



## ABSCHLUSSBERICHT

### PROJEKT

## „Entwicklung eines Xenon- 4-Kammer-Isolierglases mit maximaler Wärmedämmfähigkeit“

**Antragsteller:** Helmut Hachtel GmbH

**Förderer:** Deutsche Bundesstiftung Umwelt

**Aktenzeichen:** 34408/01 – 21/0

**Laufzeit:** 45 Monate

**Berichtszeitraum:** 4/ 2018 – 12/2021

**Datum:** 12/2021

**Autor:** Patric Hachtel

06/02					
<b>Projektkennblatt</b> der <b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>					
Az	34408/01 – 21	Referat	21/0	Fördersumme	200.000Euro
<b>Antragstitel</b>	Entwicklung eines Xenon-4-Kammer-Isolierglases mit maximaler Wärmedämmfähigkeit				
<b>Stichworte</b>	Klimaschutz Unternehmen, Green Building, Nachhaltigkeit, Leichtglas, UV-Schutz Premium-Isolierglas, Wärmedämmisolierglas, Energieeinsparung, Wärmedämmung, CO <sub>2</sub> -Reduzierung, Klimaneutrales Bauen, Klimaschutz				
<b>Laufzeit</b>	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>36 Monate + 9 Monate</b>	<b>04/2018</b>	<b>12/2021</b>	Eine		
Zwischenberichte	10/2018 11/2019				
<b>Bewilligungsempfänger</b>	Helmut Hachtel GmbH		Tel +49 (0) 791 950 95-12		
	D-74523 Schwäbisch Hall		Fax +49 (0) 791 950 95-50		
	Kolpingstrasse 3		Projektleitung Patric Hachtel		
			Bearbeiter Herr Dr. Jörg Lefèvre		
<b>Kooperationspartner</b>	n/a				
<p><b>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</b></p> <p>Das Projekt „Entwicklung eines mit Xenon gefüllten 4-Kammer-Isolierglases unter Verwendung von Heat-Mirror-Klimafolien zur Erreichung eines Wärmedurchgangskoeffizienten von <math>U_g=0,1 \text{ W/m}^2\text{K}</math>“ hatte zum Ziel, ein Isolierglas mit einem bisher nicht erreichten <math>U_g</math>-Wert von 0,1 zu entwickeln, welches aus zwei Glasscheiben und mehreren Heat-Mirror® -Folien besteht und als Mehrkammersystem aufgebaut ist. Als Dämmgas in den Kammern sollte Xenon verwendet werden.</p> <p><b>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</b></p> <p>Das Projekt ist praxisnah orientiert und zielt auf die Entwicklung und Herstellung von Prototypen ab, die mittels optimierter Vorprodukte und in vielen technischen Details modifizierten Verarbeitungsschritten zu einem technisch und physikalisch stabilen System führen, welches jederzeit auch in Serie gefertigt werden kann. Anhand des Pflichtenhefts wurde mit der Bildung von Arbeitspaketen das Projekt geplant und daraus Arbeitsschritte abgeleitet.</p> <p>Das ganze Projekt haben wir fast ausschließlich nach der heuristischen Methode „Trial and Error“ bearbeitet mit der Basis unseres langjährigen Fachwissens und Erfahrung 50jähriger Isolierglasproduktion. In zahlreichen Versuchen wurden immer einzelne Parameter geändert, wie z.B. Geometrie der Butylschnur, Gewicht, Temperaturaufbringung, Rückschnitt der Abstandhalter, unterschiedliche Foliencoatings, unterschiedliches Beschicken, Aufheizen, Halten und Abkühlen im Heat-Mirror®-Ofen etc., und die Prototypen auf verschiedene Verbesserungen und Stabilität analysiert. Aus diesem Grund wurden im Projektverlauf fast 2.000 unterschiedliche Prototypen hergestellt. Die große Anzahl an Versuchsaufbauten wurden mittels einer Software zur Zielbildung und Bewertung von Alternativen strukturiert und unterstützt.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <a href="http://www.dbu.de">http://www.dbu.de</a>					

### **Ergebnisse und Diskussion**

Die im Projektverlauf erzielten Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt.

Als ersten Schritt wurden geeignete Folien- /Glasaufbauten definiert und erfolgreich hergestellt. Das Isolierglas konnte zum Stand der Technik in vielen Bereichen wie im Projekt angestrebt verbessert werden. Die verwendete Butylschnur und die gleichmäßig aufgetragenen Sekundärdichtstoffe wurden verbessert, eine faltenfreie Folieneinbringung wurde ebenso entwickelt wie ein entsprechend verbesserter thermischer Schrumpfprozess der Folien. Das Xenon-Gas kann von uns mit einer Füllrate von durchschnittlich 98% in die Kammern eingebracht werden.

Großformatige Prototypen mit einem Format bis zu 1900 x 4300 konnten gefertigt werden. Die energetischen Kennwerte der Prototypen wurden per Software und experimentell bestimmt. Bei einem angestrebten Ug-Wert von 0,1 bewegt man sich im derzeit physikalisch machbaren Grenzbereich. Bestimmende Parameter dabei sind die Emissivität der verwendeten Glasscheiben und der Heat-Mirror®-Folien. Der angestrebte Ug-Wert kann nur mit sehr wenigen Coatings erreicht werden. Würde von einem potentiellen Kunden eine bestimmte Sonnenschutz-/Wärmeschutzglasscheibe gewünscht oder der Luftzwischenraum kundenseitig verändert werden, so ist ein Ug-Wert von 0,1 nicht zu erreichen.

Im Praxiseinsatz in der firmeneigenen Bürofassade haben sich die Prototypen als stabil und praxistauglich erwiesen. Nach über vier Monaten ist keinerlei optische oder physikalische Veränderung sichtbar.

Die im Antrag definierten Projektziele konnten somit erreicht werden.

Bei der wirtschaftlichen Umsetzung des Projekts haben sich zwei maßgebliche Probleme bei der Materialbeschaffung aufgetan. Aufgrund der Corona-Pandemie und der damit verbundenen Rohstoff-Knappheit stehen uns die für einen Ug-Wert von 0,1 benötigten Heat-Mirror®-Folien und das Xenon-Gas nicht, bzw. nicht in einem wirtschaftlich vertretbaren Rahmen zur Verfügung. So lange derart hohe Xenon-Gaspreise vorherrschen ist dieses Produkt leider nicht zu vermarkten.

Wir haben im Laufe des Jahres 2021 deshalb nach alternativen Glas- /Folienkombinationen gesucht, welche mit Krypton-Gasfüllung ebenfalls einen Ug-Wert von 0,1 erreichen. Dazu sind aber fünf bis sechs Kammern notwendig, das Glas wird dadurch um bis zu 24mm dicker bei gleichem Gewicht. Eine Alternative aufgrund der limitierten Verfügbarkeit der Heat-Mirror®-Folien stellt ein Aufbau mit drei Glasscheiben mit Low-E Beschichtung dar. Der Mehrpreis aufgrund des ebenfalls im Preis stark gestiegenen Krypton-Gases beträgt derzeit 200€/qm gegenüber der Zeit vor der Pandemie. Diese Alternative kann wohl gerade noch am Markt aufgrund der herausragenden Eigenschaften vermittelt werden.

### **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Die Helmut Hachtel GmbH zeigt ihre Webpräsenz auf ihrer Homepage (<https://www.glas-hachtel.de>) und auf Facebook. Zudem partizipierten wir im April 2019 mit einer Ausstellung und Präsentation auf der Hannover Messe auf dem Gemeinschaftsstand der DBU Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Über dieses Ereignis wurde am 4. April 2019 in der Zeitung „Haller Tagblatt“ Wirtschaft Regional ein Messebericht über den Besuch von Reinhard Bütikofer, Vorsitzender der europäischen Grünen, Europaabgeordneter, berichtet.

Zuletzt nahm die Helmut Hachtel GmbH virtuell an Woche der Umwelt 2021 im Schloss Bellevue in Berlin teil.

Ein weiterer Zeitungsartikel aus dem „Haller Tagblatt“ aus dem Dezember 2021 über das Großprojekt in Oslo findet sich im Anhang.

### **Fazit**

Aus bisheriger Erfahrung erzeugt ein Isolierglas mit einem Ug-Wert wie eine massiv gedämmte Wand ein sehr hohes Interesse. Das Interesse besteht unabhängig von eben diesem Wert.

Kunden sind bereit, derartige Investitionen zu tätigen, wenn für ein Gebäude sehr ambitionierte Ziele bezüglich Klimaneutralität gestellt werden. Auch wenn aus technischen- und materialbedingten Gründen der Ug-Wert minimal schlechter bei z.B. 0,2 oder 0,3 liegen kann, alles in diesem Bereich ist derzeit außergewöhnlich.

Wir haben mit diesem Höchstleistungsdämmglas eine neue Produktkategorie geschaffen. Aufgrund der Gesamtdicke der Aufbauten und der geringeren Lichtdurchlässigkeit gegenüber Standard-Isolierglas ist es Stand heute wohl keine Lösung für gewöhnliche Fenster. Für z.B. Bürofassaden, Tiny Houses und anspruchsvolle Anbauten in Kombination mit schaltbarem Glas oder Photovoltaik-Glas aber wohl.

## Inhalt

Projektkennblatt.....	2
Verzeichnis von Bildern und Tabellen .....	7
Verzeichnis von Begriffen und Definitionen .....	8
Zusammenfassung: .....	10
Einleitung:.....	13
Hauptteil .....	15
<b>1. Pflichtenheft und Projektkonzeption .....</b>	<b>15</b>
1.1 Auslegung der 4-Kammer-Isolierverglasung mit Heat-Mirror®-Klimafolie mit Xenon als Füllgas, Erarbeitung eines ausführlichen Lastenhefts .....	15
1.2 Zusammenfassung der Ergebnisse in einem detaillierten Pflichtenheft ...	17
<b>2. Dimensionierung und Glasaufbau.....</b>	<b>19</b>
2.1 Erweiterung des Simulationstools zur Berechnung der Dämmwirkung von Glas mit Abbildung der physikalischen Parameter von Xenon im Modell in Bezug auf Wärmeleitungs- und Strömungseffekte .....	19
2.2 Dimensionierung der Scheibenzwischenräume gemäß allgemeiner Zustandsgleichung .....	21
2.3 Bestimmung der Scheibendicke und Abstandhaltergröße unter Berücksichtigung der idealen Dämmwirkung von Xenon und einer gewichtsoptimierten Dimensionierung .....	22
2.4 Herausarbeiten von physikalischen Parametern mittels mathematischen Modellen (Schalldämmwert, Lichttransmissionswert, Lichtreflexion und Gesamtenergiedurchlass) .....	23
2.5 Ermittlung von umweltspezifischen Belastungen auf das Glas mittels einer FEM-Simulation. (Wind, Luftdruck).....	23
2.6 Durchführung iterativer Testreihen zum Aufbau der Isolierkammern und des Dämmsystems.....	24
2.7 Untersuchung von verschiedenen Kunststoff und Edelstahl Abstandhaltern für eine optimierte Wärmedämmung und Anbringung an das Randverbundsystem, sowie der Scheiben und Folien .....	24
<b>3. Weiterentwicklung der Einspanntechnik für Heat-Mirror®- Klimafolien und Modifizierung der Dichtstoffe und Klebetechnik.....</b>	<b>26</b>
3.1 Auslegung der thermischen Vorspannprozesse für die deutlich kleineren Abstandhalter des Xenon-Glases unter Berücksichtigung der auftretenden Spannkraft auf die Abstandhalter, Folien und Klebesystem .....	26
3.2 Entwicklung der Einspanntechnik mit Aufbau der neuen Aufspanntechnik zur faltenlosen Einbringung der Heat-Mirror®-Klimafolien .....	29

3.3 Auslegung der dauerelastischen Primär- und Sekundärdichtstoffe für den Hohlraum zwischen Abstandhalterraahmen und den Scheibenkanten unter Einhaltung absoluter Toleranzgrenzen .....	31
3.4 Modifizierung und Optimierung der Butyl-Klebertechnik für die Fixierung der Klimafolien bei kleineren Abstandhaltern und stärkeren Spannungen der Folien	32
3.5 Entwicklung eines neuartigen Randverbundes mit schmälere Abstandshaltern ohne Wärmebrücken oder Feuchtigkeitsbelastung, Vermeidung von Spannungsbildung und Überbeanspruchung.....	38
3.6 Modifizierung der Einspanntechnik für kleinere Abstände zwischen den Gläsern und Klimafolien .....	42
3.7 Ausarbeitung von Rauigkeits-Bearbeitung für eine verbesserte Haftwirkung mit den Folien .....	42
<b>4. Optimierung der Gasfüllung und des Gasgemisches der Kammern.....</b>	<b>44</b>
4.1 Experimentelle Untersuchung von Füllgasen zur Erreichung des idealen Gasgemisches von Xenon, Krypton und Argon unter den Parametern der Wirtschaftlichkeit und der Erreichung eines Ug-Wertes von 0,1 W/Km <sup>2</sup> .....	44
4.2 Ausarbeitung einer neuartigen Technik zur Gasbefüllung für einen hohen Gasfüllgrad und eine niedrige Gasverlustrate bei gleichzeitig geringerem Gasverlust bei Befüllung.....	45
4.3 Optimierung des Wärmedurchgangskoeffizienten über die gesamte Lebensdauer des Produktes.....	45
4.4 Untersuchung von möglichen chemischen Wechselwirkungen des Xenongases mit dem Verbundkleber (Butyl) .....	45
<b>5. Neue Trockenmittel untersucht und mit Silica Gel verglichen, Systeme entwickelt zur Vermeidung von Trockenmittel-Abrieb .....</b>	<b>48</b>
5.1 Untersuchung von bekannten und neuartigen Trockenmitteln und Vergleich mit dem aktuellen Standard (Silica Gel) unter dem Parameter der Wasserbindung pro Raumeinheit .....	48
5.2 Untersuchung der verschiedenen Trockenmittel auf ihre Lebensdauer mittels beschleunigter thermischer Alterung.....	48
5.4 Untersuchung von Kunststofffüllverfahren zum Schutz vor Abrieb durch Fixierung des Trockenmittels, Spezifizierung des Mischverhältnisses von Trockenmitteln und wasserdurchlässigem Kunststoff.....	48
5.5 Evaluierung und Entscheidung der idealen Kombination aus Trockenmittel und System zur Abriebvermeidung .....	49
5.6 Isolierglasbeständigkeit der Prototypen.....	49
<b>6. Bau eines Prototyps und Demonstratorsystems; Durchführung diverser Tests am Prüfstand.....</b>	<b>51</b>

6.1	Herstellung eines Prototypen und Implementierung in ein Demonstrationssystem, zur Simulation von realitätsnahen Umweltverhältnissen an Außenwänden .....	51
6.2	Untersuchung der realen Wärmedämmung unter extremen Temperaturunterschieden bis zu 40 °C mit Temperaturmessern nahe der jeweils Innen- und Außenscheibe .....	54
6.3	Untersuchung weiterer spezifischer Parameter des Isolierglases mittels Sensoren (Schalldämmwert, Lichttransmissionswert, Lichtreflexion und Gesamtenergiedurchlass) .....	54
<b>7.</b>	<b>Erstellen eines Marketingkonzepts .....</b>	<b>55</b>
<b>8.</b>	<b>Markteinführung.....</b>	<b>56</b>
	Fazit:.....	57
	Quellenverweis: .....	59
	Anhänge: .....	60

## Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Abbildung 1: Firmenbesuch Eastman Chemicals/Southwall Technologies in Palo Alto .....	16
Abbildung 2: Prototyp 1 Prüfformat.....	17
Abbildung 3: Beispielberechnung 1 .....	19
Abbildung 4: Beispielberechnung 2 .....	20
Abbildung 5: Beispielrechnung 3 .....	20
Abbildung 6: Aufbaukombinationen .....	21
Abbildung 7: Gasfüllgerät Nr. 3.....	25
Abbildung 8: HM-Ofen .....	27
Abbildung 9: Fertigungsschritte bei der Herstellung von Verglasungen mit eingespannten Heat-Mirror®-Folien .....	28
Abbildung 10: Automatisierungslayout .....	29
Abbildung 11: Fanuc-Folienapplikationsroboter.....	29
Abbildung 12: Testscheiben .....	30
Abbildung 13: neuer HeatMirror®-Ofen .....	31
Abbildung 14: Prüfung der Haftung durch visuelle Inspektion der Proben nach Abzugstest: die Verteilung des Dichtstoffes über die Ränder belegt die gute (links) oder schlechte (rechts) Adhäsion der Folien .....	32
Abbildung 15: Firmengelände Nedex .....	33
Abbildung 16: Fabrikhalle Nedex.....	34
Abbildung 17: neue Butylextruderanlage für HM-Produktion.....	35
Abbildung 18: Nedex Labor .....	35
Abbildung 19: Chemisches Hintergrundwissen .....	36
Abbildung 20: Information über Molekularsiebe vor Ort.....	37
Abbildung 21: Testreihen 1.....	38
Abbildung 22: Testreihe mit rudimentärer Stabilisierung .....	39
Abbildung 23: Testreihen 2.....	40
Abbildung 24: Testreihe mit Temperatursensoren im Ofen .....	41
Abbildung 25 Großformatige Testreihen.....	42
Abbildung 26: Folienaufbringung .....	43
Abbildung 27: Butylschnur .....	46
Abbildung 28: Fassade Hachtel 1 .....	52
Abbildung 29: Fassade Hachtel 2 .....	53
Abbildung 30: alternativer Ug=0,1-Aufbau mit drei Glasschreiben und verfügbaren Heat-Mirror® -Folien.....	60
Abbildung 31: Ausschnitt aus dem Haller Tagblatt, Südwest Presse vom 16. Dezember 2021 .....	61

## Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

### **Coatings (Glasbeschichtung)**

Glasbeschichtungen bieten hervorragende Lösungen für die Anforderungen an die Licht- und Energiedurchlässigkeit von modernen Isolierverglasungen. Durch verschiedene Beschichtungen werden die spezifischen Werte genau auf die Anwendung zugeschnitten.

### **Der Wert $\varepsilon$ (Emissionsvermögen)**

Silberbeschichtete Wärmedämmgläser werden in der Fachsprache auch als Low-E-Gläser bezeichnet. (Low-Emissivity=niedrige Emissivität=niedrige Wärmeabstrahlung).

Mit dem Emissionsvermögen (kurz: Emissivität) wird die Wärmeabstrahlung einer Oberfläche im Verhältnis zu einem genau definierten so genannten „schwarzen Körper“ bezeichnet. Das Emissionsvermögen des schwarzen Körpers beträgt 100%. Standard-magnetronbeschichtete Wärmedämmgläser weisen eine Emissivität von 3% auf.

### **Emissivität**

Die entscheidende Größe für die Ug-Wert Berechnung ist die Emissivität der Beschichtung. Je niedriger der Emissivitätswert, desto besser ist die Wärmedämmung.

### **g-Wert (Gesamtenergiedurchlassgrad)**

Der g-Wert gibt an, wie viel Energie von der auftreffenden Sonnenstrahlung durch die Verglasung ins Rauminnere gelangt. Er setzt sich aus zwei Teilen zusammen, aus der direkten Strahlungstransmission und der sekundären Wärmeabgabe. Die sekundäre Wärmeabgabe entsteht, weil sich das Glas als Folge der Sonneneinstrahlung erwärmt und nun seinerseits Wärme gegen innen und außen abgibt. Der g-Wert wird nach DIN EN 410 bestimmt und in % angegeben.

### **Low-E (Low-Emissivity)**

Low-Emissivity Glas (=niedrige Wärmeabstrahlung) bezeichnet ein Glas, auf das eine hauchdünne Metallschicht von etwa 100 nm aufgebracht wird. Diese reduziert den Emissionsgrad der Verglasung und dient als Wärme- und/oder Sonnenschutzschicht im Isolierglas.

### **Primer**

Der Primer dient in erster Linie der Haftvermittlung zwischen Fügeoberfläche und Klebstoff, d.h. er übernimmt die Adapterfunktion zwischen Oberfläche und Kunststoff

### **Q (Wärmestrom)**

Der Wärmestrom oder Wärmefluss ist eine physikalische Größe zur quantitativen Beschreibung von Wärmeübertragungsvorgängen. Der Wärmestrom ist eine Wärmeleistung und wird in Watt angegeben.

### **SANCO-Glasgruppe**

Mit über 60 aktiven Mitgliedern ist SANCO die größte Gruppe europäischer Isolierglas-Hersteller. Die gruppeninterne Organisation wird durch die SANCO Beratung gesteuert. Die Gruppe ist in den Verbänden des BF, ift, GMI, DIN und der Baugesetzgebung vertreten. Sie gestaltet aktiv in Branchengremien wie dem Bundesverband Flachglas mit und arbeitet zusammen mit dem ift Rosenheim.

### **Silica Gel**

Silica Gel, auch Kieselgel oder Kieselsäuregel ist ein farbloses, amorphes Siliciumdioxid, das stark hygroskopisch ist und im Isolierglasbau als Trockenmittel Verwendung findet.

### **SZR**

Scheibenzwischenraum

### **U-Wert (Wärmedurchgangskoeffizient)**

Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) gibt die Wärmemenge an, die pro Zeiteinheit durch 1m<sup>2</sup> eines Bauteils bei einem Temperaturunterschied der angrenzenden Raum- und Außenluft von 1 K hindurchgeht. Je kleiner der U-Wert, desto besser ist die Wärmedämmung. Die Maßeinheit ist W/m<sup>2</sup>K.

### **Ug-Wert**

Der U-Wert von Isolierglas (Ug) wird hauptsächlich durch die Art der Wärmedämmbeschichtung, den Scheibenabstand, die Anzahl der Scheibenzwischenräume und die Gasfüllung beeinflusst.

Der Ug-Wert eines Glases kann nach DIN EN 673 berechnet werden. Für die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten werden folgende Eingangsgrößen benötigt: Emissivität der Glasoberflächen zum SZR, die Art der Gasfüllung im SZR, der Gasfüllgrad im SZR, die Scheibenzwischenraumbreite.

## Zusammenfassung:

Das Projekt „Entwicklung eines mit Xenon gefüllten 4-Kammer-Isolierglases unter Verwendung von Heat-Mirror®-Klimafolien zur Erreichung eines Wärmedurchgangskoeffizienten von  $U_g=0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ “ hatte zum Ziel, ein Isolierglas mit einem bisher nicht erreichten  $U_g$ -Wert von 0,1 zu entwickeln, welches aus zwei Glasscheiben und mehreren Heat-Mirror®-Folien besteht und als Mehrkammersystem aufgebaut ist. Als Dämmgas in den Kammern sollte Xenon verwendet werden.

Durch den reduzierten Wärmeverlust können hohe  $\text{CO}_2$ -Einsparungen in der Raumbeheizung erzielt werden. Zu Projektbeginn wurden am häufigsten Isoliergläser mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von  $U_g=0,7$  bis 0,8 in Deutschland verbaut. Vergleicht man die Verluste eines solchen Fassadenelementes mit dem angestrebten  $U_g$ -Wert von 0,1, so erhält man enorme Einsparungen an Energie und  $\text{CO}_2$ .

Gegenüber dem von unserem Unternehmen schon entwickelten Isolierglas mit einem  $U_g$ -Wert von bis zu 0,2 sollte dieses Glas durch geringere Luftzwischenräume noch etwas dünner und die Gasfüllrate sowie die Langlebigkeit des Produktes durch innovative Fertigungsverfahren weiter gesteigert werden. In den Abstandhalter soll für diese Anforderungen besonders geeignetes bzw. modifiziertes Trockenmittel zum Einsatz kommen. Der technisch bedingte jährliche Gasfüllverlust sollte durch innovative Ansätze minimiert werden und die Spann- und Verklebungstechnik in diesem Projekt gegenüber dem bisherigen Ist-Stand weiterentwickelt und verbessert werden. Eine faltenfreie Spannung der Heat-Mirror®-Folien sollte erreicht werden.

Es wurde in einem innovativen Fertigungsverfahren eine Vielzahl von Prototypen in unterschiedlichen Formaten hergestellt und von unserem Unternehmen auf Leistungsfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit geprüft. Geeignete Folien-/Glasaufbauten wurden definiert und erfolgreich hergestellt.

Das Isolierglas konnte zum Stand der Technik in vielen Bereichen wie im Projekt angestrebt verbessert werden. Die verwendete Butylschnur und die gleichmäßig aufgetragenen Sekundärdichtstoffe wurden verbessert, eine faltenfreie Folieneinbringung wurde ebenso entwickelt wie ein entsprechend verbesserter thermischer Schrumpfprozess der Folien. Xenon-Gas kann von uns mit einer Füllrate von durchschnittlich 98% in die Kammern eingebracht werden.

Großformatige Prototypen mit einem Format bis zu 1900 x 4300 konnten gefertigt werden. Die energetischen Kennwerte der Prototypen wurden per Software und experimentell bestimmt. Bei einem angestrebten  $U_g$ -Wert von 0,1 bewegt man sich im physikalischen gerade noch machbaren Grenzbereich. Bestimmende Parameter sind die Emissivitäten der verwendeten Glasscheiben und der Heat-Mirror®-Folien. Der angestrebte  $U_g$ -Wert kann nur mit sehr wenigen Coatings erreicht werden. Würde von einem potentiellen Kunden eine bestimmte Sonnenschutz-/Wärmeschutzglasscheibe

mit höherer Emissivität gewünscht werden oder der Luftzwischenraum kundenseitig verändert werden, so ist ein Ug-Wert von 0,1 nicht zu erreichen.

Im Praxiseinsatz in der firmeneigenen Bürofassade haben sich die Prototypen als stabil und praxistauglich erwiesen. Nach über vier Monaten ist keinerlei optische oder physikalische Veränderung sichtbar.

Die ursprünglichen Projektziele konnten erreicht werden.

Folgende Probleme haben sich während des Projektverlaufes ergeben:

Aufgrund der Corona-Pandemie und der damit verbundenen PVB-Knappheit hat Eastman Chemicals sein Heat-Mirror®-Folienportfolio bis auf weiteres deutlich reduziert. Leider sind seit 2021 nur noch drei Heat-Mirror®-Folientypen verfügbar von zuvor neun. Alle drei weisen nicht die notwendige Emissivität im Coating auf, um einen Ug-Wert von 0,1 in einem Vierkammersystem zu erreichen.

Durch die Corona-Pandemie sind die Preise für Xenon, aber auch für Krypton bisher um den Faktor 15 gestiegen, fast alle am Markt verfügbaren Kapazitäten werden aufgrund dem weltweitem Halbleiternmangel den asiatischen Fertigungsstandorten zugeführt. Für die Isolierglasindustrie gibt es kaum Kapazitäten. Beide Edelgase sind kontingentiert bzw. gar nicht lieferbar. Das entwickelte Ug=0,1 Glas kostet aufgrund dieser Entwicklung derzeit 1.500€/qm mehr als zu Projektbeginn. Das ist am Markt nicht durchsetzbar. So lange derart hohe Xenon-Gaspreise vorherrschen ist dieses Produkt leider nicht zu vermarkten.

Wir haben im Laufe des Jahres 2021 deshalb nach alternativen Glas-/Folienkombinationen gesucht, welche mit Krypton-Gasfüllung ebenfalls einen Ug-Wert von 0,1 erreichen. Dazu sind aber fünf bis sechs Kammern notwendig, das Glas wird dadurch um bis zu 24mm dicker bei gleichem Gewicht. Eine Alternative aufgrund der limitierten Verfügbarkeit der Heat-Mirror®-Folien stellt ein Aufbau mit drei Glasscheiben mit Low-E Beschichtung dar. Der Mehrpreis aufgrund des ebenfalls im Preis stark gestiegenen Krypton-Gases beträgt derzeit 200€/qm. Diese Alternative kann wohl gerade noch am Markt aufgrund der herausragenden Eigenschaften vermittelt werden.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass ein Isolierglas mit einem Ug-Wert von mindestens 0,1 in einem Mehrkammersystem mit mehreren Heat-Mirror®-Folien hergestellt und getestet werden konnte. Dieser Ug-Wert kann allerdings nur erreicht werden, wenn alle dafür relevanten Produktparameter (Beschichtungen, Luftzwischenräume und Gasfüllung) passen und aufgrund kundenseitiger Vorgaben nicht verändert werden müssen. Der Ug-Wert wird sonst immer um 0,1 schlechter. Das ist vergleichbar mit dem heutigen Standardisolierglas. Auch hier wird der bestmögliche Ug-Wert von 0,5 mit einer Argon-Gasfüllung nur erreicht, wenn die Abstandhalter jeweils 18mm breit sind. In der Praxis wird das Fenster- und Fassadenbauseitig häufig reduziert, deshalb wird in der Praxis meistens ein Ug-Wert von 0,7 bis 0,8 geliefert. Deshalb kann unser entwickeltes Hochleistungsglas auch in diesem Sinne kein

Standardprodukt sein, sondern bietet in wenigen Konstellationen das derzeit technisch machbare.

Aus bisheriger Erfahrung erzeugt ein Isolierglas mit einem Ug-Wert wie eine massiv gedämmte Wand ein sehr hohes Interesse. Das Interesse besteht unabhängig von eben diesem Wert.

Kunden sind bereit, derartige Investitionen zu tätigen, wenn für ein Gebäude sehr ambitionierte Ziele bezüglich Klimaneutralität gestellt werden. Auch wenn aus technischen- und materialbedingten Gründen der Ug-Wert minimal schlechter bei z.B. 0,2 oder 0,3 liegen kann, alles in diesem Bereich ist derzeit außergewöhnlich.

Wir haben mit diesem Höchstleistungsdämmglas eine neue Produktkategorie geschaffen. Aufgrund der Gesamtdicke der Aufbauten und der geringeren Lichtdurchlässigkeit gegenüber Standard-Isolierglas ist es Stand heute wohl keine Lösung für gewöhnliche Fenster. Für z.B. Bürofassaden, Tiny Houses und anspruchsvolle Anbauten in Kombination mit schaltbarem Glas oder Photovoltaik-Glas aber wohl.

Aktuell sehen wir ein großes Interesse aus Skandinavien, da hier u.a. die tiefer stehende Sonne auch im Winter oftmals Sonnenschutzglas erfordert, welches unser Hochleistungsdämmglas in idealer Weise schon integriert hat.

## Einleitung:

2020 trat das „Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden“ in Kraft. Dies hat einen „möglichst sparsamen Einsatz von Energie in Gebäuden“ und „unter Beachtung des Grundsatzes der Wirtschaftlichkeit [...] die energie- und klimapolitischen Ziele der Bundesregierung“ zum Ziel. (§1 Abs. 1f GEG)

„Wer ein Gebäude errichtet, hat dieses als Niedrigstenergiegebäude [...] zu errichten (§10 Abs.1 GEG). Ein „Niedrigstenergiegebäude“ ist laut § 3 Absatz 1 Nr. 25 GEG ein Gebäude, das eine sehr gute Gesamtenergieeffizienz aufweist und dessen Energiebedarf sehr gering ist und, soweit möglich, zu einem ganz wesentlichen Teil durch Energie aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden soll. Zusätzlich wird die energiegerechte Sanierung, bzw. Renovierung von privaten und öffentlichen Gebäuden gefördert. Besonders gute Wärmedämmung und andere Energiesparmaßnahmen stehen dabei im Fokus. Fenster haben sich als besonders wirtschaftliche Möglichkeit herausgestellt Heizenergie einzusparen, da sie einen besonders hohen Beitrag zur Energieeffizienz eines Gebäudes beitragen. Mit den modernen Zweifach-Isoliergläsern lassen sich die Auflagen der GEG bei Neubauten und bestehenden Gebäuden erfüllen, doch ist die Energieeinsparung nicht nur eine Frage der gesetzlichen Vorgaben, sondern auch von allgemeiner Umweltverantwortung und Kostenreduzierung.

Neben einer effizienten Erzeugung, ist das Dämmen von Gebäuden der wichtigste Ansatzpunkt. Die Schwachstelle hierbei sind in der Regel die Glasflächen, die weiterhin in den meisten Fällen einen vergleichsweise hohen Wärmeverlust verzeichnen. Zudem ist ein weiterer maßgeblicher Faktor, besonders bei Sanierungsprojekten, dass der Einsatz von hochisolierenden Isoliergläsern nicht möglich ist, da diese entweder zu schwer oder zu breit sind, um in alten Fensterrahmen montiert werden zu können.

Zu den klimapolitischen Zielen möchte die Helmut Hachtel GmbH mit ihren innovativen Isoliergläsern beitragen.

Der technische Standard im Bereich der Isoliergläser ist die Verwendung von Dreifach-Verglasung mit zwei gasgefüllten Kammern. Durch die geschickte Kombination von Glasaufbau und Beschichtung waren zum Zeitpunkt des Antrags bereits Dreifach-Isoliergläser mit einem g-Wert von bis zu 64% und Ug-Werten von 0,6 W/(m<sup>2</sup>K) ohne Kryptonfüllung möglich. Der reale Stand der Technik im Massenmarkt lag hierbei bei Werten zwischen 0,6 – 0,9 W/(m<sup>2</sup>K).

Gegenüber dem von der Helmut Hachtel GmbH bereits entwickelten Isolierglas mit einem Ug-Wert von 0,2 sollte dieses Xenon-gefüllte 4-Kammer-Heat-Mirror®-Isolierglas durch geringere Luftzwischenräume noch etwas dünner und die Gasfüllrate sowie die Langlebigkeit des Produktes durch innovative

Fertigungsverfahren weiter gesteigert werden. Im Rahmen des aktuellen Vorhabens sollte das bestehende System  $U_g=0,2$  weiterentwickelt werden, denn trotz des bisher Erreichten steckt heute in diesem System noch beträchtliches Optimierungspotential, das sich mit neuen konstruktiven und funktionalen Ansätzen erschließen lässt.

## Hauptteil

### 1. Pflichtenheft und Projektkonzeption

#### 1.1 Auslegung der 4-Kammer-Isolierverglasung mit Heat-Mirror®-Klimafolie mit Xenon als Füllgas, Erarbeitung eines ausführlichen Lastenhefts

Ausgangsbasis der Projektüberlegung ist das von unserem Unternehmen entwickelte 4-Kammer-Isolierglas mit einem Ug-Wert von 0,2 (W/m<sup>2</sup>K) auf Basis von integrierten Folien im SZR. Diese sind eine Weiterentwicklung des Dreifachisolierglases mit dem Vorteil, dass sie lediglich das Gewicht einer Zweifachscheibe aufweisen. Die Technologie wurde ursprünglich für die Raumfahrt entwickelt, wird nun aber aufgrund steigender bauphysikalischer Anforderungen vor allem im Bauwesen verwendet. (Achilles et al. (2003), S. 86)

Um eine weitere Verbesserung des Ug-Wertes zu erzielen, sind verschiedene Parameter, welche den Ug-Wert noch positiver beeinflussen können, in Erwägung zu ziehen.

U.a. wird der Ug-Wert durch die Anzahl der Kammern, die Edelgasfüllung, die Dimensionierung des Scheibenzwischenraumes sowie die Anzahl und Anordnung der Low-E-Beschichtungen auf Glas und/oder Folie sowie die sog. Emissivität dieser Beschichtungen beeinflusst.

Aufgrund unserer eigenen Jahrzehntelangen Expertise mit Isolierglas sowie zahlreich geführten Gesprächen mit verschiedenen Fachleuten (z.B. ift Rosenheim, SANCO®-Beratungszentrale etc.) wurde folgender Ansatz mit den größten Erfolgswahrscheinlichkeiten ausgearbeitet:

- 4-Kammer-Isolierglassystem (Prüfung, ob nicht auch mit einem 3-Kammer-System das Projektziel erreicht werden kann)
- Xenon-Gasfüllung oder Xenon/Krypton-Gasfüllung
- Gasfüllgrad voraussichtlich mind. 98%
- Scheibenzwischenraum 10mm (ev. 8mm)
- Low-E-Beschichtung mit möglichst niedriger Emissivität auf den Glasscheiben

Auf umfangreiche Literaturrecherchen konnte verzichtet werden, da wir als SANCO-Lizenznehmer auf das sog. SANCO-Intranet zugreifen können, in welchem umfangreiche Datenbanken zur Verfügung stehen. Über Jahrzehnte wurde hier Fachwissen zu Flachglas, zugehörigen Roh- Hilfs- und Betriebsstoffen, technische Daten und Prüfzeugnisse, Verarbeitungsrichtlinien, Softwaretools etc. gesammelt.

Außerdem haben wir von Eastman Chemicals bei der Übernahme eines Applikationsroboters und einer Folienschneidanlage aus deren Produktionsstätte in Chicago (USA) eine große Anzahl an technischen Unterlagen und Prüfzeugnissen etc. übergeben bekommen. Damit konnten viele Anforderungen des Entwicklungsprojektes abgedeckt werden.

Bei einem Besuch des Autors bei Eastman Chemicals in Palo Alto (USA) konnten diverse technische Fragestellungen diskutiert werden.



Abbildung 1: Firmenbesuch Eastman Chemicals/Southwall Technologies in Palo Alto

Wir haben uns von April 2018 bis September 2018 die theoretischen Grundlagen des Projektzieles und die ersten erfolgreichen Aufbalkulationen durch Softwareunterstützung erarbeitet. Außerdem haben wir zahlreiche Detailarbeiten an der Stabilität dieses komplexen Isolierglasproduktes durchgeführt und Parameter variiert. Danach wurden sehr viele Fachgespräche vom 23. bis 26.10.2018 auf der Messe „Glasstec 2018“ in Düsseldorf geführt. Viele für das Projekt hilfreiche Informationen konnten hierbei gewonnen werden, die wir bis Januar 2019 in das Projekt einarbeiten werden.

Ein 3-Kammer-System ist mit den derzeit am Markt verfügbaren niedrigsten Emissivitäten der Glas- und Folienbeschichtungen nicht realisierbar. Wir haben hierzu viele Varianten mit der Sommer-Software durchgerechnet. Erst wenn in Zukunft Gläser oder Folien mit niedrigeren Emissivitäten verfügbar sind wäre das physikalisch möglich.

## 1.2 Zusammenfassung der Ergebnisse in einem detaillierten Pflichtenheft



Abbildung 2: Prototyp 1 Prüfformat

Die Ergebnisse wurden in einem umfassenden Pflichtenheft festgehalten.

Das Projekt ist praxisnah orientiert und zielt auf die Entwicklung und Herstellung von Prototypen ab, die mittels optimierter Vorprodukte und in vielen technischen Details modifizierten Verarbeitungsschritten zu einem technisch und physikalisch stabilen System führen, welches jederzeit auch in Serie gefertigt werden kann. Anhand des Pflichtenhefts wurde mit der Bildung von Arbeitspaketen das Projekt geplant und daraus Arbeitsschritte abgeleitet.

Das ganze Projekt haben wir fast ausschließlich nach der heuristischen Methode „Trial and Error“ bearbeitet mit der Basis unseres langjährigen Fachwissens und Erfahrung 50jähriger Isolierglasproduktion. In zahlreichen Versuchen wurden immer einzelne Parameter geändert, wie z.B. Geometrie der Butylschnur, Gewicht, Temperaturaufbringung, Rückschnitt der Abstandhalter, unterschiedliche Foliencoatings, unterschiedliches Beschicken, Aufheizen, Halten und Abkühlen im Heat-Mirror®-Ofen etc., und die Prototypen auf verschiedene Verbesserungen und Stabilität analysiert.

Aus diesem Grund wurden im Projektverlauf fast 2.000 unterschiedliche Prototypen hergestellt.

Eine wichtige Aufgabe im Organisationsprozess der Projektschritte und Herstellung der Vielzahl an Versuchsgläsern war die Bewertung möglicher Gestaltungsalternativen der verwendeten Materialien. Es waren die wahrscheinlichen Wirkungen der alternativen Lösungen in Bezug auf die verfolgten Gestaltungsziele zu beurteilen. Ein systematisches Vorgehen war hierbei wichtig.

Transparent und nachvollziehbar werden Bewertungs- und Auswahlprozesse erst dann, wenn die subjektiven Bewertungsvorgänge, ohne die man bei der Auswahl von geplanten Maßnahmen nicht auskommen kann, in formalisierte Bewertungsverfahren eingebettet werden.

Jeder Entscheidungsprozess muss als Informationsverarbeitungsprozess gesehen werden. In diesem sind tatsächliche und bewertete Komponenten wirksam. Anhand der definierten Ziele wurden Handlungen und Aktionen definiert, die Ergebnisse der Handlungen wurden analysiert und der Nutzen dieser Ergebnisse festgestellt. Daraus wurden dann immer wieder modifizierte Ziele definiert (Tiemeyer (1996), S. 108).

Die Lösungsmöglichkeiten wurden nach Zweckerfolg, Mitteleinsatz, Vor- und Nachteilen, Nutzen, Kosten und ähnlichem bewertet. Diese Bewertungskriterien waren Teilziele unseres Zielsystems. Der Bewertungsvorgang bestand aus der Einzelbewertung jeder Lösungsmöglichkeit, dem Vergleich der Ergebnisse und der Ordnung dieser Lösungsmöglichkeiten nach ihrer Vorzugswürdigkeit (Tiemeyer (1996), S. 110)

Die große Anzahl der notwendigen Versuchsaufbauten wurde deshalb mittels einer Software zur Zielbildung und Bewertung von Alternativen strukturiert und unterstützt. Wir haben hier mit der Software COMMOD (CAT = Criteria Analysing Tools von Joerg Reustle Systeme; Berlin) gearbeitet, einem Werkzeug zur Durchführung von komplexen Nutzwertanalysen und Scoring-Modellen.

Mittels dieses Software-Tools haben wir die Eignung der von uns geplanten Handlungsalternativen zur Erreichung stabiler Prototypen bestimmt. Alle denkbaren Alternativen wurden erfasst und in einem Punktesystem bewertet. Dadurch konnte die Veränderung einzelner Herstellungsparameter priorisiert werden.

Daraus haben wir Montageoperationen und notwendige Materialflüsse abgeleitet. Hierbei musste die Realisierbarkeit untersucht werden, d.h. wie und mit welchen Montagemitteln (Vorrichtungen, Werkzeuge, Maschinen) die Prototypen und später das fertige Produkt montiert werden können. Unterschieden wurde hier in

- Manuell
- Teilautomatisiert
- Vollautomatisiert
- Kombination aus den oben genannten

Dabei war wichtig, möglichst viele alternative Montagemittel für unterschiedliche Montageverfahren zu untersuchen, um ein breites Spektrum an technischen Lösungsmöglichkeiten für die Montage zu bekommen (Bullinger (1986), S. 148-149)

## 2. Dimensionierung und Glasaufbau

### 2.1 Erweiterung des Simulationstools zur Berechnung der Dämmwirkung von Glas mit Abbildung der physikalischen Parameter von Xenon im Modell in Bezug auf Wärmeleitungs- und Strömungseffekte

Aufgrund der in Paket 1.1. beschriebenen Einflussparameter wurden die Softwarelösungen „WIN SLT“ und „GLASGLOBAL®“ von Sommer Informatik zum Einsatz gebracht. Hierbei können lichttechnische und energetisch relevante Daten für Isolierglasaufbauten sowie statische Nachweise für Horizontal- und Vertikalverglasungen simuliert und berechnet werden. Aufgrund der fünf definierten Einflussparameter und der Vielzahl am europäischen Markt verfügbarer Low-E-Beschichtungen ergeben sich hunderte denkbarer und wohl in einzelnen Fällen zielführenden Kombinationen. Hierbei wurden sehr viele Arbeitsstunden investiert, da die Eingabe einer konkreten Isolierglaskombination bestehend aus den o.g. Parametern ca. 25-30min. in Anspruch nehmen und von uns bisher mehrere hundert Kombinationen berechnet wurden.

Bestimmte vielversprechende Berechnungen haben wir nach dem Vieraugenprinzip durch die SANCO®-Beratungszentrale in Ulm parallel berechnen lassen (verfügen über die gleichen Software-Lösungen), um jegliche Fehler zu vermeiden.

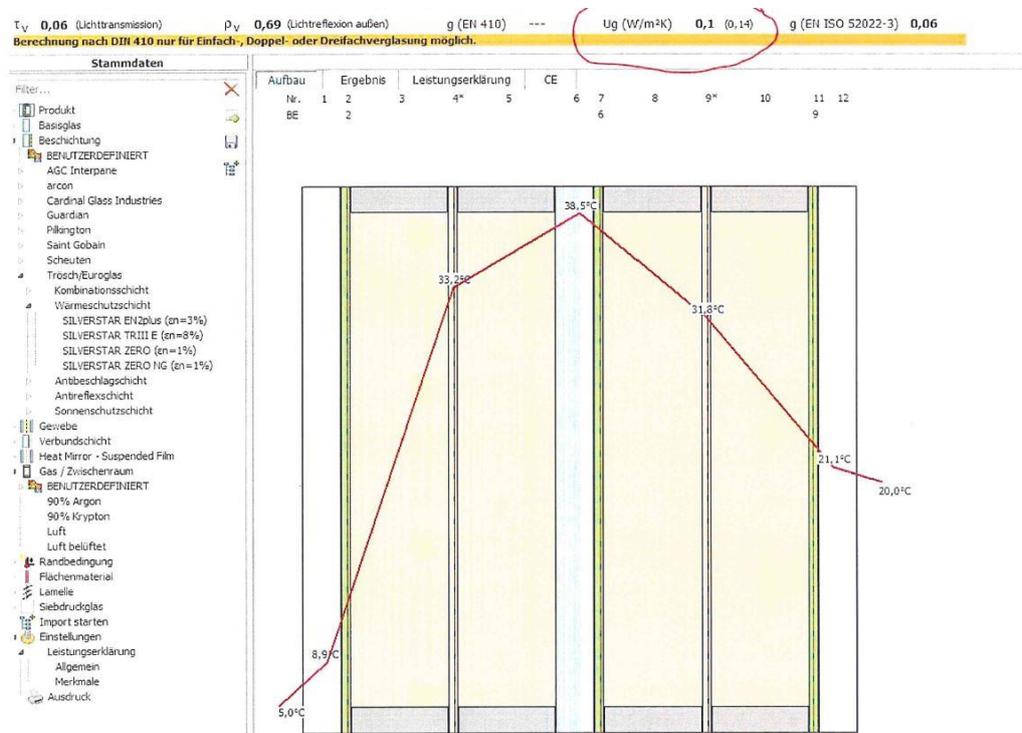


Abbildung 3: Beispielberechnung 1

**Berechnung SommerGlobal  
3fach-Iso VSG**



Bauvorhaben: 2018\_04\_06

Position: 01

Schichtaufbau (von außen nach innen)

Nr.	BE	Bezeichnung	mm
1		EUROFLOAT	4,00
2	2	SILVERSTAR ZERO NG (en=1%)	16,00
3		98% Krypton *	4,00
4		EUOWHITE NG	16,00
5		98% Krypton *	4,00
6	5	SILVERSTAR ZERO NG (en=1%)	16,00
7		EUROFLOAT	4,00
8		98% Krypton *	16,00
9	7	SILVERSTAR ZERO NG (en=1%)	4,00
10		EUROFLOAT	4,00
* BENUTZERDEFINIERT			64,00

Rw (C;Ctr) dB = npd

**Transmission, Reflexion, Absorption**

$\rho_v = 0,26$ (Lichtreflexionsgrad außen)	$T_{UV} = 0,06$ (ultravioletter Transmissionsgrad)
$\rho'_v = 0,27$ (Lichtreflexionsgrad innen)	$T_v = 0,56$ (Lichttransmissionsgrad)
$\rho_e = 0,45$ (direkter Strahlungsreflexionsgrad aussen)	$T_e = 0,28$ (direkter Strahlungstransmissionsgrad)
$\rho'_e = 0,44$ (direkter Strahlungsreflexionsgrad innen)	$R_a = 95$ (allgemeiner Farbwiedergabeindex)
$\alpha_e = 1 = 0,17; 3 = 0,01; 5 = 0,06; 7 = 0,03$ (direkter Strahlungsabsorptionsgrad)	
<b>EN 673</b> Einbauwinkel = 90° vertikal	$U_g = 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Wärmedurchgangskoeffizient)
<b>EN 13363-2</b> $T_e = 5,00 \text{ °C}$ $T_i = 20,00 \text{ °C}$	$E_s = 300,00 \text{ W/m}^2$ Systemhöhe = 1,50 m
$g_{th} = 0,043$ (Wärmestrahlungsfaktor)	$h_{c,e} = 18,00 \text{ W/m}^2\text{K}$ $h_{c,i} = 3,60 \text{ W/m}^2\text{K}$
$g_c = 0,032$ (Konvektionsfaktor)	$q_i = 0,075$ (sekundäre Wärmeabgabe nach innen)
$g_v = 0,000$ (Belüftungsfaktor)	$g = 0,35$ (Gesamtenergiedurchlassgrad)

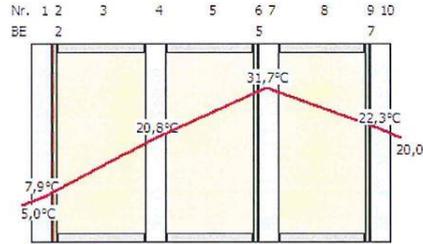


Abbildung 4: Beispielberechnung 2

**Berechnung SommerGlobal  
3fach-Iso VSG**



Bauvorhaben: 2018\_12\_11

Position: 01

Schichtaufbau (von außen nach innen)

Nr.	BE	Bezeichnung	mm
1		EUROFLOAT	4,00
2	2	SILVERSTAR ZERO NG (en=1%)	10,00
3		Xenon *	0,08
4		Heat Mirror™ 22 Suspended Film	10,00
5		Xenon *	0,08
6		Heat Mirror™ 22 Suspended Film	10,00
7		Xenon *	0,08
8		Heat Mirror™ 22 Suspended Film	10,00
9		Xenon *	0,08
10		EUROFLOAT	4,00
* BENUTZERDEFINIERT			48,23

**Transmission, Reflexion, Absorption**

$\rho_v = 0,71$ (Lichtreflexionsgrad außen)	$T_{UV} = 0,00$ (ultravioletter Transmissionsgrad)
$\rho'_v = 0,76$ (Lichtreflexionsgrad innen)	$T_v = 0,04$ (Lichttransmissionsgrad)
$\rho_e = 0,68$ (direkter Strahlungsreflexionsgrad aussen)	$T_e = 0,02$ (direkter Strahlungstransmissionsgrad)
$\rho'_e = 0,74$ (direkter Strahlungsreflexionsgrad innen)	$R_a = 86$ (allgemeiner Farbwiedergabeindex)
$\alpha_e = 1 = 0,20; 3 = 0,08; 5 = 0,02; 7 = 0,01; 9 = 0,00$ (direkter Strahlungsabsorptionsgrad)	
<b>EN 673</b> Einbauwinkel = 90° vertikal	$U_g = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Wärmedurchgangskoeffizient)
<b>EN ISO 52022-3</b> $T_e = 5,00 \text{ °C}$ $T_i = 20,00 \text{ °C}$	$E_s = 300,00 \text{ W/m}^2$ Systemhöhe = 1,50 m
$g_{th} = 0,019$ (Wärmestrahlungsfaktor)	$h_{c,e} = 18,00 \text{ W/m}^2\text{K}$ $h_{c,i} = 3,60 \text{ W/m}^2\text{K}$
$g_c = 0,014$ (Konvektionsfaktor)	$q_i = 0,033$ (sekundäre Wärmeabgabe nach innen)
$g_v = 0,000$ (Belüftungsfaktor)	$g = 0,05$ (Gesamtenergiedurchlassgrad)

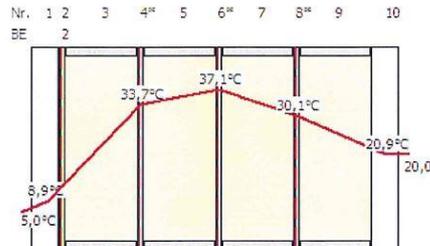


Abbildung 5: Beispielrechnung 3

## 2.2 Dimensionierung der Scheibenzwischenräume gemäß allgemeiner Zustandsgleichung

Aufgrund der Lehrmeinung zu optimal dimensionierten Luftzwischenräumen im Isolierglas in Abhängigkeit zur Edelgasfüllung ist von einem Luftzwischenraum von 8 oder 10mm auszugehen. Xenon-Gasfüllung entfaltet seine optimale Dämmeigenschaft bei 8mm, Krypton bei 12mm. Wir konzentrieren uns deshalb auf Kombinationen von 8mm und 10mm. Im Projektverlauf hat sich aufgrund weiterer Berechnungsmodelle und Rücksprache mit Prüfinstituten ein Luftzwischenraum von 10mm als optimal erwiesen. Bei Krypton liegt er bei 12mm und 13mm.

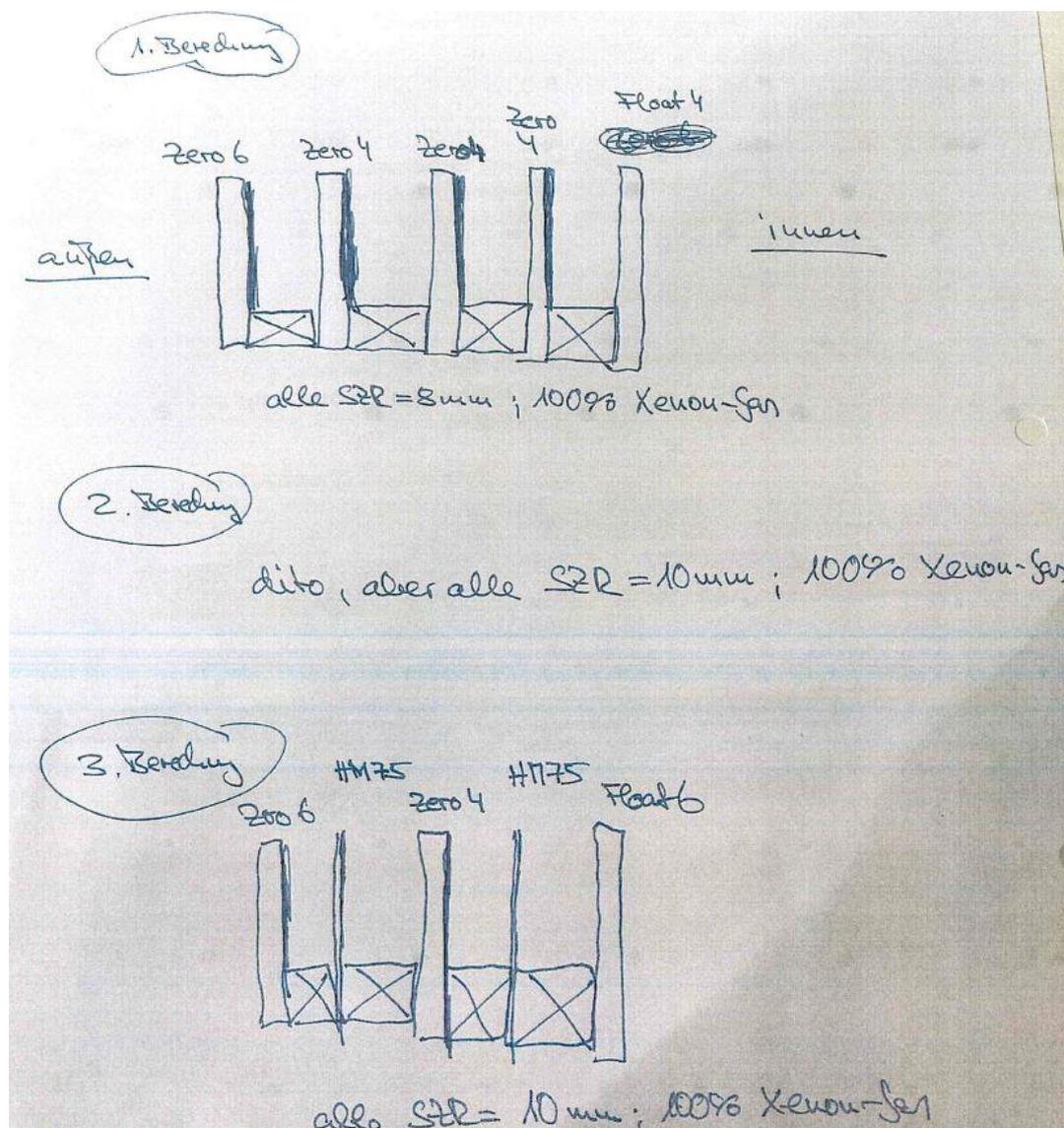


Abbildung 6: Aufbaukombinationen

In unseren Simulationen und aufgrund unserer langjährigen praktischen Erfahrungen im Bereich Isolierglas-Folien-Aufbauten haben wir im Projektverlauf zwei Lösungsansätze parallel verfolgt:

Einmal den im Projektantrag beschriebenen Ansatz ein Isolierglas mit einem Ug-Wert von 0,1 (W/m<sup>2</sup>K) aus zwei Glasscheiben, drei Hochleistungs-Heat-Mirror®-Folien und 4 Kammern (Luftzwischenräumen) herzustellen.

Teil der Projektarbeit war hier auch eine Weiterentwicklung der physikalischen und mechanischen Stabilität der vier notwendigen Abstandhalter, die für ein faltenfreies Endprodukt zwingend notwendig sind. Aufgrund der hohen physikalisch wirkenden Zugkräfte durch die von uns durchzuführende Folienschumpfung kam es in einzelnen Fällen zu einer Faltenbildung in den Folien im Randbereich.

Ein zweiter Ansatz war die Verwendung von drei Glasscheiben und jeweils zwei Kammern mit einer Heat-Mirror®-Folie zwischen zwei Scheiben. Auch hier wurde ein Ug-Wert von 0,1 (W/m<sup>2</sup>K) erreicht. Der entscheidende Vorteil war hier eine sehr hohe mechanische Stabilität der Abstandhalter, da jeder Abstandhalter auf einer Seite zu einer Glasscheibe hin verklebt wurde, dadurch wurden die hohen Zugkräfte der Folienschumpfung teilweise kompensiert, das Produkt blieb zu einem Großteil faltenfrei. Einziger Nachteil ist das höhere Gewicht des Endproduktes, da hierbei drei und nicht nur zwei Glasscheiben verwendet wurden. Beide Ansätze waren zielführend. Wir haben beide Lösungen in diesem Projekt parallel verfolgt. Auch das Gewicht einer konventionellen Dreifachglasscheibe ist bei dem angestrebten Ug-Wert von 0,1 (W/m<sup>2</sup>K) mehr als akzeptabel, da wir in bisher unerreichte Dimensionen der Dämmleistung im Isolierglas vorstoßen. Wir haben hierbei schließlich fast schon die Dämmqualität einer massiven Wand erreicht. Eine alternative Berechnung 0,1 mit verfügbaren Coatings findet sich in Anhang (Abbildung 30).

### **2.3 Bestimmung der Scheibendicke und Abstandhaltergröße unter Berücksichtigung der idealen Dämmwirkung von Xenon und einer gewichtsoptimierten Dimensionierung**

Die Glasscheibendicke beeinflusst grundsätzlich nicht den Ug-Wert einer Verglasung. Statische Vorgaben einzelner Projekte führen dementsprechend in der Praxis zu entsprechenden Glasdimensionierungen. Der Abstandhalter beeinflusst lt. Arbeitspaket 2.2 sehr wohl den Ug-Wert. Wie schon erwähnt sind 10mm in diesem Projekt elementar wichtig. Außerdem spielte der Abstandhalter bzw. die Qualität des Abstandhalters eine elementare Rolle in diesem Projekt bezüglich Stabilität, Faltenfreiheit der Folien sowie mögliche geometrische Breitenausprägung der Butylschnur.

Wir waren in diesem Projekt aber nicht völlig frei in der Auswahl der Abstandhaltersysteme. Die Stabilität des Abstandhalters spielt bei Foliensolierglas

eine elementare Rolle. Wir führten hier immer wieder Versuche mit neuen bzw. weiterentwickelten Systemen durch, in dem wir Prototypen bauten und nach der Folienschumpfung im Ofen den Verzug der Abstandhalter aufgrund der wirkenden Schrumpfkkräfte der Folien beurteilen.

Die Butylschnur beeinflusst aufgrund ihrer Geometrie und Gleichmäßigkeit die Gasdichtigkeit elementar. Durch die Softwaresimulationen konnte ermittelt werden, dass eine hohe Gasfüllrate von 98% für den Projekterfolg elementar ist.

#### **2.4 Herausarbeiten von physikalischen Parametern mittels mathematischen Modellen (Schalldämmwert, Lichttransmissionswert, Lichtreflexion und Gesamtenergiedurchlass)**

Diese Werte wurden alle durch den ausgiebigen Einsatz der Software „WIN SLT“ ermittelt. Diese Software entspricht dem aktuellen Standard im Bereich einer solchen Berechnungssoftware in der alle gängigen Gläser, Coatings und ebenfalls alle Heat-Mirror®-Folien hinterlegt sind.

Unter den erfolgsversprechenden Aufbauvarianten mussten dann in einem nächsten Schritt diejenigen ausgewählt bzw. priorisiert werden, die aufgrund ihrer lichttechnischen Eigenschaften das höchste Vermarktungspotenzial besitzen. Hier wurde zwischen reinen Wärme- oder Sonnenschutzigenschaften sowie Kombinationen aus beiden unterschieden. Daraus haben sich dann unterschiedliche Zielmärkte abgeleitet. Aufgrund der mindestens drei zu verwendenden Heat-Mirror®-Folien haben sich im angestrebten Projektaufbau auch immer eine automatische Sonnenschutzfunktion aufgrund der gegenüber einem Standard-Wärmeisolierverglasung geringeren Lichttransmission ergeben.

#### **2.5 Ermittlung von umweltspezifischen Belastungen auf das Glas mittels einer FEM-Simulation. (Wind, Luftdruck)**

Zur Ermittlung der physikalischen Belastung des Isolierglasproduktes haben wir mit der Software GLASGLOBAL® gearbeitet.

GLASGLOBAL® ist die Expertensoftware zur Berechnung des statischen Nachweises von Verglasungen nach DIN 18008 Teil 1 – 6. Der schnelle FEM-Rechenkern ermöglicht eine exakte Berechnung verschiedenster Verglasungen. Die Lastannahmen nach DIN EN 1991 – 1 sind im Programm hinterlegt.

## **2.6 Durchführung iterativer Testreihen zum Aufbau der Isolierkammern und des Dämmsystems**

Wie im Arbeitspaket 2.1 beschrieben wurden umfangreiche Softwareberechnungen iterativ durchgeführt. Außerdem wurden positive Parameterkombinationen, welche durch die Software ermittelt wurden als erste Prototypen gebaut, um erste Erkenntnisse zu physikalischen und praktischen Anforderungen zu gewinnen.

## **2.7 Untersuchung von verschiedenen Kunststoff und Edelstahl Abstandhaltern für eine optimierte Wärmedämmung und Anbringung an das Randverbundsystem, sowie der Scheiben und Folien**

Diverse Abstandhalter, die am Markt verfügbar sind wurden auf ihre Eignung geprüft. Es handelte sich um Edelstahl-Abstandhalter und Kunststoff-Abstandhalter der renomierten Marken Almetall (USA), Swisspacer (Saint Gobain, Frankreich), Thermix (Ensinger, Deutschland) sowie Chromatec (Dänemark).

Dieses Arbeitspaket wurde während der gesamten Projektlaufzeit bearbeitet, die Abstandhalter wurden alle zur Messe Glasstec 2018 verändert bzw. verbessert.

Wie bereits im Punkt 2.3 angesprochen haben die Qualität und Geometrie und die Auftragsmenge je Laufmeter bei der Butylschnur eine elementar wichtige Rolle in diesem Projekt gespielt. Wir haben eine große Reihe Testexponate gefertigt, bei denen wir die Butylschnur in eben diesen Parametern variiert haben, um optimale Haftung zu den Folien und den Abstandhaltern zu erreichen. Hier führten wir u.a. sog. Butterfly-Testreihen durch, um den Grad der Haftung erkennen zu können. Eine völlig fehlerfrei aufgebrachte Butylschnur war hierbei die Voraussetzung für die Gasdichtigkeit.

Kritisch bei der Herstellung von Isolierglas ist grundsätzlich der Zeitraum zwischen dem Zusammenbau der Komponenten (Glas und Abstandhalter) und der Versiegelung mit dem Sekundärdichtstoff Polyurethan. Hier verliert jedes gewöhnliche Isolierglas schnell 2-3 % Gasfüllung innerhalb von 30-60 Sekunden, wenn Unregelmäßigkeiten in der Butylschnur vorhanden sind. Für gewöhnliches Isolierglas spielt das keine große Rolle, da Gasfüllgrade von ca. 92% ausreichend sind. Für dieses Projekt haben wir bis zu 98% Gasfüllrate benötigt und verfügen hierfür über mehrere Gasfüllgeräte, die auf zuverlässige Erreichung dieses Gasfüllgrades geprüft worden sind und einer fremdüberwachten Prüfung unterzogen wurden. Gasfüllraten von 95% wurden bisher von allen Geräten immer verlässlich erreicht.



Abbildung 7: Gasfüllgerät Nr. 3

Da wir aber ein absolutes Premiumprodukt angestrebt haben, musste hier an alle Details gedacht werden, die zu einer zuverlässigen Gasdichtigkeit führen würden.

Aufgrund neu getesteter Abstandhaltersysteme, die wiederum über unterschiedliche Ausprägungen der Perforierungen für den Gas-/Feuchtigkeitsaustausch mit dem sog. Silicagel verfügen, haben wir Testlieferungen Silicagel von bisher zwei neuen Herstellern bezogen. Diese Lieferungen hatten aufgrund unserer Vorgaben andere Körnungen, da wir mit unserem bisherigen Silicagel (Hersteller Grace GmbH) Staubentwicklung im Luftzwischenraum feststellen mussten. Wir beziehen aufgrund unserer im Projekt ermittelten Anforderungen nun Silicagel in der für diese Projektentwicklung optimalen Qualität.

### **3. Weiterentwicklung der Einspanntechnik für Heat-Mirror®-Klimafolien und Modifizierung der Dichtstoffe und Klebetechnik**

#### **3.1 Auslegung der thermischen Vorspannprozesse für die deutlich kleineren Abstandhalter des Xenon-Glases unter Berücksichtigung der auftretenden Spannkraft auf die Abstandhalter, Folien und Klebesystem**

In diesem Paket wurden diverse Fachgespräche mit Eastman Chemicals (Folienhersteller) sowie Dicht- und Klebstoffherstellern geführt. Bei diesen Gesprächen konnten Parametereinstellungen erarbeitet werden, die bei den regelmäßig gefertigten Testscheiben verifiziert und analysiert wurden. Rezepturänderungen waren bei Dicht- und Klebstoffen aufgrund der relevanten Kleinmengen von den Herstellern nicht machbar, allerdings aufgrund des positiven Projektverlaufes schlussendlich nicht notwendig.

Bei dem von uns entwickelten Verfahren wurde eine wärmeschrumpfbare, transparente Kunststoffolie am Randverbund einer Doppelverglasung zwischen jeweils zwei Abstandhalter eingespannt und befestigt. Die gesamte Einheit wurde in einem Heißluftofen auf eine bestimmte Temperatur und über eine definierte Zeit erhitzt, damit die Folie geschrumpft ist und straff wurde und anschließend auf Umgebungstemperatur kontrolliert abkühlen konnte (siehe Abbildung 8).



Abbildung 8: HM-Ofen

Aufgrund der Schrumpfkkräfte, die sich beim Erwärmen entwickelt haben, war die Folie im Endzustand straff und unempfindlich gegenüber Temperaturschwankungen, die sonst zu einer Änderung ihrer Dimension geführt hätten. Die Folie bleibt so dauerhaft faltenfrei.

Eine erfolgreiche Verglasungsintegration hängt hauptsächlich von zwei mechanischen Eigenschaften der Folie ab. Die Haftung am Dichtungsmaterial gewährleistet eine dauerhafte Verbindung und bestimmt die Isolierglasbeständigkeit der gesamten Einheit mit. Ein geeignetes Schrumpfverhalten sorgt für das Erscheinungsbild der Verglasung, damit die Folie unsichtbar zwischen den zwei Scheiben eingespannt bleibt.

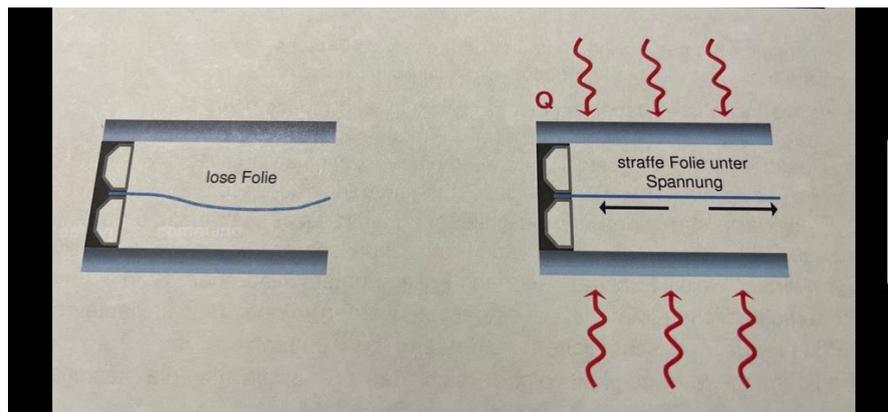


Abbildung 9: Fertigungsschritte bei der Herstellung von Verglasungen mit eingespannten Heat-Mirror®-Folien

Die wärmeschrumpfbare Heat-Mirror®-Folie wurden nach der Extrusion durch Flachfoliendüsen mehrfach uniaxial oder biaxial gereckt. Der Reckgrad der Folie ließ sich bei der Fertigung in Abhängigkeit der Kristallinität des eingesetzten Polymers einstellen. Dieser Zustand blieb nach der Abkühlung erhalten. Wurden diese Folien erneut auf die Herstellungstemperatur erwärmt, zogen sie sich durch das Freisetzen der Spannung, die bei der Herstellung eingebracht wurde, zusammen. Diese Eigenschaft haben wir bei unserem Verfahren verwendet, um die Folien faltenfrei im Scheibenzwischenraum einer Verglasung einzuspannen. Dabei wurde das Schrumpfverhalten parallel zu den Haftungsversuchen an den gleichen Proben getestet. Die Bewertung erfolgte zum einen durch eine visuelle Inspektion der Folie (Faltenbildung) und zum anderen durch eine qualitative Prüfung der Spannungskraft, die sich aufgrund des Schrumpfens der Folien entwickelt hat. Da in unserem Projektaufbau vier Abstandhalter verwendet werden mussten befanden sich die zwei inneren Abstandhalter nur in Verbindung mit den Folien, die beiden äußeren Abstandhalter dagegen mit jeweils einer Folie zur Glasscheibe hin. Zur Glasscheibe hat sich eine mechanisch deutlich stabilere Verbindung ergeben, die inneren Abstandhalter „schwimmen“ regelrecht zwischen der Folie und wurden häufig beim Schrumpfungsprozess mitgezogen aufgrund der dünnen Wandstärke. Sie haben sich also regelrecht um 1-3mm verbogen. Das hat zu Falten in der Folie geführt, die visuell nicht tolerierbar waren. Nur mit einem äußerst gleichmäßigen Erhitzen der Folien und einer von uns im Projekt entwickelten mechanischen Stabilisierung der vier Abstandhalter ist ein fehlerfreies Produkt möglich.

Die daraus abgeleiteten Erkenntnisse führten u.a. zur Investition in einen neuen Ofen zur Herstellung der Prototypen.

### 3.2 Entwicklung der Einspanntechnik mit Aufbau der neuen Aufspanntechnik zur faltenlosen Einbringung der Heat-Mirror®-Klimafolien

Hierzu wurde versucht mittels eines Fanuc-Roboters, den wir aus dem früheren Heat Mirror®-Isolierglaswerk in Chicago (USA) von Eastman Chemicals übernommen haben, eine Automatisierungslösung zu erarbeiten (siehe Abbildung 10 und Abbildung 11). Diese führte bei größeren Formaten zu einer gleichbleibend guten Aufbringungsqualität. Für die Vielzahl an gefertigten Testscheiben im Format 350mm x 500mm wurde allerdings konventionell mit größtmöglicher Sorgfalt gefertigt. Bei allen produzierten Testscheiben in den Größen 350mm x 500mm sowie 500mm x 700mm wurde eine sehr hohe Stabilität des Folien- und Abstandhalteraufbaus erreicht. Bei größeren Testscheiben hingegen trat immer wieder ein leichter Verzug der Folien respektive der Abstandhalter auf.

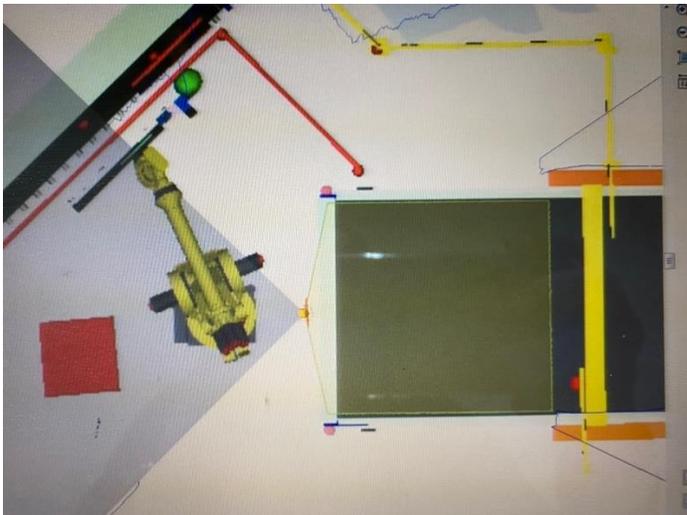


Abbildung 10: Automatisierungslayout



Abbildung 11: Fanuc-Folienapplikationsroboter

Dies ist durch die hohen Zugkräfte zu erklären, die beim Schrumpfungsprozess der Folien im Heat-Mirror®-Ofen erzeugt wurden. Zur Lösung dieser auftretenden Instabilitäten haben wir uns verschiedene Lösungsansätze erarbeitet, die wir jeweils durch Herstellung von Testscheiben verifiziert haben.

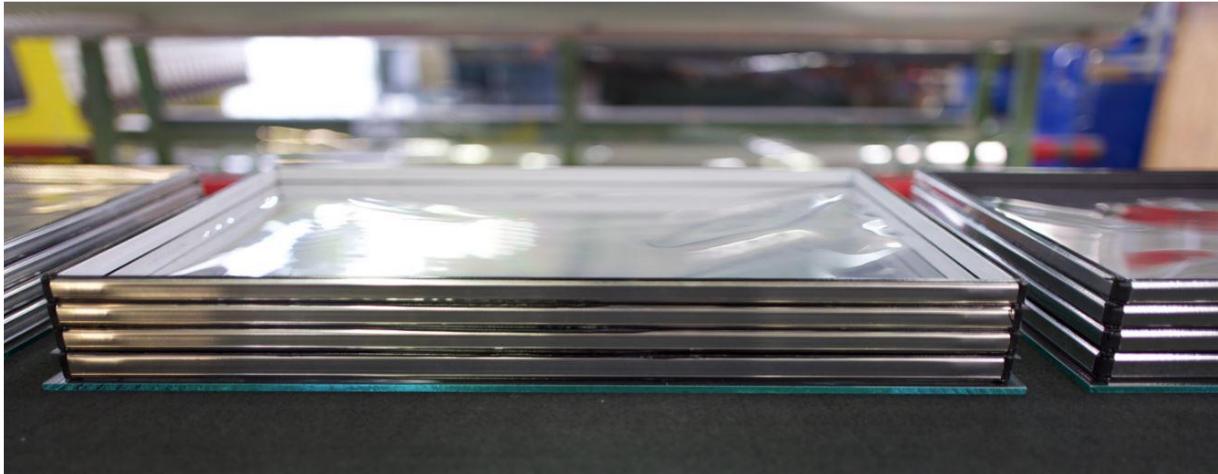


Abbildung 12: Testscheiben

Hierzu haben wir die relevanten Bereiche physikalisch verändert bzw. unterstützt. Zu jedem veränderten Parameter war die Herstellung von Testgläsern notwendig, Simulationen waren hier nicht ausreichend. Insgesamt wurde hier über Monate hinweg an Lösungsansätzen gearbeitet, da aufgrund des Vierkammer-Isolierglasaufbaus die physikalischen Wirkkräfte sehr komplex waren und die Lösung dieser, eine der größten Projektherausforderungen dargestellt haben. Aufgrund aller im Projektverlauf gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der Anforderungen an einen perfekten Schrumpfungsprozess mussten wir erkennen, dass unser Heat-Mirror®-Ofen diese Anforderungen nicht vollumfänglich erfüllen konnte. Es war ein sehr präziser und Gradgenauer Verlauf unterschiedlicher Heizzyklen und Temperaturhaldauern notwendig, um optimale Ergebnisse zu erzielen. Wir haben hierbei untersucht, inwieweit mit Hilfe von Parameterkombinationen und der Zwangsumwälzung der Gase eine Homogenisierung der Temperatur in unserem 1-zonigen Kammerofen erreicht werden kann. Die Aufheizkurven wurden genauer untersucht. Wir haben die relevanten Stoff- und Wärmeaustauschvorgänge betrachtet und analysiert.

Aus diesen Anforderungen haben wir uns im September 2020 ein Anforderungsprofil bezüglich Dämmung, Heiztechnik, Temperaturverteilung und elektronischer Regelung für einen neuen Ofen erstellt, welchen wir im März 2021 in Schwäbisch Hall installieren und in Betrieb nehmen konnten. Hierbei handelte es sich um Investition im sechsstelligen Euro-Bereich.



Abbildung 13: neuer HeatMirror®-Ofen

### 3.3 Auslegung der dauerelastischen Primär- und Sekundärdichtstoffe für den Hohlraum zwischen Abstandhalterraahmen und den Scheibenkanten unter Einhaltung absoluter Toleranzgrenzen

Hier wurden Parameter für Fließdruck- und Fließgeschwindigkeit der Primär- und Sekundärdichtstoffe erarbeitet sowie der jeweiligen optimalen Aufbringungstemperaturen dieser Stoffe angepasst. Eine Verifizierung erfolgte jeweils bei diversen Testreihen der Musterglaserstellung. Es konnte erfolgreich eine stoffschlüssige Verbindung zwischen der Verstärkungsgeometrie sowie den übrigen Komponenten erzielt werden. Es wurde das Haftungsverhalten bei Versteifungsplättchen mit und ohne seitliche Flanken getestet. Bei der Haftung des Polyurethans an den Abstandhaltern spielte die Vorbehandlung mittels Primern eine wichtige Rolle.

Die Haftung zwischen Folie und Sekundärdichtstoff am Randverbund einer Verglasung entsteht durch die molekulare Wechselwirkung der Grenzschicht der beteiligten Materialien und hängt somit von ihren physikalischen Oberflächeneigenschaften ab. Um den Einfluss vom Material sowie Beschaffenheit der Oberfläche auf die Adhäsion der Folie zu untersuchen, wurden von uns Haftungsversuche an diversen Proben durchgeführt.

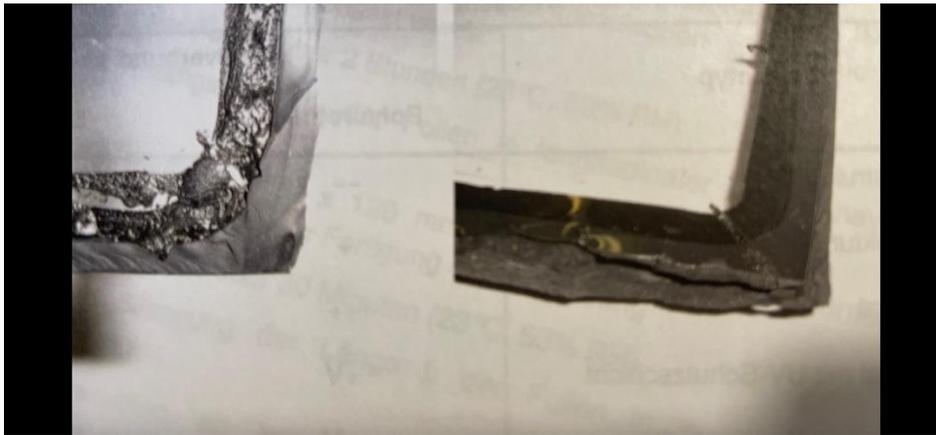


Abbildung 14: Prüfung der Haftung durch visuelle Inspektion der Proben nach Abzugstest: die Verteilung des Dichtstoffes über die Ränder belegt die gute (links) oder schlechte (rechts) Adhäsion der Folien

### **3.4 Modifizierung und Optimierung der Butyl-Klebertechnik für die Fixierung der Klimafolien bei kleineren Abstandhaltern und stärkeren Spannungen der Folien**

In diesem Paket haben wir Gespräche mit den Herstellern Fenzi S.p.A., Kömmerling Chemische Fabrik GmbH sowie der Nedex Group, Türkei, und deren Entwicklungslaboren geführt. Alle drei Unternehmen stellen sowohl Butyl als auch Polyurethan oder Polysulfid her. Dort existiert jeweils großes Fach- und Detailwissen sowohl zu den chemischen als auch physikalisch-thermischen Eigenschaften dieser Materialien. Anhand unserer Qualitätsprobleme bei Aushärtung und Folienstraffung ergab sich bei diesen Unternehmen ein Anforderungsprofil an den von uns für dieses Projekt benötigten Aushärteprozess. Sehr ergiebig waren mehrere Firmenbesuche bei Nedex in Dilovasi, Türkei, von Herrn Patric Hachtel. Hier konnten viele für den Projekterfolg notwendigen Parameter sehr detailliert besprochen und erarbeitet werden. Diverse Labortechnische Untersuchungen zu unserem Projekt wurden unter größter Geheimhaltung in diesem Labor für uns durchgeführt.



Abbildung 15: Firmengelände Nedex



Abbildung 16: Fabrikhalle Nedex

Im Nedex-Labor konnten für unser Projekt geeignete Parameter angewandt und geprüft werden.

Über eine Vielzahl durchgeführter Haftungstests konnten wir ein Anforderungsprofil für das Butyl respektive die Butylschnur und die damit verbundene Butylgeometrie erarbeiten. Die äußeren Abstandhalter im Projektaufbau müssen auf der einen Seite eine Haftung zur Glasscheibe aufbauen und auf der gegenüberliegenden Seite zur Heat-Mirror®-Folie. Dafür sind unterschiedliche Geometrien der Butylschnüre notwendig. Außerdem unterscheiden sich beide Butylschnüre in der Dicke und im Gewicht je Laufmeter. Diese komplexen Anforderungen konnten unsere existierenden Butylextruder nicht immer und gleichbleibend erfüllen. Deshalb wurde im Projektverlauf in eine neue Butylextruderanlage investiert, die unsere Anforderungen an Geometrie, Fließgeschwindigkeit und Aufbringungspräzision erfüllen konnte. Dem Hersteller wurden sehr genaue Vorgaben für die für unser Unternehmen individuelle Umsetzung gemacht.



Abbildung 17: neue Butylextruderanlage für HM-Produktion



Abbildung 18: Nedex Labor

Die in diesen Gesprächen gewonnenen Erkenntnisse wurden anschließend im weiteren Projektverlauf umgesetzt. U.a. werden für das Projekt nun Molekularsiebe des Unternehmens Nedex eingesetzt sowie Verfahrensparameter wie Temperaturen, Aushärtezeiten, Butylgeometrien etc. angewandt, welche uns als für unsere Projektanforderungen sehr geeignet mitgeteilt wurden.

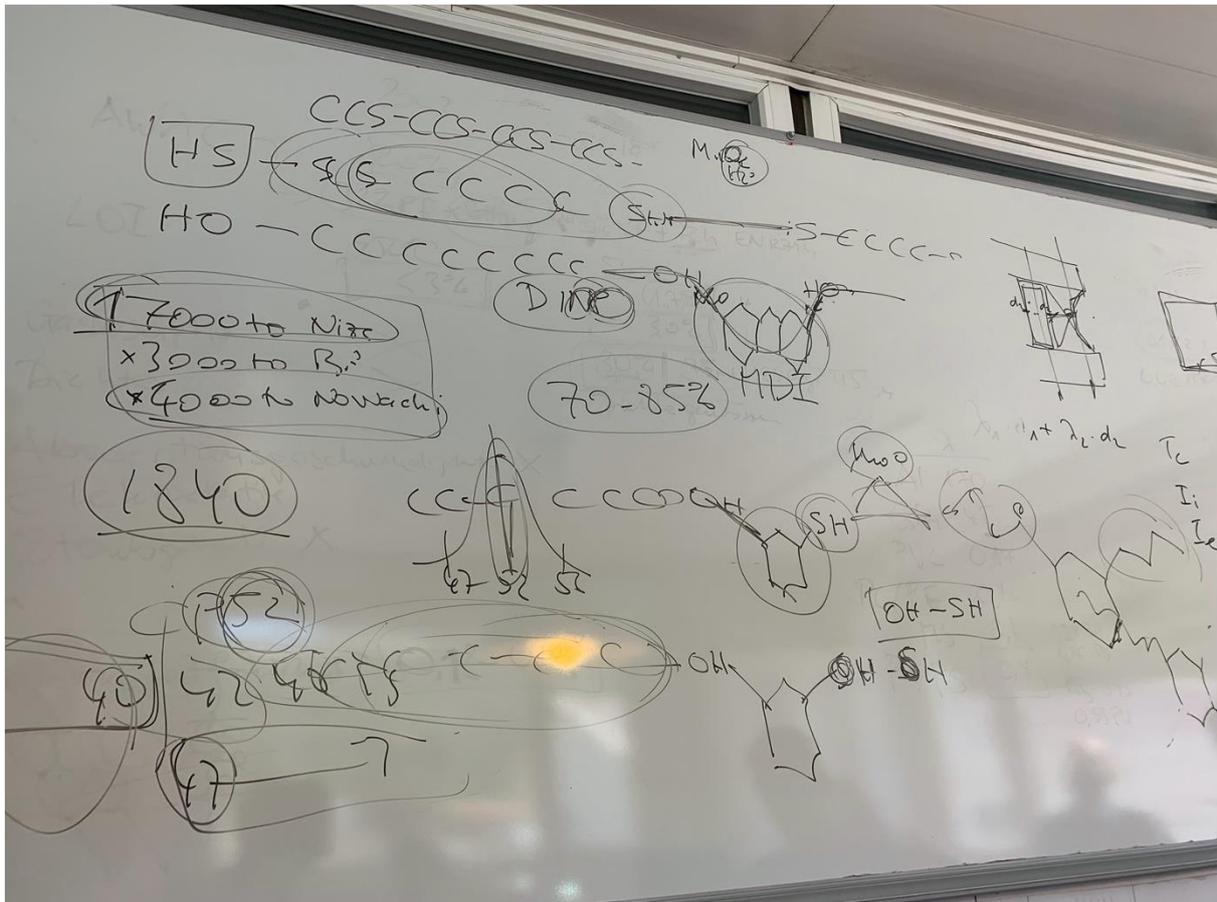


Abbildung 19: Chemisches Hintergrundwissen



### **3.5 Entwicklung eines neuartigen Randverbundes mit schmäleren Abstandhaltern ohne Wärmebrücken oder Feuchtigkeitsbelastung, Vermeidung von Spannungsbildung und Überbeanspruchung**

Im Zuge der Entwicklung des neuartigen Randverbundes wurde eine Vielzahl von Testreihen im Prüfformat 350mm x 500mm gefertigt, bei denen Abstandhaltersysteme verwendet wurden. Limitierend ist immer die Breite der Abstandhalterflanke, die zwischen einzelnen Abstandhalterfabrikaten variiert. Zu viel Butylmenge führt beim Verpressen der Testeinheiten zum seitlichen Austreten des Materials, zu wenig Material fixiert die Folie nicht dauerhaft. Außerdem konnten wir im Projektverlauf erarbeiten, dass die Geometrie der Butylschnur einen entscheidenden Einfluss auf den Projekterfolg hat, wie in Paket 3.4 beschrieben.

Über den gesamten Projektverlauf hinweg haben wir ca. 1.900 Testmuster im Prüfformat 350mm x 500mm gefertigt, darin verschiedene Abstandhalter mit unterschiedlichen Herstellungsparametern kombiniert und anschließend visuell und physikalisch/chemisch analysiert.

An diesem Paket wurde über die gesamte Projektlaufzeit hinweg gearbeitet. Unser Vorzugslieferant für Heat-Mirror®-Abstandhaltersysteme aus den USA hat uns im Projektverlauf verschiedene Edelstahllegierungen geliefert und auch die Flankenbreite mehrfach verändert. Zum Projektabschluss beziehen wir nun ein für das Projekt bestgeeignetes Abstandhaltersystem.

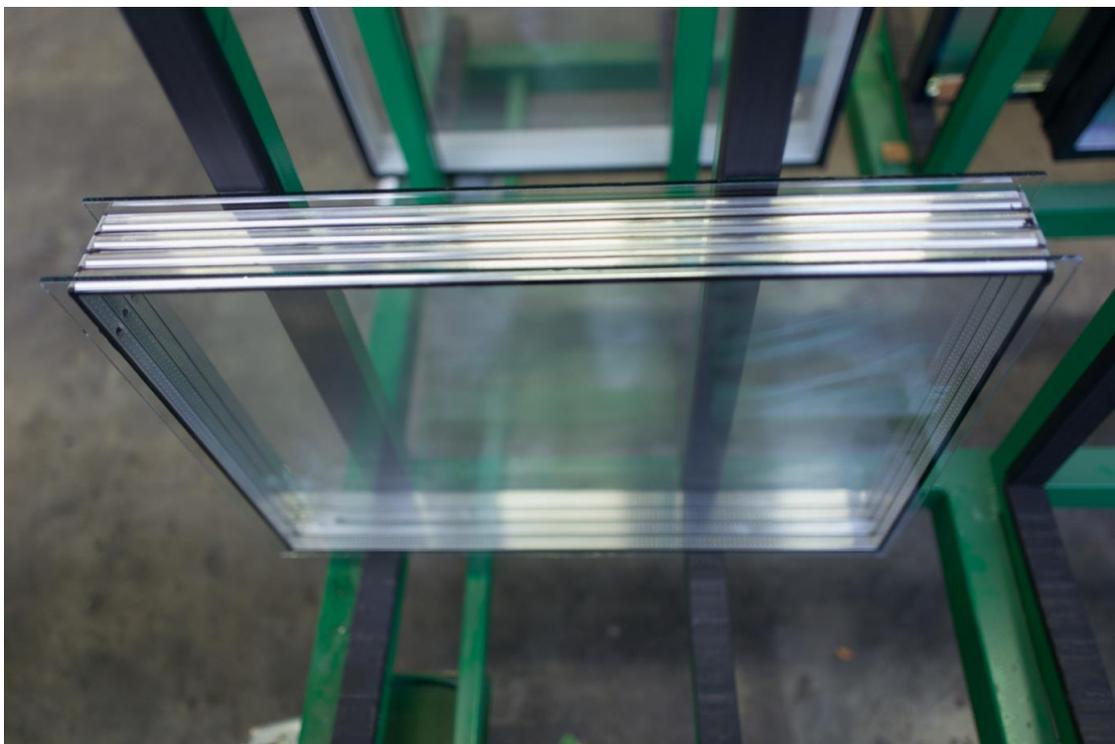


Abbildung 21: Testreihen 1



Abbildung 22: Testreihe mit rudimentärer Stabilisierung

Anhand der aus diesen 1.900 Testmustern gewonnenen Erkenntnisse konnten alle bisherigen Schwachstellen des Systems erkannt und analysiert werden und daraus Anforderungsparameter an neue maschinelle Anlagen abgeleitet werden.



Abbildung 23: Testreihen 2



Abbildung 24: Testreihe mit Temperatursensoren im Ofen



Abbildung 25 Großformatige Testreihen

### **3.6 Modifizierung der Einspanntechnik für kleinere Abstände zwischen den Gläsern und Klimafolien**

In diesem Paket haben wir Modifizierungen an unseren für die Folieneinbringung eingesetzten Einspannvorrichtungen vorgenommen. Diese hierbei zum Einsatz gebrachten Parameter (Zugkraft sowie Aufspanngeschwindigkeit) müssen noch im Herstellprozess für große Glasformate verifiziert werden.

### **3.7 Ausarbeitung von Rauigkeits-Bearbeitung für eine verbesserte Haftwirkung mit den Folien**

Die Haftung zwischen Folie und Sekundärdichtstoff am Randverbund einer Verglasung entsteht durch die molekulare Wechselwirkung in der Grenzschicht der beteiligten Materialien und hängt somit von ihren physikalischen Oberflächeneigenschaften ab. Um den Einfluss vom Material sowie Beschaffenheit der Oberfläche auf die Adhäsion der Folie zu untersuchen, wurden von uns Haftungsversuche an diversen Proben durchgeführt.

Getestet wurden insgesamt 100 zwischen Abstandhaltern eingespannte Proben (mehrere Proben je Folientyp), die mit zwei unterschiedlichen Dichtstoffen (Polyurethan und Silikon) gefertigt wurden. Die Bewertung erfolgte nach Ofenzyklus durch eine qualitative Prüfung der Adhäsionskraft der Folien am Dichtungsmaterial mittels Abzugstest und einer visuellen Inspektion.

Hier haben wir ein mechanisches Verfahren entwickelt um das Low-E-Coating auf den Heat-Mirror®-Folien zu entfernen. Vergleichbar wird dieser Ansatz standardmäßig bei Low-E-Gläsern durchgeführt, allerdings normalerweise vollautomatisiert auf den Glasschneideanlagen. Für eine Folienverarbeitung in einem Zweikammer-Isolierglassystem wurde dieses Verfahren bisher nach dem Stand der Technik nicht benötigt und nicht durchgeführt. Für die in diesem Projekt notwendige Vierkammerlösung hat sich das allerdings als Vorteil erwiesen.

Wurde am Rand einer Folie auf ca. 15mm Breite das Coating entfernt, so hat man eine bessere Haftung des Butyls mit der Folie erreicht. Wir haben hierzu eine mechanische Lösung erarbeitet und dazu unsere maschinelle Technologie zum Randentschichten von Low-E-beschichteten Gläsern umgebaut, um damit Folien entschichten können.



Abbildung 26: Folienaufbringung

## 4. Optimierung der Gasfüllung und des Gasgemisches der Kammern

### 4.1 Experimentelle Untersuchung von Füllgasen zur Erreichung des idealen Gasgemisches von Xenon, Krypton und Argon unter den Parametern der Wirtschaftlichkeit und der Erreichung eines Ug-Wertes von 0,1 W/Km<sup>2</sup>

Im angestrebten System mit vier Kammern und drei Heat-Mirror®-Folien sowie zwei Glasscheiben ist aufgrund der Berechnung des Ug-Wertes durch die Sommer-Software eine reine Xenon-Gasfüllung notwendig. Aufgrund der bei den Heat-Mirror®-Folien gegebenen Emissivitäten ist eine andere Gasfüllung nicht zielführend, da immer nur ein Ug-Wert von 0.2 erreicht werden konnte.

Aufgrund der Entwicklung der letzten 18 Monate während und aufgrund der Corona-Pandemie haben sich leider folgende negativen Veränderungen bezogen auf das Projekt ergeben:

Eastman hat wegen der Rohstoff- und vor allem Kunststoffknappheit entschieden, sein Heat-Mirror®-Folienprogramm zu straffen und auch technisch zu verändern. Derzeit sind nur die Folientypen HM75S, HM88S und HM44S verfügbar. Die Produktion der Folientypen HM11, HM22, HM-HPR28, HM33, HM55, HM66, HM77 und HM-TC88 wurden während der Pandemie gestoppt. Derzeit ist unklar, wann diese ggfs. wieder verfügbar sein werden. Aufgrund dieser Situation fehlen nun Folien, die eine für den Projekterfolg geeignete Emissivität mit sich bringen. Vor allem das Fehlen der Folie mit TwinCoating, d.h. eine Low-E-Beschichtung auf beiden Seiten der Folie macht sich bemerkbar.

Darüber hinaus hat sich durch die Corona-Pandemie der Preis von Krypton und Xenon bisher um den Faktor 15 verteuert und sind derzeit schwer bis nicht am Weltmarkt verfügbar. Das in diesem Projekt entwickelte Isolierglas mit Xenongasfüllung kostet aufgrund dieser Entwicklung allein durch die Gaspreissteigerung nun 1.500€/qm mehr als zu Projektbeginn. Diese Preisentwicklung macht dieses Glas derzeit schlicht unverkäuflich. In einem alternativen Aufbau mit Kryptongasfüllung liegt der derzeitige Mehrpreis bei derzeit 200€/qm. Das ist in gerade noch am Markt vermittelbaren Rahmen. Da fast das gesamte weltweit erzeugte Kryptongas derzeit für die Halbleiterherstellung verwendet wird und aufgrund der Chipknappheit dafür Rekordpreise bezahlt werden, ist nicht absehbar wohin diese Entwicklung führen wird.

Derzeit erscheint nur ein Glasaufbau mit Kryptonfüllung sinnvoll, wofür drei Glasscheiben mit niedrigster Emissivität verwendet werden müssen, um die fehlenden Heat-Mirror®-Folientypen auszugleichen.

#### **4.2 Ausarbeitung einer neuartigen Technik zur Gasbefüllung für einen hohen Gasfüllgrad und eine niedrige Gasverlustrate bei gleichzeitig geringerem Gasverlust bei Befüllung**

In diesem Paket haben wir Modifizierungen unserer Gasfüllgeräte vorgenommen. Wir haben versucht mit sehr geringer Geschwindigkeit das Edelgas in die Zwischenräume einzufüllen, um eine möglichst niedrige Gasverlustrate zu erreichen. Ein Füllen der Luftzwischenräume ohne jeglichen Gasverlust ist derzeit laut dem Stand der Technik im Bereich der Isolierglasherstellung nicht möglich. Durch diverse Veränderungen der Füll- und Absaugschläuche ist es uns gelungen, eine verlässliche Gasfüllrate von 98% zu erreichen. Allerdings geht diese Füllart zu Lasten des Zeitfaktors und hat mehrere Minuten je Einheit zusätzlich in Anspruch genommen.

#### **4.3 Optimierung des Wärmedurchgangskoeffizienten über die gesamte Lebensdauer des Produktes**

Hochleistungsgläser besitzen heute aufgrund der aufgetragenen Coatings selektive Emissivitäten. Je besser die Emissivität der eingesetzten Glasscheiben, desto besser wird schlussendlich der Ug-Wert einer Isolierglasscheibe. Um die Emissivität im infraroten Spektralbereich zu optimieren, haben wir in Absprache mit unserem Low-E-Lieferanten Modifikationen der bei uns in diesem Projekt zum Einsatz kommenden Glasscheiben vorgenommen. Der technische Ansatz unterliegt allerdings in Abstimmung mit unserem Lieferanten der Geheimhaltung.

#### **4.4 Untersuchung von möglichen chemischen Wechselwirkungen des Xenongases mit dem Verbundkleber (Butyl)**

Zunächst wurden Gespräche mit Butylherstellern geführt, um die Funktionsweise einer Butylschnur besser verstehen zu können und beeinflussbare Produktionsparameter zu identifizieren. Für gewöhnliches Isolierglas werden Butyextruder-Maschinen standardisiert gebaut und die entsprechenden Parameter je Abstandhalter entsprechend fest vorgegeben.

Wir haben hierbei Fachgespräche mit den Herstellern Fenzi S.p.A., Kömmerling Chemische Fabrik GmbH sowie Nedex Kimya San ve Tic A.S. und deren Entwicklungslaboren geführt. Die Helmut Hachtel GmbH ist bei allen drei Unternehmen als Stammkunde gelistet. Alle relevanten Einflussfaktoren für unser Projektziel konnten hierbei erarbeitet, strukturiert und priorisiert werden. Diese Abstimmungen wurden zum großen Teil telefonisch durchgeführt. Zudem besuchten uns Techniker aller drei Unternehmen in regelmäßigen Abständen, sodass hier wertvolle Gespräche geführt werden konnten. Herr Hachtel hat mit technischen Vertretern dieser Unternehmen auf den sog. SANCO®-Lieferantentagen im Februar 2019 in Mainz wichtige Gespräche für

das Projekt führen können und außerdem die Firma Nedex in der Türkei und Fenzi in Italien persönlich besucht und dort projektrelevante Informationen gewinnen können.

Schlussendlich wurden verschiedene Butylschnurgeometrien in der Theorie definiert, welche sich in Breite, Höhe, Gewicht je Laufmeter und Form unterscheiden. Im nächsten Schritt wurden diese Ergebnisse auf praktische Umsetzbarkeit mit den vorhandenen technischen und maschinellen Möglichkeiten geprüft.

Für erste Testreihen wurden kleine Mengen Butylschnur von den verschiedenen Herstellern mit definierten Geometrien auf einer Rolle bezogen. Diese wurden in einer ersten Versuchsreihe auf Praxistauglichkeit geprüft.

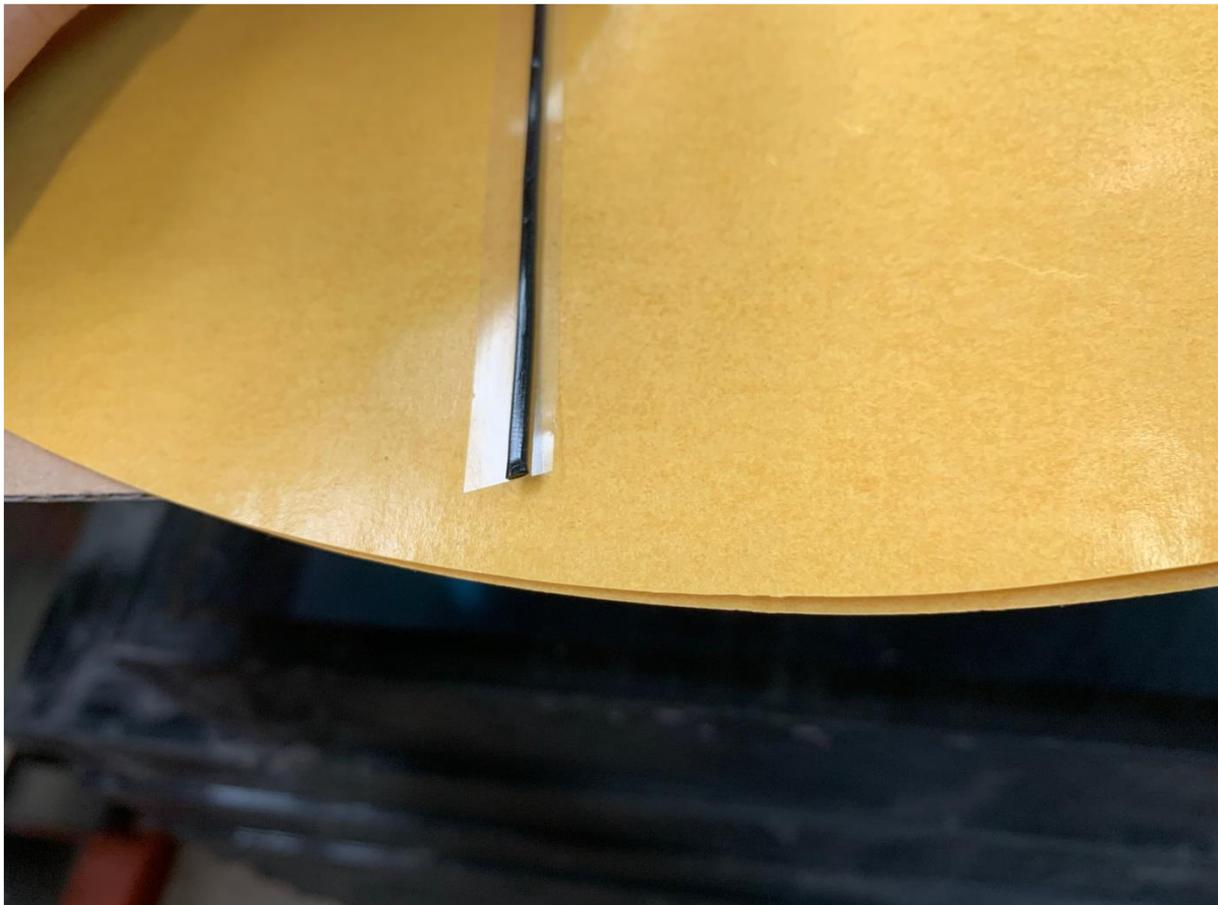


Abbildung 27: Butylschnur

Es wurden an den in unserem Unternehmen vorhandenen zwei Butylextrudern jeweils die Produktionsparameter (Menge/Gramm je Laufmeter, Arbeitsdruck 3-6 bar, Aufbringungstemperatur des Butyls (beeinflusst die Viskosität) sowie Aufbringungsgeschwindigkeit) verändert.

Die Qualität sowie Viskosität, Formstruktur und Geometrie der Butylschnur beeinflussen die Gasdichtigkeit eines Isolierglases. Wir haben hier von unseren Marktpartnern wertvolle Informationen und Vorgaben bekommen, um hier optimale Ergebnisse zu erzielen, die für das teure Xenon-Gas und die Zielsetzung des Projektes unerlässlich sind. Bezüglich der chemischen Wechselwirkungen führten wir Langzeittests durch.

Nur durch die Investition in einen für diese Projektanforderungen hergestellten Butylextruder konnten alle notwendigen Qualitätsmerkmale der Butylschnüre dauerhaft gewährleistet werden.

## **5. Neue Trockenmittel untersucht und mit Silica Gel verglichen, Systeme entwickelt zur Vermeidung von Trockenmittel-Abrieb**

### **5.1 Untersuchung von bekannten und neuartigen Trockenmitteln und Vergleich mit dem aktuellen Standard (Silica Gel) unter dem Parameter der Wasserbindung pro Raumeinheit**

Bei diesem Schritt wurden wir von der Nedex Group unterstützt. Ziel war bei geringerer Staubentwicklung ein höheres Schüttgewicht zu erreichen. Aufgrund dessen, dass bei Heat-Mirror®-Abstandhaltern die Planität der gebogenen Ecken von größter Bedeutung ist, musste der Abstandhalter vor dem Biegen zwingend mit Silica Gel vorgefüllt werden bevor der Biegeprozess beginnt. Dabei war eine gewisse Staubentwicklung im Bereich der Ecken unvermeidlich. Nedex hat in Abstimmung mit uns und den erarbeiteten Projektanforderungen deren Trockenmitteln für uns optimiert. Die Veränderungen unterliegen strenger Geheimhaltung.

### **5.2 Untersuchung der verschiedenen Trockenmittel auf ihre Lebensdauer mittels beschleunigter thermischer Alterung**

Auch hier wurden von der Nedex-Group alle notwendigen vergleichenden Versuche in deren Labor in Dilovasi (Türkei) durchgeführt. Seit dem Sommer 2021 wird uns von Nedex ein für unsere Bedürfnisse optimales Trockenmittel zur Verarbeitung zur Verfügung gestellt.

### **5.4 Untersuchung von Kunststofffüllverfahren zum Schutz vor Abrieb durch Fixierung des Trockenmittels, Spezifizierung des Mischverhältnisses von Trockenmitteln und wasserdurchlässigem Kunststoff**

Hier haben wir unsere auf Edelstahl basierenden Füllgeräte derart umgebaut, dass in einem langsameren Füllverfahren weniger Staub entstehen und der Füllgrad optimiert werden konnte. Es wurden zwei Körnungsgrößen von Trockenmitteln für eine optimale Füllqualität in den Abstandhaltern gemischt.

## 5.5 Evaluierung und Entscheidung der idealen Kombination aus Trockenmittel und System zur Abriebvermeidung

Anhand des bearbeiteten Arbeitspakets 5 wurde sich für die Kombination einer bestimmten Formulierung an Trockenmittel entschieden. Aus dem bisherigen Projektverlauf hat sich u.a. auch ein Anforderungsprofil an eine neue Rahmenbiege- und Füllanlage ergeben, um sowohl die sehr wichtige Ausprägung der gebogenen Ecken als auch die Art und Weise der Befüllung der Abstandhalter mit Trockenmittel ergeben. Wir sind mit der uns bisher zur Verfügung gestandenen maschinellen Ausstattung mitunter an Grenzen gestoßen.

Aus diesem Grund haben wir im Mai 2021 eine neue Rahmenbiege- und Füllanlage bei einem Maschinenbauunternehmen bestellt, die unsere Vorgaben aufgrund der gewonnenen Projekterkenntnisse umsetzen können. Die Anlagen im Wert von €400.000 werden im Februar 2022 geliefert. Dadurch werden wir die benötigte Abstandhalterqualität bzw. Präzision sowie ein für das Produkt optimales Befüllen mit Silica Gel erhalten.

## 5.6 Isolierglasbeständigkeit der Prototypen

Der Auftrag für die Untersuchungen zur Isolierglasbeständigkeit der Prototypen wurde an die Nedex Group vergeben, einem international führenden Hersteller von hochwertigen Kleb- und Dichtstoffen sowie Trockenmittel für die Isolierglasindustrie, die seit langem mit der Helmut Hachtel GmbH zusammenarbeitet. Bei diesen Untersuchungen ging es um die Fragestellung, ob die Prototypen die Anforderungen an Mehrscheiben-Isoliergläser bezüglich ihrer Systemtauglichkeit erfüllen, damit ihre Funktion über eine wirtschaftlich angemessene Nutzungsdauer erhalten bleibt.

### 5.6.1 Feuchtigkeitsaufnahme und Gasdichtigkeit

Das Prüfverfahren basiert auf dem in EN 1279-6 /21/ beschriebenen Langzeitprüfverfahren, nach dem die werkseigene Produktionskontrolle Audit-Prüfungen an Isolierglasscheiben durchführt. Das Verfahren wird in seinem Ablauf folgendermaßen ergänzt, um eine Vergleichbarkeit mit den EN 1279-2 und -3 /22/, /23/ zu ermöglichen:

- Bestimmung der Trockenmittel-Vorbeladung, Messung der Gaskonzentration und Dicke an zwei Proben je Serie im Anlieferungszustand.
- Belastung der Proben in einer Klimakammer bei konstanten Prüfbedingungen (58°C und 95% relative Luftfeuchtigkeit) über einen Zeitraum von jeweils 3, 6 und 12 Wochen.

- Bestimmung der Trockenmittel-Beladung, Messung der Gaskonzentration und Dickenzunahme (Aufweitung) an zwei belasteten Proben je Serie nach dem ersten Beanspruchungszyklus.
- Bestimmung der Gaskonzentration an zwei belasteten Proben, je Serie nach dem zweiten und dritten Beanspruchungszyklus.

Im Rahmen der Projektuntersuchungen wurde von der Helmut Hachtel GmbH der Einfluss der folgenden Parameter bei der Fertigung untersucht:

- Primär- und Sekundärdichtstoff
- Verschlussart der Gasfüllbohrungen
- Aufbringungsart der Dichtstoffe an den kritischen Stellen (z.B. an der Abstandhalterstoßstelle)
- Fertigungs- und Schnittkante der Folie bzw. deren Position in den Prüfscheiben
- Breite des Abstandhalters
- Einstand des Abstandhalters
- Pressdauer bei der Fertigung der Scheiben
- Presskraft bei der Fertigung der Scheiben

Bezüglich der Dickenzunahme zeigten alle Serien keine außergewöhnliche und für Probeaufbauten in diesen Gesamtdicken normale Aufweitung. Eine Überbeanspruchung des Randverbundes konnte daraus nicht abgeleitet werden.

Für die Bewertung der Feuchtigkeitsaufnahme bezieht man sich auf den Faktor Ireq, einen rechnerischen Wert für die Beladung des Trockenmittels nach der Klimalagerung, der kleiner oder gleich 8,5% sein muss. Die Vorgaben wurden bei allen untersuchten Testscheiben deutlich unterschritten. Anhand dieser Ergebnisse wird davon ausgegangen, dass Proben in gleicher Fertigungsqualität Prüfungen nach EN1279-2 bestehen werden.

Für die Bewertung der Gasdichtigkeit der Prototypen sind insbesondere die Ergebnisse nach 6 Wochen Beanspruchung von Bedeutung. Aus Erfahrung der Nedex Group und der Kömmerling Chemische Fabrik GmbH sind nämlich diese Werte in etwa vergleichbar mit den Anforderungen der EN 1279-3. Von den Prototypen wurde als bestes Ergebnis eine Abnahme der Gaskonzentration von 1,2% gegenüber dem zulässigen Wert von maximal 1%. Diese Art von Prüfungen sind aber für 2- und 3-fach-Isolierglasscheiben normiert. 4- oder 5- Kammersysteme sind hier nicht vorgesehen. Die leichte Überschreitung ist dementsprechend unkritisch.

Eine externe Prüfung in einem Prüfinstitut wird im ersten Quartal 2022 zusätzlich durchgeführt werden, nachdem wir im Dezember 2021 nach vielen Monaten eine kleine Menge Xenon-Gas erhalten konnten. Zusätzlich werden wir aufgrund der bereits erläuterten Entwicklungen aufgrund der Pandemie einen auf Krypton-Gas basierenden alternativen Aufbau prüfen lassen.

## **6. Bau eines Prototyps und Demonstratorsystems; Durchführung diverser Tests am Prüfstand**

### **6.1 Herstellung eines Prototypen und Implementierung in ein Demonstrationssystem, zur Simulation von realitätsnahen Umweltverhältnissen an Außenwänden**

Hierfür wurden 3 Glasscheiben in die Bürofassade der Helmut Hachtel GmbH im Juni 2021 integriert - zwei Glasscheiben auf der Westseite der Bürofassade, eine Scheibe auf der Nordseite der Fassade.

Diese Langzeituntersuchung im Gebäude ist nach Herstellung der finalen Prototypen die abschließende Phase des Entwicklungsprojektes. Dabei werden die Prototypen im eingebauten Zustand unter natürlichen Bedingungen auf Leistungsfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit untersucht.



Abbildung 28: Fassade Hachtel 1



Abbildung 29: Fassade Hachtel 2

## **6.2 Untersuchung der realen Wärmedämmung unter extremen Temperaturunterschieden bis zu 40 °C mit Temperaturmessern nahe der jeweils Innen- und Außenscheibe**

Sowohl im vergangenen Sommer als auch in den letzten Herbst- bzw. Wintermonaten haben wir Temperaturmessungen der Innen- und Außenscheiben durchgeführt und damit sowohl die hochwertige Dämmung als auch den hervorragenden Sonnenschutz dieser Verglasung geprüft.

## **6.3 Untersuchung weiterer spezifischer Parameter des Isolierglases mittels Sensoren (Schalldämmwert, Lichttransmissionswert, Lichtreflexion und Gesamtenergiedurchlass)**

Seit August 2021 liefert die Helmut Hachtel GmbH einen Projektauftrag über 4.000qm an ein Bürogebäude nach Oslo. Ein Teil des Auftrags besteht aus dem identischen, wie in diesem Projekt erarbeiteten Glasaufbau. Lediglich das Xenon-Gas musste durch Krypton ersetzt werden, da aufgrund der Corona-Pandemie Xenon nicht verfügbar und auch nicht wirtschaftlich darstellbar war aufgrund der exorbitanten Preissteigerung. Das Gebäude wird teilweise von der „Norwegian innovation agency“ Enova unter dem Namen „New technic in the construction industry“ mitfinanziert. Unser Kunde führt hier Langzeitmessungen und entsprechende langfristige Prüfungen am Gebäude und an unseren Glaselementen durch. Die Ergebnisse hierzu werden wir voraussichtlich im dritten Quartal 2022 nach Bezug des Gebäudes erhalten.

## 7. Erstellen eines Marketingkonzepts

Wir haben das Projekt im Rahmen der „Woche der Umwelt 2021“ im Schloss Bellevue präsentieren dürfen. Aufgrund der Corona-Pandemie fand diese Veranstaltung digital statt. Das war aber schon der Startschuss für das geplante Marketing- und Vermarktungskonzept.

Ab 2022 werden wir das entwickelte Produkt auf Messen bewerben. Leider wurde von der SANCO®-Glasgruppe, eine Lizenzgruppe für Isolierglasbau zu der wir gehören, die Teilnahme an der Messe FENSTERBAU FRONTALE im März 2022 aufgrund der Corona-Pandemie bereits abgesagt. Aufgrund dieser unsicheren Zukunft fokussieren wir uns auf eine Teilnahme an der BAU 2023 in München, der Weltleitmesse für das Bauwesen.

Wir werden das Produkt in der Designer Werkschau München ausstellen, ein für die Öffentlichkeit zugänglicher Showroom, in welchem wir bereits ein Heat-Mirror®-Glas dauerhaft ausstellen dürfen.

Wir planen darüber hinaus für 2022 Fachartikel und Werbeaktivitäten in einschlägigen Fachmagazinen und Newslettern, z.B.

- „GLASWELT“
- „GFF“
- „Glas und Rahmen“
- Heinze/AIS-Newsletter“
- „ARCGUIDE
- + Das Portal für Architekten, Planer und Designer“
- BauNetz.de
- db Bauzeitung
- architektur-online.com
- ait-xia-Newsletter
- Newsletter fensterplatz.de

Das Großprojekt „Oslo GT 5“ mit 4.000qm von uns gelieferter Glasfläche wird in Skandinavien professionell von unserem börsennotierten Partner und Kunden „ChromoGenics“ ab Herbst 2022 beworben.

## 8. Markteinführung

Das entwickelte Produkt ist bei uns bereits erwerbbar und damit für den Markt verfügbar.

Allerdings ist dieses Glas aufgrund der bereits erläuterten negativen Auswirkungen der Corona-Pandemie und den damit verbundenen drastischen Preissteigerungen für Xenon-Gas sowie der reduzierten Verfügbarkeit der geeignetsten Heat-Mirror®-Folien derzeit nicht seriös zu vermarkten.

Das im Punkt 7 genannte aktuelle Großprojekt „Oslo GT 5“ wurde teilweise in exakt dem identischen Projektaufbau bestellt und schon teilweise geliefert. Lediglich das Xenon-Gas musste von unserem Kunden in Krypton-Gas aus den zuvor schon erläuterten Gründen getauscht werden. Alle im Projekt erarbeiteten Innovationen und Materialien sowie technische Verfahren werden bei diesem Auftrag angewandt.

Dieses Bürogebäude in Oslo wird durch unser Glas jährlich ca. 140 Tonnen CO<sub>2</sub> einsparen und 100.000 Kilowattstunden Energie. Die Emission von Treibhausgas wird um 50% reduziert.

Der Umsatz für dieses Projekt liegt für die Helmut Hachtel GmbH bei über 1 Mio. €.

Da die für diese Art von Bauprodukt notwendigen Materialien immer teurer werden und teilweise Lieferketten reißen und Roh- Hilfs- und Betriebsstoffe teilweise nicht mehr verfügbar sind, muss auch die Markteinführung flexibel betrachtet und geplant werden.

Aufgrund der Pandemie und der nicht planbaren näheren Zukunft müssen wir improvisieren, denn Verlässlichkeit war gestern. Abwarten ist aber keine Option für uns, das Vertrauen in alte Handbücher auch nicht. Für die Gestaltung der eigenen wirtschaftlichen Zukunft eines Unternehmens gibt es in der heutigen Zeit kein Handbuch, das einem sagt, was zu tun ist. man muss seine Zukunft aktiv und selbst gestalten

Das von uns in diesem Projekt entwickelte Premium-Isolierglas und die damit verbundene Produktpalette an Hochdämmisoliertgläsern wird aus unserer Sicht aufgrund der Klimaziele unserer Bundesregierung, aber auch der weltweiten Klimaziele in Zukunft eine rege Nachfrage erzielen. Um diese jetzt schon spürbare Nachfrage bedienen zu können, müssen wir unsere Produktion für diesen Bereich entsprechend skalieren.

Aus diesem Grund wird die Helmut Hachtel GmbH umfangreiche maschinelle Investitionen über 1.800.000€ im Jahr 2022 tätigen.

Diese Investition wird im Rahmen des „Invest BW“ Programmes des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg unter dem Namen „*Transformation der Produktion von Heat-Mirror®-Glas*“ mit 10% gefördert.

**Fazit:**

Die energetischen Kennwerte der Prototypen wurden per Software und experimentell bestimmt. Bei einem angestrebten Ug-Wert von 0,1 bewegt man sich im physikalischen machbaren Grenzbereich. Bestimmende Parameter sind die Emissivitäten der verwendeten Glasscheiben und der Heat-Mirror®-Folien. Der angestrebte Ug-Wert kann nur mit einigen wenigen Coatings erreicht werden. Würde von einem potentiellen Kunden eine bestimmte Sonnenschutz-/Wärmeschutzglasscheibe gewünscht oder der Luftzwischenraum kundenseitig verändert werden, so kann ein Ug-Wert von 0,1 nicht erreicht werden.

Folgende Probleme haben sich während des Projektverlaufes ergeben:

Aufgrund der Corona-Pandemie und der damit verbundenen PVB-Knappheit hat Eastman Chemicals sein Heat-Mirror®-Folienportfolio bis auf weiteres deutlich reduziert. Leider sind seit 2021 nur noch drei Heat-Mirror®-Folientypen verfügbar. Alle drei weisen nicht die notwendige Emissivität im Coating auf, um einen Ug-Wert von 0,1 in einem Vierkammersystem zu erreichen.

Durch die Corona-Pandemie sind die Preise für Xenon, aber auch für Krypton bisher um den Faktor 15 gestiegen, fast alle am Markt verfügbaren Kapazitäten werden aufgrund dem weltweitem Halbleitermangel den asiatischen Fertigungsstandorten zugeführt. Für die Isolierglasindustrie gibt es kaum Kapazitäten. Beide Edelgase sind kontingentiert bzw. gar nicht lieferbar. Das entwickelte Ug=0,1 Glas kostet aufgrund dieser Entwicklung derzeit 1.500€/qm mehr als zu Projektbeginn. Das ist am Markt nicht durchsetzbar. So lange derart hohe Xenon-Gaspreise vorherrschen ist dieses Produkt leider nicht zu vermarkten.

Wir haben im Laufe des Jahres 2021 deshalb nach alternativen Glas-/Folienkombinationen gesucht, welche mit Krypton-Gasfüllung ebenfalls einen Ug-Wert von 0,1 erreichen. Dazu sind aber fünf bis sechs Kammern notwendig, das Glas wird dadurch um bis zu 24mm dicker bei gleichem Gewicht. Der Mehrpreis aufgrund des ebenfalls im Preis stark gestiegenen Krypton-Gases beträgt derzeit 200€/qm. Diese Alternative kann wohl gerade noch am Markt aufgrund der herausragenden Eigenschaften vermittelt werden.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass ein Isolierglas mit einem Ug-Wert von 0,1 in einem Mehrkammersystem mit mehreren Heat-Mirror®-Folien hergestellt und getestet werden konnte. Dieser Ug-Wert kann allerdings nur erreicht werden, wenn alle dafür relevanten Produktparameter (Beschichtungen, Luftzwischenräume und Gasfüllung) passen und aufgrund kundenseitiger Vorgaben nicht verändert werden müssen. Der Ug-Wert wird sonst immer mindestens um 0,1 schlechter. Das ist vergleichbar mit dem heutigen Standardisolierglas. Auch hier wird der bestmögliche Ug-Wert von 0,5 mit einer Argon-Gasfüllung nur erreicht, wenn die Abstandhalter jeweils 18mm breit sind. In der Praxis wird das Fenster- und Fassadenbauseitig häufig reduziert, deshalb wird in der Praxis meistens ein Ug-Wert von 0,7 bis 0,8 geliefert. Das von uns entwickelte Hochleistungsglas stellt von Seiten der Wärmedämmung das physikalische Maximum dar, das aufgrund heutiger Materialien machbar ist. Es kann aber nicht als Standardprodukt gesehen werden, da wie dargestellt die Veränderung eines Parameters eine negative Veränderung nach sich zieht. Wir bewegen uns hier im derzeitigen physikalischen Grenzbereich. Gleichwohl haben wir damit eine neue Premiumkategorie geschaffen, die Interesse und Nachfrage generiert.

Wir sehen diese Entwicklung aufgrund der Gesamtdicke der Aufbauten und der geringeren Lichtdurchlässigkeit aufgrund der Vielzahl Coatings gegenüber Standard-Isolierglas nicht als Lösung für gewöhnliche Fenster. Wir sehen einen Markt im Bereich Bürofassaden, Tiny Houses und anspruchsvollen Anbauten.

Im Bereich der Intelligenten Glasfassaden ergeben sich in Kombination mit schaltbaren Gläsern und semitransparenten Photovoltaik-Gläsern interessante vertriebliche Ansätze. Unser Produkt kann hier nur ein Teil eines übergeordneten Gesamtkonzeptes darstellen und Interesse im ambitionierten Architekturbereich auslösen.

Für den wirkungsvollen Einsatz einer „intelligenten“ Glasfassade ist die Entwicklung fortschrittlicher Gesamtenergiekonzepte notwendig, welche die Interaktion zwischen Fassade und Haustechnik ermöglichen. Das führt zu einer zunehmenden Komplexität der Gebäudekonzeption, die nur durch eine integrale und ganzheitliche Planung zwischen Architekt, Fassadenplaner und Fachingenieuren erfolgversprechend realisiert werden kann (Compagno (1996), S. 122).

Deshalb kann ein derartig gegenüber dem Marktstandard besser dämmendes Isolierglas nur bei ganzheitlicher Betrachtung und Planung eines energetisch optimierten Gebäudes sinnvoll eingesetzt werden.

## Quellenverweis:

Achilles, Braun, Seger, Stark, Volz (2003): *Glasklar Produkte und Technologien zum Einsatz von Elax und Architektur*, Deutsche Verlags-Anstalt München

Bullinger, H.J. (Hrsg.) (1986); *Systematische Montageplanung Handbuch für die Praxis*, Carl Hanser Verlag München Wien

Campagno, Andrea (1996); *Intelligente Glasfassaden*; Birkhäuser – Verlag für Architektur, Basel

Glas Trösch GmbH – SANCO Beratung (2014): *SANCO-Glasbuch*, 5. Auflage

SANCO-Intranet: *Glas- und Glasanwendungsdatenbank mit Prüfzeugnissen, Zertifikaten, Software-Tools, Verarbeitungsrichtlinien und Glasbuch*

Tiemeyer, Ernst unter Mitarbeit von Chrobok, Reiner (1996): *OrgTools: AfürO-Softwareführer für die Organisationsarbeit, Band 2: Problemlösungstechniken*, Schäffer-Poeschel

Anhänge:

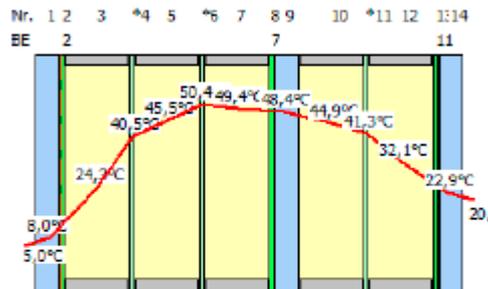
Berechnung SommerGlobal  
3-fach

Projekt: 2021\_12\_20

Position: 01

Schichtaufbau (von außen nach innen)

Nr.	BE	Bezeichnung	mm
1		EUROWHITE NG	4,00
2	2	SILVERSTAR ZERO NG (en=1%)	
3		98% Xenon	10,00
4		Heat Mirror™ 88 Suspended Film	0,08
5		98% Xenon	10,00
6		Heat Mirror™ 88 Suspended Film	0,08
7		98% Xenon	10,00
8	7	SILVERSTAR ZERO NG (en=1%)	
9		EUROWHITE NG	4,00
10		98% Xenon	10,00
11		Heat Mirror™ 88 Suspended Film	0,08
12		98% Xenon	10,00
13	11	SILVERSTAR ZERO NG (en=1%)	
14		EUROWHITE NG	4,00
			62,23



Transmission, Reflexion, Absorption

$\rho_v = 0,26$  (Lichtreflexionsgrad außen)

$T_{UV} = 0,00$  (ultravioletter Transmissionsgrad)

$\rho'_v = 0,29$  (Lichtreflexionsgrad innen)

$T_v = 0,43$  (Lichttransmissionsgrad)

$\rho_e = 0,51$  (direkter Strahlungsreflexionsgrad außen)

$T_e = 0,20$  (direkter Strahlungstransmissionsgrad)

$\rho'_e = 0,52$  (direkter Strahlungsreflexionsgrad innen)

$R_a = 92$  (allgemeiner Farbwiedergabeindex)

$\alpha_e$  1 = 0,08; 3 = 0,09; 5 = 0,05; 7 = 0,03; 9 = 0,03; 11 = 0,02 (direkter Strahlungsabsorptionsgrad)

EN 673 Einbauwinkel = 90° vertikal

$U_g = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$  (Wärmedurchgangskoeffizient)  
Korrigierter Emissionsgrad gemäß EN 12898:2019

EN ISO 52022-3  $T_e = 5,00 \text{ °C}$   $T_i = 20,00 \text{ °C}$

$E_s = 300,00 \text{ W/m}^2$  Systemhöhe = 1,50 m

$g_{th} = 0,051$  (Wärmestrahlungsfaktor)

$h_{c,e} = 18,00 \text{ W/m}^2\text{K}$   $h_{c,i} = 3,60 \text{ W/m}^2\text{K}$

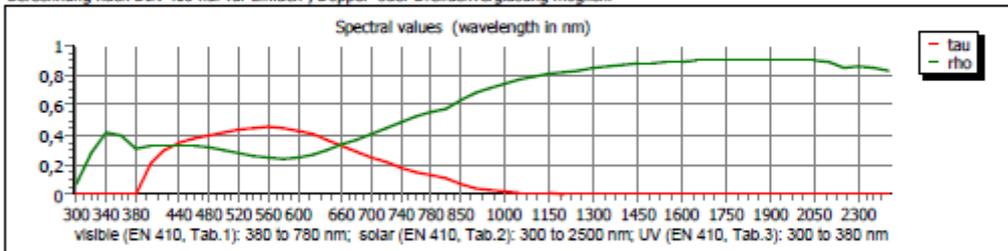
$g_c = 0,038$  (Konvektionsfaktor)

$q_i = 0,088$  (sekundäre Wärmeabgabe nach innen)

$g_v = 0,000$  (Belüftungsfaktor)

$g_{tot} = 0,29$  (Gesamtenergiedurchlassgrad)

Berechnung nach DIN 410 nur für Einfach-, Doppel- oder Dreifachverglasung möglich.



Schwankungen der Licht- und strahlungstechnischen Werte wegen chemischer Zusammensetzung von Glas und Herstellprozesses möglich. Funktionswerte berücksichtigen die zugelassenen Toleranzen entsprechend der Produktnormen. Das Rechenergebnis gibt keine Auskunft über die technische Ausführbarkeit des Aufbaus.

Wir weisen darauf hin, daß die Berechnungen auf Grundlage von Spektraldaten der Hersteller erstellt wurden. Die Firma Sommer Informatik GmbH übernimmt keine Haftung sowohl für die Vollständigkeit als auch für die Richtigkeit der Herstellerdaten. Für die Leistungserklärung sind die zur Verfügung gestellten Herstellerdaten gesondert zu bestätigen.

EN 410, EN 673, EN ISO 52022-3, EN 12898:2019

ift-zertifiziert lt. Validierungsbericht Nr. 410 42167 (Stand 11/2009)

Registriert für: Glas Trösch GmbH - Sanco Beratung - Glas Trösch GmbH - Sanco Beratung  
SommerGlobal 7.3417 Copyright Sommer Informatik GmbH, Rosenheim

ADMIN

20.12.2021 - 10:13:19 | 1 / 1

Abbildung 30: alternativer  $U_g=0,1$ -Aufbau mit drei Glasschreiben und verfügbaren Heat-Mirror® -Folien

28 WIRTSCHAFT REGIONAL / BÖRSE

Donnerstag, 16. Dezember 2021

# Weltrekord-Glas aus Hall für Oslo

**Wärmedämmung** Das Unternehmen Helmut Hachtel GmbH stellt Glaselemente her, mit denen die Emission von Treibhausgas um die Hälfte reduziert werden kann. Auch die Kostenersparnis ist hoch. *Von Jürgen Stegmaier*

Die Folie aus der Raumfahrt-Entwicklung spannt frei zwischen zwei Glasscheiben. Die Hohlräume sind mit dem Edelgas Krypton gefüllt. So fertigt die Firma Hachtel in Hall Fensterelemente. Geliefert werden sie derzeit in die norwegische Hauptstadt. In Oslo entsteht der Bürokomplex GT 5. Weltweit gebe es kein Gebäude, in dem Glasscheiben mit einem vergleichbar hohen Dämmwert verbaut werden. „Wir müssen unsere Nische finden“, macht Patric Hachtel deutlich. Der Eigner und Geschäftsführer der Helmut Hachtel GmbH scheint diese Nische in der Herstellung von Glaselementen gefunden zu haben, die überragende Dämmwerte aufweisen. Es ist eines von drei Geschäftsfeldern des Haller Unternehmens. Neben Isolierglas unterschiedlicher Qualitäten ist Hachtel auf Verbundsicherheitsglas und Einscheibensicherheitsglas spezialisiert.

**Harter Wettbewerb**

Insbesondere im Bereich des Bauens herrschen harter Wettbewerb und hoher Preisdruck. Über die Technologieführerschaft könne man sich davon etwas lösen, gibt Patric Hachtel zu verstehen. Es sei gelungen, das extrem effektive Isolierglas reproduzierbar zur Serienreife zu führen. Das Unter-



Auf dem Bildschirm ist ein Modell des Gebäudes in Oslo zu sehen. Das Glas kommt aus Schwäbisch Hall. Nikola Wessels, Assistentin der Geschäftsleitung, und Patric Hachtel, Eigner und Geschäftsführer, sprechen über das Projekt, das im nächsten Jahr fertiggestellt werden soll. *Foto: Just*

nehmen beschäftigt und 65 Frauen und Männer.

Das elektrochrome Glas, das Hachtel von dem schwedischen Hersteller Chromogenics bezieht, lässt sich elektrisch verdunkeln. Im Sommer spare dies erhebliche Klimatisierungskosten. Die Folie, die zwischen die Gläser gespannt wird, stammt vom US-Hersteller Eastman. Sie wurde für die Raumfahrt entwickelt. Die hauchdünne Membran mit der Bezeichnung Heat Mirror ist durchgängig für sichtbares Licht, stößt aber Wärme zum Ursprungspunkt ab. Glas und Folie werden in Hall in sorgfältigen Arbeitsschritten zu Elementen zusam-

mengefügt, die ausgesprochen hohe Isolierwerte aufweisen. Dazu trägt auch das Edelgas Krypton bei, das beidseits zwischen Glas und Folie gedrückt wird. Krypton zeichnet sich durch eine extrem niedrige Wärmeleitfähigkeit aus.

**140 Tonnen weniger CO<sub>2</sub>**

Das Haller Unternehmen macht deutlich: Bei dem Gebäude in Oslo können die CO<sub>2</sub>-Emissionen jährlich um 140 Tonnen gegenüber Referenzgebäuden gesenkt, 100 000 Kilowattstunden Energieeinsparung erreicht und die Emission von Treibhausgas um 50 Prozent reduziert werden.

Auch die Fenster am New Yorker Empire State Building wurden mit dieser Technologie nachgerüstet. Diese Maßnahme führt dort zu einer Ersparnis von jährlich rund 4,4 Millionen US-Dollar Energiekosten, schreibt Hachtel auf seiner Internetseite.

Wesentlich bei der Fertigung ist die Anbringung der Folie zwischen den beiden Scheiben. Das gefertigte Glaselement kommt in einen Ofen. Dieser ist neun Meter lang und wiegt rund 16 Tonnen. Es ist der weltgrößte seiner Art. Dort wird die Einheit aus Gläsern und Folie auf knapp über 100 Grad erhitzt. Dabei schrumpft die Folie, sie spannt sich. In ei-

nem weiteren Schritt wird das Gas in die Hohlräume gedrückt.

**Xenon-Gas nicht verfügbar**

Der so genannte Wärmedurchgangskoeffizient Ug ist eine wichtige Kennziffer bei der Bemessung von Isolierglas. Er liegt bei einer aktuellen Dreifachverglasung, wie sie bei Neubauten verwendet wird, im Bereich von 0,6. Die Fensterelemente, die Hachtel nach Oslo liefert, weisen Werte um 0,2 auf. Hachtel hat auch schon Isolierglas mit dem Wert 0,1 entwickelt. Dazu ist Xenon-Gas nötig, doch dieses sei auf dem Weltmarkt derzeit nicht verfügbar.

**Präsentation im Schloss Bellevue**

Seine Hochleistungsisoliergläser präsentierte der Haller Betrieb in diesem Jahr auch bei der Woche der Umwelt, zu der Bundespräsident Frank-Walter Steinmeier eingeladen hatte. Sie stand unter dem Motto „So geht Umwelt“. Das im Schloss Bellevue gezeigte Entwicklungsprojekt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt begann 2018, es wird Ende 2021 enden. „Wir haben dafür ein Isolierglas mit einem einzigartigen Ug-Wert von 0,1 entwickelt. Markenstandard ist derzeit 0,5 bis 0,7. Unser Glas verliert also in einem bestimmten Zeitraum nur noch zirkel ein Sechstel an Wärmeenergie aus den Räumen gegenüber dem gewöhnlichen Fenster“, sagt der Haller Unternehmer.

Patric Hachtel und seine Assistentin Nikola Wessels betrachten auf einem großen Bildschirm den Livestream, der den aktuellen Baufortschritt an dem Bürogebäude in Oslo zeigt. Dortin wurden bereits 2000 Quadratmeter Glasscheiben aus Schwäbisch Hall geliefert, weitere 2000 folgen. Bis Februar soll das Gebäude fertig sein. „Es gibt kein vergleichbares Gebäude, es ist weltweit einzigartig“, sagt Patric Hachtel.

Die Skandinavier seien weiter als die Deutschen. Im Norden Europas werde umgesetzt, während hierzulande noch geredet werde, sagt Hachtel.

Knappes Material hemmt viele Industriebereiche, auch die Fertigung beim Haller Glasspezialisten ist davon betroffen. Allein die Preise für die Edelgase Argon und Krypton haben sich um etwa den Faktor 15 verteuert. Auch das Glas an und für sich kostet mehr, die Preise haben sich teilweise verdoppelt. Grund: In diesem Jahr wurden von den Glashütten rund 20 Prozent weniger geliefert. Und schließlich ist Holz knapp. Die empfindlichen Glaselemente werden in Holzrahmen nach Lettland transportiert, dort werden sie mit den Rahmen verklebt. Erst dann werden sie nach Oslo geliefert. *Just*

50

Jahre alt wird die Helmut Hachtel GmbH 2022. Gegründet wurde es 1972 von Patric Hachtels Vater.

TecDAX 3836,47 (+1,29%)	S&P UK 1435,61 (-0,71%)	Euro Stoxx 50 4159,68 (+0,37%)	Nasdaq 15136,917 (-0,66%)	Nikkei 225 28459,72 (+0,10%)
DAX 15476,35 (+0,15%)	Dow Jones 35534,66 (-0,03%)	Umlaufrendite -0,44 (+/-0%)	Rohöl (Brent in €/Barrel) 73,52 (+0,34%)	Euro in Dollar 1,1262 (-0,42%)
<b>Zinsen</b>				
Zinssätze und Renditen				
Basiszinssatz (nach § 247 BGB)				
0,00				
Festgeld bis 5000 € 1 Monat 0,038				
0,01				
Festgeld bis 5000 € 3 Monate 0,04				
0,01				

Abbildung 31: Ausschnitt aus dem Haller Tagblatt, Südwest Presse vom 16. Dezember 2021