

Das Austrocknungsverhalten von Isolierglasscheiben

Vorhersage per Computer

Dr. Hans Höfer, Dr. Horst Thamm und Andreas Keinath

DIE ISOLIERGLASINDUSTRIE VERARBEITET EINE Vielzahl von Abstandshaltern, die sich durch die Form des Profilquerschnittes, die Breite des Abstandshalters und die Art der Perforation unterscheiden. Die einzelnen Perforationsarten wiederum unterscheiden sich durch Anzahl, Anordnung und Form der Öffnungen sowie deren Öffnungsweiten.



Bild 1: Abstandhalter im Kühlschrank



Bild 2: Abstandhalter auf der Waage

Individuelle Fertigungskonzepte verlangen nach Abstandshaltern, die nach dem Verschließen der Isolierglasscheibe eine schnelle Feuchtigkeitsaufnahme aus dem Scheibeninnenraum ermöglichen und somit einen zügigen Versand nach der Fertigstellung erlauben. Als Alternative dazu werden auch Abstandshalter verarbeitet, die sich durch eine langsame Feuchtigkeitsaufnahme charakterisieren. In solchen Fällen muss die fertige Isolierglaseinheit für eine gewisse Zeit bei einer kontrollierten Umgebungstemperatur gelagert werden, bevor sie transportiert werden kann.

Für alle Isolierglashersteller ist es üblich, vor dem Versand einen Taupunkt von -30°C in der IG-Einheit vorliegen zu haben. Der Abstandhalter bestimmt die wesentlichen Eigenschaften einer Isolierglasscheibe. Er gibt ihre Geometrie vor und legt in Kombination mit dem Trocknungsmittel das Austrocknungsverhalten im Scheibenzwischenraum (SZR) fest. Bild 5 zeigt das experimentell bestimmte, zeitliche Wasseraufnahmeverhalten von verschiedenen, mit Trocknungsmitteln ausgestatteten Abstandshaltern unterschiedlicher Trocknungsmittelbefüllung (Profiltest).

Bild 6 gibt die experimentell ermittelten Austrocknungsgeschwindigkeiten eines „langsamen“ und eines „schnellen“

16 mm Abstandshalters in einer 1 m x 1 m Isolierglasscheibe wieder. In beiden Fällen ist eine zweiseitige Befüllung mit einem Trocknungsmittel gegeben. Die Abstandshalter unterscheiden sich in der Anzahl der Öffnungen pro cm. Das Wissen um die Austrocknungsgeschwindigkeit, oder präziser formuliert, um die räumliche und zeitliche Entwicklung des Taupunktes im SZR nach dem Zusammenbau der Isolierglasscheibe, ist für den Hersteller von entscheidender Bedeutung. Es ermöglicht ihm die negativen Einflüsse zu vermeiden, die Wasserkondensation innerhalb einer Scheibe bedingen kann.

Experimentelles

Bevor mit der Modellierung von Gasdiffusionsvorgängen zwischen SZR und Trocknungsmittel - getrennt durch die Perforation des Abstandshalters - begonnen werden konnte, wurden zahlreiche Experimente durchgeführt, um das Austrocknungsverhalten von Isolierglaseinheiten unter industriell relevanten Bedingungen zu ermitteln. Dazu wurden zwei Arten von Versuchen durchgeführt. Dies waren:

1. Messungen der Wasserdampfdiffusionsraten durch verschiedene Abstandshalterprofile (Profilrate)
2. Taupunktmessungen.

Zur Bestimmung der Profilraten wurden Abstandshalter auf ca. 40 cm Länge zurecht geschnitten, mit einem geeigneten Trocknungsmittel, wie z. B. „Grace Phonosorb 551“ befüllt und an den beiden Endseiten mit Polyiso-Buthylen, kurz Butyl

! Info

Neues Computerprogramm

Ein neu entwickeltes Computerprogramm gestattet es, auf der Grundlage nur weniger experimenteller Daten das zeit- und ortsabhängige Austrocknungsverhalten in einer Isolierglasscheibe zu simulieren. Das Ergebnis einer Reihe von Simulationsläufen zeigt, dass die übliche Taupunktmessung in der Scheibenmitte im Fall einer unsymmetrisch mit Trocknungsmittel gefüllten Isolierglasscheibe den Austrocknungszustand nur unzureichend beschreibt. Die Nichtberücksichtigung dieses Sachverhaltes kann in der Praxis trotz korrekter Messung zu Kondensationschäden führen.

genannt, gasdicht versiegelt. Danach wurden diese Abstandshalter für mindestens 24 Stunden in einem Klimaschrank bei 25 °C und 50% relativer Feuchtigkeit gelagert. Der zeitliche Verlauf der Wasseraufnahme wurde durch das Auswiegen der Abstandshalter nach ein, zwei, vier, acht und 24 Stunden festgestellt. Zur Verbesserung der Messdatenstatistik wurden für jeden Versuch fünf Abstandshalter präpariert und vermessen und die entsprechenden Mittelwerte aufgezeichnet. Die Bilder 1 und 2 zeigen Probeabstandshalter im Klimaschrank und auf der Präzisionswaage. Die Taupunktmessungen wurden nach DIN 52345/EN 1279-2 (Anhang A) durchgeführt und erfolgten durch das kontrollierte Abkühlen eines kleinen Bereichs im Zentrum einer der beiden außen liegenden Scheiben einer Isolierglaseinheit. Der Taupunkt im SZR gilt als erreicht, wenn sich Feuchtigkeit an der Innenseite der gekühlten Scheibe als Kondensat abscheidet.

In der Praxis wird eine Plastikbecherhälfte mit Butyl von außen an die Scheibenmitte geklebt und mit einer Aceton/Trockeneis Kältemischung gefüllt. Die Temperatursenkung lässt sich mit einem Thermometer verfolgen. Ein kleiner Spiegel, unmittelbar an der Scheibe positioniert, erlaubt es, die erste Kondensatbildung zu erkennen. Der Taupunkt im SZR ist um so niedriger, je besser die Isolierglasscheibe ausgetrocknet ist. Bild 3 zeigt den Plastikbecher an der Außenseite der Isolierglasscheibe mit Butyl befestigt, mit dem Thermometer ausgestattet und mit Aceton gefüllt bei der Zugabe von Trockeneis. Bild 4 zeigt die Kondensation an der Scheibeninnenseite und Beobachtungsspiegel.

Computermodell

Dem Computerprogramm liegt ein Modell zugrunde, das drei Elemente enthält:

1. die Diffusion von Wassermolekülen innerhalb der Gasatmosphäre im SZR (zweites Fick'sche Gesetz)

2. die Feuchtigkeitsdurchtrittsrate vom SZR in das Abstandshalterprofil bedingt durch das Adsorptionspotential des dort befindlichen Trocknungsmittels

3. DampfadSORPTION am Trocknungsmittel. Es wurden hochwertige Zeolith 3A Trocknungsmittel verschiedener Hersteller untersucht. Im Rahmen dieser Testreihen konnte kein nennenswerter Unterschied zwischen den Adsorbentien festgestellt werden, so dass auf das Einbeziehen unterschiedlicher Sorptionscharakteristika in das Modell verzichtet wurde. Reduziert man die Gasdiffusion in Isolierglasscheiben auf ein zweidimensionales Phänomen, so lässt sich das Wasserdampfgleichgewicht zwischen dem SZR und dem Raum im Abstandshalter folgendermaßen beschreiben:

$$V_c \times \frac{\partial c}{\partial t} + V_s \times \frac{\partial c_s}{\partial t} = V_c \times D \times \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right)$$

Es bedeuten :

- V_c – Gasvolumen des SZR
- V_s – Gasvolumen im Abstandshalter
- c – Wasserdampfkonzentration im SZR
- c_s – Wasserdampfkonzentration im Abstandshalter
- D – Diffusionskoeffizient für Wasser in den entsprechenden Füllgasen

Der Ausdruck ($V_s \times \partial c_s / \partial t$) gibt die zeitliche Änderung der Wasserdampfkonzentration innerhalb des Abstandshalters wieder. Diese entspricht der überführten Wasserdampfmasse durch die Perforation im Abstandshalter ($k \times A (c - c_s)$).

$$V_s \times \frac{\partial c_s}{\partial t} = k \times A (c - c_s)$$

Es bedeuten:

- k – Massenüberföhrungskoeffizient
- A – Durchtrittsfläche der Massenüberföhrung – Gesamtoberfläche der Öffnungen der Perforierung



Bild 3: Taupunktmesseinrichtung mit Aceton gefülltem Plastikbecher bei der Trockeneiszugabe



Bild 4: Kondensation an der Scheibeninnenseite; der grüne Pfeil zeigt den klaren Bereich

Abstandhaltertest

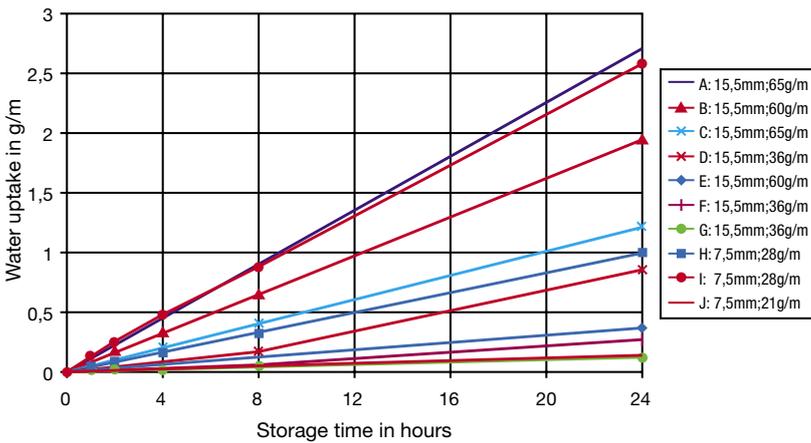


Bild 5: Abstandhaltertest bei 25 °C und 50 % relativer Feuchte mit verschiedenen Profilen und Trocknungsmittelfüllung. 65 g/m bedeutet 65 g Trocknungsmittel pro Meter Abstandhalter

Taupunktverlauf

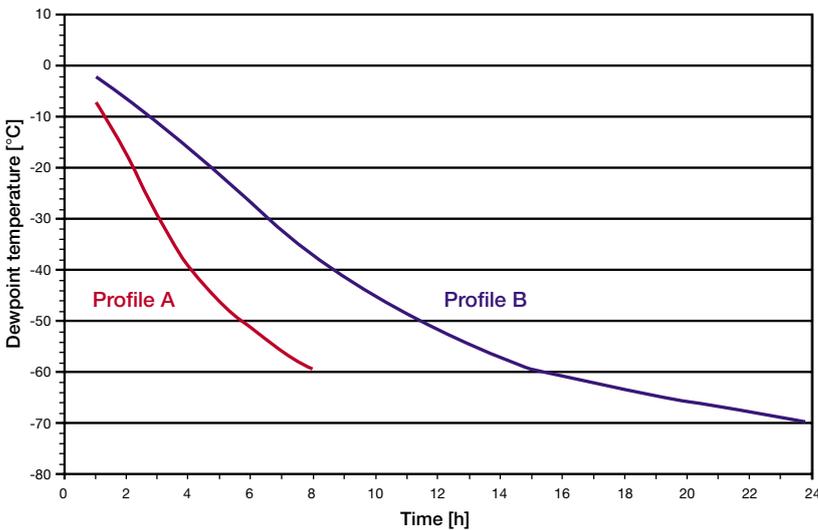


Bild 6: Verlauf des Taupunktes eines „schnellen“ (rot) und eines „langsamen“ (blau) Profils

Taupunktentwicklung

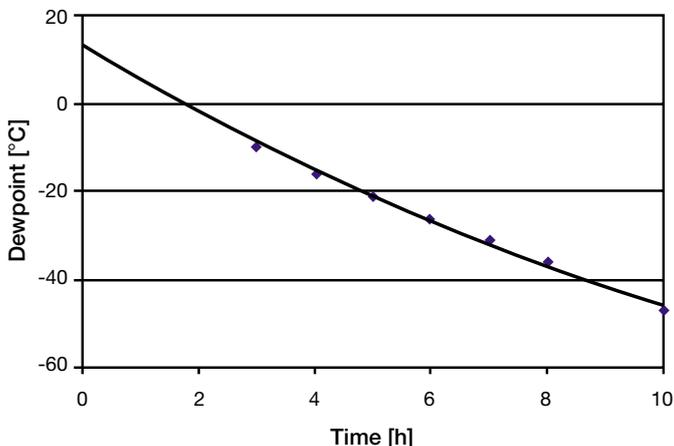


Bild 7: Taupunktentwicklung mit einer 1 m x 1 m Isolierglasscheibe mit 16 mm Abstandhalter und „langsamer“ Wasseraufnahmegeschwindigkeit mit zweiseitiger Füllung. Die Punkte geben die Messwerte wider. Die Kurven wurden berechnet

Die Lösung folgender Differentialgleichung führt zu der gesuchten Austrocknungsrate:

$$V_c \times \frac{\partial c}{\partial t} + k \times A \times (c - c_s) = V_c \times D \times \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right)$$

Als erste Näherung wird angenommen, dass der Wasserdampf innerhalb des Abstandhalters sofort vollständig adsorbiert wird. Daher darf $c_s = 0$ gesetzt werden. Experimente und Berechnungen haben gezeigt, dass diese Annahme bis zu Taupunkten um die -40°C sehr gut zutrifft. Bei niedrigeren Taupunkten muss die Adsorptionsisotherme des Wasserdampfes für das eingesetzte Trocknungsmittel berücksichtigt werden.

Der Wasserdurchtritt durch die Öffnungen der Perforation ist gegeben durch:

$$\partial N / \partial t = k \times A \times c$$

Experimentell wird der Wasserdampfdurchtritt durch die Perforierungsöffnungen des Abstandhalters durch den oben beschriebenen Profilttest bestimmt (siehe Abschnitt Experimentelles). Üblicherweise wird die Profiltrate N_{exp} angegeben durch Gramm Wasser pro Meter Abstandhalter pro Tag beschrieben mit:

$$N_{exp} / 24 = (N \times M) / A = k \times M \times c$$

Daraus lässt sich der Massenüberföhrungskoeffizient k errechnen:

$$k = (N_{exp} / 24) / (M \times c)$$

M ist das Molekulargewicht des Wassers (18g/mol). Bei luftgefüllten Scheiben ergibt sich c aus der relativen Feuchtigkeit und der Temperatur der produktionsbedingt im SZR eingeschlossenen Luft.

Im Fall von luftgefüllten Scheiben benötigt das Modell somit neben der Profiltrate N_{exp} lediglich noch die Angabe über Luftfeuchte und Temperatur während der Fertigung sowie die Temperatur während der Lagerung.

In den Diagrammen ab Bild 7 werden experimentelle und errechnete Daten gegenübergestellt, um die Gültigkeit des Diffusionsmodells zu überprüfen. Bild 7 zeigt die Taupunktentwicklung in einer 1 m x 1 m Isolierglasscheibe, die mit einem 16 mm Abstandhalter ausgerüstet und beidseitig mit Trocknungsmittel gefüllt ist. Die experimentell ermittelte Wasserdiffusionsrate beträgt 1,43g/m/24h und weist auf einen „langsamen“ Abstandhalter hin. Die Punkte repräsentieren gemessene Daten, die Line ist errechnet. Die experimentellen und errechneten Daten beziehen sich auf einen Taupunkt, wie er in der Scheibenmitte vorherrscht.

Bild 8 gibt den Taupunktverlauf in einer Scheibe wieder, bei der alle vier Seiten des Abstandhalters mit Trocknungsmittel gefüllt sind. Alle anderen Versuchsbedingungen entsprechen denen in Bild 7.

Man erkennt, dass die vierseitige Füllung der Abstandhalter mit Trocknungsmitteln erwartungsgemäß doppelt so effizient ist, wie die mit zweiseitiger Füllung.

Taupunktentwicklung

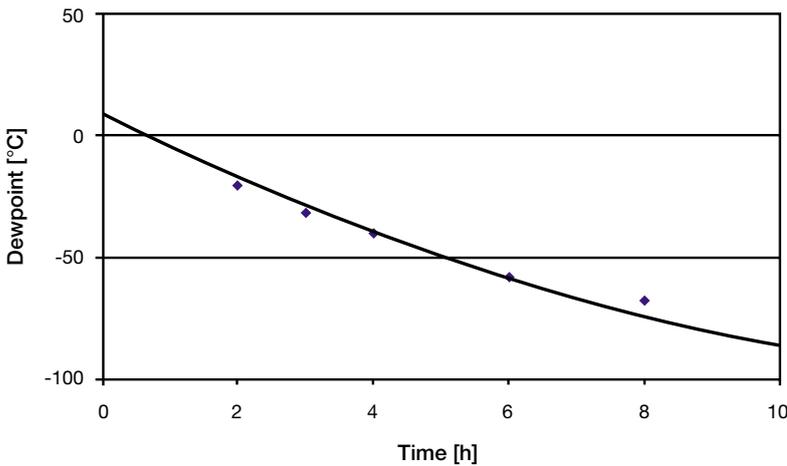


Bild 8: Taupunktentwicklung in einer 1 m x 1m Isolierglasscheibe mit 16 mm Abstandshalter und „langsamer“ Wasseraufnahmegeschwindigkeit mit vorseitiger Füllung. Die Punkte geben die Messwerte wider. Die Kurven wurden berechnet

Taupunktentwicklung

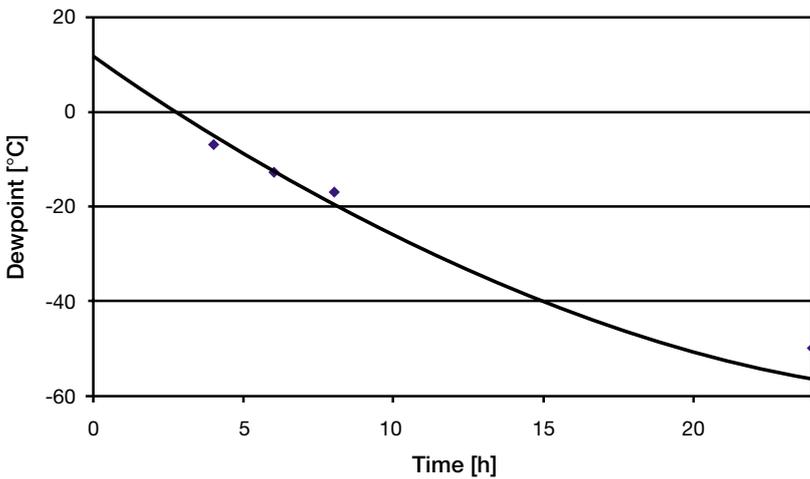


Bild 9: Taupunktentwicklung in einer 1 m x 1m Isolierglasscheibe mit 16 mm Abstandshalter und „langsamer“ Wasseraufnahmegeschwindigkeit mit einseitiger Füllung. Die Punkte geben die Messwerte wider. Die Kurven wurden berechnet

Taupunktentwicklung

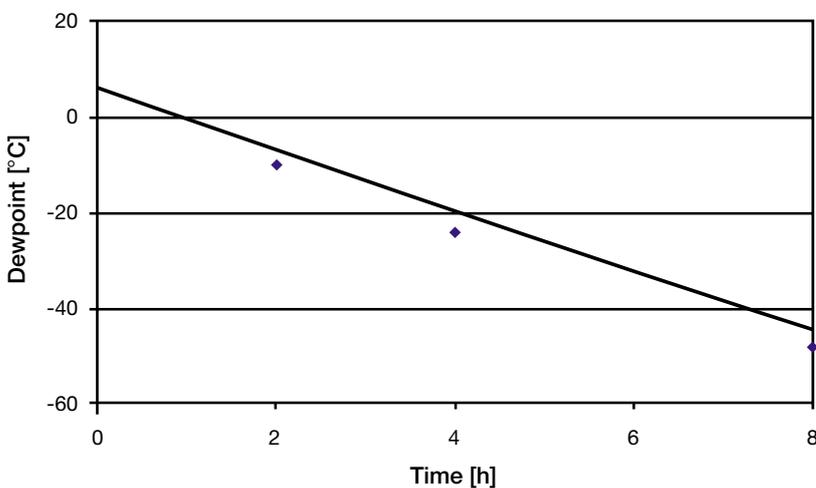


Bild 10: Taupunktentwicklung in einer 1 m x 1m Isolierglasscheibe mit 16 mm Abstandshalter und „schneller“ Wasseraufnahmegeschwindigkeit mit einseitiger Füllung. Die Punkte geben die Messwerte wider. Die Kurven wurden berechnet

Bild 9 entspricht nochmals der gleichen Versuchsanordnung mit Ausnahme der Befüllung. Hier ist nur eine Seite des Abstandshalters mit einem Trocknungsmittel ausgerüstet. Der Taupunktverlauf ist hier halb so schnell wie bei der zweiseitigen Füllung im Beispiel von Bild 7. Auch in diesem etwas kritischeren Fall sind Messwerte und errechnete Daten in zufriedenstellender Übereinstimmung.

Der nächste diskutierte Fall entspricht dem Beispiel in Bild 9 jedoch mit einem „schnellen“ Abstandshalter. Mit 2,86g/m/24h ist die Diffusionsgeschwindigkeit nun doppelt so groß. Gemessen und berechnete Taupunktwerte sind in Bild 10 dargestellt.

Simulationsprogramm

In der folgenden Testreihe ist das Programm benutzt worden, um die zeitliche und ortsabhängige Verteilung des Taupunktes nachzubilden. Dazu wird der SZR durch eine farbige x-y-Rasterebene, die der Scheibenfläche entspricht, dargestellt. Die Dicke des SZR (z-Achse) wird hierbei vernachlässigt. Jede Farbe entspricht einem Taupunkttemperaturbereich. Die Form der Ebene repräsentiert die exakte Taupunktverteilung. Es werden nun drei praxisrelevante Taupunktverläufe diskutiert, die als die Serien A, B, und C bildlich dargestellt sind (Bild 11). Folgende Startparameter wurden variiert: Zahl der mit Trocknungsmittel gefüllten Seiten, Abmessung der Isolierglasscheibe, Wasserdiffusionsrate durch die Perforierung des Abstandshalters. Gewählt wurden ein „langsames“ und ein „schnelles“ Profil mit Diffusionsraten von 1,43 g/m/24h und 2,86 g/m/24h. Der Einfachheit halber wurden die Konzentrationen des Füllgases, die Umgebungstemperatur und die relative Feuchte im SZR konstant gehalten.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein Taupunkt unterhalb -30°C über die gesamte Fläche der Isolierglasscheibe, im Fall A nach 60 Minuten, im Fall C dagegen erst ca. 10 Stunden nach der Versiegelung erreicht wird. Die berechneten zeit- und ortsabhängigen Taupunktverteilungen im Fall C zeigen weiter, dass bei asymmetrisch mit Trocknungsmittel gefüllten Abstandshaltern, im Gegensatz zu symmetrisch gefüllten Abstandshaltern (A und B), Taupunktmessungen im Scheibenzentrum irreführend sein können.

Im Zweifelsfall sollte daher der Taupunkt bei einer einseitigen Füllung im Bereich der dem Trocknungsmittel gegenüberliegenden Seite gemessen werden. Im Falle einer asymmetrischen, zweiseitigen Füllung kommt die gegenüberliegenden Ecke als Messort in Frage.

Gasgefüllte Isolierglasscheiben weisen in aller Regel nach Versiegelung vergleichsweise geringe Wasserdampfkonzentrationen im SZR auf. In extremen Fällen, d.h. große Scheiben, geringe Trocknungsmittelmengen und „langsame“ Profile, können aber auch hier durch Feuchteintrag in den SZR längere Austrocknungszeiten auftreten.

Da das Programm neben den Diffusionskoeffizienten für Wasserdampf in Luft auch die Diffusionskoeffizienten für andere Füllgase enthält, kann auch das Austrocknungsverhalten in gasgefüllten Isolierglasscheiben simuliert werden. Voraussetzung für die Vorausberechnung der zeitlichen und örtlichen Taupunktverteilungen in diesen Fällen ist allerdings, zusätzlich zu der oben genannten Profilrate, die Kenntnis des Taupunktes in Scheibenmitte unmittelbar nach der Versiegelung.

Taupunktentwicklung

Serie A Taupunktentwicklung in einer 0,5 m x 0,35 m Isolierglasscheibe mit 16 mm Abstandshalter, „langsamer“ Wasseraufnahme und vier Seiten Füllung.

Serie B Taupunktentwicklung in einer 1 m x 1 m Isolierglasscheibe mit 16 mm Abstandshalter, „schneller“ Wasseraufnahme und zwei Seiten Füllung - gegenüberliegend

Serie B Taupunktentwicklung in einer 1 m x 1 m Isolierglasscheibe mit 16 mm Abstandshalter, „langsa-“ mer Wasseraufnahme und zwei Seiten Füllung – über Eck

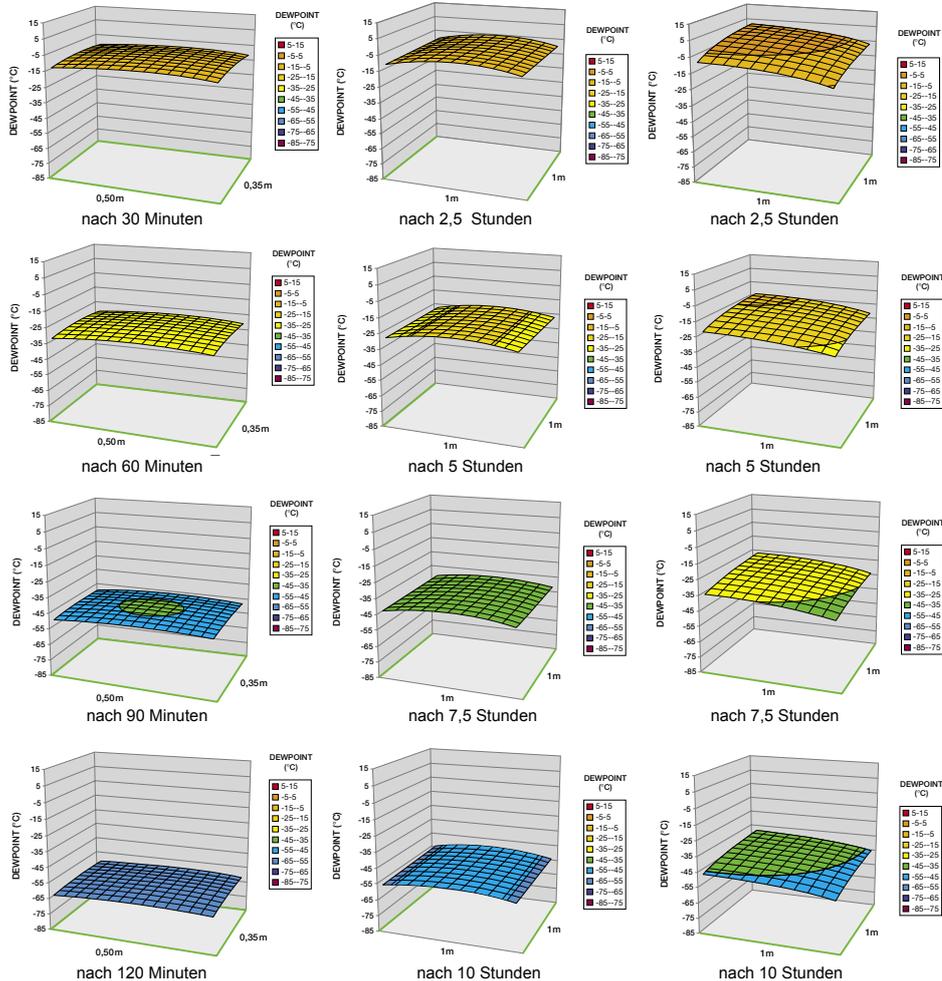


Bild 11: Taupunktentwicklungen in verschiedenen Isolierglasscheiben

Ausblick

Es wurde ein Computerprogramm entwickelt, das es ermöglicht, die zeitliche und örtliche Taupunktverteilung in Isolierglasscheiben nach deren Versiegelung vorzuberechnen. Der praktische Nutzen dieses Programms, insbesondere für luftgefüllte Isolierglasscheiben, ist offensichtlich. Auf der Grundlage weniger experimenteller Daten, wie die vorstehend beschriebene Profilrate, die relative Luftfeuchte und die Lufttemperatur bei der Herstellung sowie die Lagertemperatur der Isolierglasscheibe, lassen sich das Austrocknungsverhalten von Isolierglasscheiben voraus berechnen und damit in der Praxis Kondensationsschäden durch zu schnelle Auslieferung vermeiden. Beispielrechnungen zeigen, dass in Isolierglasscheiben mit unsymmetrischen Trocknungs-

mittelfüllungen, beträchtliche Unterschiede in der örtlichen Taupunktverteilung auftreten können. Die übliche Taupunktmessung in der Scheibenmitte ist in diesen Fällen nicht ausreichend. Sie kann vor allem bei großen Scheiben zu falschen Schlussfolgerungen bezüglich der notwendigen Lagerzeit führen.

! Autor
Dr. Hans Höfer, Dr. Horst Thamm und Andreas Keinath sind bei der Grace GmbH in 67545 Worms beschäftigt. Die Autoren möchten Prof. Suckow, Abteilung für Chemieingenieurwesen an der Fachhochschule Lausitz, für seine Unterstützung bei der Erstellung des Programms sowie wertvoller Diskussionsbeiträge danken.