

Bohle AG, Haan

**Entwicklung einer kombinierten Reinigungs- bzw.  
Beschichtungstechnologie für Gewächshäuser  
zur Verbesserung der Energieeffizienz**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az. 24505 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Herrn Frank Ruzicka (Bohle AG)  
Dr. Anke Niemann (Innovent e. V.)

Juli 2008

**Bohle AG,  
Siemensstr. 1  
42781 Haan**

**Tel.: 02129 5568 0**

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>24505</b>	Referat	<b>22</b>	Fördersumme	<b>67.113,00 €</b>
----	--------------	---------	-----------	-------------	--------------------

**Antragstitel**                      **Entwicklung einer kombinierten Reinigungs- bzw. Beschichtungstechnologie für Gewächshäuser zur Verbesserung der Energieeffizienz**

**Stichworte**                      Energieeffizienz, Glasbeschichtung, Gewächshäuser, Lichttransmission

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>12 Monate</b>	<b>01/2007</b>	<b>12/2007</b>	<b>1</b>

**Bewilligungsempfänger**   **Bohle AG**

Siemensstr. 1  
42781 Haan

Tel:                      02129 5568 0

Fax:                     02129 5568 281

Projektleitung:  
Frank Ruzicka

Bearbeiter:

**Kooperationspartner**        Innovent e.V., Jena

Prüssingstr. 27B, 07745 Jena

### **Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Die mittel- und langfristigen, umweltrelevanten Ziele des geplanten F&E-Vorhabens waren, eine signifikante Erhöhung der Energieeffizienz, ein erhöhtes Pflanzenwachstum sowie eine Reduzierung der Reinigungszyklen in Gewächshäusern zu erreichen.

Unmittelbares Ziel war es deshalb, ein funktionelles Glas zu entwickeln, das den spezifischen Anforderungen an ein Gewächshausglas besser gerecht wird, als es dem derzeitigen Stand der Technik entspricht. Zu diesen Anforderungen gehören

- eine hohe Lichttransmission des neuen Glases im Bereich von 380-780 nm
- kein oder nur geringes Nachlassen der Lichttransmission über die gesamte Lebensdauer des Gewächshauses durch
  - gute Witterungs- bzw. Korrosionsbeständigkeit des Glases
  - schmutzabweisende Oberfläche, einfache Reinigung oder „Selbstreinigung“ des Glases

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Das Projektziel sollte durch die Applikation von Schichten mit bestimmten Eigenschaften und mittels eines Screenings der verschiedenen Varianten auf der Innen- und Außenseite von Gläser erreicht werden.

Dazu sollten Eigenschaften des beschichteten Glases wie Hydrophilie und Hydrophobie optimal kombiniert werden, um ein möglichst funktionales Glas mit niedrigen Herstellungskosten bei gleichzeitig möglichst hoher Transmission des beschichteten Glases und Langzeitbeständigkeit der Beschichtungen gewährleisten zu können.

Es wurden parallel zwei Hauptforschungswege verfolgt.

Zum einen wurden die unterschiedlichen Beschichtungen und ihre Kombinationen in ihren Eigenschaften wie Transmissionsverbesserung, Langzeitstabilität, Abriebfestigkeit und Chemikalienbeständigkeit auf handelsüblichem Floatglas unter Laborbedingungen untersucht und optimiert.

Zum anderen wurde ein Außenbewitterungsversuch aufgebaut, mit dem zum einen unterschiedliche Glassorten mit zum Teil deutlich verbesserter Transmission ebenso wie unterschiedlich beschichtete Gläser dieser Glassorten betreffs ihres Verhaltens unter Außenbedingungen untersucht wurden.

## ***Ergebnisse und Diskussion***

Das wissenschaftlich-technische Arbeits- und Aufgabenprogramm wurde von den Projektpartnern gemeinsam bearbeitet.

Dabei wurden folgende Ergebnisse erzielt:

1. In dem durchgeführten Forschungsprojekt ist es den Projektpartnern gelungen, die Applikation von transmissionserhöhenden Pyrosil®-Schichten so weit zu optimieren, dass eine Transmissionsverbesserung um 2,8 % pro beschichteter Seite erreichbar ist
2. Es wurden darüber hinaus funktionale Mehrschichtsysteme untersucht, welche entweder hydrophobe oder hydrophile Eigenschaften aufweisen und daher leichter zu reinigen bzw. selbstreinigend sind. Diese Mehrschichtsysteme haben allerdings aufgrund ihrer Komplexität nicht nur positive Eigenschaften, sondern auch Nachteile wie z. B: die verminderte Transmission ganz besonders im UV-Bereich für die TiO<sub>2</sub>-Schichten oder die deutlich höheren Herstellungskosten der untersuchten Mehrschichtsysteme im Vergleich zu den Einschichtsystemen.
3. Das Standard-Hydrophobierungsmittel ClearShield® der Bohle AG wurde in Richtung höherer Temperaturbeständigkeit und höherer Lebensdauer optimiert.
4. Es wurde ein Außenbewitterungs-Versuchsstand aufgebaut, mit dem es möglich ist, die Veränderung der Transmission und damit das Alterungsverhalten unterschiedlicher Gläser und unterschiedlich beschichteter Gläser vergleichend zu untersuchen. Dieser Versuchsstand liefert seit nunmehr gut 11 Monaten sehr interessante und zum Teil überraschende Ergebnisse betreffs der Eigenschaften der untersuchten unterschiedlichen Gläser und Beschichtungen.

## ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

- Vorstellung der Projektergebnisse ist auf entsprechenden Fachtagungen ebenso vorgesehen wie durch Veröffentlichung in fach- und anwendungsspezifischen Zeitschriften. Dazu ist bereits die Anmeldung eines Posterbeitrages mit zugehöriger Veröffentlichung zu den 4. Thüringer Grenz- und Oberflächentagen erfolgt.

## ***Fazit***

1. Die Versuche zur Wirksamkeit von hydrophoben Beschichtungen im Bereich des Gewächshausglases können noch nicht abschließend bewertet werden. Die normalerweise positiv zu erwartende Auswirkung auf den Verschmutzungsgrad und damit auf die Transmission der beschichteten Gläser konnte bisher nicht nachgewiesen werden. Dazu ist eventuell eine längere Untersuchungsdauer notwendig. Daher und auch, um die positiven Ergebnisse, die bisher für die transmissionsverbessernd mit Hilfe der Pyrosil®-Technologie beschichteten Gläser erhalten worden sind, in ihrer Aussagekraft zu festigen, wird der Außenbewitterungs-Versuchsstand in der beschriebenen Form mit den im Rahmen dieses Projektes untersuchten Gläsern weiterbetrieben werden. Darüber hinaus ist eine Erweiterung des Versuchsstandes geplant, in deren Planung die bisherigen Ergebnisse und gewonnenen Erkenntnisse zur Vermeidung von Problemen einfließen werden.
2. Das wichtigste Ergebnis dieses Projektes ist, dass die transmissionserhöhende Pyrosil®-Beschichtungstechnologie gut geeignet erscheint, um die Eigenschaften von Gewächshausgläsern dauerhaft deutlich zu verbessern. So wird die Transmission deutlich und dauerhaft erhöht. Das Verschmutzungsverhalten der hydrophilen Pyrosil®-beschichteten Scheiben ist deutlich positiver als das unbeschichteter Scheiben, da sich nur eine sehr dünne gleichmäßige Verschmutzungsschicht bildet. Durch die erzielbare dauerhaft höhere Transmission durch den Einsatz der Pyrosil®-Beschichtungstechnologie auf Gewächshausgläsern würde sowohl der Energiebedarf eines Gewächshauses verringert als auch das Pflanzenwachstum entsprechend verbessert und damit der Ertrag erhöht.

# Inhaltverzeichnis

<b>1. VERZEICHNIS VON BILDERN, ZEICHNUNGEN, GRAFIKEN UND TABELLEN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>2</b>
<b>3. ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>3</b>
<b>4. EINLEITUNG .....</b>	<b>4</b>
<b>5. HAUPTTEIL .....</b>	<b>7</b>
5.1. DARSTELLUNG DER ARBEITSSCHRITTE, ANGEWANDTEN METHODEN SOWIE DER ERZIELTEN ERGEBNISSE.....	7
5.1.1. <i>Optimierung der transmissionserhöhenden hydrophilen Pyrosil®-Beschichtung an Musterglasscheiben.....</i>	<i>7</i>
5.1.2. <i>Entwicklung von hydrophilen Mehrschichtsystemen.....</i>	<i>10</i>
5.1.3. <i>Entwicklung von hydrophoben Mehrschichtsystemen, Optimierung der hydrophoben Eigenschaften .....</i>	<i>12</i>
5.1.4. <i>Untersuchung der Langzeitstabilität der unterschiedlichen hydrophoben Beschichtungen.....</i>	<i>13</i>
5.1.5. <i>Außenwitterung unterschiedlich beschichteter Scheiben.....</i>	<i>17</i>
5.2. DISKUSSION UND ZUSAMMENFASSUNG DER ERZIELTEN ERGEBNISSE .....	25
5.3. ÖKOLOGISCHE, TECHNOLOGISCHE UND ÖKONOMISCHE BEWERTUNG DER VORHABENSERGEBNISSE .....	26
5.4. VERÖFFENTLICHUNG DER VORHABENSERGEBNISSE.....	27
<b>6. FAZIT .....</b>	<b>27</b>

# 1. Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

<b>ABBILDUNG 1:</b>	UV-VIS-SPEKTREN VON MIT UNTERSCHIEDLICH UNTER PARAMETERVARIATION BESCHICHTETEN FLOATGLASSCHEIBEN (PROBEN A - D) IM VERGLEICH ZU EINER UNBESCHICHTETEN FLOATGLASSCHEIBE (PROBE UNB.) .....	9
<b>ABBILDUNG 2:</b>	AN VERSCHIEDENEN PUNKTEN DER PROBE A GEMESSENE UV-VIS-SPEKTREN ZUM NACHWEIS DER REPRODUZIERBARKEIT ÜBER EINE FLÄCHE VON 50 CM X 50 CM .....	9
<b>ABBILDUNG 3:</b>	UV-VIS-SEKTREN VON MIT UNTERSCHIEDLICHEN TiO <sub>2</sub> -SPUTTERSCHICHTEN VERSEHENEN FLOATGLASSCHEIBEN .....	11
<b>ABBILDUNG 4:</b>	RANDWINKEL VON UNTERSCHIEDLICHEN TiO <sub>2</sub> -SPUTTERSCHICHTEN AUF FLOATGLAS VOR (A) UND NACH TEMPERUNG (B) .....	11
<b>ABBILDUNG 5:</b>	ABBAURATEN VON UNTERSCHIEDLICHEN TiO <sub>2</sub> -SPUTTERSCHICHTEN AUF FLOATGLAS VOR (A) UND NACH TEMPERUNG (B) IM VERGLEICH ZU PILKINGTON ACTIV® .....	12
<b>ABBILDUNG 6:</b>	RANDWINKEL GEGEN WASSER FÜR UNTERSCHIEDLICHE BESCHICHTUNGEN VOR UND NACH BELASTUNG DURCH EINEN TROPEN- UND KLIMATEST.....	14
<b>ABBILDUNG 7:</b>	RANDWINKEL GEGEN WASSER NACH ABRASIONSTEST FÜR UNTERSCHIEDLICHE, AUF DER LUFTSEITE BESCHICHTETE PROBEN.....	15
<b>ABBILDUNG 8:</b>	RANDWINKEL GEGEN WASSER NACH ABRASIONSTEST FÜR UNTERSCHIEDLICHE, AUF DER ZINNBADSEITE BESCHICHTETE PROBEN .....	15
<b>ABBILDUNG 9:</b>	RANDWINKEL GEGEN WASSER FÜR UNTERSCHIEDLICHE BESCHICHTUNGEN NACH LAGERUNG IN VERSCHIEDENEN CHEMIKALIEN (C1-C12) .....	16
<b>ABBILDUNG 10:</b>	FÜR DIE AUßENBEWITTERUNGSVERSUCHE AUFGEBAUTER VERSUCHSSTAND..	17
<b>ABBILDUNG 11:</b>	GEGENÜBERSTELLUNG DER PROZENTUALEN ABWEICHUNGEN DER SUMMENWERTE DER UNTERSCHIEDLICHEN IN DER AUßENBEWITTERUNG UNTERSUCHTEN GLASPLATTEN VON DEM MITTELWERT ALLER SUMMENWERTE .....	19
<b>ABBILDUNG 12:</b>	GEGENÜBERSTELLUNG DER PROZENTUALEN ABWEICHUNGEN DER SUMMENWERTE DER IN DER AUßENBEWITTERUNG UNTERSUCHTEN VERSCHIEDEN BESCHICHTETEN GUARDIAN (GF) UND GUARDIAN POLEN (T1124) FLOATGLÄSER VON DEM MITTELWERT ALLER SUMMENWERTE .....	19
<b>ABBILDUNG 13:</b>	GEGENÜBERSTELLUNG DER PROZENTUALEN ABWEICHUNGEN DER SUMMENWERTE DER IN DER AUßENBEWITTERUNG UNTERSUCHTEN VERSCHIEDEN BESCHICHTETEN LOW IRON EUROPA (T1140) UND CHINA (T1145) FLOATGLÄSER UND GEZOGENEN GLÄSER (SG2) VON DEM MITTELWERT ALLER SUMMENWERTE .....	20
<b>ABBILDUNG 14:</b>	.....GEGENÜBERSTELLUNG DES INTENSITÄTSVERLAUFS VON BESCHICHTETEN GUARDIAN POLEN FLOATGLÄSERN FÜR ZWEI SONNENTAGE IM AUGUST 2007 UND JUNI 2008 .....	22
<b>ABBILDUNG 15:</b>	GEGENÜBERSTELLUNG DES INTENSITÄTSVERLAUFS VON BESCHICHTETEN LOW IRON EUROPA FLOATGLÄSERN FÜR ZWEI SONNENTAGE IM AUGUST 2007 UND JUNI 2008 ..	22
<b>ABBILDUNG 16:</b>	GEGENÜBERSTELLUNG DES INTENSITÄTSVERLAUFS VON BESCHICHTETEN GEZOGENEM GLAS (PITTSBURGH) FÜR ZWEI SONNENTAGE IM AUGUST 2007 UND JUNI 2008 .	23
<b>ABBILDUNG 17:</b>	GEGENÜBERSTELLUNG DES INTENSITÄTSVERLAUFS VON ALLEN PYROSIL®- BESCHICHTETEN GLÄSERN FÜR ZWEI SONNENTAGE IM AUGUST 2007 UND JUNI 2008 .....	23
<b>ABBILDUNG 18:</b>	DARSTELLUNG DER UNTERSCHIEDLICHEN VERSCHMUTZUNG VON UNTERSCHIEDLICH BESCHICHTETEN GUARDIAN FLOATGLÄSERN IM APRIL 2008 .....	24
<b>TABELLE 1:</b>	DURCH PYROSIL®-FLOATGLASBESCHICHTUNG ERZIELTE TRANSMISSIONSERHÖHUNG BEI 550 NM UNTER VARIATION VON PROPANGASMENGE UND VERFAHRGESCHWINDIGKEIT .....	8
<b>TABELLE 2:</b>	SCHICHTDICKE VON UNTERSCHIEDLICH PYROSIL®-BESCHICHTETEN FLOATGLASSCHEIBEN UNTER VARIATION VON PROPANGASMENGE UND VERFAHRGESCHWINDIGKEIT .....	8
<b>TABELLE 3:</b>	GASPARTIALDRÜCKE BEI DER TiO <sub>2</sub> -BESCHICHTUNG MIT HILFE DES SPUTTERPROZESSES .....	10
<b>TABELLE 4:</b>	ANORDNUNG DER UNTERSCHIEDLICHEN GLASSCHEIBEN IN DER AUßENBEWITTERUNGSANLAGE .....	18

## 2. Abkürzungsverzeichnis

C	Chemikalie
CCVD	Combustion Chemical Vapour Deposition
cm	Zentimeter
CS	ClearShield®-beschichtet
DSF	DSF-beschichtet
€	Euro
°	Grad
°C	Grad Celcius
GF	Guardian Floatglas
HP	HeatPerformance-beschichtet
Hz	Hertz
L	Luftseite
mbar	Millibar
nm	Nanometer
o. B.	ohne Belastung
%	Prozent
Pyr.	Pyrosil®-beschichtet
qm	Quadratmeter
RT	Raumtemperatur
SG1	Ornamentglas
SG2	gezogenes Glas (Pittsburgh)
Sn	Zinnbadseite
St.abw.	Standardabweichung
T1124	Guardian Polen Floatglas
T1140	Low Iron Europa Floatglas
T1145	Low Iron China Floatglas
TG1	Tegla Reflo Galerieglas
TG2	Tegla Nonflex
TT	Tropentest
unb.	unbeschichtet
V	Volt
H <sub>2</sub> O	Wasser

### 3. Zusammenfassung

Die mittel- und langfristigen, umweltrelevanten Ziele des geplanten F&E-Vorhabens waren, eine signifikante Erhöhung der Energieeffizienz, ein erhöhtes Pflanzenwachstum sowie eine Reduzierung der Reinigungszyklen in Gewächshäusern durch eine funktionale Beschichtung der eingesetzten Gläser zu erreichen.

Dazu wurden unterschiedliche hydrophile und hydrophobe Ein- und Mehrschichtsysteme entwickelt und untersucht.

Erzielt wurden folgende Ergebnisse:

In dem durchgeführten Forschungsprojekt ist es den Projektpartnern gelungen, die Applikation von transmissionserhöhenden Pyrosil®-Schichten so weit zu optimieren, dass eine Transmissionsverbesserung um 2,8 % pro beschichteter Seite erreichbar ist

Es wurden darüber hinaus funktionale Mehrschichtsysteme untersucht, welche entweder hydrophobe oder hydrophile Eigenschaften aufweisen und daher leichter zu reinigen bzw. selbstreinigend sind.

Das Standard-Hydrophobierungsmittel ClearShield® der Bohle AG wurde in Richtung höherer Temperaturbeständigkeit und höherer Lebensdauer weiterentwickelt.

Es wurde ein Außenwitterungs-Versuchsstand aufgebaut, mit dem es möglich ist, die Veränderung der Transmission und damit das Alterungsverhalten unterschiedlicher Gläser und unterschiedlich beschichteter Gläser vergleichend zu untersuchen.

Das wichtigste Ergebnis dieses Projektes ist, dass die transmissionserhöhende Pyrosil®-Beschichtungstechnologie gut geeignet erscheint, um die Eigenschaften von Gewächshausgläsern dauerhaft deutlich zu verbessern. So wird die Transmission deutlich und dauerhaft erhöht. Das Verschmutzungsverhalten der hydrophilen, Pyrosil®-beschichteten Scheiben ist deutlich positiver als das unbeschichteter Scheiben, da sich nur eine sehr dünne gleichmäßige Verschmutzungsschicht bildet. Durch die erzielbare dauerhaft höhere Transmission durch den Einsatz der Pyrosil®-Beschichtungstechnologie auf Gewächshausgläsern würde sowohl der Energiebedarf eines Gewächshauses verringert als auch das Pflanzenwachstum entsprechend verbessert und damit der Ertrag erhöht.

Betreffs des weiteren Vorgehens im Anschluss an das Projekt erscheint es sinnvoll, sich für zukünftige Untersuchungen weitere Partner direkt aus der Gruppe der Gewächshausglashersteller bzw. Gewächshausbetreiber zu suchen, um die Einsatzfähigkeit der Pyrosil®-Technik auf Floatglas als geeignete Beschichtung für Gewächshausglas noch weiter zu untersuchen und zu testen und die ökologischen und ökonomischen Effekte der Nutzung dieser Technologie quantifizieren zu können.

Das Entwicklungsprojekt wurde in Zusammenarbeit der Bohle AG, Haan und von Innovent e. V. Technologieentwicklung, Jena durchgeführt und von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen 24505 gefördert.

## 4. Einleitung

Viele in Gewächshäusern gezüchtete Pflanzen sind ursprünglich subtropisch, entsprechend hoch ist ihr Wärmebedarf. Aus diesem Grund ist eine möglichst effektive Nutzung der einfallenden Sonnenenergie in diesem Bereich dringend notwendig. Mit Hilfe der Sonnenenergie wird zum einen ca. die Hälfte des gesamten Wärmebedarfs im Gewächshaus gedeckt und zum anderen ist das Sonnenlicht der entscheidende Faktor für die Fotosynthese und damit eine entscheidende Größe für das Pflanzenwachstum.

Im Gartenbau gilt die Faustregel: 1 % mehr Sonnenlicht bedeutet ca. 1 % mehr Produktion.

Ein großes Problem im Bereich der Gewächshausgläser ist, dass die Transmission von Sonnenlicht mit der Zeit infolge von Verschmutzungen – außen vorwiegend Stoff- und Schmutzteilchen, innen Algenbildung aufgrund der Feuchte – und von Glaskorrosion abnimmt.

Verschmutzungen werden derzeit außen durch regelmäßiges Reinigen ca. alle sechs Wochen mit Wasser (bei Großanlagen mit Robotern) und innen ein Mal pro Jahr durch Reinigen mit flusssäurehaltigen Reinigern beseitigt, um die Transparenz der Gläser soweit wie möglich wieder herzustellen. Neben den hohen Kosten und der Umwelt- und Arbeitssicherheitsproblematik der auf Flusssäure basierenden Reinigungsprozesse ist außerdem ein Problem, dass durch die Reinigungsprozesse die Glaskorrosion verstärkt wird.

Auf der Grundlage dieser unterschiedlichen Problematiken wurden als mittel- und langfristige, umweltrelevante Ziele des durchgeführten F&E-Vorhabens eine signifikante Erhöhung der Energieeffizienz, ein erhöhtes Pflanzenwachstum sowie eine Reduzierung der Reinigungszyklen in Gewächshäusern festgelegt.

Dazu war das unmittelbare Ziel, ein funktionelles Glas zu entwickeln, das den spezifischen Anforderungen an ein Gewächshausglas besser gerecht wird, als es dem damaligen Stand der Technik entsprach. Zu diesen Anforderungen gehören eine hohe Lichttransmission des neuen Glases im Bereich von 380-780 nm, kein oder nur geringes Nachlassen der Lichttransmission über die gesamte Lebensdauer des Gewächshauses durch gute Witterungs- bzw. Korrosionsbeständigkeit des Glases, eine schmutzabweisende Oberfläche, einfache Reinigung oder „Selbstreinigung“ des Glases und ungehinderten Kondensatablauf.

Da die Funktionalisierung des Floatglases durch eine Oberflächenbeschichtung erzielt werden sollte, müssen die entsprechenden funktionellen Schichten über die gesamte Lebensdauer des Glases bzw. Gewächshauses haftfest, abriebfest und UV-stabil sein.

Es sollte ein optimiertes Schichtsystem und eine entsprechende Beschichtungstechnologie entwickelt werden. Dazu war die Entwicklung einer hydrophoben Beschichtung inklusive der Weiterentwicklung eines Hydrophobierungsmittels mit dem Ziel der einfachen Reinigung – Selbstreinigung – für die Gewächshausaußenseite geplant. Die Kombination mit Pyrosil® sollte die hydrophobe Wirkung verstärken und eine hohe Haft- und Abriebfestigkeit der Schicht gewährleisten,

Eine hydrophile Beschichtung auf der Grundlage des Pyrosil®-Verfahrens wird für die Gewächshausinnenseite hinsichtlich Kondensatablauf und Verzögerung der Glaskorrosion getrimmt und ggf. mit weiteren funktionellen Schichten (z. B. TiO<sub>2</sub>) zum Abbau von Organischen Substanzen gekoppelt.

Schließlich wurden die in Frage kommenden Schichtsysteme im Hinblick auf eine Verbesserung der Transmission optimiert.

Der allgemeine Entwicklungstrend im Gewächshausbau ging in der Vergangenheit hin zur Verwendung von eisenoxidarmem („extraweißem“) Floatglas, um die UV- und Lichttransmission zu erhöhen und zur Anwendung von Antireflexschichten auf Basis von strukturierten, zum Teil mittels Ätzverfahren hergestellten Gläsern oder von Sol-Gel-Beschichtungen zur Erhöhung der Lichttransmission

Mit diesem Hintergrund steigt der Bedarf an einem funktionellen Glas konstant hoher Transmission, das den unterschiedlichen Belastungen an Außen- und Innenseite eines Gewächshauses standhält sowie an einer innovativen Methode zur Glasveredelung, um kommerzielles Floatglas derart zu funktionalisieren.

Als mittelbare Ergebnisse würden mit dem Einsatz dieses neuen funktionellen Glases Energie gespart, durch den Verzicht oder die Reduzierung von Reinigungsmitteln die Umwelt entlastet sowie die Lebensdauer der Glaspaneele und damit der Gewächshäuser erhöht.

Mit dem weiterzuentwickelnden Schichtsystem auf Grundlage der Pyrosil<sup>®</sup>-Technologie wurde eine Transmissionserhöhung um mindestens 4 % angestrebt, was gemäß der im Gartenbau üblichen Faustregel zu einer Produktionssteigerung im Gewächshaus von ebenfalls ca. 4 % führen sollte.

Um eine dauerhafte Easy-to-Clean Wirkung auf der Gewächshausaußenseite zu erzielen, sollte eine entsprechende hydrophobe Schicht sowohl haft- als auch abriebfest und witterungsstabil sein. Schätzungen zu Folge kann man mit Hilfe eines optimierten Hydrophobierungsmittels und einer Pyrosil<sup>®</sup>-Vorbehandlung die Haltbarkeit bzw. Lebensdauer der hydrophoben Schicht um das Zwei- bis Vierfache verlängern. Mittelfristiges Ziel war es, die Beständigkeit der funktionellen Schicht für die gesamte Lebensdauer des Gewächshauses von durchschnittlich 15 Jahren zu gewährleisten.

Durch die „Easy-to-Clean“ Wirkung der zu entwickelnden Schichten und Schichtsysteme sollten die Reinigungszyklen und der Eintrag von Reinigungsmitteln mindestens deutlich reduziert werden können. Im günstigsten Fall kann auf die üblichen Reinigungsmittel, insbesondere auf flusssäurehaltige Reiniger im Inneren, sogar komplett verzichtet werden, und das bedeutet, dass eine deutlich umweltfreundlichere Variante zum Einsatz kommen könnte.

Betrachtet man die wirtschaftlichen Aspekte einer solchen Neuentwicklung, erkennt man, dass der Einsatz des neuen funktionellen Glases im Gewächshausbau insbesondere für Neubauten interessant ist. Gewächshäuser haben bislang eine durchschnittliche Lebensdauer von 15 Jahren, die vorwiegend durch die Lebensdauer der Glaspaneele bestimmt wird.

Das Pyrosil<sup>®</sup>-Verfahren ist im Gegensatz zum Sol-Gel-Verfahren wesentlich kostengünstiger und zeit- und energiesparend. Eine Pyrosil<sup>®</sup>-Schicht muss nicht getempert werden und kann darüber hinaus einseitig oder beidseitig appliziert werden.

Erreicht werden sollten die genannten Ziele durch die Applikation von Schichten mit bestimmten Eigenschaften und mittels eines Screenings der verschiedenen Varianten auf der Innen- und Außenseite der Gewächshausgläser.

Während Hydrophilie und Hydrophobie gegensätzliche Eigenschaften darstellen, geht eine Erhöhung der Hydrophilie speziell beschichteter Gläser über einen weiten Bereich konform mit einer erhöhten Transmission. Innerhalb des Projektes gilt es deshalb, eine optimale Kombination dieser Eigenschaften im Hinblick auf die oben genannten Projektziele zu erreichen.

Der dazu verfolgte Arbeitsplan enthielt hauptsächlich folgende Punkte:

- Optimierung der transmissionserhöhenden hydrophilen Pyrosil<sup>®</sup>-Beschichtung an Musterglasscheiben
- Entwicklung von hydrophilen Mehrschichtsystemen
- Entwicklung von hydrophoben Mehrschichtsystemen, Optimierung der hydrophoben Eigenschaften
- Untersuchung der Langzeitstabilität der unterschiedlichen hydrophoben Beschichtungen
- Außenbewitterung unterschiedlich beschichteter Scheiben

Gerade der letzte Arbeitspunkt stellte sich dabei im Projektverlauf als sehr aussagekräftig für die Bewertung der unterschiedlichen Schichtsysteme heraus.

## 5. Hauptteil

### 5.1. *Darstellung der Arbeitsschritte, angewandten Methoden sowie der erzielten Ergebnisse*

Das Projektziel sollte durch die Applikation von Schichten mit bestimmten Eigenschaften und mittels eines Screenings der verschiedenen Varianten auf den Gewächshausgläsern erreicht werden.

Dabei war eine wichtige Frage, wie man Eigenschaften des beschichteten Glases wie Hydrophilie und Hydrophobie optimal kombinieren kann, um ein möglichst funktionales Glas mit niedrigen Herstellungskosten bei gleichzeitig möglichst hoher Transmission des beschichteten Glases und Langzeitbeständigkeit der Beschichtungen gewährleisten zu können.

Um zu diesem Ziel zu gelangen, wurden parallel zwei Hauptforschungswege verfolgt.

Zum einen wurden die unterschiedlichen Beschichtungen und ihre Kombinationen in ihren Eigenschaften wie Transmissionsverbesserung, Langzeitstabilität, Abriebfestigkeit und Chemikalienbeständigkeit unter Laborbedingungen untersucht und optimiert. Für diese Untersuchungen wurde hauptsächlich handelsübliches Floatglas verwendet, da man unter Verwendung dieses preiswerten Standardglases die wirtschaftlichen Anforderungen an das Endprodukt am ehesten erreichen kann.

Zum anderen wurde ein Außenbewitterungsversuch aufgebaut, mit dem zum einen unterschiedliche Glassorten mit zum Teil deutlich verbesserter Ausgangstransmission als Standard-Floatglas ebenso wie unterschiedlich beschichtete Gläser dieser Glassorten betreffs ihres Verhaltens unter Außenbedingungen untersucht wurden. Die hierbei interessierende Eigenschaft war die Transmission der unterschiedlichen und unterschiedlich beschichteten Glasscheiben, die indirekt über die Energieaufnahme von Solarzellen vergleichend über einen Zeitraum von 11 Monaten bestimmt wurde und weiterhin bestimmt wird.

#### 5.1.1. **Optimierung der transmissionserhöhenden hydrophilen Pyrosil<sup>®</sup>-Beschichtung an Musterglasscheiben**

Der Effekt, dass das Aufbringen von Pyrosil<sup>®</sup>-Schichten (SiO<sub>x</sub>-Schichten, die mit Hilfe von Combustion Chemical Vapour Deposition [CCVD] abgeschieden werden) auf Glas die Transmission von Licht erhöht, war bereits zum Projektbeginn bekannt.

Die Abhängigkeit der Schichteigenschaften, speziell der Transmissionserhöhung, von den Beflammungsparametern war allerdings noch nicht umfassend erforscht. Deswegen wurde diese im Rahmen dieses Projektes untersucht und optimiert.

Dazu wurden in einem ersten Schritt die unterschiedlichen Beflammungsparameter wie Beflammungsgeschwindigkeit, -abstand, Precursorkonzentration, Gas-, Luftmenge und Anzahl Durchläufe jeweils einzeln optimiert.

Um darüber hinaus zu untersuchen, ob die Parameter stark voneinander abhängig sind, so dass eine Optimierung nur eines Parameters alleine nicht ausreicht, wurden im Anschluss an die Versuchsreihe mit Variation nur eines Parameters Versuche durchgeführt, in denen immer zwei Parameter variiert worden sind.

Entscheidende Messgröße war im Verlauf der gesamten Optimierung die Veränderung des Transmissionsverhaltens der beschichteten Floatglasscheiben, die mit Hilfe der UV-VIS-Spektroskopie untersucht worden ist. Zusätzlich dazu wurde jeweils die Schichtdicke bestimmt.

Mit dieser Vorgehensweise ist es gelungen, eine zufriedenstellende Optimierung der Pyrosil®-Beschichtungsparameter für den Anwendungsfall der Transmissionserhöhung auf Floatglas zu erhalten.

Beispielhaft für die durchgeführten Untersuchungen werden im Folgenden die Ergebnisse für die gleichzeitige Variation zweier Parameter genauer dargestellt. Die variierten Parameter waren hierbei die Propangasmenge und die Verfahrensgeschwindigkeit. Die Variation erfolgte bereits zum Ende der Untersuchungen auf der Grundlage der vorher durchgeführten Optimierungen, das heißt mit bereits optimierten Parametern für Beflammungsabstand, Precursorkonzentration, Luftmenge und Durchlaufanzahl.

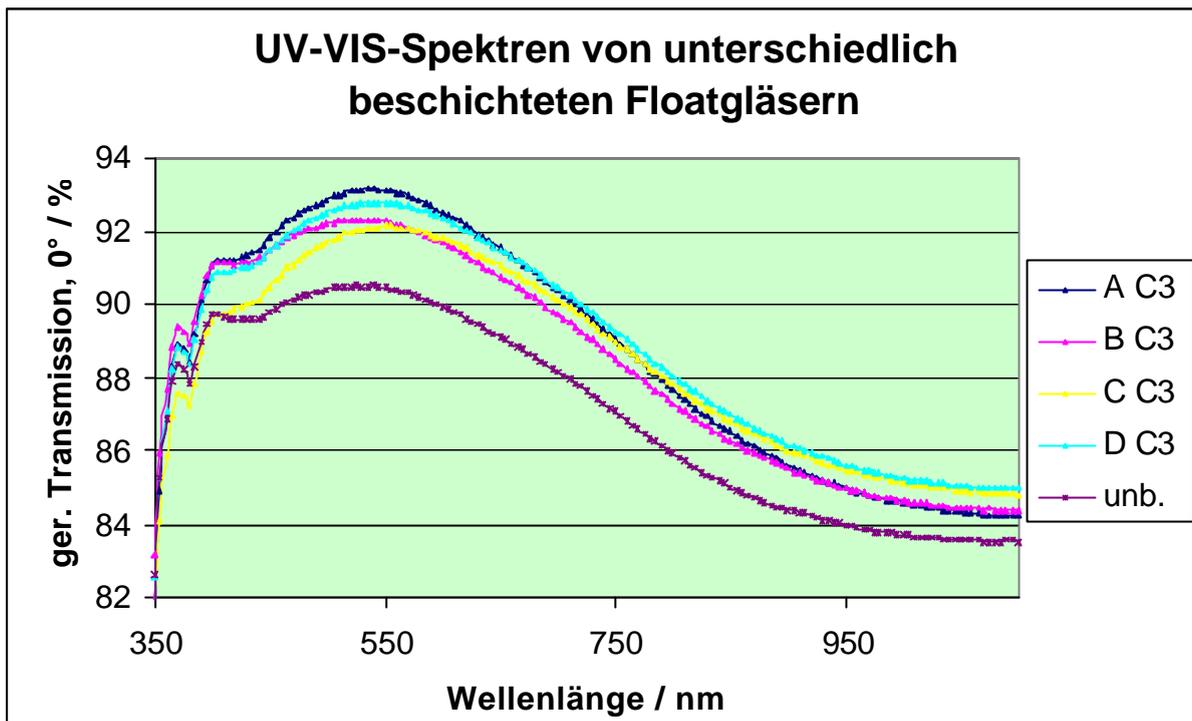
Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Tabelle 1 und 2 sowie Abbildung 1 zusammengefasst.

**Tabelle 1:** Durch Pyrosil®-Floatglasbeschichtung erzielte Transmissionserhöhung bei 550 nm unter Variation von Propangasmenge und Verfahrensgeschwindigkeit

Probe	Propangasmenge	Geschwindigkeit	Transmissionserhöhung (bei 550 nm) / %	St.abw.
A	Niedrig	Niedrig	2,8	0,1
B	Niedrig	Hoch	2,4	0,2
C	Hoch	Niedrig	1,8	0,1
D	Hoch	Hoch	1,8	0,2

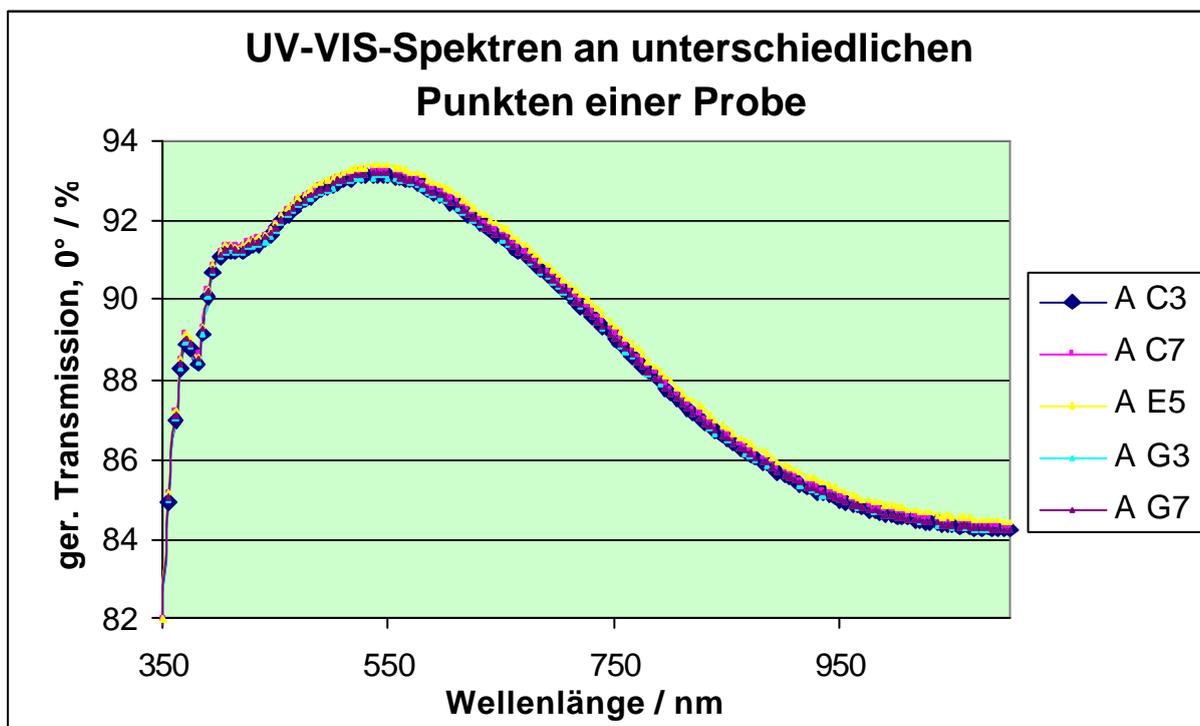
**Tabelle 2:** Schichtdicke von unterschiedlich Pyrosil®-beschichteten Floatglasscheiben unter Variation von Propangasmenge und Verfahrensgeschwindigkeit

Probe	Propangasmenge	Geschwindigkeit	Schichtdicke / nm	St.abw.
A	Niedrig	Niedrig	111	5
B	Niedrig	Hoch	124	6
C	Hoch	Niedrig	125	6
D	Hoch	Hoch	94	5



**Abbildung 1:** UV-VIS-Spektren von mit unterschiedlich unter Parametervariation beschichteten Floatglasscheiben (Proben A - D) im Vergleich zu einer unbeschichteten Floatglasscheibe (Probe unb.)

Man erkennt, dass die Ergebnisse je nach Parameterkombination doch sehr unterschiedlich sind. Die besten Ergebnisse erzielt man bei niedriger Propangasmenge und niedriger Verfahrgeschwindigkeit. Für diese Parameter ist eine einseitige Transmissionserhöhung von 2,8 % bei 550 nm erzielbar.



**Abbildung 2:** An verschiedenen Punkten der Probe A gemessene UV-VIS-Spektren zum Nachweis der Reproduzierbarkeit über eine Fläche von 50 cm x 50 cm

Ein weitere wichtige Voraussetzung, die eine solche Beschichtung erfüllen muss, ist eine hohe Homogenität der erzielten Eigenschaften über eine größere Fläche. Daher wurde nach der generellen Optimierung der Beflammungsparameter für mehrere Scheiben in der Größe 50 cm x 50 cm die Homogenität der Schichteigenschaften, speziell der Transmissionserhöhung, untersucht. Abbildung 2 zeigt die für die Probe A erzielten Ergebnisse dieser Homogenitätsuntersuchung. Man erkennt, dass an allen fünf untersuchten Punkten die UV-VIS-Spektren annähernd den gleichen Verlauf zeigen. Damit konnte nachgewiesen werden, dass es mit Hilfe der Pyrosil®-Technik möglich ist, großflächig eine homogene transmissionserhöhende Beschichtung aufzubringen.

### 5.1.2. Entwicklung von hydrophilen Mehrschichtsystemen

Ein Projektziel war, als Alternative zu den hydrophilen Pyrosil®-Schichten hydrophile Mehrschichtsysteme Pyrosil®/TiO<sub>2</sub> und ihre Einsetzbarkeit und Eigenschaften für und im Gewächshausbau zu untersuchen und vergleichend zu bewerten. Diese Schichten verfügen zusätzlich zur Hydrophilie über eine UV-strahlungsaktivierte Fähigkeit zur Selbstreinigung („easy to clean“-Effekt).

Die Vorteile solcher Schichten sind ihre UV-aktivierbare Hydrophilie sowie die UV-induzierte Selbstreinigung, ein Nachteil ist die durch die zusätzlich TiO<sub>2</sub>-Beschichtung reduzierte Transmission solcher Mehrschichtsysteme im Vergleich zur Pyrosil®-Schicht allein.

Im Rahmen des Projektes wurden unterschiedliche, mit Hilfe von Sol-Gel- und Sputterprozessen applizierte Schichtsysteme untersucht.

Dabei stellte sich heraus, dass die Eigenschaften der unterschiedlich applizierten Schichtsysteme sehr ähnlich sind. So haben die Untersuchungen unabhängig von der Art der Applikation (Sol-Gel- oder Sputterprozess) gezeigt, dass man für das Erreichen einer möglichst hohen photokatalytischen Aktivität nach dem Auftrag der Schichten einen Temperungsschritt benötigt, der genau auf das Schichtsystem abgestimmt sein muss, um eine möglichst leistungsfähige Beschichtung zu erhalten.

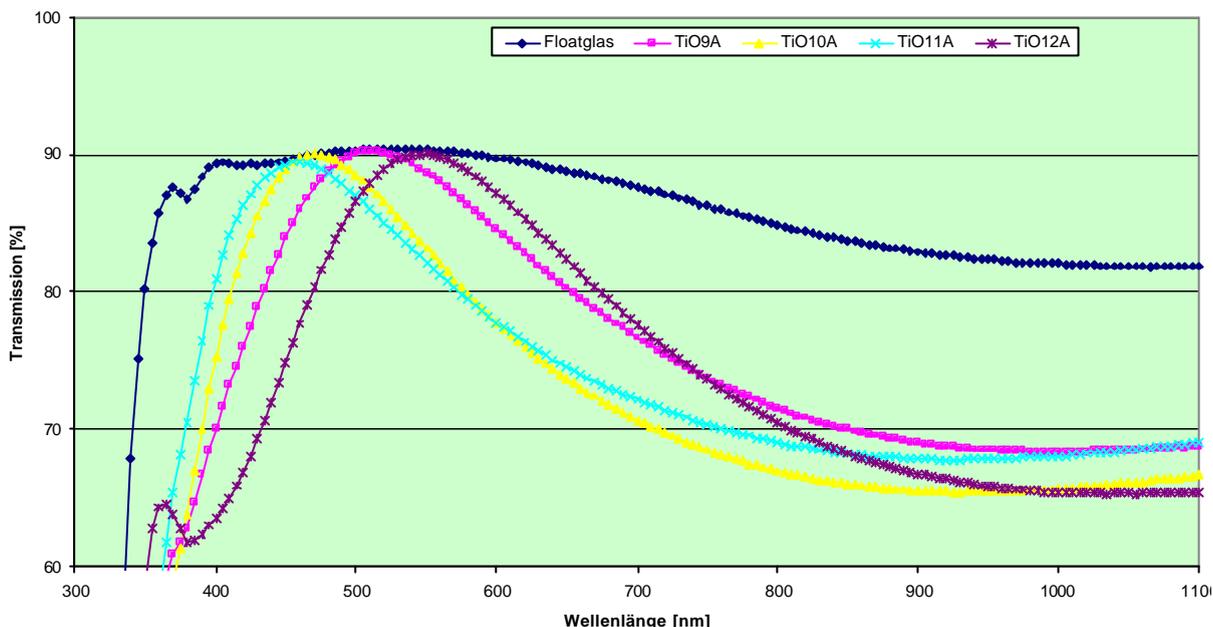
Im Folgenden sind beispielhaft Ergebnisse für mit unterschiedlichen Gasdrücken abgeschiedene TiO<sub>2</sub>-Sputterschichten auf Pyrosil®-Schichten dargestellt, Sputterparameter siehe Tabelle 3. Die Pyrosil®-Schicht war dabei jeweils ca. 30 nm und die TiO<sub>2</sub>-Schichten jeweils ca. 100 nm dick.

**Tabelle 3:** Gaspartialdrücke bei der TiO<sub>2</sub>-Beschichtung mit Hilfe des Sputterprozesses

Probe	Sauerstoffpartialdruck / mbar	Sauerstoffpartialdruck / mbar
TiO9	0,2 x 10 <sup>-2</sup>	2,0 x 10 <sup>-2</sup>
TiO10	0,6 x 10 <sup>-2</sup>	1,5 x 10 <sup>-2</sup>
TiO11	1,0 x 10 <sup>-2</sup>	2,0 x 10 <sup>-2</sup>
TiO12	2,0 x 10 <sup>-2</sup>	1,0 x 10 <sup>-2</sup>

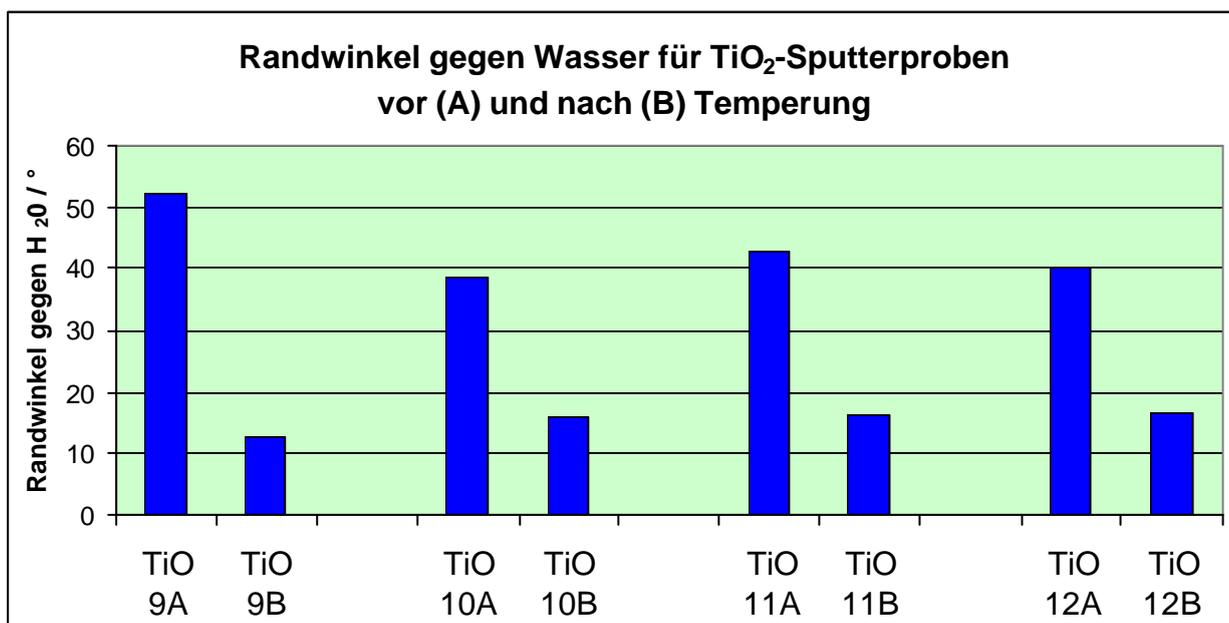
Die deutliche Reduzierung der Transmission besonders in den Bereichen kleiner 500 nm und größer 600 nm durch die TiO<sub>2</sub>-Beschichtung ist sehr gut in Abbildung 3 zu erkennen, in der die UV-VIS-Spektren unterschiedlicher mit TiO<sub>2</sub>Sputterschichten versehener Floatglasscheiben dem Spektrum einer unbeschichteten Scheibe gegenübergestellt sind.

UV-VIS-Spektren von TiO<sub>2</sub>-Sputterschichten auf Floatglas (mit Pyrosil®)

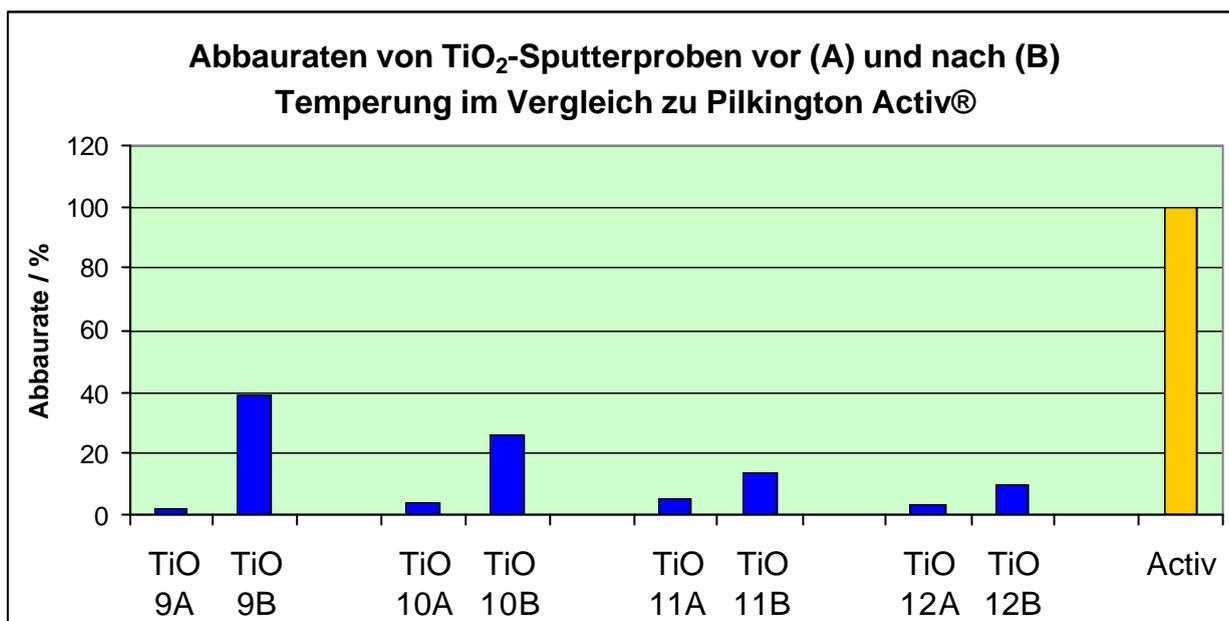


**Abbildung 3:** UV-VIS-Spektren von mit unterschiedlichen TiO<sub>2</sub>-Sputterschichten versehenen Floatglasscheiben

Betrachtet man für unterschiedlichen TiO<sub>2</sub>-Sputterschichten auf Floatglas die mit einem statischen Randwinkelmessgerät OCA 20 der Firma Data Physics bestimmten Randwinkel gegen Wasser, siehe Abbildung 4, und die Abbauraten im Vergleich zu Pilkington Activ<sup>®</sup>, siehe Abbildung 5, erkennt man, dass ein zusätzlicher Temperungsschritt die Hydrophilie aller Proben und die Abbauraten an organischen Substanzen (hier verwendet: Stearinsäure) deutlich erhöht. Allerdings kann auch mit Hilfe eines Temperungsschrittes mit gesputterten TiO<sub>2</sub>-Schichten nicht die Abbauraten des Pilkington Activs erreicht werden, sondern nur maximal 40 % dieser, siehe Abbildung 5.



**Abbildung 4:** Randwinkel von unterschiedlichen TiO<sub>2</sub>-Sputterschichten auf Floatglas vor (A) und nach Temperung (B)



**Abbildung 5:** Abbauraten von unterschiedlichen TiO<sub>2</sub>-Sputterschichten auf Floatglas vor (A) und nach Temperung (B) im Vergleich zu Pilkington Activ®

Die Problematik, dass trotz zusätzlichem Temperungsschritt die untersuchten TiO<sub>2</sub>-Schichten nur eine mittlere Selbstreinigungsaktivität zeigen, lässt zusammen mit der Problematik der deutlichen Transmissionerniedrigung, die durch das Aufbringen von TiO<sub>2</sub>-Schichten hervorgerufen wird, einen Einsatz von Pyrosil®-/TiO<sub>2</sub>-Mehrschichtsystemen im Bereich des Gewächshausglases kritisch erscheinen.

Bei der Bewertung eines Pyrosil®-/TiO<sub>2</sub>-Mehrschichtsystemes muss auch berücksichtigt werden, dass ein weiterer Beschichtungsschritt immer mit erheblichen Kosten und auch mit einem erheblichen Energieaufwand verbunden ist, gerade auch in diesem Falle, in dem man zusätzlich zur eigentlichen Beschichtung einen energieaufwändigen Temperungsschritt benötigt.

### 5.1.3. Entwicklung von hydrophoben Mehrschichtsystemen, Optimierung der hydrophoben Eigenschaften

Die Untersuchung von Mehrschichtsystemen als leistungsfähigere Alternative zum Einschichtsystem Pyrosil®\* umfasste neben möglichen hydrophilen und photokatalytisch wirksamen Mehrschichtsystemen auch hydrophobe Schichtsysteme. Dieser Forschungsschwerpunkt wurde in besonderem Maße von der Bohle AG als Hersteller eines am Markt etablierten Hydrophobierungsmittels für Glas verfolgt.

Ziel dieser Untersuchungen war zum einen, die Leistungsfähigkeit und Einsatzfähigkeit des bereits am Markt etablierten Produktes ClearShield® im Rahmen des Außenwitterungsversuches und durch Langzeitbeständigkeits- und Lebensdauertests vergleichend zu untersuchen und nachzuweisen.

Zum anderen war ein Ziel, dieses Produkt weiterzuentwickeln. Dabei war das Ziel, die Langzeitstabilität zu erhöhen bei gleichbleibendem oder niedrigerem Preis und gleichbleibender oder einfacherer Applikation der hydrophoben Beschichtung.

Aus zurückliegenden Untersuchungen war bereits bekannt, dass die Stabilität, ganz besonders die Abriebfestigkeit, von Hydrophobierungsschichten auf Glas durch die vorherige Beschichtung mit Pyrosil® deutlich verbessert werden kann. Dieser Effekt zusammen mit der großen transmissionsverbessernden Wirkung von angepassten Pyrosil®-Schichten ließ die Anwendung von Pyrosil®-/Hydrophobierungsmittel-Mehrschichtsystemen im Bereich des Gewächshausglases sehr aussichtsreich erscheinen.

Zusätzlich zu dem Standardprodukt ClearShield® der Bohle AG wurde als Vergleich für das weiterentwickelte Hydrophobierungsmittel ein Versuchsprodukt aus dem Hause Innovent mit dem Namen DSF in die Versuchsreihen mit einbezogen, da es sich bei diesem Produkt um ein bekanntermaßen sehr langzeitstabiles Produkt handelt, das allerdings vom Preis um einiges höher liegt und damit für die hier angestrebte Anwendung nicht in Frage kommt.

Im Laufe der Untersuchungen an den unterschiedlichen Mehrschichtsystemen Pyrosil®/Hydrophobierungsmittel auf Glas zeigte sich, dass die Startwerte der Hydrophobie ohne Belastung der Schichten für alle untersuchten Systeme mit Randwinkeln gegen Wasser von 115 ° bis 125 ° sehr ähnlich waren. Daher wurden umfangreiche Belastungstests durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Produkte vergleichend untersuchen zu können, siehe auch den nachfolgenden Punkt 5.1.4.

#### **5.1.4. Untersuchung der Langzeitstabilität der unterschiedlichen hydrophoben Beschichtungen**

Die hauptsächlich untersuchten hydrophoben Mehrschichtsysteme wurden unterschiedlichen Belastungen ausgesetzt. Dazu wurde ein Klimatest, ein Tropentest und ein Chemikaliertest durchgeführt.

Für den Klimatest wurden die Proben in einer Klimakammer 120 Stunden einem regelmäßigen Temperaturwechsel zwischen -18 °C und +56 °C mit jeweils 20 min Haltezeit unterzogen und anschließend 48 Stunden bei +56 °C und 92 % relativer Luftfeuchtigkeit belassen. Dieser Zyklus von 7 Tagen wurde viermal wiederholt.

Für den Tropentest oder Kondenswassertest wurden die Proben in einer geschlossenen Apparatur bei +52 °C und 100 % relativer Luftfeuchtigkeit schräggehend für 30 Tage so gelagert, dass an der zu untersuchenden beschichteten Fläche das Wasser regelmäßig kondensieren und ablaufen konnte.

Beim Chemikaliertest wurden die unterschiedlich beschichteten Proben für 14 Tage bei Raumtemperatur jeweils zur Hälfte in unterschiedliche Chemikalien oder Lösungen gestellt. Bei den Chemikalien und Lösungen handelt es sich um eine Auswahl an wahrscheinlichen Kontaktchemikalien für Gewächshausgläser. So sind neben einigen Reinigungs- und Pflegeprodukten der Bohle AG weitere Reinigungsprodukte ebenso in der Testreihe berücksichtigt worden wie auch Schädlingsbekämpfungsmittel und Laugen.

Zusätzlich zu diesen Belastungen wurde ein Teil der Proben ohne und nach Belastung abrasiv beansprucht. Dazu wurden die Oberflächen in einem Washability Tester der Firma Simex mit einem mit Scheuermilch beaufschlagten Schwamm mit bis zu 10.000 Zyklen mit einem definierten Druck abgefahren.

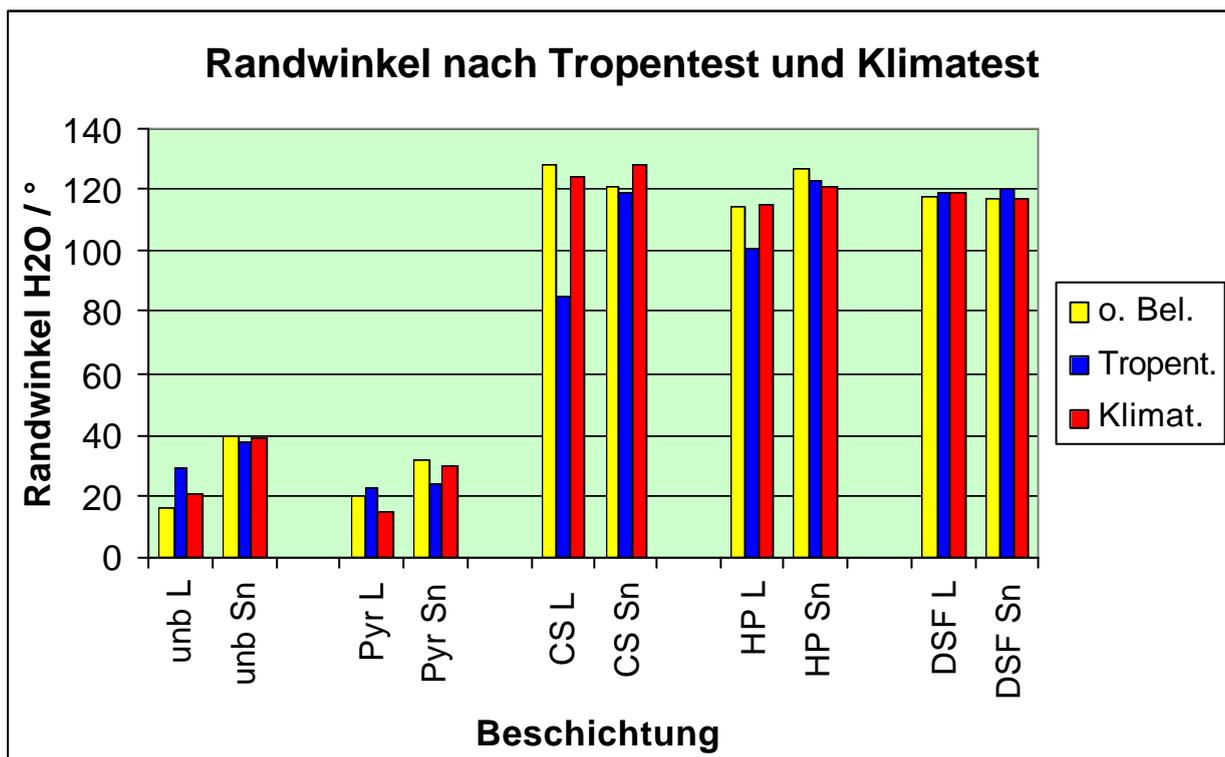
Die im Rahmen der unterschiedlichen Tests untersuchten Proben waren

- unbeschichtetes Floatglas (unb.)
- mit Pyrosil® beschichtetes Floatglas (Pyr.)
- mit Pyrosil® und ClearShield® beschichtetes Floatglas (CS)
- mit Pyrosil® und HeatPerformance beschichtetes Floatglas (HP)
- mit Pyrosil® und DSF beschichtetes Floatglas (DSF)

Untersucht wurde dabei jeweils die Beschichtung auf der Luft- (L) und Zinnbad- (Sn) Seite.

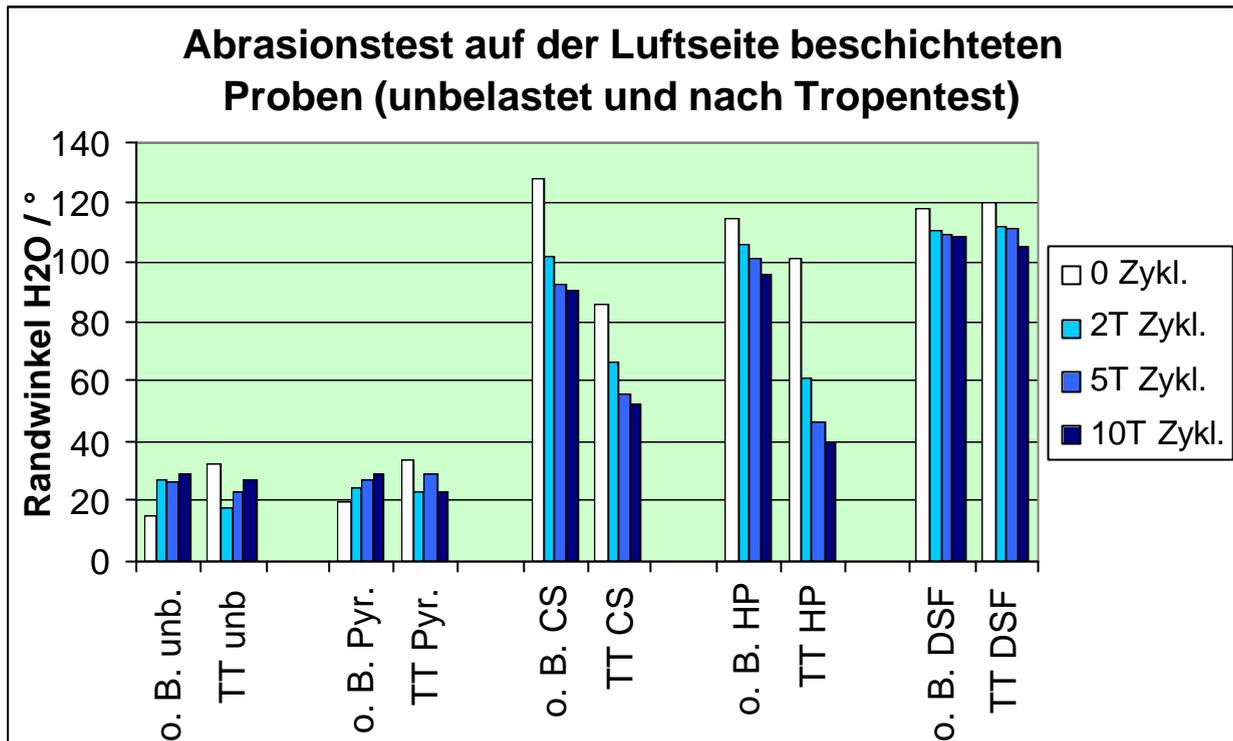
In Abbildung 6 sind die Ergebnisse der Bestimmung der Randwinkel gegen Wasser nach der Belastung der unterschiedlichen Proben im Klima- und Tropentest dargestellt.

Man erkennt, dass der Klimatest, der hauptsächlich einem Temperaturwechseltest entspricht, keine Veränderung der Hydrophobie der Proben hervorgerufen hat. Der durchgeführte Tropen- bzw. Kondenswassertest zeigt dagegen Unterschiede zwischen den verschiedenen Hydrophobierungsmitteln, zumindest für die, die zusammen mit Pyrosil auf der Luftseite der Floatglasscheiben appliziert wurden. Für die mit ClearShield® beschichtete Probe ist nach dem Tropentest der Randwinkel gegen Wasser deutlich niedriger als vorher, für die weiterentwickelte HeatPerformance Probe ist er ein wenig niedriger und bei der DSF Probe verändert sich nichts.

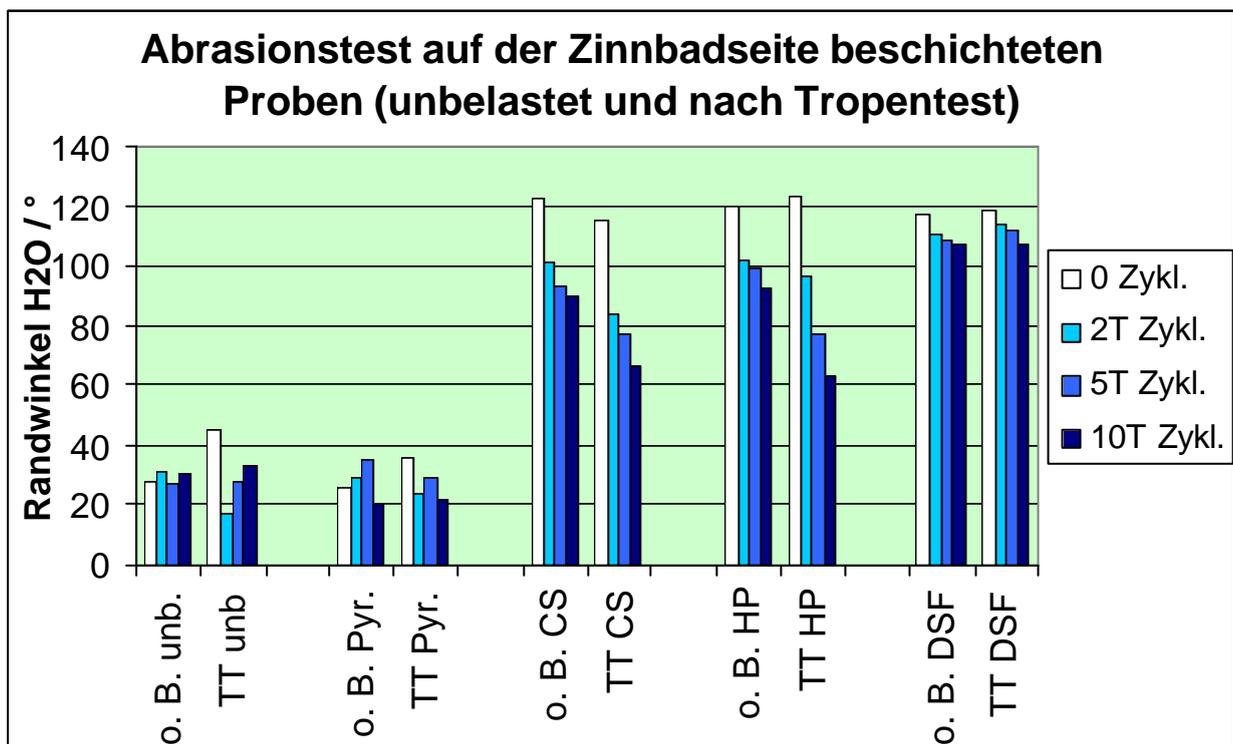


**Abbildung 6:** Randwinkel gegen Wasser für unterschiedliche Beschichtungen vor und nach Belastung durch einen Tropen- und Klimatest

Da der Tropentest deutlichere Auswirkungen auf die Hydrophobie der unterschiedlichen Schichten gezeigt hat als der Klimatest, werden im Folgenden die Ergebnisse der abrasiven Belastungen an den vorab im Tropentest belasteten Proben gezeigt, siehe Abbildung 7 für die auf der Luftseite und Abbildung 8 für die auf der Zinnbadseite beschichteten Proben.



**Abbildung 7:** Randwinkel gegen Wasser nach Abrasionstest für unterschiedliche, auf der Luftseite beschichtete Proben



**Abbildung 8:** Randwinkel gegen Wasser nach Abrasionstest für unterschiedliche, auf der Zinnbadseite beschichtete Proben

Dargestellt sind jeweils die nach 0, 2.000, 5.000 und 10.000 Zyklen gemessenen Randwinkel gegen Wasser.

Man erkennt als Ergebnis des Abrasionstests, dass die hydrophoben Eigenschaften des DSF Versuchsprodukt durch die abrasive Beanspruchung sowohl vor als auch nach dem

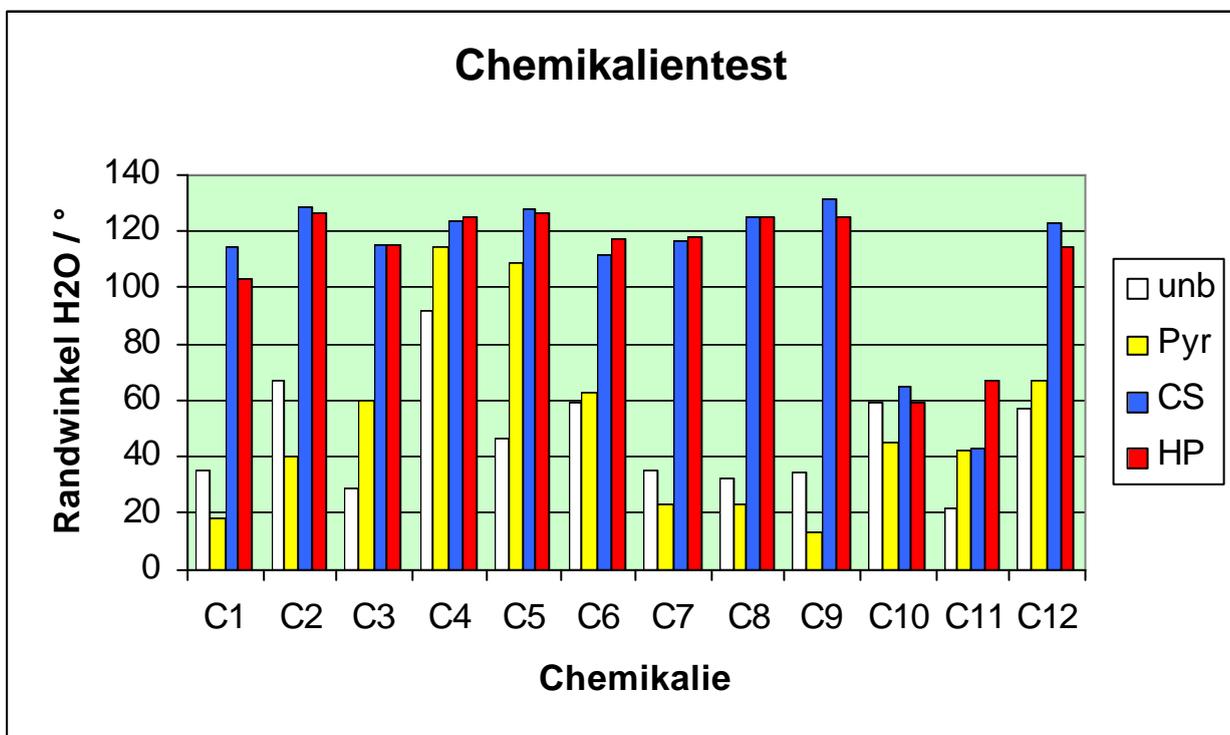
Tropentest kaum verändert werden. Die beiden anderen Hydrophobierungsmittel werden dagegen durch den Abrasionstest deutlich stärker beansprucht. Außerdem kann man beobachten, dass die Stabilität beider Hydrophobierungsmittel durch den Tropentest zusätzlich vermindert wurde.

Der Chemikaliertest soll Auskunft darüber geben, welche Substanzen die Eigenschaften der im Rahmen dieses Projektes teilweise entwickelten und umfassend untersuchten Schichtsysteme negativ beeinflussen können.

Im Folgenden sind die beim Chemikaliertest verwendeten Chemikalien aufgeführt:

- Clean All (C1) - unverdünnt
- Limescale Remover (C2) - unverdünnt
- Ritepolish (C3) - unverdünnt
- Silicone Eater (C4) - unverdünnt
- Conditioner (C5) - unverdünnt
- Pfl. Duschkabinen (C6) - unverdünnt
- Bohle Glasreiniger (C7) - unverdünnt
- Essigreiniger (C8) - unverdünnt
- Pilzfrei Ectivo (C9) - 1,2 Vol.-%
- Spruzit (C10) - 2 Vol.-%
- NaOH-Lösung (C11) - 5 %ig
- Leitungswasser (C12)

Nach 14 Tagen Lagerung bei RT in den Lösungen wurde die Randwinkelbestimmung gegen Wasser im Anschluss an einen Säuberungsschritt mit destilliertem Wasser durchgeführt, Ergebnisse siehe Abbildung 9.



**Abbildung 9:** Randwinkel gegen Wasser für unterschiedliche Beschichtungen nach Lagerung in verschiedenen Chemikalien (C1-C12)

Der Großteil der getesteten Chemikalien verändert die Schichteigenschaften betreffs Hydrophobie bzw. Hydrophilie nur wenig. Sehr stark die Hydrophobie zerstört wird zum einen durch das Schädlingsbekämpfungsmittel Spruzit (C10) und durch die 5%ige Natronlauge (C11). Zusätzlich lässt sich feststellen, dass einige Chemikalien die unbeschichteten und mit Pyrosil® beschichteten Oberflächen stark beeinflussen und sie deutlich hydrophober machen. Dieser Effekt ist besonders für die Bohle Produkte Silicone Eater (C4) und Conditioner (C5) zu beobachten.

### 5.1.5. Außenbewitterung unterschiedlich beschichteter Scheiben

Da man im Labormaßstab nie alle praxisrelevanten Einflussgrößen und Belastungen, die in einem Außeneinsatz, wie hier für Gewächshausgläser geplant, eine Rolle spielen, umfassend nachvollziehen und nachstellen kann, wurde ein Versuchsstand für die Außenbewitterung von unterschiedlich beschichteten Glasscheiben aufgebaut. Ziel der Konstruktion dieses Versuchsstandes ist, die Alterung unterschiedlicher Gläser und unterschiedlicher Beschichtungen unter Praxisbedingungen untersuchen zu können.

Zielgröße war dabei die vergleichende Messung der Transmission.

In dem Versuchsstand wurden 24 Messplätze eingerichtet, die jeweils eine Glasscheibe der Größe 50 cm x 50 cm aufnehmen können, siehe Abbildung 10. Pro Messplatz wurden zwei Solarzellen installiert, über die die hinter den unterschiedlichen Scheiben noch mögliche Energieaufnahme indirekt gemessen wurde. Dazu wurde der entstehende Solarstrom indirekt über die Spannung an eingebauten Widerständen gemessen. Diese Spannung, die direkt proportional zu dem Solarstrom und damit zu der Energieaufnahme der Solarzellen ist, wird mit einer Frequenz von minimal 30 Hz über einen Zeitraum von fünf Minuten gemessen und die Messwerte gemittelt und ausgegeben. Dieses Messregime wurde so gewählt, um zum einen eine sehr genaue Messung durchzuführen (Messwernerfassung mit einer Frequenz von minimal 30 Hz) und trotzdem gleichzeitig die Menge der zu verarbeitenden Messdaten in einem überschaubaren Rahmen zu halten (Ausgabe der gemittelten Werte alle fünf Minuten).



**Abbildung 10:** Für die Außenbewitterungsversuche aufgebauter Versuchsstand

Da die Solarzellen produktionsbedingt Unterschiede in ihrer Effektivität aufweisen, wurde vor Beginn der Messungen mit den beschichteten Gläsern eine Leermessung an einem Sonnentag durchgeführt. Mit den Ergebnissen dieser „Nullmessung“ wurden zunächst alle weiteren Messungen korrigiert. Um einen Einfluss einer eventuellen Alterung der Solarzellen möglichst gering zu halten, wurde diese „Nullmessung“ wiederholt, um auf der Grundlage realistischer und aktueller Werte der Nullmessung die notwendige Korrektur der Messwerte durchführen zu können.

Im Folgenden ist die Belegung der Außenbewitterungsanlage mit den unterschiedlichen Glasscheiben dargestellt, siehe Tabelle 4.

**Tabelle 4:** Anordnung der unterschiedlichen Glasscheiben in der Außenbewitterungsanlage

TG2-I	TG2-II	T1140-I	T1140-II	T1140-III	T1145-I	T1145-II	T1145-III
TG1-I	TG1-II	SG2-I	SG2-II	SG2-III	T1124-I	T1124-II	T1124-III
SG1-I	SG1-II	GF-I	GF-II	GF-III	GF-IV	GF-V	GF-VI

Dabei steht

GF für Guardian Floatglas und  
 I für unbeschichtet; II für Pyrosil<sup>®</sup>-beschichtet; III für Pyrosil<sup>®</sup> - + ClearShield<sup>®</sup> - beschichtet;  
 IV für Pyrosil<sup>®</sup> - + DSF-beschichtet; V für Pyrosil<sup>®</sup> - + TiO<sub>2</sub>-beschichtet und  
 VI für unbeschichtet, diese Scheibe wird regelmäßig gereinigt

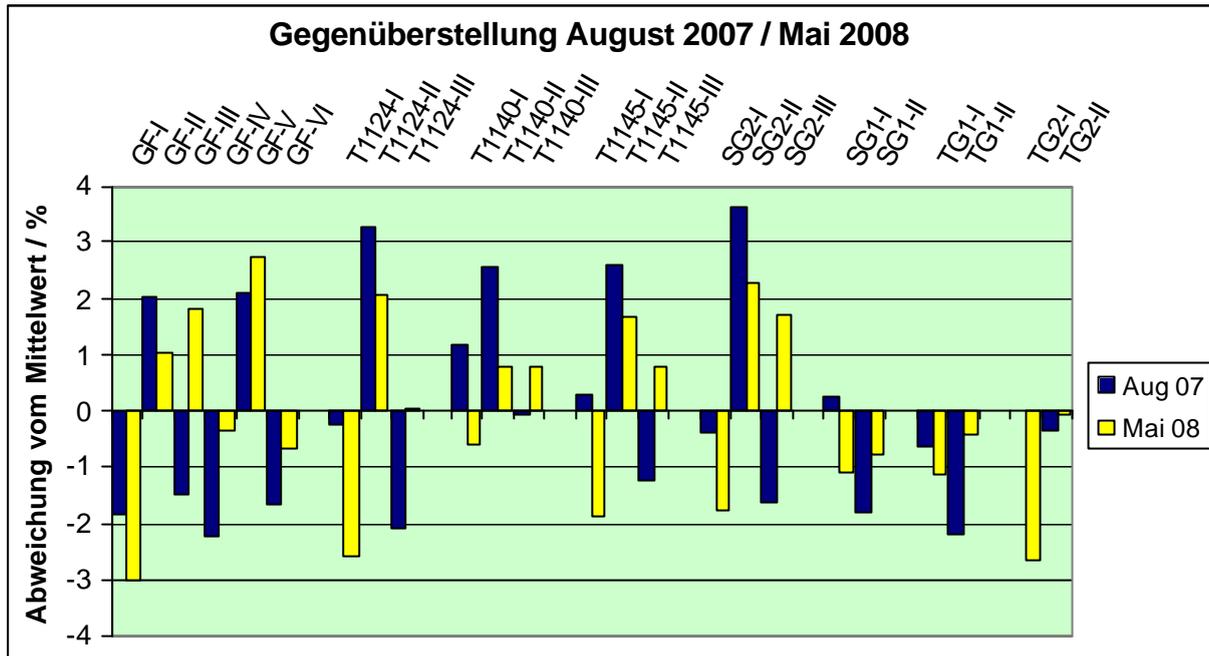
T1124 für Guardian Polen Floatglas LT 90+,  
 T1140 für Low Iron Europa Floatglas LT 91+,  
 T1145 für Low Iron China Floatglas LT 91+ und  
 SG2 für Gezogenes Glas (Pittsburgh) und  
 I für unbeschichtet; II für Pyrosil<sup>®</sup>-beschichtet; III für Pyrosil<sup>®</sup> - + ClearShield<sup>®</sup>-beschichtet

SG1 für Ornamentglas,  
 TG1 für Tegla Reflo Galerieglas und  
 TG2 für Tegla Nonflex und  
 I für unbeschichtet und II für ClearShield<sup>®</sup>-beschichtet

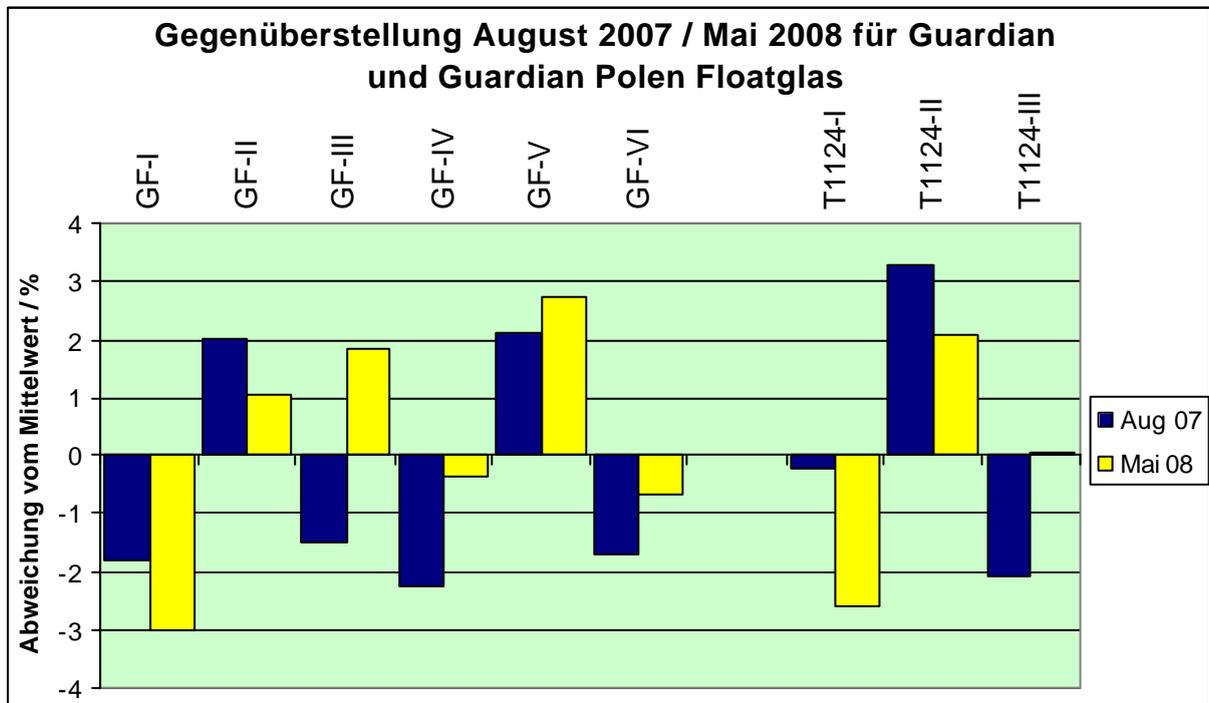
Um die Ergebnisse der Transmissionsuntersuchungen der unterschiedlichen Glassorten und unterschiedlichen Beschichtungen vergleichend darstellen und über den Untersuchungszeitraum von gut 11 Monaten vergleichen zu können, wurden zwei unterschiedlichen Wege der Auswertung der Messergebnisse verfolgt, und zwar zum einen als eine Darstellung von Monatssummen und zum anderen von einzelnen Messtagen.

Für die Darstellung von Monatssummen über die einzelnen Messmonate wurden die Summen der Messwerte für jede Solarzelle gebildet, mit der Nullwertmessung korrigiert und die Abweichung der Summen vom Mittelwert aller Summenwerte prozentual dargestellt, siehe Abbildungen 11-13 für eine Gegenüberstellung der Ergebnisse für den August 2007 (Anfangsmonat der Messungen) und den Mai 2008 (Monat mit vergleichbarer Tageslänge). In Abbildung 11 sind die Ergebnisse für alle im Außenbewitterungs-Versuchsstand untersuchten Gläser dargestellt. Da diese Abbildung allerdings sehr viele Informationen enthält, sind aus Übersichtlichkeitsgründen in Abbildung 12 nur die für das Guardian Floatglas und das Guardian Polen Floatglas und in Abbildung 13 die für die Low Iron

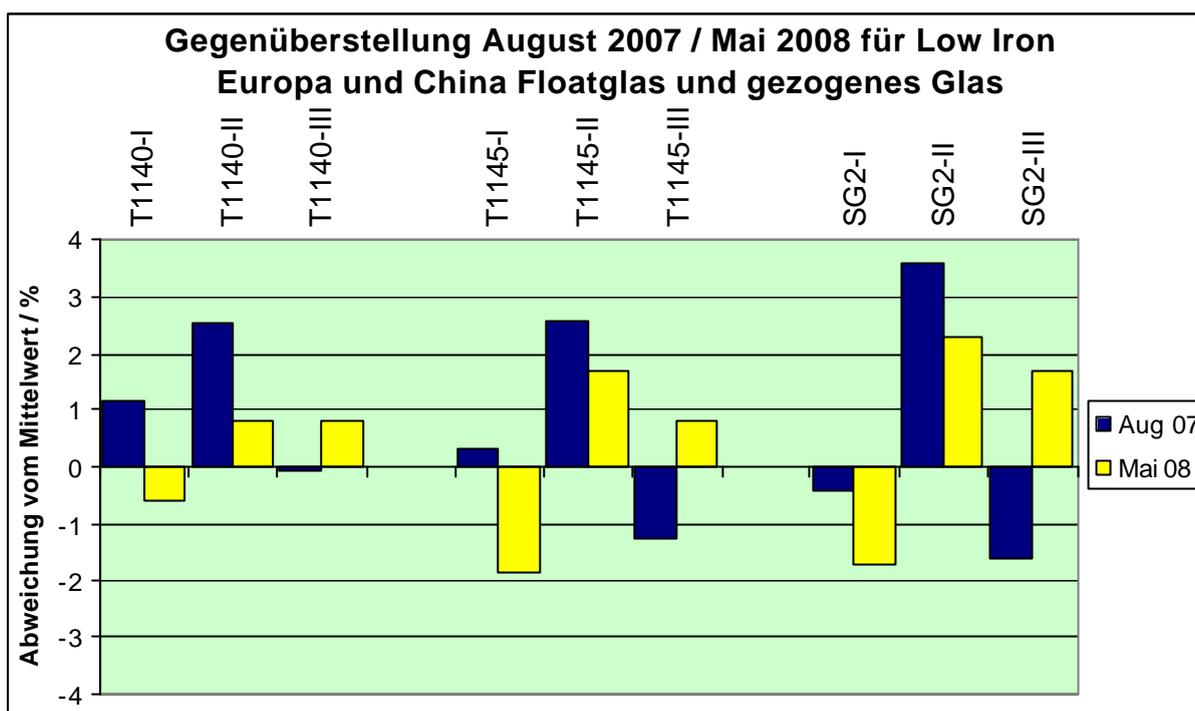
Floatgläser aus Europa und China sowie das gezogene Glas gemessenen Abweichungen noch mal einzeln dargestellt.



**Abbildung 11:** Gegenüberstellung der prozentualen Abweichungen der Summenwerte der unterschiedlichen in der Außenbewitterung untersuchten Glasplatten von dem Mittelwert aller Summenwerte



**Abbildung 12:** Gegenüberstellung der prozentualen Abweichungen der Summenwerte der in der Außenbewitterung untersuchten verschieden beschichteten Guardian (GF) und Guardian Polen (T1124) Floatgläser von dem Mittelwert aller Summenwerte



**Abbildung 13:** Gegenüberstellung der prozentualen Abweichungen der Summenwerte der in der Außenbewitterung untersuchten verschieden beschichteten Low Iron Europa (T1140) und China (T1145) Floatgläser und gezogenen Gläser (SG2) von dem Mittelwert aller Summenwerte

Betrachtet man in den Abbildungen 11-13 zuerst die prozentuale Abweichung der Summenwerte für den ersten Messmonat, den August 2007 (blaue Balken), für die unbeschichteten Ausgangsgläser (jeweils Bezeichnung I), erkennt man, dass ein Großteil davon sehr ähnlich viel Licht durchlässt, sie liegen alle nah am Mittelwert der Transmission. Einzige Ausnahmen sind das Low Iron Europa Floatglas, das auch unbeschichtet schon um gut 1 % über dem Schnitt liegt, siehe Abbildung 13, und das Guardian Floatglas, das unbeschichtet knapp 2 % unter dem Schnitt liegt, siehe Abbildung 12.

Schaut man sich in den Abbildungen 12 und 13 für den ersten Messmonat die ausschließlich Pyrosil<sup>®</sup>-beschichteten Gläser (in diesen Abbildungen alle Gläser mit Bezeichnung II), und das mit Pyrosil<sup>®</sup>- und TiO<sub>2</sub>-beschichtete Glas (GF-V) an, erkennt man, dass die Pyrosil<sup>®</sup>-Beschichtung bei allen Floatgläsern und dem gezogenen Glas zu einer Transmissionserhöhung geführt hat. Diese fällt allerdings in ihrer Größe recht unterschiedlich aus, für das Guardian Floatglas, das Guardian Polen Floatglas und das gezogene Glas liegt sie bei jeweils knapp 4 %, für die Low Iron Floatgläser liegt sie mit Erhöhungen zwischen gut 1 und 2 % allerdings deutlich darunter. Dadurch ergibt sich dann das Bild, dass das Pyrosil<sup>®</sup>-beschichtete Guardian Polen Floatglas und das Pyrosil<sup>®</sup>-beschichtete gezogene Glas die besten Startwerte aufgewiesen haben.

Betrachtet man in den Abbildungen 12-13 nun die prozentuale Abweichungen neun Monate später für den Mai 2008 (gelbe Balken), erkennt man, dass ein Großteil der unbeschichteten Gläser (hier jetzt allerdings mit einer Abweichung von ca. -2 % vom Mittelwert) immer noch untereinander vergleichbar sind, deutlich nach oben weicht wiederum das unbeschichtete Low Iron Europa Floatglas mit ca. -0,5 % und deutlich nach unten das Guardian Float mit -3 % ab.

Die Pyrosil<sup>®</sup>-beschichteten Gläser verhalten sich auch im Juni 2008 im Vergleich zu den unbeschichteten immer noch wie im Mai 2007 mit normalerweise ca. 4 % Transmissionsverbesserung und mit deutlich weniger für die beiden Low Iron Floatgläser.

Sehr auffällig ist allerdings darüber hinaus, dass die Kombination Pyrosil<sup>®</sup>- und TiO<sub>2</sub>-Beschichtung auf Guardian Floatglas (GF-V) deutlich besser geworden ist. Für dieses Glas wurde im Mai 2008 insgesamt die höchste Transmission gemessen, sie liegt 5,5 % über der des unbeschichteten Guardian Floatglases (GF-I). Dieser positive Effekt ist wahrscheinlich auf die zusätzlich zur reinen Hydrophilie vorhandene „Selbstreinigungsfähigkeit“ von TiO<sub>2</sub>-Schichten zurückzuführen.

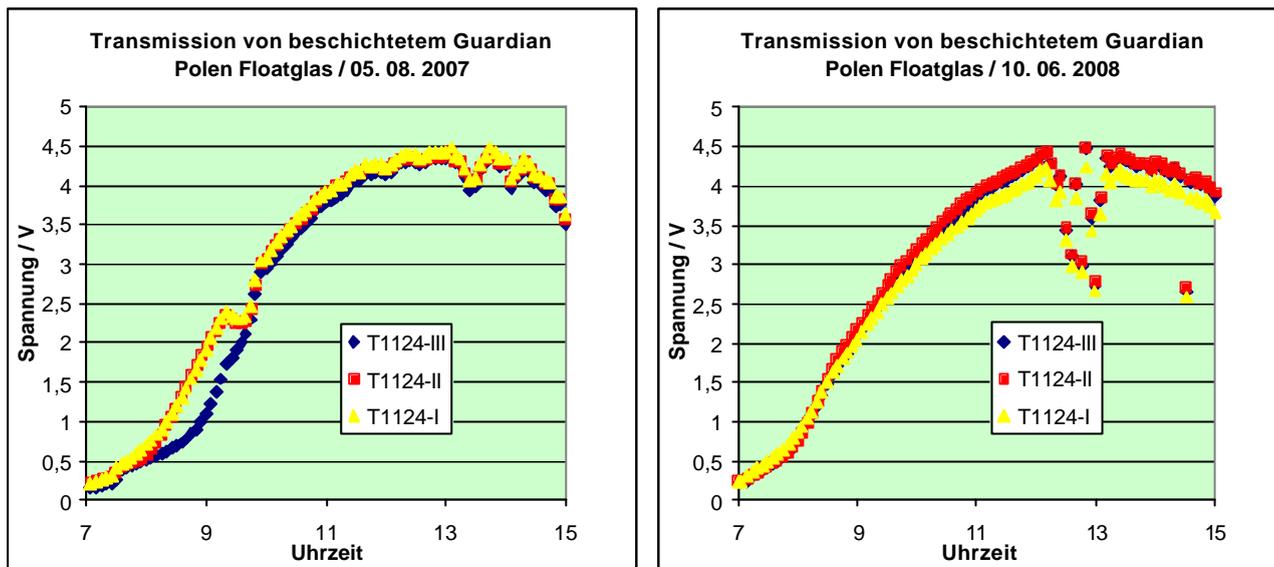
Für die Pyrosil<sup>®</sup>- und ClearShield<sup>®</sup>-beschichteten Gläser (überwiegend Bezeichnung III und teilweise II für SG1, TG1 und TG2) und das Pyrosil<sup>®</sup>- und DSF-beschichtete Glas (GF-IV) dagegen haben die ersten Monate der Langzeitmessung ein sehr überraschendes Verhalten gezeigt, da für diese eine deutlich geringere Transmission als für alle anderen Scheiben, selbst als für die unbeschichteten Scheiben, gemessen wurde. Eigentlich war eine Transmission, die nur etwa 1 % unter der der nur mit Pyrosil<sup>®</sup>-beschichteten Gläser liegen würde, aufgrund von UV-VIS-Messungen an entsprechend beschichteten Gläsern erwartet worden.

Wie eigentlich zu Beginn der Messungen erwartet, verhalten sich die Pyrosil<sup>®</sup>- und ClearShield<sup>®</sup>-beschichteten Gläser dann im Mai 2008. Hier liegen die Transmissionswerte nur wenig unter denen der ausschließlich Pyrosil<sup>®</sup>- beschichteten Gläser, siehe Abbildungen 12 und 13.

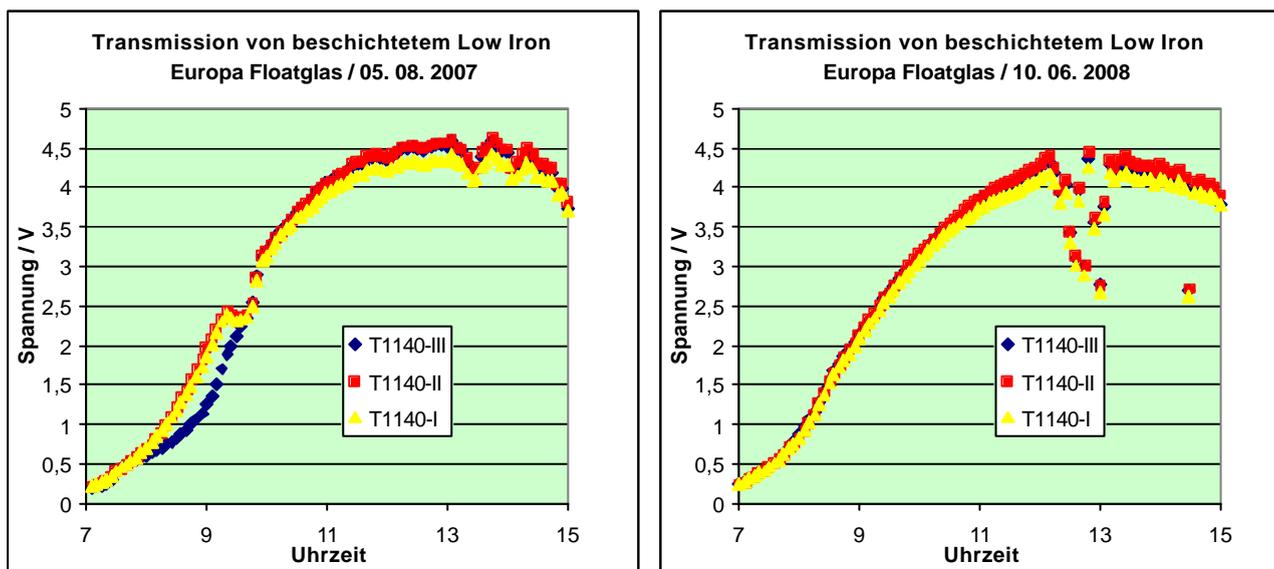
Um diesen Effekt zu verstehen, muss man sich einzelnen Messtage, und zwar am Besten Sonnentage, anschauen.

Dazu wurden Messungen für die unterschiedlichen Gläser und Beschichtungen für einzelne Tage gegenübergestellt. Besonders aussagekräftig sind bei dieser Art der Gegenüberstellung Tage mit möglichst viel Sonnenschein, daher sind die Intensitätsverläufe für die unterschiedlich beschichteten Gläser für einige Glassorten beispielhaft in den Abbildungen 14-16 und in Abbildung 17 für alle Pyrosil<sup>®</sup>-beschichteten, unterschiedlichen Glassorten vergleichend für zwei Sonnentage dargestellt. Ausgewählte Sonnentage sind hierbei ein Sonnentag zu Beginn der Messreihe, der 05.08.2007, und ein Sonnentag gut zehn Monate später, der 10.06.2008.

Betrachtet man die Abbildungen 14-16 speziell für die Zeit zwischen 8 und 10 Uhr, erkennt man einen deutlichen Unterschied zwischen den beiden Sonnentagen für die Pyrosil<sup>®</sup>- und ClearShield<sup>®</sup>-beschichteten Proben. Und zwar führte die Hydrophobie der Glasscheiben zu Beginn der Außenbewitterungsmessung zu einem überraschenden Effekt in den Morgenstunden aufgrund der Betauung. Die Betauung führt für die hydrophob beschichteten Scheiben (dies betrifft auch die DSF-beschichtete) zu einer Verminderung der Transmission, die sich in der Summe ziemlich negativ auswirkt, siehe auch die Abbildungen 11-13. Erstaunlicherweise ist dieser Effekt allerdings nach dem Winter nicht mehr aufgetreten, siehe auch in den Abbildungen 14-16 den Intensitätsverlauf für den 10.06.2008 und die Auswirkungen auf die Summenabweichung in den Abbildungen 11-13.

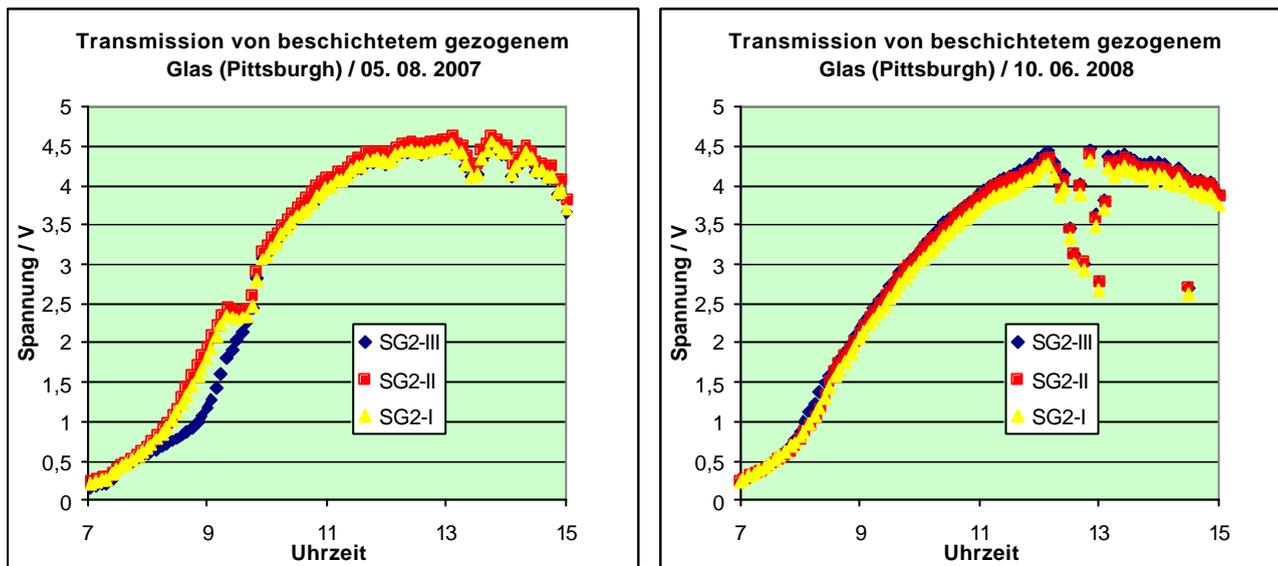


**Abbildung 14:** Gegenüberstellung des Intensitätsverlaufs von beschichteten Guardian Polen Floatgläsern für zwei Sonnentage im August 2007 und Juni 2008



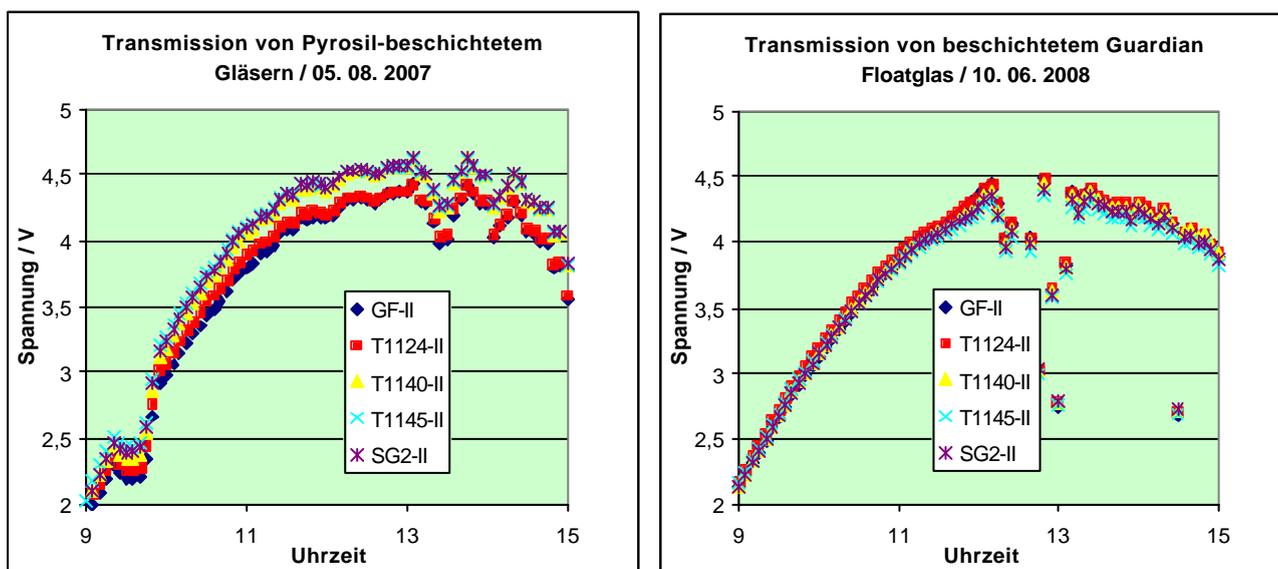
**Abbildung 15:** Gegenüberstellung des Intensitätsverlaufs von beschichteten Low Iron Europa Floatgläsern für zwei Sonnentage im August 2007 und Juni 2008

Insgesamt bleibt daher betreffs der Bewertung der Eignung einer hydrophoben Beschichtung für Gewächshausgläser der weitere Verlauf der Messungen anzuwarten. Da der negative Betaungseffekt inzwischen keine Rolle mehr spielt, bleibt weiter zu untersuchen, ob eventuell trotzdem positive Reinigungseffekte durch die Hydrophobierung auf Dauer feststellbar sein werden.



**Abbildung 16:** Gegenüberstellung des Intensitätsverlaufs von beschichteten gezogenem Glas (Pittsburgh) für zwei Sonnentage im August 2007 und Juni 2008

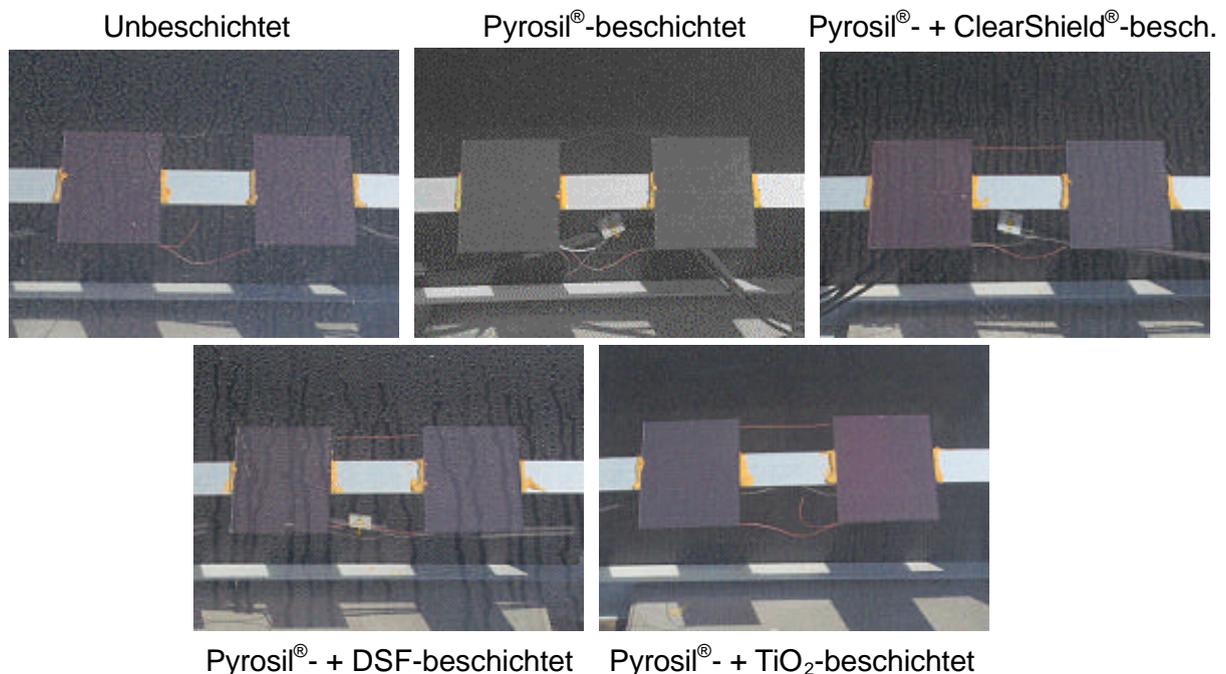
Neben dem Vergleich des Intensitätsverlaufes unterschiedlich beschichteter Gläser für einzelne Sonnentage ist ein Vergleich gleich beschichteter Gläser sehr interessant, da dadurch ein eventuell unterschiedliches Alterungsverhalten der einzelnen Glassorten vergleichend festgestellt werden kann. Hierzu wurden in Abbildung 17 die unterschiedlichen Pyrosil®-beschichteten Gläser gegenübergestellt. Man erkennt, dass die unterschiedlichen Gläser ein unterschiedliches Alterungsverhalten zeigen. So zeigen die Low Iron Floatgläser und das gezogene Glas im August 2007 für hohe Strahlungsintensitäten noch deutlich eine höhere Transmission als die beiden Guardian Floatgläser. Dies hat sich bis zum Juni allerdings schon verschoben, hier ist für hohe Strahlungsintensitäten jetzt die Transmission für das Guardian Polen Floatglas am größten, gefolgt von dem Low Iron Europa Floatglas, dem Guardian Floatglas, dem gezogenen Glas und mit niedrigster Transmission vom Low Iron China Floatglas.



**Abbildung 17:** Gegenüberstellung des Intensitätsverlaufs von allen Pyrosil®-beschichteten Gläsern für zwei Sonnentage im August 2007 und Juni 2008

Ein weiterer wichtiger Punkt neben den gemessenen Transmissionen ist das Verschmutzungsbild der unterschiedlich beschichteten Gläser. Dieses ist in Abbildung 18 vergleichend für einen Tag nach einer längeren Trockenperiode im April für die unterschiedlich beschichteten Guardian Floatgläser dargestellt. Man kann auf den unterschiedlich beschichteten Proben unterschiedlich viel Verschmutzung, hauptsächlich durch Pollenflug hervorgerufen, feststellen.

So ist die Schmutzschicht auf den beiden hydrophilen Gläsern am wenigsten ausgeprägt. Auf dem unbeschichteten und den beiden hydrophoben Gläsern sieht man dagegen die Verschmutzung deutlich. Interessant ist hierbei noch, dass hier ein deutlicher Unterschied im Bereich der Spuren der abgerollten Tautropfen zu erkennen ist. Diese Spuren sind für das DSF-beschichtete Glas relativ breit und vereinzelt, was auf den hydrophoben Charakter der Scheibe zurückzuführen ist, für die mit ClearShield®-beschichtete Scheibe sind die Spuren dagegen schon feiner, fast so wie die auf der unbeschichteten Scheibe. Hier scheint der hydrophobe Charakter der Scheibe nicht mehr so ausgeprägt zu sein.



**Abbildung 18:** Darstellung der unterschiedlichen Verschmutzung von unterschiedlich beschichteten Guardian Floatgläsern im April 2008

## **5.2. Diskussion und Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse**

In dem durchgeführten Forschungsprojekt ist es den Projektpartnern gelungen, die Applikation von transmissionserhöhenden Pyrosil<sup>®</sup>-Schichten so weit zu optimieren, dass eine Transmissionsverbesserung um 2,8 % pro beschichteter Seite erreichbar ist. Für diese Optimierung wurden die unterschiedlichen Beflammungsparameter wie Beflammungsgeschwindigkeit, -abstand, Precursorkonzentration, Gas-, Luftmenge und Anzahl Durchläufe sowohl einzeln variiert und optimiert als auch jeweils zwei gleichzeitig, um Parameterabhängigkeiten zu erkennen.

Es wurden darüber hinaus funktionale Mehrschichtsysteme untersucht, welche entweder hydrophobe oder hydrophile Eigenschaften aufwiesen und daher leichter zu reinigen sein sollten bzw. selbstreinigend sind. Diese Mehrschichtsysteme haben allerdings aufgrund ihrer Komplexität nicht nur positive Eigenschaften, sondern auch Nachteile wie z. B. die verminderte Transmission ganz besonders im UV-Bereich der TiO<sub>2</sub>-Schichten oder die deutlich höheren Herstellungskosten der untersuchten Mehrschichtsysteme im Vergleich zu den Einschichtsystemen. Wenn sich allerdings z. B. das Pyrosil<sup>®</sup>- und TiO<sub>2</sub>-beschichtete Glas im Außenbewitterungstest weiterhin so positiv entwickelt, kann eventuell ein solches System trotz der erhöhten Kosten interessant werden.

Das Standard-Hydrophobierungsmittel ClearShield<sup>®</sup> der Bohle AG wurde in Richtung höherer Temperaturbeständigkeit und höherer Lebensdauer optimiert.

Im Rahmen des Projektes wurde ein Außenbewitterungs-Versuchsstand aufgebaut, mit dem es möglich ist, die Veränderung der Transmission und damit das Alterungsverhalten unterschiedlicher Gläser und unterschiedlich beschichteter Gläser vergleichend zu untersuchen. Dieser Versuchsstand hat seit nunmehr gut 11 Monaten sehr interessante und zum Teil überraschende Ergebnisse betreffs der Eigenschaften der untersuchten unterschiedlichen Gläser und Beschichtungen geliefert.

Die Versuche zur Wirksamkeit von hydrophoben Beschichtungen im Bereich des Gewächshausglases können dabei noch nicht abschließend bewertet werden. Dazu ist eine längere Untersuchungsdauer notwendig. Daher und auch, um die positiven Ergebnisse, die bisher für die transmissionsverbessernd mit Hilfe der Pyrosil<sup>®</sup>-Technologie beschichteten Gläser in ihrer Aussagekraft zu festigen, wird der Außenbewitterungs-Versuchsstand in der beschriebenen Form mit den im Rahmen dieses Projektes untersuchten Gläsern weiterbetrieben werden. Darüber hinaus ist eine Erweiterung des Versuchsstandes geplant, in deren Planung die bisherigen Ergebnisse und gewonnenen Erkenntnisse zur Vermeidung von Problemen einfließen.

Das wichtigste Ergebnis dieses Projektes ist, dass die transmissionserhöhende Pyrosil<sup>®</sup>-Beschichtungstechnologie gut geeignet erscheint, um die Eigenschaften von Gewächshausgläsern dauerhaft deutlich zu verbessern. Die Transmission wird deutlich und dauerhaft erhöht. Das Verschmutzungsverhalten der hydrophilen Pyrosil<sup>®</sup>-beschichteten Scheiben ist deutlich positiver als das unbeschichteter Scheiben, da sich nur eine sehr dünne gleichmäßige Verschmutzungsschicht bildet. Durch die dauerhaft höhere Transmission wird sowohl der Energiebedarf eines Gewächshauses verringert als auch das Pflanzenwachstum entsprechend verbessert und damit der Ertrag erhöht.

### **5.3. Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse**

Eine ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse ist noch nicht umfassend möglich, da gerade eine abschließende ökonomische Bewertung noch weiterer Daten ganz besonders zum Alterungsverhalten der unterschiedlichen und unterschiedlich beschichteten Gläser bedarf. Diese werden durch weitere Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet gesammelt werden. Ein wichtiger Punkt dabei ist der Weiterbetrieb des Außenbewitterungs-Versuchsstandes.

Eine grundlegende generelle Abschätzung einer wirtschaftlich möglichen und sinnvollen Umsetzung ist allerdings bereits jetzt möglich. Diese beruht primär auf der Aussage, dass 1 % mehr Transmission gleich 1 % mehr Pflanzenwachstum sein soll, was 1 % mehr Ertrag entspricht. Betrachtet man daher die nachgewiesene Erhöhung von 4 % Transmissionserhöhung durch die Pyrosil<sup>®</sup> Beschichtung, würde dies einer Ertragserhöhung von ebenfalls 4 % entsprechen.

Um zu entscheiden, ob sich die Beschichtung für diese Anwendung lohnt, müssen die Beschichtungskosten in Relation zu den Herstellungskosten eines Gewächshauses gesetzt werden. Diese betragen zur Zeit zwischen 80 und 120 € pro qm. Geht man von den 80 € und der Ertragssteigerung von 4 % aus, bedeutet das, dass man für eine Beschichtung bis zu 4 % mehr ausgeben darf, also bis zu 3,20 €. Dieser Betrag ist für das wirtschaftliche Aufbringen eines Mehrschichtsystems auf jeden Fall zu gering. Anders sieht das allerdings für eine reine Pyrosil<sup>®</sup>-Beschichtung aus. Hierbei ergibt eine quadratmeterabhängige Kalkulation Kosten zwischen 6 € (für Beschichtungsflächen von <100.00 qm pro Jahr) und 2 € (für Beschichtungsflächen von >500.000 qm pro Jahr). Mit der reinen Pyrosil<sup>®</sup>-Beschichtung liegt man also durchaus in einem wirtschaftlich interessanten Bereich.

Diese Kalkulation betrifft bisher nur den wirtschaftlichen Gewinn, der durch die reine Ertragssteigerung zu erreichen wäre. Hinzu kommt noch eine Reduzierung des Energieverbrauchs eines Gewächshauses, für die belastbare Zahlen allerdings nicht vorliegen, plus die Kostenersparnis durch die seltener notwendige Reinigung der beschichteten Gläser im Vergleich zu den unbeschichteten. Diese weiteren wirtschaftlichen Aspekte machen es durchaus möglich, dass auch funktionale Mehrschichtsysteme für diesen Bereich interessant werden könnten. Dies könnte besonders auf das Pyrosil<sup>®</sup>-/TiO<sub>2</sub>-System zutreffen, da dieses ja entsprechend den bisherigen Ergebnissen des Außenbewitterungstests einen deutlichen Alterungsvorteil durch die Vermeidung von Verschmutzung zu bringen scheint.

Ökologisch wäre eine solche Beschichtung in vielerlei Hinsicht interessant, da sie zu einem höheren Ertrag führt, den Energieverbrauch des Gewächshauses senkt, die Glaskorrosion verringert und damit die Lebensdauer des Gewächshausglases verlängert sowie die Zeiten zwischen den umweltbelastenden Reinigungen vergrößert. All diese Dinge sollten zusammen zu einer deutlichen ökologischen Entlastung führen. Gerade auch die mögliche Energieeinsparung wird sowohl ökologisch als auch ökonomisch in Zukunft durch die zunehmende Energierohstoffknappheit immer interessanter werden.

#### **5.4. Veröffentlichung der Vorhabensergebnisse**

Die Darstellung und Veröffentlichung der Vorhabensergebnisse ist im Rahmen von Tagungen und in Fachzeitschriften geplant. Dazu ist z. B. bereits die Anmeldung eines Posterbeitrages mit zugehöriger Veröffentlichung zu den 4. Thüringer Grenz- und Oberflächentagen, die am 16./17. September 2008 in Jena stattfinden werden, erfolgt.

### **6. Fazit**

Das wichtigste Ergebnis dieses Projektes ist, dass die transmissionserhöhende Pyrosil<sup>®</sup>-Beschichtungstechnologie gut geeignet erscheint, um die Eigenschaften von Gewächshausgläsern dauerhaft deutlich zu verbessern. So wird die Transmission deutlich und dauerhaft erhöht. Das Verschmutzungsverhalten der hydrophilen, Pyrosil<sup>®</sup>-beschichteten Scheiben ist deutlich positiver als das unbeschichteter Scheiben, da sich nur eine sehr dünne gleichmäßige Verschmutzungsschicht bildet. Durch die erzielbare dauerhaft höhere Transmission durch den Einsatz der Pyrosil<sup>®</sup>-Beschichtungstechnologie auf Gewächshausgläsern würde sowohl der Energiebedarf eines Gewächshauses verringert als auch das Pflanzenwachstum entsprechend verbessert und damit der Ertrag erhöht sowie die Anzahl der notwendigen umweltbelastenden Reinigungen reduziert.

Die Einsatzfähigkeit von hydrophilen oder hydrophoben Mehrschichtsystemen ist nach Abschluss des Projektes kritischer einzuschätzen als zu Projektbeginn. Gerade mit den hydrophoben Beschichtungen scheinen die erwarteten positiven Effekte nicht in der Größenordnung erreichbar zu sein, wie zu Projektbeginn erwartet.

Betreffs des weiteren Vorgehens im Anschluss an das Projekt erscheint es sinnvoll, sich für zukünftige Untersuchungen weitere Partner direkt aus der Gruppe der Gewächshausglashersteller bzw. Gewächshausbetreiber zu suchen, um die Einsatzfähigkeit der Pyrosil<sup>®</sup>-Technik auf Floatglas als geeignete Beschichtung für Gewächshausglas noch weiter zu untersuchen und zu testen und die ökologischen und ökonomischen Effekte der Nutzung dieser Technologie besser und abschließend bewerten und quantifizieren zu können.