	÷	÷	•	•	•	•	•	•	÷	÷	÷	•	÷	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	÷	÷	÷	•	÷	÷	÷	÷	÷	•	÷	÷	•	÷	÷	÷	•	•	•	•	•	•	÷	÷	÷	•	÷	•	•	•		•
•	•	•	÷	•	•	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	•	÷	÷	÷	÷	•	÷	•	÷	•	÷	÷	÷	•	÷	•	•	•		•
					_										4	K	uns	FI stsf	äch toff	nen foli	gev e a	vicl Is E	ht N Ersa	Ne h atz	nrso der	che mi	ibe ittle	n-le erer	soli n Se	erg che	las ibe							
•	•	•	•	•	RO	1 SEN	F	t -	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

Mittelwerte und Standardabweichungen von jeweils sechs Proben											
Folie	Dichtstoff	Maximalkraft in N	Maximalkraft in N								
		(Std. abw. in N)	(Std. abw. in N)								
		Nach 28 Tagen Normalklima	Nach 28 Tagen 70 °C								
HM88	PU	335	330								
		(92)	(52)								
		adhäsiv	adhäsiv								
HM22	PU	249	274								
		(15)	(78)								
		adhäsiv	adhäsiv								
HM88S	Silikon	646	689								
		(67)	(32)								
		kohäsiv	kohäsiv								
HM88 *	PS *	92	104								
		(31)	(28)								
		adhäsiv	adhäsiv								

Tabelle 9Ergebnisse der Haftungsprüfungen
Mittelwerte und Standardabweichungen von jeweils sechs Proben

* von der Fa. Southwall nicht qualifizierte Kombination von Film und Dichtstoff

Nachdem bei drei Folie/Dichtstoff-Kombinationen ein adhäsives Versagen aufgetreten war, stellte sich die Frage, ob das Versagen bevorzugt auf einer der Folienseiten (beschichtet, unbeschichtet) auftrat. Das ließ sich über Messungen der Oberflächenleitfähigkeit feststellen. Bei den Probekörpern mit der HM22-Folie trat nach der Normalklimalagerung der Bruch überwiegend auf der beschichteten Seite auf (5 von 6 PK), nach der Ofenalterung überwiegend auf der unbeschichteten Seite (auch 5 von 6 PK). Bei den Probekörpern mit der HM88-Folie war keine bevorzugte Seite festzustellen. Letzteres stimmt mit Erfahrungen der Fa. Southwall überein, wonach unabhängig von der Art der Folie keine Seite bevorzugt in Erscheinung tritt. Eine abschließende Klärung dieser Frage würde eine systematische Untersuchung erfordern.



Zusammenfassung

Die Haftungsprüfung ist eventuell besser als Screeningtest geeignet als der Schältest. Zumindest bei zwei der untersuchten Folie/Dichtstoff-Kombinationen hat die Haftungsprüfung eindeutige Resultate geliefert, die mit den Einstufungen der Fa. Southwall übereinstimmen. Die Ergebnisse der beiden anderen Kombinationen waren zwar nicht so eindeutig, führten aber auch nicht zu Widersprüchen. Ein Einfluss der Alterung auf die Ergebnisse der Haftungsprüfung wurde nicht festgestellt.

4.2.4 Auszugversuch

Abbildung 56 illustriert den Auszugversuch und die dafür verwendeten Probekörper.

40 mm breite Stücke wurden aus dem Randverbund eines MIG zusammen mit den daran hängenden Folienstreifen herausgeschnitten. In einem Zugversuch wurde dann die Maximalkraft (pro Probenbreite) ermittelt, um den Folienstreifen aus dem Randverbund herauszuziehen.



Abbildung 56 Auszugversuch: Probekörper, eingespannt in Prüfmaschine (identisch mit Aufbau für Kriech-/Relaxationsversuch)

Die MIG, aus denen die Probekörper für den Auszugversuch präpariert wurden, hatten folgenden Aufbau:

 Float 4 /12 / HM88 / 12 / Float 4, PU als Sekundärdichtstoff, Abstandhalter Stahl

ROSENHEIM



Im Rahmen des Projektes konnten Probekörper nur aus zwei Mehrscheiben-Isoliergläsern präpariert werden. Das eine MIG war vor der Präparation einer Alterung gemäß EN 1279-3 ausgesetzt, das andere Isolierglas lagerte währenddessen in Normalklima.

Die Ergebnisse der Auszugversuche sind in Tabelle 10 zusammengefasst. In Abbildung 57 sind zwei typische Kraft-/Weg-Kurven dargestellt.

	6
Maximalkraft in N	Maximalkraft in N
(Std. abw. in N)	(Std. abw. in N)
Normalklima	EN 1279-3-Alterung
332	290
(20)	(23)
Beidseitig gute Haftung Folie / Dichtstoff	Beidseitig gute Haftung Folie / Dichtstoff

Tabelle 10Ergebnisse der Auszugprüfungen (40 mm Probenbreite)Mittelwerte und Standardabweichungen von jeweils fünf Proben



Abbildung 57 Kraft-/Weg-Kurven im Auszugversuch



ROSENHEIM

Die Auszugversuche zeigten einen geringen Unterschied zwischen den gealterten und den in Normalklima gelagerten Proben. Alle Proben wiesen eine gute beidseitige Haftung der Folien zum Sekundärdichtstoff auf, erkennbar an Dichtstoffresten auf beiden Seiten der herausgezogenen Filmstreifen (Abbildung 58).



Abbildung 58 Probe nach Auszugversuch, beidseitige Haftung der Folie zum Sekundärdichtstoff

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen einen experimentellen Ansatz auf zur Ermittlung der Haftungskräfte, mit denen die Folie im Randverbund gehalten wird. Die präsentierten Ergebnisse können nur einer ersten Orientierung zur Weiterentwicklung des Auszugversuchs dienen, denn die Anzahl der durchgeführten Prüfungen war zu klein. Weiterhin ist bisher nicht bekannt, wie die Auszugskräfte innerhalb eines MIG und von MIG zu MIG variieren. Erst wenn entsprechende Untersuchungen zur Validierung des Auszugversuchs abgeschlossen sind macht es Sinn, den Einfluss einer Alterung auf die Haftungskräfte zu untersuchen.

4.2.5 Kriech-/Relaxationsversuch

Probekörper und Versuchsaufbau für Kriech- und Relaxationsversuche sind im Prinzip identisch zu denen des Auszugversuchs (Abbildung 56). Der Unterschied besteht in der Belastung. Während beim Auszugversuch die Belastung kontinuierlich gesteigert wird, bis es zum Versagen der Probe kommt, ist im Kriechversuch die Belastung sehr gering, konstant und lange einwirkend. Über

Flächengewicht Mehrscheiben-Isolierglas Kunststofffolie als Ersatz der mittleren Scheibe



einen längeren Zeitraum wird die Verformung der Probe unter Last aufgezeichnet, und zwar sowohl bei Raumtemperatur als auch bei erhöhten Temperaturen. Der Relaxationsversuch ist eine Art "Umkehrung" des Kriechversuches. Es wird eine kleine und konstante Dehnung aufgebracht und die Spannung als Funktion der Zeit bestimmt; und zwar üblicherweise auch wieder bei verschiedenen Temperaturen. Beide, der Kriech- sowie der Relaxationsversuch, geben Auskunft über mikroskopische Fließvorgänge im Probekörper. Die jeweiligen Ergebnisse könnten theoretisch sogar ineinander überführt werden. Der Kriechversuch (konstante Last, Dehnung als Funktion der Zeit) ist allerdings weiter verbreitet als der Relaxationsversuch, wahrscheinlich, weil er einfacher durchzuführen ist. Im Prinzip muss nur ein Gewicht an ein Bauteil gehängt und regelmäßig über einen langen Zeitraum die Verlängerung des Bauteils gemessen werden. Außerdem gibt es zeitraffende Methoden wie die Stepped Isothermal Method (SIM) [16], [17].

Aus diesen Gründen wurde beschlossen, den Weg des Kriechversuches weiter zu verfolgen, obwohl eine Folie eingeklebt in den steifen Randverbund eines MIG eher den Fall der Relaxation repräsentiert.

Der Stepped Isothermal Method liegt eine Äquivalenz von Zeit und Temperatur bei der Verformung von Kunststoffen zugrunde. Das bedeutet, eine vorgegebene Last führt bei hoher Temperatur in kurzer Zeit zu der gleichen Verformung wie bei niedriger Temperatur in langer Zeit. Der eigentliche Kriechversuch wird bei erhöhten Temperaturen in relativ kurzer Zeit ausgeführt und die Ergebnisse dann für eine niedrige Temperatur auf lange Belastungszeiten hin extrapoliert. Bei der Durchführung des Versuchs wird die Temperatur eines Probekörpers schrittweise etwa alle drei Stunden erhöht. Der Probekörper unterliegt die ganze Zeit über einer relativ geringen und konstanten Last und dehnt sich, bedingt durch interne Kriechvorgänge, wobei die Dehngeschwindigkeit mit der Temperatur zunimmt. Man erhält Temperatur- und Dehnungsverläufe wie links oben in Abbildung 59 dargestellt. Die Dehnungskurven werden in ein halb-logarithmisches Koordinatensystem übertragen, wie rechts oben und rechts unten in Abbildung 59 zu sehen. Schließlich werden die zu den verschiedenen Temperaturen gehörenden Dehnungskurven auf der logarithmischen Zeitachse verschoben, bis sie sich überlappen und eine sogenannte Masterkurve entsteht (links unten, Abbildung 59). Diese Masterkurve gilt für die Ausgangstemperatur T₀ und zeigt die zu erwartende Dehnung für sehr lange Zeiträume an (logarithmische Zeitachse).



Abbildung 59 Prinzip der Stepped Isothermal Method als zeitraffender Kriechversuch [16]

Die nächste Frage, die sich stellt, ist die nach der eigentlichen Belastung während des Kriechversuches; diese Belastung sollte der im MIG gleichen. Die Spannung der Folie im MIG lässt sich aber nicht direkt messen. Eine grobe Abschätzung aus Material- und geometrischen Daten ist jedoch möglich:

Für einen 75 µm dicken biaxial gestreckten PET Film mit einem Elastizitätsmodul von 4,5 GPa (bei Raumtemperatur) ergibt sich bei einer angenommenen Dehnung von 0,2 % im fertigen MIG eine Spannung von etwa 7 N/cm. Eine Dehnung von 0,2 % entspricht bei Raumtemperatur etwa der Elastizitätsgrenze eines solchen Werkstoffes (viskoelastische Details des Verformungsverhaltens von Kunststoffen vernachlässigend). In Realität dürfte die Spannung im MIG eher niedriger liegen, nämlich erheblich unterhalb der Elastizitätsgrenze. Von der Fa. Southwall wurde ein Wert von ca. 1,2 N/cm genannt.

Anfängliche Experimente haben gezeigt, dass bei den erforderlichen niedrigen Lasten die auftretenden Verformungen so gering sind, dass die Messung mit

Flächengewicht Mehrscheiben-Isolierglas Kunststofffolie als Ersatz der mittleren Scheibe



den am **ift** Rosenheim verfügbaren Geräten an technische Grenzen stößt. Es wurde deshalb die oben geschätzte Dauerlast erheblich erhöht, auf 20 N/cm, um die experimentelle Technik zumindest auszuprobieren. Der Wert ist auf alle Fälle viel zu hoch; er entspräche einer Dehnung von 0,6% (berechnet gemäß Hookschem Gesetz), und liegt damit oberhalb der Elastizitätsgrenze von Kunststoffen.

Die Abbildung 60 zeigt die aufgenommene Weg-Zeit-Kurve. Mit jedem Temperaturanstieg, der auch einige Minuten dauert, verlängert sich der eingespannte Folienstreifen um einige Zehntel Millimeter. Danach, bei konstanter Temperatur, ist die Dehnungszunahme erheblich geringer. Dieses sind die Bereiche in denen die Auflösungs- und Genauigkeitsgrenzen der Wegmessung erreicht werden. Zwischen 60 und 80 °C gibt es einen vergleichsweise riesigen Schritt von 2mm. Das liegt daran, dass die sogenannte Glasübergangstemperatur des PET von etwa 70 °C überschritten wird. Nach Temperaturstabilisierung zeichnet sich wieder ein ähnliches Verhalten wie schon bei den niedrigeren Temperaturen ab.

Da nur durch erhebliche Überschreitung der in einem MIG zu erwartenden Spannungen überhaupt eine messtechnische Erfassung des Kriechens möglich war, und selbst dann bei niedrigen Temperaturen (RT) die Auflösungsund Genauigkeitsgrenzen der Wegmessung erreicht wurden, wurde beschlossen, die Kriechversuche abzubrechen.







4.3 Ermittlung der Dauerhaftigkeit gemäß EN 1279

4.3.1 Untersuchungen

Die Feuchtigkeitsaufnahme und Gasverlustrate wurden gemäß EN 1279-2 bzw. -3 ermittelt, und zwar an drei, nach Angaben der Fa. Southwall, qualifizierten Systemen und an einem experimentellen System mit Kunststoffabstandhalter.

- 1. ESG4/13/Folie/13/ESG4; Abstandhalter aus Stahl
- 2. ESG4/13/Folie/13/ESG4; Wärmetechnisch verbesserter Abstandhalter aus Edelstahl
- ESG4/12/Folie/12/Folie/12/ESG4 (Triple Cavity Aufbau, siehe Abbildung 61) Abstandhalter aus Stahl
- ESG4/13/Folie/13/ESG4; Experimenteller Aufbau mit wärmetechnisch verbessertem Abstandhalter aus Kunststoff. Nach Angaben der Fa. Southwall gab es zum Zeitpunkt der Planung dieser Untersuchungen noch kein qualifiziertes System mit Abstandhalter aus Kunststoff.



Abbildung 61 Querschnitt eines Triple Cavity-Aufbaus

Das Foggingverhalten wurde sowohl gemäß EN 1279-6 Anhang C als auch bei erhöhter Temperatur nach der **ift**-Richtlinie VE 07/2 an einem Standardaufbau ESG4/12/Folie/12/ESG4 mit Folie als mittlerer Scheibe und konventionellem Abstandhalter bestimmt. Nach Bewertung der Ergebnisse für die Aufbauten 1. bis 4. wurde beschlossen, die Gasverlustrate gemäß EN 1279-3 für zwei weitere Aufbauten zu ermitteln. Hierzu wurden neue Probekörper gefertigt:

- 5. ESG4/13/Folie/13/ESG4; Abstandhalter aus Edelstahl
- 6. Float4/13/Folie/13/ Float4; Abstandhalter aus Edelstahl



4.3.2 Ergebnisse

In Tabelle 11 sind die Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsprüfungen zusammen gefasst.

Nr.		Beladung im Anlieferungs zustand in %	Beladung nach Klima- lagerung in %	Feuchtigkeits- aufnahmefaktor in %	Ga verlu in S L _F 1	as- strate %/a L _F 2	Fogging
		_	_	Anforderung Mittel ≤ 20 % Einzel ≤ 25 %	Anford < 1,0	derung) %/a	Anforderung Kein Fogging
1	Konventioneller Rand- verbund, Stahl, ESG	2,0	5,6	18,0	7,2	10,3	Kein Fogging
2	Wärmetechnisch verbesserter Rand- verbund, Edelstahl, ESG	2,5	5,5	15,8	8,1	7,0	_
3	Triple Cavity, Konventioneller Rand- verbund, Stahl, ESG	3,0	5,6	14,0	3,4	5,4	_
4*	Wärmetechnisch verbesserter Rand- verbund, Kunststoff, ESG	2,3	6,1	Mittel: 19,4 Einzel: 28,3 29,4	17,3	13,1	_
	Zusätzlich	geprüft nach E	Bewertung de	er vorangehenden E	rgebnis	se:	
5	Wärmetechnisch verbesserter Rand- verbund Edelstahl, ESG	-	-	-	0,67	0,33	-
6	Wärmetechnisch verbesserter Rand- verbund Edelstahl, Float	v	V	_	0,27	0,66	_

Tabelle 11 Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsprüfungen nach EN1279

* ist ein "experimenteller" Aufbau



Nach den ersten Untersuchungen (Nr. 1 bis 4 in Tabelle 11) war besonders auffällig, dass die Gasverlustraten den zulässigen Wert von 1 %/a erheblich überschritten. Es wurden deshalb zwei MIG geöffnet, um nach möglichen Ursachen für die hohen Gasverlustraten zu suchen.

Abbildung 62 zeigt eine geöffnete Scheibe: Links, mit den weißen Molekularsiebteilchen anhaftend, die HM-Folie, und rechts eine der Glasscheiben, in der Mitte der Randverbund. Die beiden schwarzen Butylstreifen sollten eigentlich durch Butylfäden verbunden sein. Übliche Butylprodukte zeigen, nach der Erfahrung der Forschungsstelle, einen längeren Fadenzug beim Klapptest.



Abbildung 62 Butylband zieht beim Öffnen des MIG keine Fäden

Die HM-Folie zeigte nur auf einer Seite gute Adhäsion mit dem Sekundärdichtstoff. Auf der anderen Seite ließ sich das Butylband sehr leicht von der Folie abziehen (Abbildung 63).



Abbildung 63 HM-Folie nicht mit Sekundärdichtstoff verklebt und schlechte Haftung des Butylbandes



Abbildung 64 zeigt eine große Pore im Sekundärdichtstoff in einer Ecke des Randverbundes.



Abbildung 64 Große Pore in einer Ecke des Randverbundes

Diese Befunde gaben Anlass zu der Vermutung, dass Herstellungsfehler die Ursache für die hohen Gasverlustraten gewesen sein könnten. Des Weiteren bestand von Seiten der Fa. Southwall die Vermutung, dass die übliche Welligkeit und Krümmung von ESG (gegenüber Floatglas) zu den Grenzwertüberschreitungen beigetragen haben könnten. Daher wurden zwei weitere Serien von Probekörpern gefertigt und auf Ihre Gasverlustrate hin geprüft, eine Serie mit Floatglas und die andere mit ESG (Nr. 5 und 6 in Tabelle 11).

Die Untersuchungen dieser beiden Serien wurden auf die Bestimmung der Gasverlustrate beschränkt, da, nach den Erfahrungen der Forschungsstelle, diese empfindlicher auf Fehler im Randverbund reagiert als der Feuchtigkeitsaufnahmefaktor.

Beide Serien (Nr. 5 und 6 in Tabelle 11) erfüllten die Anforderungen der EN 1279-3 hinsichtlich der Gasverlustrate.

Mit hohen Gasverlustraten gehen häufig auch relativ hohe Werte für die Feuchtigkeitsaufnahme einher, so auch bei den untersuchten Probekörpern 1 – 4. Allerdings überschritten nur zwei Einzelwerte (Nr. 4 in Tabelle 11: Experimenteller Aufbau-Kunststoffabstandhalter) den durch die Norm vorgegebenen Grenzwert.

Fogging trat durch die HM-Folie im Scheibenzwischenraum nicht auf, auch nicht bei erhöhter Temperatur.



5 Kunststoffplatte als mittlere Scheibe

5.1 Untersuchungsprogramm spezifisch zur Produktgruppe

Beim Einsatz von transparenten Kunststoffplatten ist primär zu beachten, dass die thermischen Ausdehnungen von Kunststoffen und Glas sehr unterschiedlich sind. So besitzt Float Glas einen thermischen Längenausdehnungskoeffizienten α von etwa 9x10⁻⁶K⁻¹ [5], Polycarbonat hingegen von etwa 70x10⁻⁶K⁻¹ [6], d.h., der Kunststoff dehnt sich etwa achtmal so stark aus wie das Glas. Eine 2 m lange Glasplatte wird sich bei Erwärmung um 50 K um ca. 0,9 mm verlängern, eine Polycarbonatplatte um ca. 7 mm. In einer konventionellen Konstruktion würden hohe Scherlasten im Randverbund erzeugt werden, wobei große Formate wesentlich stärker belastet würden als kleine Formate. Eine schwimmende Lagerung der Kunststoffplatte in einem Sonderprofil ermöglicht eine ungehinderte thermische Ausdehnung, hat aber auch weitere Effekte. So könnte sich das zusätzliche Profil im Randverbund sicherlich auf den linearen Wärmedurchgangskoeffizienten auswirken, und es könnte, bedingt durch zusätzliche Dichtungsflächen, auch die Wasseraufnahme und die Gasverlustrate der Mehrscheiben-Isoliergläser negativ beeinflussen.

Es wurden die Psi-Werte des Randverbundes berechnet; und zwar für einen Standardaufbau mit Aluminiumsonderprofil und konventionellen Abstandhaltern, für einen Aufbau mit wärmetechnisch verbessertem Abstandhalter, und für einen Aufbau mit einem Sonderprofil aus einem Material mit niedriger Wärmeleitfähigkeit und wärmetechnisch verbessertem Abstandhalter. Die Wasseraufnahme und die Gasverlustrate gemäß EN 1279-2 und -3 wurden ebenfalls ermittelt.

Im Zusammenhang mit der Dauerhaftigkeit musste auch das Foggingverhalten untersucht werden, insbesondere da durch die Platten erhebliche Mengen an Kunststoff im Scheibenzwischenraum vorhanden sind. Zwei Aufbauten, einer mit einer PC-Platte, der andere mit einer PMMA-Platte, wurden auf ihr Foggingverhalten geprüft.

Neben niedermolekularen organischen Substanzen, die das Fogging verursachen, können viele Kunststoffe auch Wasser in den Molekülverbund einlagern, z.B. während der Lagerung der Kunststoffplatten vor dem Einbau in ein MIG. So kann z.B. PMMA unter Normalklimabedingungen, also bei 23 °C und 50 %rF, 0,6 Gew % Wasser aufnehmen. Bei einer PMMA-Platte von 2 m x 1 m und 8 mm Dicke sind das 115 g Wasser, die, falls sie denn, insbesondere bei erhöhten Temperaturen, in die Scheibenzwischenräume freigesetzt würden, zusätzlich vom Trockenmittel aufgenommen werden müssten.

ROSENHEIM

Flächengewicht Mehrscheiben-Isolierglas 5 Kunststoffplatte als mittlere Scheibe



Ein Trockenmittel vom Typ Molekularsieb hat typischerweise eine Wasseraufnahmekapazität von 20% des Eigengewichts. Das bedeutet, um 115 g Wasser aus einer PMMA Platte wie oben beschrieben zu absorbieren, sind 5 x 115 = 575g Trockenmittel nötig, und zwar zusätzlich zu der Menge die normalerweise schon in den Randverbund eingefüllt würde.

Üblicherweise werden etwa 50 ml Molekularsieb pro laufenden Meter Randverbund eingefüllt. Ein 2 m x 1 m großes Dreifachglas hat 2 x 6 m = 12 m Randverbund, wird also üblicherweise mit ca. 600 ml Molekularsieb befüllt. Bei einer Schüttdichte von 760 g/l sind das 456 g Molekularsieb, also nur etwa 80 % der Menge die notwendig wäre, um allein das Wasser aus der PMMA-Platte aufzunehmen.

Mit anderen transparenten Kunststoffen wie PC oder PET ist die Situation weniger gravierend, da sie nur etwa 0,2 Gew% Wasser unter Normalklimabedingungen aufnehmen können. Aber auch mit 0,2 Gew% würden im obigen Beispiel einer Kunststoffplatte von 2 m x 1 m x 8 mm 40 % der Kapazität der üblicherweise eingefüllten Trockenmittelmenge durch das Wasser aus dem Kunststoff belegt.

Die bisherigen Überlegungen und Berechnungen geben nur Auskunft über die Menge an Wasser, die aus einer Kunststoffplatte freigesetzt werden könnte und über die zur Absorption dieses Wassers benötigte Menge an Trockenmittel. Aus diesen Daten geht noch nicht hervor, ob eine Wasserabgabe aus einem Kunststoff wirklich stattfindet, und wie schnell ein solcher Prozess abläuft, insbesondere bei den in einem Mehrscheiben-Isolierglas üblichen Temperaturen. Einige experimentelle Untersuchungen sollten daher diese Fragen beantworten. Dazu wurden Proben aus PC und PMMA mehrere Wochen in Normalklima gelagert, so dass sich ein Gleichgewichtswassergehalt einstellen konnte. Dann wurden die Proben einer "Trocknung" in einem Exsikkator mit Trockenmittel bei erhöhter Temperatur unterzogen. Die Proben wurden vor und nach der Trocknung gewogen.

Ein wesentlicher Faktor für diese Experimente war die anzunehmende Temperatur im Scheibenzwischenraum. Diese hängt sehr stark von der Intensität der Sonneneinstrahlung und dem Absorptions- und Transmissionsgrad der Kunststoffplatte ab. Dementsprechend mussten Letztere in spektroskopischen Messungen ermittelt werden.

Die Fa. Isophon Glas GmbH stellte die Probekörper für die Untersuchungen zur Verfügung. Isophon verwendet 8 mm dicke Polycarbonatplatten als mittlere



Scheibe in 3-fach-Sicherheitsisolierglas. Der Aufbau mit 8 mm PC ist im Wesentlichen den beabsichtigten Anforderungen an die Durchbruchhemmung geschuldet. Dieser Aufbau ist wesentlich leichter als herkömmliche Systeme ähnlicher Klassifizierung der Durchbruchhemmung mit Verbundgläsern. Im Projekt waren deshalb Aufbauten mit 8-mm-PC-Platten als mittlerer Scheibe Gegenstand von Untersuchungen, obwohl diese gegenüber 4-mm-Floatglasaufbauten keine Gewichtsvorteile bieten. Für einen Teil der Fragestellungen im Projekt war die Dicke der Kunststoffplatten nicht ausschlaggebend. Zusätzlich wurden aber auch Eigenschaften an dünneren PC-Platten als auch an PMMA-Platten ermittelt.

5.2 Berechnung wärmetechnischer Kennwerte des Randverbundes

Zur Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fenstern U_w wird neben dem Wärmedurchgangskoeffizienten des Rahmens U_f und des Isolierglases U_g der lineare Wärmedurchgangskoeffizient Ψ benötigt. Dieser beschreibt die Wärmeverluste im Übergangsbereich vom Isolierglas zum Rahmen. Der Ψ -Wert hängt hierbei sowohl von den wärmetechnischen Eigenschaften des Rahmenprofils als auch von der Ausbildung des Randverbundes des Isolierglases ab. Bei der Optimierung der wärmetechnischen Eigenschaften des Glasrandverbundes werden verstärkt sog. wärmetechnisch verbesserte Abstandhalter eingesetzt.

Um die Kunststoffplatte schwimmend im Isolierglas zu lagern, ist es notwendig, ein Zusatzprofil im Randverbund zu integrieren, das diese Aufgabe übernimmt. Der schematische Aufbau einer solchen konstruktiven Lösung ist in Abbildung 65 dargestellt. Die Ausbildung der beiden Scheibenzwischenräume wird, wie auch bei "konventionellem" Isolierglas, durch Abstandhalter realisiert. Hierfür stehen am Markt unterschiedliche Systeme zur Verfügung.



Im Rahmen des Projektes wurden Untersuchungen zu den wärmetechnischen Eigenschaften des Randverbundes durchgeführt. Folgende Fragestellungen standen hierbei im Mittelpunkt:

- Welchen Einfluss auf den Ψ-Wert hat ein für die Integration der Kunststoffplatte notwendiges "Zusatzprofil"?
- Welche Auswirkungen hat der Einsatz von wärmetechnisch verbesserten Abstandhaltern?

Die Ermittlung der wärmetechnischen Eigenschaften des Randverbundes, im Speziellen des linearen Wärmedurchgangskoeffizienten Ψ erfolgte nach EN ISO 10077-2. Als Rahmen wurde hierfür eine Flügel-/Blendrahmenkombination aus Holz verwendet. Abbildung 66 zeigt exemplarisch ein entsprechendes Berechnungsmodell. Die für unterschiedliche Aufbauten ermittelten Ψ -Werte können Tabelle 12 entnommen werden.





Abbildung 66 Numerisches Modell zur Berechnung des linearen Wärmedurchgangskoeffizienten Ψ für den Fall: Zusatzprofil aus Aluminium, Aluminiumabstandhalter

Nr.	Material Zusatzprofil	Abstandhalter	Linearer Wärmedurchgangs- koeffizient Ѱ in W/(m K)
1	Aluminium	Aluminium	0,12
2	Aluminium	Wärmetechnisch verbessert	0,084
3	PA66.6	Wärmetechnisch verbessert	0,056

Tabelle 12	Für unterschiedliche	Aufhauten des	Randverbundes	ermittelte Ψ -M/e	rto
		Auibauten ues	Ranuverbunues	enninene T-we	TIE

Beim untersuchten Randverbundsystem Nr. 1 ist das Zusatzprofil aus Aluminium hergestellt; als Abstandhalter werden konventionelle Systeme, d.h. auch aus Aluminium verwendet. Der ermittelte Ψ -Wert von 0,12 W/(m K) liegt über dem in EN ISO 10077-2 angegebenen pauschalen Ψ -Wert von 0,08 für "konventionelles Isolierglas" bei Verwendung eines konventionellen Abstandhalters. Die Erhöhung des Ψ -Wertes ist der Integration des Zusatzprofils sowie auch dem hieraus resultierenden breiteren Randverbund geschuldet.

Wird der Aluminium-Abstandhalter durch einen wärmetechnisch verbesserten Abstandhalter ersetzt, so sinkt der Ψ -Wert um ca. 0,04 W/(mK) auf 0,084 W/(mK). Im konkreten Fall wurde als wärmetechnisch verbesserter Abstandhalter das System TGI-Spacer verwendet. Die entsprechenden Daten hierzu können dem BF Datenblatt Nr. 9 entnommen werden, welches unter

Flächengewicht Mehrscheiben-Isolierglas 5 Kunststoffplatte als mittlere Scheibe



www.bundesverband-flachglas.de kostenlos erhältlich ist. Hier finden sich auch Datenblätter von einer Vielzahl von weiteren wärmetechnisch verbesserten Abstandhaltern.

Würde zusätzlich zum Einsatz eines wärmtechnisch verbesserten Abstandhalters das Zusatzprofil aus einem Material mit niedriger Wärmeleitfähigkeit hergestellt, so könnte der Ψ -Wert nochmals verringert werden. Bei Verwendung von z.B. glasfaserverstärktem Polyamid wie in Nr. 3 könnte der Wert auf 0,056 W/(mK) reduziert werden. Hierbei ist anzumerken, dass bei der Verwendung eines anderen Materials wie z.B. PA66.6 auch weitere Eigenschaften wie z.B. die Dauerhaftigkeit nach EN 1279 zu überprüfen wären. Aktuell wird das Zusatzprofil aus Aluminium hergestellt.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die pauschalen ψ -Werte entsprechend EN ISO 10077-1 Anhänge E nicht für den untersuchten Randverbund verwendet werden können, da dieser erheblich von den Randverbundsystemen abweicht, die die Grundlage für den Anhang E der EN ISO 10077-1 sind.

5.3 Ermittlung der Dauerhaftigkeit gemäß EN 1279

5.3.1 Untersuchungen

Die Feuchtigkeitsaufnahme und Gasverlustrate wurden gemäß EN 1279-2 bzw. -3 ermittelt, und zwar an einem Aufbau mit 8-mm-PC-Platte und wärmetechnisch verbessertem Abstandhalter aus Edelstahl und Kunststoff, ESG 4 / 16 / PC 8 / 16 / ESG 4.

Das Foggingverhalten wurde sowohl gemäß EN 1279-6, als auch bei erhöhter Temperatur nach der ift Richtlinie VE 07/2 an zwei Aufbauten mit 8 mm PC- bzw. PMMA Platte bestimmt:

- ESG 4 / 16 / PC 8 / 16 / ESG 4
- ESG 4 / 16 / PMMA 8 / 16 / ESG 4

5.3.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsprüfungen sind in Tabelle 13 zusammengefasst.



ROSENHEIM

	Anfangs- beladung in %	End- beladung in %	Feuchtigkeits- aufnahme in %	Gas- verlustrate in % L _F 1 L _F 2
	_	_	Anforderung Mittel < 20 % Einzel <25 %	Anforderung < 1,0 %/a
ESG4/16/PC8/16/ESG 4 Wärmetechnisch verbesserter Abstandhalter	4,9	11,5	43,5 46,9	1,2 1,4

 Tabelle 13
 Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsprüfungen nach EN1279

Die Anforderungen der EN 1279 an die Gasverlustrate und die Feuchtigkeitsaufnahme wurden nicht erfüllt.

Bei der Prüfung des Foggingverhaltens trat sowohl bei Einsatz von Polycarbonat als auch PMMA als mittlere Scheibe kein Fogging auf, auch nicht bei erhöhter Prüftemperatur.

Auffällig ist, dass die Gasverlustrate nur knapp über dem Grenzwert liegt, während die Feuchtigkeitsaufnahme den Grenzwert ganz erheblich überschreitet. Nach Erfahrungen der Forschungsstelle ist die Gasverlustrate ein wesentlich empfindlicherer Indikator für ein Versagen des Randverbundes als die Feuchtigkeitsaufnahme, so dass hier davon ausgegangen werden kann, dass die hohe Feuchtigkeitsaufnahme nicht durch einen "defekten" Randverbund verursacht ist. Die hohe Feuchtigkeitsaufnahme könnte aus der Freisetzung von Feuchtigkeit aus der Kunststoffplatte resultieren. Das würde auch die hohe Anfangsbeladung erklären und wäre in Einklang mit den Wasseraufnahme/-abgabe-untersuchungen, die in Kapitel 5.5 dargestellt sind.

5.4 Bestimmung spektraler Kenndaten und Berechnung der Temperatur im Scheibenzwischenraum

5.4.1 Untersuchungen

Der spektrale Transmissions- und Reflektionsgrad von zwei Polycarbonaten (von zwei verschiedenen Herstellern) und einem PMMA wurde nach EN 410 in Abhängigkeit der Probendicken ermittelt. Ziel der Untersuchungen war es,



- festzustellen, ob Kunststoffe gleicher Sorte signifikant unterschiedliche spektrale Daten aufweisen,
- Anhaltswerte für die licht- und strahlungsphysikalischen Eigenschaften von MIG mit Kunststoffplatten zu ermitteln sowie
- die Erwärmung der Kunststoffplatte unter solarer Einstrahlung zu berechnen.

Die Erwärmung der Kunststoffplatte im Scheibenzwischenraum unter solarer Einstrahlung wurde entsprechend EN 13363-2 berechnet.

5.4.2 Ergebnisse

Abbildung 67 zeigt exemplarisch die gemessene spektrale Transmission für das Polycarbonat von Hersteller 1 in Abhängigkeit der Plattendicke.





Mit den gemessenen spektralen Daten wurden die licht- und strahlungsphysikalischen Werte der Einzelplatten berechnet. Die Werte sind in Tabelle 14 bis Tabelle 16 dargestellt.


5 Kunststoffplatte als mittlere Scheibe

. . .

.

.



Tabelle 14Ermittelte strahlungsphysikalische Daten für Polycarbonat von Hersteller 1
in Abhängigkeit der Plattendicke

. .

10 A 10

.

	Plattendicke in mm										
1 2 3 4 5 6											
Strahlungstransmissionsgrad τ_e	0,84	0,80	0,80	0,77	0,78	0,75	0,76				
Strahlungsreflektionsgrad ρ_e	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09				
Strahlungsabsorptionsgrad α_e	0,07	0,10	0,11	0,13	0,13	0,15	0,15				
Lichttransmissionsgrad τ_v	0,90	0,88	0,88	0,86	0,87	0,84	0,86				
Lichtreflektionsgrad ρ_v	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10				
UV-Transmissionsgrad τ_{UV}	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				

Tabelle 15 Ermittelte strahlungsphysikalische Daten f ür Polycarbonat von Hersteller 2 in Abh ängigkeit der Plattendicke

	Plattendicke in mm								
	2	3	4	5	6	8			
Strahlungstransmissionsgrad τ_e	0,80	0,79	0,77	0,77	0,76	0,75			
Strahlungsreflektionsgrad ρ_e	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09			
Strahlungsabsorptionsgrad α_e	0,10	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15			
Lichttransmissionsgrad τ_v	0,88	0,87	0,85	0,86	0,85	0,85			
Lichtreflektionsgrad ρ_v	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10			
UV-Transmissionsgrad τ_{UV}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			

Tabelle 16 Ermittelte strahlungsphysikalische Daten f ür PMMA in Abh ängigkeit der Plattendicke

		Platte	endicke	in mm	
	2	3	4	6	8
Strahlungstransmissionsgrad τ_{e}	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81
Strahlungsreflektionsgrad ρ_e	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Strahlungsabsorptionsgrad α_e	0,07	0,09	0,10	0,11	0,12
Lichttransmissionsgrad τ_v	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
Lichtreflektionsgrad ρ_v	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
UV-Transmissionsgrad τ_{UV}	0,15	0,08	0,07	0,04	0,07



Vergleicht man Tabelle 14 und Tabelle 15, stellt man fest, dass sich die strahlungsphysikalischen Daten der zwei untersuchten Polycarbonate (Hersteller 1 und 2) im Rahmen der baupraktischen Anwendung nicht unterscheiden. Beim Vergleich zum untersuchten PMMA (Tabelle 16) zeigt sich, dass die Transmissionsgrade sowohl im visuellen als auch im solaren Bereich für PMMA höher sind als für Polycarbonat. Ebenso fällt auf, dass bei den untersuchten PMMA-Proben von 2 mm bis 8 mm der Lichttransmissionsgrad im Rahmen der Messgenauigkeit unabhängig von der Dicke ist.



Abbildung 68 Spektraler Transmissionsgrad von PMMA in Abhängigkeit der Plattendicke

Die gemessenen spektralen Daten dienten als Grundlage, um den Temperaturverlauf in einem Isolierglas, bei dem die mittlere Scheibe durch eine Kunststoffplatte ersetzt ist, zu berechnen. Die Berechnungen wurden nach EN 13363-2 durchgeführt. Der Isolierglasaufbau war hierbei wie folgt:

Aufbau: 4/12/PC8/12/4 und 4/12/PC2/12/4; Argonfüllung, typische Wärmeschutzbeschichtung mit $\varepsilon_n = 0,03$ auf Position 2 und 5

Die Randbedingungen für die Berechnungen wurden wie folgt angenommen: Außentemperatur $T_e = 40$ °C, Innentemperatur $T_i = 30$ °C, Solare Einstrahlung $E_s = 900 \text{ W/m}^2$



ROSENHEIM

Aufbau	Plattentemperatur
4/12/PC2/12/4	ca. 59 °C
4/12/PC8/12/4	ca. 65 °C
4/12/PMMA2/12/4	ca. 52 °C
4/12/PMMA8/12/4	ca. 56 °C

 Tabelle 17
 Berechnete Temperaturen der Kunststoffplatte

Wie aufgrund des höheren Strahlungsabsorptionsgrades, erwartet ist die Temperatur bei einer 8-mm-PC Platte höher als bei einer 2-mm-PC Platte. Ebenso führt der geringere Strahlungsabsorptionsgrad von PMMA im Vergleich zu PC zu niedrigeren Temperaturen. So ergibt sich bei Verwendung von PMMA 8 mm eine Temperatur von ca. 56 °C; eine um fast 10 K geringere Temperatur als bei PC 8mm.

Für die im nachfolgenden dargestellten Untersuchungen zur Wassserabgabe von Kunststoffplatten wurde auf Grundlage der durchgeführten Berechungen eine Temperatur von 70 °C gewählt.

5.5 Wasserabgabe aus Kunststoffplatten

5.5.1 Untersuchungen

Zwei Kunststoffe wurden untersucht, ein PMMA und ein PC. Die Probekörper waren 2 mm dicke Platten, die, mit quadratischen Format und einer Kantenlänge von 16,5 cm, bequem in Exsikkatoren gestellt werden konnten. 2 mm dünne Platten bieten den Vorteil relativ kurzer Diffusionswege für die Wassermoleküle in das Innere bzw. aus dem Inneren der Platten. Dadurch sollten die notwendigen Untersuchungszeiten reduziert werden.

Die Platten wurden zunächst vier Wochen in Normalklima gelagert, damit sich ein Gleichgewichtswassergehalt einstellen konnte. Dann wurden die Platten mit einer Feinwaage gewogen und jeweils alleine in einen Exsikkator mit gleichfalls abgewogenem Trockenmittel (MS) gestellt. Die Exsikkatoren wurden mehrere Wochen in einem Klimaschrank bei 70 °C gelagert. Diese Temperatur war das Resultat der spektralen Messungen und Berechnungen zur Abschätzung der in einem Scheibenzwischenraum zu erwartenden Temperaturen (5.4.2).

Flächengewicht Mehrscheiben-Isolierglas 5 Kunststoffplatte als mittlere Scheibe



Nach zwei Wochen im Exsikkator im Klimaschrank wurden sowohl die Probekörper als auch die Trockenmittel entnommen und erneut gewogen. Den Ergebnissen entsprechend wurden Trocknung und Wägung fortgeführt.

Bei erhöhten Temperaturen können Kunststoffe neben Wasser auch noch niedermolekulare, organische Stoffe freisetzen. Solche Substanzen sind häufig kurzkettige Überbleibsel aus der Herstellung der Polymere. Sie werden aber bei der Herstellung auch absichtlich zugesetzt und dienen als Gleitmittel, UV-Absorber, Weichmacher u.a. Die Freisetzung dieser organischen Stoffe würde das Ergebnis verfälschen, einen zu hohen Wassergehalt vortäuschen. Deshalb wurde, in Ergänzung zu den Wägungen, auch versucht, den Wassergehalt der Probekörper mithilfe der Karl-Fischer-Titration zu bestimmen ([18] – [20]). Die KF-Methode ist sehr spezifisch zu Wasser und reagiert nicht auf andere Moleküle. Sie wird im Bereich der Mehrscheiben-Isoliergläser üblicherweise eingesetzt zur Bestimmung des Wassergehaltes von integrierten Systemen; also Systemen in denen das Trockenmittel in die polymere Matrix des Abstandhalters eingemengt ist (EN 1279-2 [4]).

5.5.2 Ergebnisse

Tabelle 18 zeigt die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchungen zur Wasserabgabe von Kunststoffen. Diese sollen am Beispiel des PMMA erläutert werden. Das Ausgangsgewicht des Probekörpers nach vier Wochen Lagerung in Normalklima betrug 63,551 g (Wo. 0). Die Karl-Fischer-Titration dieses Materials ergab einen Ausgangswassergehalt von 0.63 %, was sehr gut mit dem Literaturwert 0,6 % übereinstimmt. Nach zwei Wochen in der Trocknung (Wo. 2) wog der Probekörper 63,162 g; er hatte 0,389 g bzw. 0,62 % an Gewicht verloren, d.h., scheinbar praktisch die gesamte Menge an absorbiertem Wasser. Um das zu bestätigen, wurde von der Platte eine Probe für KF Titration entnommen, und die Platte mit 60,671 g dann wieder zurück in die Trocknung gegeben. Die KF-Titration bestätigte einen Wassergehalt von 0 % (Wo. 2). Während einer weiteren Woche in der Trocknung reduzierte sich die Masse der Platte nur geringfügig um 10 mg auf 60,661 g (Wo. 3). Weder eine Fortführung der Trocknung, noch eine weitere KF Titration erschienen sinnvoll. Offensichtlich hatte der Probekörper innerhalb der ersten beiden Wochen die gesamte Feuchtigkeit verloren.

PC zeigte im Prinzip genau das gleiche Verhalten, nämlich einen vollständigen Feuchtigkeitsverlust innerhalb der ersten beiden Wochen.



		Zeit in Wocher	Masseänderung			
PMMA	Wo. 0	Wo. 2	Wo. 3	Abs. in g	Rel. in %	
Masse in g	63,551	63,162	-	-0,389	-0,62	
		Probennał	nme für KF			
Masse in g		60,671	60,661	-0,010	0,02	
KF in %	0,63	0,00	-			

Tabelle 18 Wassergehalt/-abgabe aus Kunststoffen

	i	Masseä	nderung		
PC	Wo. 0	Wo. 2	Wo. 3	Abs. in g	Rel. in %
Masse in g	65,158	65,055	-	-0,103	-0,16
		Probennał	nme für KF		
Masse in g		63,717	63,713	-0,004	0,01
KF in %	0,12	0,00	_		

Die Wägungen wurden mit einer Feinwaage der Genauigkeitsklasse 1 vorgenommen; die Messunsicherheit sollte also im Bereich von 1 mg liegen. Die KF-Methode kann im Prinzip eine Messunsicherheit von 0,01 % erreichen [18]; diese liegt aber nach internen Erfahrungen etwas höher, bei etwa 0,05 % (jeweils drei KF-Messungen).

Wie in 5.5.1 erwähnt, wurde nicht nur der Probekörper, sondern auch das Trockenmittel gewogen. Die eigentlichen Zahlen sind hier nicht von weiterer Bedeutung, nur so viel: Der Betrag der Massenzunahme des Trockenmittels war in allen Fällen um etwa 90 bis 130 mg größer als der Betrag der Massenabnahme des Probekörpers. Dafür gibt es zwei Erklärungen: Erstens, das Trockenmittel absorbiert auch die Feuchtigkeit der im Exsikkator eingeschlossenen Luft. Bei fast 6 I Volumen des Exsikkators und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 45 % an einem der Messtage macht das schon etwa 50 mg aus. Zweitens, sobald der Exsikkator geöffnet wird, zum Wiegen des Probkörpers und des Trockenmittels, findet eine weitere Absorption von Feuchtigkeit aus der umgebenden Luft statt. Die Massenzunahme des Trockenmittels ist also kein geeigneter Indikator für die Wasserabgabe aus dem Kunststoff. In den obigen Beispielen hätten sich Fehler von 25 % (Wo. 2) bis zu einigen hundert Prozent (Wo. 3) ergeben. Flächengewicht Mehrscheiben-Isolierglas 5 Kunststoffplatte als mittlere Scheibe



Bei eventuellen zukünftigen Untersuchungen dieser Art erscheint es ausreichend, *nur* die Kunststoffplatte zu wiegen, nicht das Trockenmittel. Das hätte den Vorteil, dass z.B. mehrere Platten desselben Materials, aber unterschiedlicher Dicke, gleichzeitig in einen Exsikkator gestellt werden könnten. Es ließe sich dann der Einfluss der Diffusionswege auf die Geschwindigkeit der Wasserabgabe mit relativ geringem Aufwand (Exsikkator, Klimakammer, Zeit) untersuchen.

Die Ergebnisse der Karl-Fischer-Titrationen bestätigten die Wägungen und demonstrierten damit, dass die Gewichtsänderungen der Probekörper durch Wasserabgabe erklärt werden können. Der zeitliche und finanzielle Aufwand der KF-Methode ist hoch. Wahrscheinlich wäre es für weitere Untersuchungen mit gleichen oder ähnlichen Kunststoffen ausreichend, nur einige wenige KF-Titrationen durchzuführen und mit Wägungen zu vergleichen, um den Probekörper auf die Freisetzung von organischen, niedermolekularen Substanzen zu prüfen.



6 Einfluss flächengewichtreduzierender Maßnahmen auf bauphysikalische Kennwerte

In den vorangegangenen Kapiteln wurden drei Produktlösungen zur Reduzierung des Flächengewichts von Mehrscheiben-Isolierglas vorgestellt. In den Untersuchungen ging es dabei ausschließlich um produktspezifische Fragen zur Bemessung und zum physikalisch/chemischen Verhalten. Im Folgenden sollen nun einige wesentliche Kennwerte der drei behandelten Produktlösungen dargestellt werden.

Da die Verschärfungen energetischer Anforderungen an Gebäude im Allgemeinen und Fenster im Besonderen durch die EnEV 2009 [1] sowie die EU-Richtlinie 2010/31 [2] überhaupt Anlass zu diesem Forschungsvorhaben gaben, müssen energetische Kennwerte der drei Produktlösungen verglichen werden. Des Weiteren ist die Luftschalldämmung eine für den Kunden wichtige Funktion eines Mehrscheiben-Isolierglases. Die Dämmung hängt sehr stark von dem jeweiligen Aufbau eines MIG ab. Insbesondere die Masse an Glas, d.h. die Scheibendicke, hat wesentlichen Einfluss. Dünne Scheiben bedeuten weniger Masse und daher auch eine schlechtere Schalldämmung. Ein größerer Scheibenabstand wiederum verbessert die Dämmung. Um diese Effekte zu quantifizieren, wurden Luftschalldämmwerte für verschiedene Aufbauten experimentell ermittelt.

6.1 Energetische Kenndaten

Für die im Rahmen des Projektes untersuchten Lösungsansätze zur Reduzierung des Flächengewichtes wurden für unterschiedliche Aufbauten die energetischen Kenndaten berechnet. Die Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten U_g erfolgte hierbei nach EN 673, die Berechnung der lichttechnischen Kenndaten nach EN 410. Für alle Aufbauten wurde ein Gasfüllgrad von 90% Argon angenommen. Für die Beschichtung auf Glas (nicht auf Kunststoff) wurde eine typische Wärmeschutzbeschichtung mit einem Emissionsgrad von $\varepsilon_n = 0,03$ zugrunde gelegt.

Tabelle 19 bis Tabelle 21 stellen die berechneten Werte für unterschiedliche Aufbauten dar.

Flächengewicht Mehrscheiben-Isolierglas 6 Einfluss auf bauphysikalische Kennwerte



Tabelle 19WärmedurchgangskoeffizientUg,GesamtenergiedurchlassgradgsowieLichttransmissionsgrad τ_v für 3-fach Isoliergläser mit unterschiedlichen Glas-
dicken. Für die Berechnungen wurde eine typische Wärmeschutzschicht mit
einem Emissionsgrad von $\varepsilon_n = 0.03$ sowie 90 % Argonfüllung verwendet.

Nr.	Aufbau	U _g in W/(m²K)	g	τ _v	Schichtpos.
1	A/12/A/12/A	0.72	0,49	0,70	2+5
2	<u>4/12/4/12/4</u>	0,72	0,52	0,70	3+5
3	2/12/2/12/2	0.72	0,50	0,71	2+5
4	<u>3/12/3/12/3</u>	0,72	0,53	0,71	3+5
5	2/12/2/12/2	0.72	0,51	0,72	2+5
6	<u>Z</u> Z <u>Z</u> Z <u>Z</u>	0,72	0,54	0,72	3+5
7	1/16/2/16/2	0.59	0,50	0,71	2+5
8	<u>4/10/2/10/3</u>	0,00	0,52	0,71	3+5







ROSENHEIM

Tabelle 20Wärmedurchgangskoeffizient Ug, Gesamtenergiedurchlassgrad g sowie
Lichttransmissionsgrad τ_v für 3-fach-Isoliergläser mit einer unbeschichte-
ten Kunststofffolie (PET) als Ersatz der mittleren Scheibe. Für die Be-
rechnung des Aufbaus Nr. 1 wurde eine typische Wärmeschutzschicht
mit einem Emissionsgrad von $\varepsilon_n = 0,03$ verwendet. Aufbauten 2 und 3
sind mit dem Produkt HM TC88 berechnet. Die Gasfüllung betrug in allen
Fällen 90 % Argon.

Nr.	Aufbau	U _g in W/(m²K)	g	τ _v	Schichtpos.
<u>1</u>	<u>4</u> /12/ <u>PET0,1</u> /12/ <u>4</u>	0,72	0,48	0,68	2+5
<u>2</u>	<u>4</u> /12/ <u>TC88</u> /12/ <u>4</u>	0,80	0,53	0,66	3+4
<u>3</u>	<u>4</u> /10/ <u>TC88</u> /10/ <u>TC88</u> /10/ <u>4</u>	0,62	0,42	0,54	3+4 5+6



Abbildung 70 Schematische Darstellung der berechneten Scheiben mit Folie

		•			•			•		•		•		•					•			1	•	÷						1		÷
÷		•	•		•	•	÷	\cdot	•	÷	\cdot	•	\cdot	•	•	÷		÷	÷	÷	÷	÷	•	÷	•		÷	÷	\cdot	\cdot		
÷	•	•	•	•	•	•	÷	÷	•	•	÷	•	÷	•	•	÷	•	÷	÷	÷	÷	÷	•	÷	•	•	÷	÷	÷	÷	•	
	_		_									6	FI Ei	äch infl	nen uss	gev s au	vic If b	ht N aup	/le h ohy	nrso sik	che alis	ibe sch	n-ls e K	soli eni	erg nwe	jlas erte						

Tabelle 21Wärmedurchgangskoeffizient Ug, Gesamtenergiedurchlassgrad g sowie
Lichttransmissionsgrad τ_v für 3-fach-Isoliergläser mit einer Kunststoffplat-
te als Ersatz der mittleren Scheibe. Für die Berechnungen wurde eine ty-
pische Wärmeschutzschicht mit einem Emissionsgrad von $\varepsilon_n = 0,03$ so-
wie 90 % Argonfüllung verwendet.

Nr.	Aufbau	U _g in W/(m²K)	g	τ _v	Schichtpos.
<u>1</u>	<u>4</u> /12/ <u>PC2</u> /12/ <u>4</u>	0,72	0,48	0,68	2+5
2	<u>4</u> /12/ <u>PC8</u> /12/ <u>4</u>	0,70	0,48	0,66	2+5
3	<u>4</u> /12/ <u>PMMA2</u> /12/ <u>4</u>	0,72	0,50	0,72	2+5
<u>4</u>	<u>4</u> /12/ <u>PMMA8</u> /12/ <u>4</u>	0,70	0,50	0,71	2+5



Abbildung 71 Schematische Darstellung der berechneten Scheiben mit Kunststoffplatten

.



Für **Isoliergläser mit dünnen Glasscheiben** zeigt sich anhand Tabelle 19, dass die lichttechnischen Kenndaten sich geringfügig ändern, wenn dünnere Scheiben eingesetzt werden. So steigt der g-Wert bei Verwendung von 3 mal 3 mm Glas um 0,01 gegenüber dem Standardaufbau (3 mal 4 mm) an; ebenso steigt der Lichttransmissionsgrad um 0,01. Für ein Isolierglas aus 3 mal 2 mm erhöhen sich sowohl der g-Wert als auch der Lichttransmissionsgrad nochmals um 0,01.

Bei allen berechneten Aufbauten ist festzustellen, dass sich der Gesamtenergiedurchlassgrad im Schnitt um 0,03 erhöht, wenn die Beschichtungen auf Pos. 3 und Pos. 5 aufgebracht werden statt auf Pos. 2 und Pos. 5. Wie bereits dargestellt, erhöhen sich hierbei jedoch die thermisch induzierten Spannungen in der mittleren Scheibe, die Gefahr des Glasbruchs steigt. Durch den Einsatz einer vorgespannten mittleren Scheibe bei Beschichtung auf Pos. 3 kann thermisch induzierter Glasbruch ausgeschlossen werden.

Wie zu erwarten, ist der Wärmedurchgangskoeffizient U_g unabhängig von der Glasdicke. Entscheidende Parameter hierbei sind der Emissionsgrad der Beschichtung, der Scheibenzwischenraum sowie die Gasfüllung.

Für Isoliergläser mit Folie als mittlere Scheibe zeigt Tabelle 20 exemplarisch berechnete energetische Daten. Im Aufbau Nr. 1 wird die mittlere Scheibe durch eine vorgereckte PET-Folie ersetzt, die Funktionsschichten befinden sich auf dem Glas, auf Pos. 2 und Pos. 5. Sowohl der berechnete g-Wert von 0,48 als auch der berechnete Lichttransmissionsgrad τ_v von 0,68 liegen geringfügig unter den Werten für ein Isolierglas mit 4-mm-Float als mittlerer Scheibe (vgl. Tabelle 19, Aufbau Nr. 1). Dies wird durch den höheren Absorptionsgrad der PET-Folie gegenüber Float verursacht. Aufbau 2 aus Tabelle 20 zeigt Funktionswerte eines Isolierglases, bei dem die Funktionsschichten auf die Folie aufgebracht sind. Vom Projektpartner Fa. Southwall werden hier unterschiedlichste Systeme angeboten. Für die Berechung wurde exemplarisch eine beidseitig beschichtete Folie mit der Bezeichnung TC88 verwendet. Die Folie hat im aktuellen Produktportfolio der Fa. Southwall die höchsten Transmissionseigenschaften und kommt daher den gängigen Wärmeschutzbeschichtungen für Glas am nächsten. Durch die Beschichtung der Folie auf beiden Seiten kann darauf verzichtet werden, zusätzliche Beschichtungen auf den Glasscheiben zu haben. Durch den höheren Emissionsgrad der Beschichtung HM 88 von $\varepsilon_n = 0,08$ im Vergleich zu einer typischen Wärmeschutzschicht auf Glas mit $\varepsilon_n = 0.03$ ergeben sich etwas höhere Wärmedurchgangskoeffizienten von $U_g = 0,80 \text{ W/(m^2K)}$.

Flächengewicht Mehrscheiben-Isolierglas 6 Einfluss auf bauphysikalische Kennwerte



Beim Einsatz von dünnen Folien könnte ohne Erhöhung des Flächengewichtes ein 4-fach-Glas realisiert werden. Bei solchen Konstruktionen ist jedoch generell zu beachten, dass durch den dritten Scheibenzwischenraum sowohl die Gesamtdicke des MIG als auch die Dicke des effektiven SZR (Summe aller einzelner SZR) erhöht werden. Die Erhöhung der Gesamtdicke des MIG kann hierbei zu Problemen bei der Integration des Isolierglases in gängige Rahmenkonstruktionen führen. Eine höhere Dicke des effektiven SZR führt zu höheren Randlasten und u.U. somit zu einer reduzierten Dauerhaftigkeit des Isolierglases. Daher wurde im Aufbau Nr. 3 ein SZR von 3 mal 10 mm gewählt. Bedingt durch die zusätzliche beschichtete Folie sinken sowohl der Gesamtenergiedurchlassgrad g als auch der Lichttransmissionsgrad τ_v deutlich im Vergleich zum Isolierglas mit nur einer TC88-Folie. Der Wärmedurchgangskoeffizient U_g hingegen wird durch den dritten Scheibenzwischenraum deutlich auf U_g = 0,6 W/(m²K) gesenkt.

Für **Isoliergläser mit Kunststoffplatten** als Ersatz der mittleren Scheibe wurden Funktionswerte bei Verwendung von Polycarbonat sowie PMMA berechnet. Die Werte können für eine Dicke der Kunststoffplatten von 2 mm bzw. 8 mm Tabelle 21 entnommen werden. Durch die höhere Transmission von PMMA im Vergleich zu PC (siehe hierzu auch 5.4.2, Tabelle 14 bis Tabelle 16) ergibt sich unter Verwendung von PMMA ein um ca. 0,02 Prozentpunkte höherer g-Wert als bei Verwendung von PC. Der Lichttransmissionsgrad bei Verwendung von PMMA ist um ca. 0,04–0,05 Prozentpunkte höher als bei Verwendung von PC. Der Gesamtenergiedurchlassgrad ist unabhängig von der Dicke der Kunststoffplatte. Der Lichttransmissionsgrad τ_v erniedrigt sich bei Verwendung von PC mit zunehmender Plattendicke stärker als bei Verwendung von PMMA. Aufgrund der im Vergleich zu Floatglas um ca. den Faktor 5 geringeren Wärmeleitfähigkeit von PC sowie PMMA ergeben sich bei Verwendung von 8-mm-Platten geringfügig geringere U_g-Werte als bei der Verwendung von 2-mm-Platten.

Zusammenfassung

Anhand der durchgeführten Berechnungen zu den energetischen Kenndaten konnte gezeigt werden, dass mit den im Rahmen des Projektes untersuchten Lösungsansätzen zur Reduzierung des Flächengewichtes von Isolierglas keine drastischen Einflüsse auf die energetischen Kenndaten verbunden sind. So können sowohl Wärmedurchgangskoeffizienten als auch Gesamtenergiedurchlassgrade sowie Lichttransmissionsgrade erreicht werden, die mit den Werten von "konventionellem" Dreifach-Isolierglas vergleichbar sind.



6.2 Luftschalldämmung

Neben den energetischen Eigenschaften spielt die Luftschalldämmung von Isoliergläsern für die Verwendung im Bauwesen eine wichtige Rolle. Daher wurde im Rahmen dieses Projektes untersucht, welche Auswirkungen auf die Luftschalldämmung von Isoliergläsern vorhanden sind, wenn die unterschiedlichen Techniken zur Reduzierung des Flächengewichtes umgesetzt werden. Hierzu wurde das Luftschalldämmmaß für verschiedene Aufbauten nach DIN EN ISO 10140-2 [21] bestimmt. Die ermittelten R_w(C,C_{tr})-Werte sind in Tabelle 22 dargestellt. Um evtl. Rundungseffekte zu erkennen, sind zusätzlich die R_w-Werte mit einer Nachkommastelle angegeben. Die Messungen fanden jeweils an einem Probekörper statt. Nach Erfahrungen des **ift** kann bei Mehrfachmessung eines Probekörpers in einem Labor mit einer Standardabweichung des bewerteten Schalldämmmaßes R_w von etwa 0,4 dB gerechnet werden. Finden Messungen desselben Glasaufbaus in verschiedenen Labors statt, erhöht sich die zu erwartende Standardabweichung auf ungefähr 1,2 dB. [22].

PK Nr.	Aufbau	Luftschalldämmmaß R _w (C,C _{tr}) in dB	R _w Werte *)
	Dünne Glasscheiben		
1	<u>4</u> /12/ <u>4</u> /12/ <u>4</u>	31 (-1; -5)	31,5
2	<u>3</u> /12/ <u>3</u> /12/ <u>3</u>	29 (0; -3)	29,8
3	<u>2</u> /12/ <u>2</u> /12/ <u>2</u>	25 (0; -3)	25,6
4	<u>4</u> /16/ <u>2</u> /16/ <u>3</u>	33 (-2; -6)	33,0
5	<u>4</u> /12/ <u>2</u> /12/ <u>3</u>	32 (-1; -5)	32,3
6	<u>3</u> /12/ <u>2</u> /12/ <u>3</u>	30 (-1; -4)	30,1
7	<u>4</u> /16/ <u>4</u> /16/ <u>4</u>	32 (-1; -5)	32,6
8	<u>3</u> /16/ <u>2</u> /16/ <u>3</u>	30 (-1; -5)	30,3
	Kunststofffolie als Ersatz der mittleren Scheibe		
9	<u>4</u> /13/75µm <u>HM Folie</u> /13/ <u>4</u>	32 (-2; -6)	32,3
	Kunststoffplatte als Ersatz der mittleren Scheibe		
10	<u>4</u> /12/ <u>8 PC</u> /12/ <u>4</u>	33 (-2; -6)	33,2

Tabelle 22	Luftschalldämmmaße der	untersuchten	Isolierglasaufbauten

Flächengewicht Mehrscheiben-Isolierglas





PK Nr.	Aufbau	Luftschalldämmmaß R _w (C,C _{tr}) in dB	R _w Werte *)				
11	4/12/8 Acryl gelocht/12/4	33 (-2; -6)	33,3				
12	<u>4</u> /12/ <u>2 PC</u> /12/4	36 (-2; -6)	36,6				
13	<u>6 VSG</u> /10/ <u>8 PC</u> /10/ <u>6 VSG</u>	38 (-2; -6)	38,7				
14	<u>8 VSG (0,5 PS-Folie)</u> /10/ <u>8</u> <u>PC</u> /10/ <u>6 VSG</u>	43 (-2; -6)	43,2				
15	<u>8 VSG (0,5 PS-Folie)</u> /10/ <u>8</u> <u>PC</u> /10/12 <u>VSG (0,5 PS-Folie)</u>	49 (-1; -6)	49,5				
	Aus ift-Datenarchiv						
16	<u>10</u> /12/ <u>4</u> /12/ <u>6</u>	40 (-1; -4)					
17	<u>6</u> /14/ <u>4</u> /14/ <u>8</u>	40 (-1; -5)					

*) Um evtl. Rundungseffekte zu erkennen, sind zusätzlich die R_w-Werte mit einer Nachkommastelle angegeben.

In den Messungen 1 bis 3 wurden Aufbauten mit unterschiedlichen Glasdicken untersucht. Ausgehend vom Standardaufbau mit 3 mal 4 mm Floatglas mit einer Luftschalldämmung von $R_w = 31$ dB sinkt die Luftschalldämmung auf $R_w = 29$ dB beim Aufbau mit 3 mal 3 mm Glas und auf $R_w = 25$ dB bei einem Aufbau mit 3 mal 2 mm Glas. Die Abnahme der Luftschalldämmung begründet sich durch die Reduzierung der Glasmassen. So besitzt der Aufbau mit 3 mal 2 mm Glas nur noch die halbe Masse des Aufbaus mit 3 mal 4 mm Glas.

Der Einfluss des Scheibenzwischenraums auf die Luftschalldämmung wurde ebenso untersucht. Vergleicht man Aufbau Nr. 1 (4/12/4/12/4) mit dem Aufbau Nr. 7 (4/16/4/16/4) bewirkt die Erhöhung des SZR von 12 mm auf 16 mm eine Erhöhung der Luftschalldämmung um 1,1 dB. Beim Vergleich des Aufbaus Nr. 4 (4/16/2/16/3) mit dem Aufbau Nr. 5 (4/12/2/12/3) wurde eine Erhöhung der Luftschalldämmung von 0,7 dB festgestellt. Bei den Aufbauten Nr. 6 (3/12/2/12/3) und Nr. 8 (3/16/2/16/3) beträgt die Verbesserung "nur" 0,3 dB. Es liegt die Vermutung nahe, dass der Effekt der Verbesserung der Luftschalldämmung mit größerem SZR für Scheiben mit geringerer Masse abnimmt. Um diese Vermutung zu untermauern, wären jedoch noch weitere Messungen zur Verbesserung der Statistik notwendig.



Um die Luftschalldämmung bei Isolierglas mit dünnen Scheiben zu verbessern, können Gläser mit unterschiedlichen Dicken eingesetzt und so ein asymmetrischer Aufbau umgesetzt werden. So hat der Aufbau Nr. 5 (4/12/2/12/3) eine gegenüber dem Aufbau Nr. 3 (3/12/3/12/3) erhöhte Luftschalldämmung von ca. 2,5 dB; das Flächengewicht beider Aufbauten ist jedoch identisch.

Der Einfluss der mittleren Scheibe auf die Luftschalldämmung ist gering. So wird für den Aufbau Nr. 2 (3/12/3/12/3) und den Aufbau Nr. 6 (3/12/2/12/3) praktisch die gleiche Luftschalldämmung ermittelt. Vergleichbare Werte zeigen auch der Aufbau Nr. 1 (4/12/4/12/4) sowie der Aufbau Nr. 9. Beim Aufbau Nr. 9 wurde die mittlere 4-mm-Glasscheibe durch eine Folie ersetzt. Der Unterschied von 0,7 dB kann durch den etwas größeren Scheibenzwischenraum sowie einen leicht unterschiedlichen Aufbau des Randverbundes erklärt werden. Beim Aufbau Nr. 10, bei dem die mittlere 4 mm Glasscheibe durch eine 8-mm-PC-Platte ersetzt wurde, wurde ein Unterschied von 1,7 dB ermittelt. Die höhere Luftschalldämmung beim Aufbau Nr. 10 ist jedoch aller Wahrscheinlichkeit nach dem Aufbau des Randverbundes geschuldet. Wie bereits erwähnt, erfolgt die Lagerung der PC-Platte durch ein entsprechendes Zusatzprofil. Hierdurch ergibt sich insgesamt eine größere Rückenüberdeckung, d.h. die Dicke des sekundären Dichtstoffes ist größer als bei einem konventionellen Aufbau.

Ein rein experimenteller Aufbau wurde mit der Nr. 11 umgesetzt. Hier wurde statt einer PC 8-mm-Platte eine spezielle PMMA-Platte mit 8 mm Dicke eingesetzt. Bei der Platte handelt es sich um eine mikroperforierte Kunststoffplatte (Abbildung 72). Solche Kunststoffplatten werden zur Erhöhung der Schallabsorption und somit zur Verringerung der Nachhallzeit in Räumen eingesetzt (www.microsorber.de) Im Rahmen des Projektes wurde untersucht, ob die mikroperforierte Kunststoffplatte einen positiven Einfluss auf die Luftschalldämmung von Isolierglas haben könnte, wenn sie als mittlere Scheibe eingebaut ist. Die untersuchte Platte hatte einen Lochdurchmesser von 0,8 mm und einen Lochabstand von 5 mm. Für diesen Aufbau Nr. 11 wurde die gleiche Luftschalldämmung ermittelt wie beim identischen Aufbau mit einer nichtgelochten Platte. Ein Einfluss der mikroperforierte Kunststoffplatte auf die Luftschalldämmung des Isolierglases ist nicht vorhanden.

÷	÷	•	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	•	÷	÷	÷	÷	•	•	•	÷	÷	÷	•	÷	÷	÷	•	•	÷	÷	•	÷	÷		
÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	
																		FI	äcł	nen	gev	vic	ht I	Ne ł	nrso	che	ibe	n-l	soli	erg	las	;						
																	6	E	infl	uss	s au	ıf b	au	ohy	sik	alis	sch	e K	eni	nwe	erte	•						
						•	C																															



ROSENHEIM

Abbildung 72 Mikroperforierte PMMA-Platte (Quelle: <u>www.microsorber.de</u>)

Überraschend war, dass eine nur 2 mm dicke PC-Platte, Nr. 12, eine deutliche Verbesserung der Schalldämmung gegenüber dem Standardaufbau, Nr. 1, aber auch gegenüber dem Aufbau mit einer 8-mm-PC-Platte, Nr. 10, bringt. (Eine Wiederholungsmessung an einem baugleichen Probekörper bestätigte jedoch das Resultat der ersten Messung.) Die 2-mm-Platte konnte aus technischen Gründen nicht wie geplant in dem sonst für PC-Platten verwendeten Sonderprofil schwebend gelagert werden. Stattdessen wurde die 2-mm-PC-Platte konventionell in den Randverbund eingeklebt. Wahrscheinlich tritt auch hier eine Energieabsorption durch Schwingen der dünnen und damit flexiblen Platte auf. Eine abschließende Erklärung existiert jedoch im Moment nicht.

Hinweis: Ein Aufbau mit eingeklebter PC Platte als mittlere Scheibe ist rein experimentell. Wie bereits in 5.1 erläutert, machen die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Glas und PC die Lagerung der PC Platte in einem speziellen Profil notwendig.

Zusätzlich wurden Messungen zum Einfluss von Verbundfolien vorgenommen. Diese wurden willkürlich an Aufbauten mit PC als mittlerer Scheibe durchgeführt. Die generellen Aussagen sind unabhängig vom Material und der Dicke der mittleren Scheibe. Durch den Einsatz von Schallschutzfolien in VSG kann eine ganz wesentliche Verbesserung der Schalldämmung, um etwa 5 dB, erzielt werden (Nr. 13 bis 15). Diese Folien sind sehr weich und dämpfen die



Schwingungen der einzelnen Glasscheiben im VSG. Hinzu kommt bei diesen Aufbauten auch noch der Effekt der höheren Massen, im Vergleich zum Standardaufbau Nr. 1.

Bei Isolierglasaufbauten unter Verwendung von Glas kann eine maximale Luftschalldämmung von R_w ca. 40 dB erreicht werden. Hierzu sind ca. 14 mm –16 mm Glasdicke (Summe der äußeren und inneren Scheibe) notwendig. Die entsprechenden Aufbauten Nr. 16 und Aufbau Nr. 17 entstammen dem Datenarchiv des **ift** Rosenheim. Durch den Einsatz von Verbundscheiben mit speziellen Verbundfolien können bei gleicher Gesamtglasdicke deutlich höhere Luftschalldämmmaße erreicht werden. So hat der Aufbau Nr. 14 eine Gesamtdicke der Scheiben von 14 mm, erreicht jedoch durch den Einsatz von Verbundglas mit speziellen Schalldämmfolien eine Luftschalldämmung von $R_w =$ 43 dB. Durch den Einsatz von dickeren Verbundgläsern können noch höhere Luftschalldämm-Maße erreicht werden. Für den Aufbau Nr. 15 mit einer 8-mmund einer 12-mm-Verbundglasscheibe mit Schalldämmfolie beträgt die gemessene Luftschalldämmung $R_w = 49$ dB.

Flächengewicht Mehrscheiben-Isolierglas 7 Literaturverzeichnis

7 Literaturverzeichnis

[1]	Energieeinsparverordnung (EnEV) Änderungen der Energieeinsparverordnung durch die EnEV 2009 <u>http://www.bmvbs.de/DE/BauenUndWohnen/EnergieeffizienteGebaeude/Energieeinsparverordnung/energieeinsparverordnung_node.html</u>
[2]	Richtlinie 2010/31/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung) European directive energy performance of buildings EPBD; http://www.enev- online.de/epbd/2010_100618_verkuendung_eu_amtsblatt_deutsch.pdf
[3]	Wachstumskern GLASING – Verbundvorhaben: 2-mm-ESG-Anlage, Gefördert durch das BMBF, Förderkennzeichen 03WKBE1, Laufzeit 2007–2010
[4]	DIN EN 1279 Glas im Bauwesen – Mehrscheiben-Isolierglas Berlin, Beuth Verlag GmbH
[5]	DIN EN 572-1 : 2004 Glas im Bauwesen – Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas – Teil 1: Definitionen und allgemeine physikalische und mechanische Eigenschaften Berlin, Beuth Verlag GmbH
[6]	Datenblatt Makrolon; Bayer Sheet Europe
[7]	http://www2.dupont.com/SafetyGlass/en_US/products/sentryglas.html
[8]	Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen (TRLV); Deutsches Institut für Bautechnik, August 2006
[9]	DIN 18008 Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln Berlin, Beuth Verlag GmbH
[10]	Linienförmig gelagerte Verglasungen – Technische Regeln, Anwendung, Vorbemessung; ift forum 1/99, ift Rosenheim
[11]	Feldmeier, F.; Klimabelastung und Lastverteilung bei Isolierglas, Stahlbau 75 (2006), Heft 6, Seite 467 bis 478
[12]	Sedlazek G. et al.: Glas im konstruktiven Ingenieurbau; Ernst & Sohn, 1999
[13]	Wörner J.D.: Glasbau: Grundlagen, Berechnung, Konstruktion; Springer Verlag, 2001
[14]	Technischen Richtlinie des Glaserhandwerks Nr. 2 "Windlast und Glasdicke", Bundesinnungsverband des Glaserhandwerks, Hadamar, Mai 1984
[15]	R. Hess: Glassdickenbemessung; Institut für Hochbautechnik, ETH Zürich,1986

Flächengewicht Mehrscheiben-Isolierglas

. .

.

7 Literaturverzeichnis

. .

.

.

. .

· · · · · i	ft
ROSE	NHEIM
[16]	Zeitraffende Bestimmung des Langzeit-Kriechverhaltens mittels der Stepped Isothermal Method, Süddeutsches Kunststoffzentrum, Würzburg, <u>www.skz.de</u>
[17]	Bestimmung des Langzeitverhaltens mit der "Stepped Isothermal Method" im Vergleich mit konventionellen Langzeitprüfungen, Institut für textile Bau- und Umwelttechnik GmbH, Greven, Newsletter 13, 2005
[18]	ISO 760 : 1978-12 Bestimmung von Wasser; Karl-Fischer-Methode
[19]	EN ISO 15512 : 2009 Kunststoffe – Bestimmung des Wassergehaltes
[20]	Chakraborty S. et al.; Moisture content determination of different polymers by Karl Fischer titration; Rubber World, Juli 2007
[21]	DIN EN ISO 10140-2 : 2010-12 Akustik – Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand – Teil 2 Messung der Luftschalldämmung Berlin, Beuth Verlag GmbH
[22]	ISO/CD 12999-1 : 2011-10 Acoustics – Determination and application of measurement uncertainties in building acoustics — Part 1: Sound insulation Berlin, Beuth Verlag GmbH
[23]	Bernd Saß Schalldämmung von Dreifach-Isolierglas; Tagungsband Daga 2009
[24]	DIN EN 673 : 2011 Glas im Bauwesen – Bestimmung des U-Wertes (Wärmedurchgangskoeffizient) - Berechnungsverfahren Berlin, Beuth Verlag GmbH
[25]	DIN EN 410 : 2011 Glas im Bauwesen - Bestimmung der lichttechnischen und strahlungs- physikalischen Kenngrößen von Verglasungen Berlin, Beuth Verlag GmbH
[26]	ift -Richtlinie DI-01/1-1, Febr. 2008 Verwendbarkeit von Dichtstoffen; Teil 1: Prüfung von Materialien im Kontakt mit dem Isolierglas-Randverbund; ift Rosenheim
[27]	Entwicklung von Umweltproduktdeklarationen für transparente Bauelemente – Fenster und Glas – für die Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden Forschungsbericht; ISBN 978-3-86791-308-9, ift Rosenheim
[28]	PE INTERNATIONAL GmbH und LBP Universität Stuttgart GaBi 4/ 2010/ Software und Datenbank zur ganzheitlichen Bilanzierung; http://www.GaBi-software.com; 70771 Leinfelden-Echterdingen
[29]	Makrolon und Vivak – Umweltaspekte Technische Information der Fa. Bayer, Oktober 2011

. . .

.

.

.

÷

. . . .

. . .

. . .

. . .

.

.



8 Danksagung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. (Aktenzeichen: SF-10.08.18.7 – 10.13 / II 3 – F20-10-1-017). 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:

Herr Prof. Dr. Franz Feldmeier	Hochschule Rosenheim
Herr Dr. Wolfgang Wittwer	Kömmerling Chemische Fabrik GmbH
Frau Miriam Hohfeld	Forschungsinitiative Zukunft Bau

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



Bundesverband Flachglas e.V.

In der Projektgruppe vertreten durch:



Isophon Glas GmbH



Southwall Europe GmbH



Winterglas GmbH

Wir bedanken uns auch bei der Fa. KAEFER Construction GmbH für das kostenlose Zurverfügungstellen einer MICROSORBER[®]-Platte.



ift Rosenheim Theodor-Gietl-Str. 7-9 83026 Rosenheim Telefon +49 (0) 8031 261-0 Telefax +49 (0) 8031 261-290 E-Mail: info@ift-rosenheim.de http://www.ift-rosenheim.de