

Bernd Schirmer und Franz Durst

Eine Meßmethode zur Bestimmung der Dampfdurchlässigkeit von Dampfsperren und Unterspannbahnen

Im Hausbau finden verstärkt Folien Anwendung, z. B. um das Eindringen von Wasserdampf in die Dachkonstruktion durch das Verlegen einer Dampfsperre zu unterbinden bzw. den Wind- und teilweise auch den Regenschutz der Dachkonstruktion durch die Unterspannbahn zu gewährleisten. Während es für die Dampfsperre als essentiell gilt, daß die eingesetzte Folie eine möglichst geringe Dampfdurchlässigkeit aufweist, wird von unterspannbahn-tauglichen Folien gelegentlich erwartet, daß sie eine hohe Dampfdurchlässigkeit besitzen. Diese unterschiedlichen Anforderungen an die im Baubereich eingesetzten Folien verdeutlichen, daß es sehr wichtig ist, verlässliche Meßverfahren zur Verfügung zu haben, um die Dampfdurchlässigkeit von Folien quantitativ zu bestimmen. Die von den Autoren durchgeführten und in dieser Arbeit zusammenfassend dargestellten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten resultierten in einem Meßverfahren zur Dampfkonzentrationsmessung ober- und unterhalb von Folien. Messungen dieser Art lassen sich, in Verbindung mit einer geeigneten Meßstrecke, zur Bestimmung der Dampfdurchlässigkeit von Folien einsetzen. Die vorliegende Arbeit zeigt dies auf, beschreibt das entwickelte Diodenlaserspektrometer für Wasserdampfkonzentrationsmessungen und zeigt dessen Einsatz für Messungen mit verschiedenen Folien.

A method for determining the vapour permeability of vapour barriers and rain protection sheets in roofs

In domestic building construction, sheeting and films are increasingly used, for example, to prevent the penetration of water vapour into the roof construction through the installation of a vapour barrier, or to ensure wind and also rain protection of the roof construction by means of rain protection sheets. Whilst low vapour permeability is essential for vapour barriers, films that are intended to be suitable for rain protection are occasionally expected to have high vapour permeability. These conflicting requirements for the films used in the construction industry demonstrate the importance of reliable measurement methods for determining the vapour permeability of films qualitatively. The research and development work carried out by the authors and presented in this article has resulted in a measuring technique for determining the vapour concentration above and below films. In combination with a suitable measuring section, measurements of this type can be used for determining the vapour permeability of films. The article describes the method and the diode laser spectrometer that was developed for measuring water vapour concentrations and demonstrates its application for measurements with different films.

Dr.-Ing. Bernd Schirmer - Jg. 1969, Studium der Physik in Freiburg und Heidelberg (Diplom 1996). Von 1997 bis 2002 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Strömungsmechanik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen, Promotion 2001 „Hochauflöste Wasserdampfdetektion mittels Diodenlaser-Absorptionspektroskopie“. Seit 2002 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Physikalische Meßtechnik Freiburg.
Prof. Dr. Dr. h. c. Franz Durst - Lehrstuhlinhaber für Strömungsmechanik an der Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

1 Einleitung

Wasserdampf-Durchlässigkeit und Permeabilität

Eine in der Praxis häufig verwendete Größe zur Angabe der Wasserdampf-Durchlässigkeit einer Folie ist die Wasserdampf-Massenstromdichte mit der Einheit $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot 24\text{h})$, welche auch einfach als Wasserdampf-Durchlässigkeit (WDD) bezeichnet wird. Die Wasserdampf-Durchlässigkeit j , ausgedrückt in MKSA-Einheiten ($\text{kg}/(\text{m}^2 \text{s})$) ist proportional zur Partialdruckdifferenz Δp , gemäß:

$$j = P \frac{M}{RT} \Delta p \quad (1)$$

mit der Molmasse von Wasser $M = 18,025 \text{ g/mol}$, der allgemeinen Gaskonstanten $R = 8,31 \text{ J}/(\text{K mol})$, der Temperatur T in Kelvin und der Wasserdampf-Partialdruckdifferenz in Pascal ($= 10^{-5} \text{ bar}$). Die Proportionalitätskonstante P (in m/s) wird auch als die Permeabilität der Folie bezeichnet, allerdings wird diese in der Literatur nicht einheitlich definiert. Die Partialdruckdifferenz (auch Teildruckdifferenz) kann auch mittels des Sättigungsdampfdrucks p_s durch die Differenz der relativen Feuchten $\Delta \phi$ zu beiden Seiten der Folie ausgedrückt werden:

$$\Delta p = \Delta \phi \cdot p_s \quad (2)$$

wobei der Sättigungsdampfdruck stark (näherungsweise exponentiell) von der Temperatur abhängig ist. Bei Verwendung der Wasserdampf-Durchlässigkeit ist insbesondere darauf zu achten, daß stets die Partialdruckdifferenz, bzw. die Differenz der relativen Feuchten zu beiden Seiten der Folie sowie die Temperatur angegeben ist, bei welcher die Messung durchgeführt wurde.

Sämtliche in der Praxis verwendete Einheiten sind beispielsweise in der DIN-Norm 53122, Blatt 1 definiert. Hierin sind auch Referenzklimata für die Bestimmung der Wasserdampf-Durchlässigkeit festgelegt. Für Kunststoffolien ist das Klima D mit einer Temperatur von $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ und einer Differenz der relativen Feuchten von 85 % r.H. gegen trockene Luft mit einem Restfeuchtegehalt unter 1 % r.H. vorgeschrieben. Die Umrech-

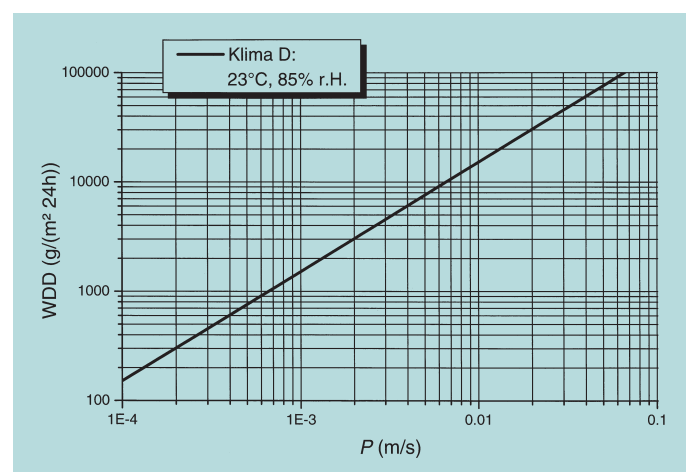


Bild 1. Umrechnung der Permeabilität in die Wasserdampf-Durchlässigkeit für das Referenzklima D (nach DIN 53 122)

nung der oben definierten Permeabilität in die Wasserdampf-Durchlässigkeit nach Gleichung 1 ist in Bild 1 skizziert. Die Temperaturabhängigkeit der Wasserdampf-Durchlässigkeit kann häufig durch ein Arrheniusgesetz beschrieben werden. *Becker und Heiss* [1] haben beispielsweise die Temperaturabhängigkeit verschiedener Packstoffe untersucht und für eine Polyethylen-Folie eine Erhöhung der Wasserdampf-Durchlässigkeit um einen Faktor 2,9 bei einer Temperaturerhöhung von 20 °C auf 30 °C berichtet.

Meßverfahren

Für die Bestimmung der Wasserdampf-Durchlässigkeit durch Folien werden häufig gravimetrische Verfahren eingesetzt.¹ Hierbei wird die Probe über ein teilweise mit Trockenmittel gefülltes Schälchen gespannt und mit Luft mit definierter relativer Feuchte überströmt. Die Massenzunahme des Trockenmittels durch den eindiffundierten Wasserdampf dient als Maß für die Wasserdampf-Durchlässigkeit bzw. die Permeabilität der Probe. Diese Verfahren sind naturgemäß sehr langsam. Ein alternatives Meßverfahren ist das Elektrolyse-Verfahren.² Hierbei wird die Probe in einer Meßzelle auf der einen Seite mit feuchter Luft und auf der anderen Seite mit trockener Luft überströmt. Der durch die Probe in die Trockenluft diffundierte Wasserdampfgehalt wird in einer nachfolgenden Elektrolysezelle quantitativ bestimmt und dient auch hier wieder als Maß für die Permeabilität der Probe.

Ein gänzlich neues Verfahren ist die Bestimmung der Wasserdampf-Durchlässigkeit bzw. der Permeabilität durch die genaue, räumliche Vermessung der Wasserdampf-Konzentrationsverläufe (Profile) in der Nähe der Folie. Hierzu eignet sich die Methode der Diodenlaser-Absorptionsspektroskopie, welche als spezielle Lasermeßtechnik die räumliche aufgelöste Konzentrationsbestimmung von Wasserdampf erlaubt. Das beschriebene Verfahren erlaubt extrem schnelle Permeationsmessungen und ist zudem kalibrierfrei. Da die Feuchtekonzentrationen direkt gemessen werden, ist kein zusätzliches Meßgerät zur Bestimmung der Feuchtigkeit zu beiden Seiten der Folie notwendig.

Im folgenden Kapitel werden zunächst einige theoretische Überlegungen zu den Konzentrationsverläufen in der Nähe einer Folie angestellt, welche die Wasserdampf-Durchlässigkeit wesentlich bestimmen. Die Kenntnis der Konzentrationsprofile ist daher zur Interpretation jeglichen Permeationsmessungen wünschenswert. Des weiteren wird die Theorie zu der neuen, in dieser Publikation vorgestellten Meßmethode erarbeitet. Es folgt eine kurze Beschreibung des Meßgeräts und des experimentellen Aufbaus für die Permeationsmessungen. Schließlich werden Messungen an zwei verschiedenen Polypropylen-Spinfließen, welche als diffusionsoffene Folien eingesetzt werden, vorgestellt.

2 Theoretische Überlegungen

Der Verlauf der Wasserdampfkonzentration in der Nähe einer Folie hat entscheidenden Einfluß auf die Wasserdampf-Durchlässigkeit durch dieselbe. In diesem Kapitel sollen daher einige

Überlegungen zu den möglichen Konzentrationsprofilen angestellt werden, wobei auch Bezug zu den oben genannten Methoden zur Messung der Wasserdampf-Durchlässigkeit genommen wird.

2.1 Konzentrationsverlauf in der Nähe der Folie

Für die folgenden Überlegungen betrachten wir ein Modellsystem wie in Bild 2 dargestellt. Eine Folie der Dicke δ_m sei in einem Abstand H über einer ebenen Oberfläche aufgespannt. Die Grenzfläche bei $y=0$ sei entweder eine Wasseroberfläche mit der dem Sättigungsdampfdruck entsprechenden Wasserdampfkonzentration $c = c(p_s(T))$ oder ein Trockenmittel, wie beispielsweise bei den gravimetrischen Verfahren zur Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit (vgl. Abschnitt 1). Die Wasserdampf-Konzentration c (in mol/m³) steht gemäß dem allgemeinen Gasgesetz in folgender Beziehung zum Druck (in Pa):

$$p = c R T \quad (3)$$

In der Luftsäule der Höhe H zwischen der Oberfläche und der Folie herrsche keine Luftbewegung, während die Oberseite der Folie ($y > H + \delta_m$) parallel überströmt werde. Die Wasserdampfkonzentration der Spülluft betrage c_∞ . Mittels dieses Modellsystems wollen wir einige grundlegende Phänomene, welche bei der Wasserdampfdiffusion durch Folien auftreten, näher erläutern. Im folgenden sollen die Wasserdampf-Konzentrationsprofile in den drei Gebieten einzeln diskutiert werden.

Profil unter der Folie

Unterhalb der Folie kann die Wasserdampfkonzentration $c(y)$ mittels der eindimensionalen Kontinuitätsgleichung berechnet werden:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial c}{\partial y} \right) \quad (4)$$

mit dem Diffusionskoeffizienten D . Bei Umgebungstemperatur ist der absolute Wasserdampf-Volumenanteil wesentlich kleiner als Eins, so daß die mittlere molekulare Geschwindigkeit der Wasserdampfmoleküle \bar{u} vernachlässigt werden kann. Wenn die Diffusion zudem ein Gleichgewicht erreicht hat, also nicht mehr von der Zeit abhängt, und der Diffusionskoeffizient konstant ist,

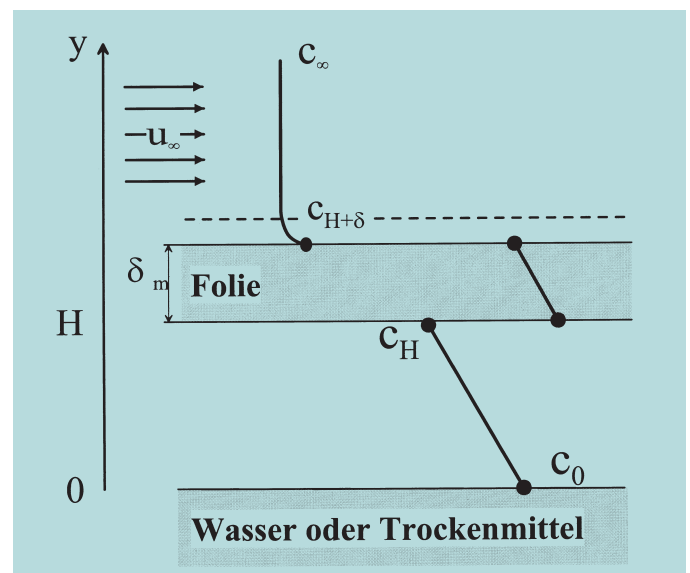


Bild 2. Konzentrationsprofile in der Nähe einer Folie

¹ Vgl. DIN 53 122 Teil 1: Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit - Gravimetrische Verfahren zur Prüfung von Kunststoff-Folien, Elastomerfolien, Papier, Pappe und anderen Flächengebilden, 2001 sowie DIN 52 615: Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen.

² Vgl. DIN 53 122 Teil 2: Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit - Elektrolytische Verfahren zur Prüfung von Kunststoff-Folien, Elastomerfolien, Papier, Pappe und anderen Flächengebilden, 1982.

was im allgemeinen angenommen werden kann, läßt sich die Gleichung wesentlich vereinfachen zu:

$$\frac{\partial^2 c}{\partial y^2} = 0 \quad (5)$$

Als Lösung dieser Differentialgleichung ergibt sich eine lineare Funktion. Die Randbedingungen $c(0) = c_0$ und $c(H) = c_H$ werden durch folgendes Konzentrationsprofil erfüllt:

$$c(y) = c_0 + (c_H - c_0) \frac{y}{H} \quad (6)$$

Für hohe Konzentrationen und damit hohe Diffusionsströme, welche beispielsweise bei erhöhten Temperaturen auftreten, muß in Gleichung 4 auch der konvektive Term mit der mittleren molekularen Geschwindigkeit \bar{u} berücksichtigt werden; als Lösung ergibt sich dann eine Exponentialfunktion (siehe z. B. [2]). Der Diffusionsstrom j kann durch das erste Ficksche Gesetz mittels der Ableitung des Konzentrationsprofils $c(y)$ berechnet werden gemäß:

$$j = -D \cdot \frac{\partial c}{\partial y} = D \cdot \frac{c_0 - c_H}{H} \quad (7)$$

Für die gravimetrischen Methoden wird das sich einstellende lineare Konzentrationsprofil zwischen Trockenmittel und Folie häufig unzulässigerweise nicht berücksichtigt.

Profil in der Folie

In der Folie kann das Konzentrationsprofil $C(y)$ grundsätzlich auch mittels der allgemeinen Transportgleichung 4 bestimmt werden, wobei hier der effektive Diffusionskoeffizient D_m von Wasserdampf in dem Folienmaterial zu verwenden ist. Das Konzentrationsprofil in der Folie $C(y)$ kann jedoch schwerlich direkt gemessen werden. Zu den beiden Seiten der Folie kann jedoch die folienseitige Wasserdampfkonzentration als proportional zur Wasserdampfkonzentration in der Gasphase angesetzt werden:

$$\begin{aligned} C(y=H) &= S_m c_H \\ C(y=H+\delta_m) &= S_m c_{H+\delta} \end{aligned} \quad (8)$$

wobei die Konstante S_m die Wasserlöslichkeit im Folienmaterial beschreibe. Wenn man wiederum annimmt, daß sowohl die Löslichkeit S_m wie auch der Diffusionskoeffizient im Folienmaterial D_m nicht von der absoluten Wasserdampfkonzentration abhängen, ergibt sich wieder, wie in Bild 2 angedeutet, ein lineares Konzentrationsprofil:

$$C(y) = S_m c_H + S_m (c_{H+\delta} - c_H) \frac{y}{\delta_m} \quad (9)$$

Hierbei ist jedoch anzumerken, daß die genannte Annahme nicht immer zutreffend ist (s. u.)

Der Diffusionsstrom durch die Folie kann wieder mittels des ersten Fickschen Gesetzes (Gl. 7) berechnet werden und es ergibt sich die Beziehung:

$$j = -D_m S_m \cdot \frac{c_{H+\delta} - c_H}{\delta_m} \quad (10)$$

Der Koeffizient $D_m S_m / \delta_m$ ist gerade die oben definierte Permeabilität P (m/s) der Folie (Gleichung 1) und beschreibt die Proportionalität zwischen der effektiven Konzentrationsdifferenz zu beiden Seiten der Folie und dem Stoffstrom j (siehe auch [3]):

$$j = P (c_H - c_{H+\delta}) \quad (11)$$

Tatsächlich ist die Löslichkeit sehr stark temperatur- und materialabhängig, so daß damit auch die Permeabilität bzw. die Wasserdampfdurchlässigkeit stark von diesen Parametern abhängt. Außerdem kann die Wasserlöslichkeit im Folienmaterial selbst

eine Funktion der Wasserdampfkonzentration sein. Dies gilt speziell für Wasserdampf-anreichernde (hydrophile) Folien, bei welchen die Permeabilität bei höheren Konzentrationen höher ist; einige Hersteller von Dachmembranen machen daher Werbung für 'intelligente' Membranen, bei welchen der Wasserdampftransport bei höheren Feuchten höher ist als bei niedrigen Feuchtekonzentrationen. In diesem Fall kann die Wasserdampfdurchlässigkeit jedoch keinesfalls allein durch die Konzentrationsdifferenz beschrieben werden, sondern es müssen auch die absoluten Feuchtekonzentrationen zu beiden Seiten der Folie spezifiziert werden. So kann es beispielsweise einen erheblichen Unterschied geben, ob eine Folie nach Klima 'D' unter den Bedingungen 0 %/85 % relative Feuchte (wie vorgeschrieben) oder 15 %/100 % geprüft wird.

Profil oberhalb der Folie

Oberhalb der Folie werde ein paralleler Spülstrom mit der Wasserdampfkonzentration c_∞ angelegt, um die durch die Folie diffundierte Feuchte abzutransportieren und so die Konzentration konstant zu halten. Diese Situation tritt bei den meisten Meßverfahren zur Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit auf. Wir wollen sie im folgenden etwas näher betrachten.

Zunächst ist festzuhalten, daß aufgrund der Haftbedingung die Strömungsgeschwindigkeit direkt an der Folie Null sein muß und sich erst in einem gewissen Abstand die mittlere Anströmgeschwindigkeit einstellen wird. Dieses Gebiet wird als Strömungsgrenzschicht bezeichnet. Auch wenn es i.A. sehr klein ist, hat es doch einen großen Einfluß auf den Wärme- und Stofftransport und ist somit Gegenstand eines wichtigen Teilgebietes der Strömungsmechanik (siehe z. B. [4]). Ebenso baut sich oberhalb der Folie eine Konzentrationsgrenzschicht auf: direkt an der Folie ist die Konzentration wegen des eindiffundierten Wasserdampfs zunächst höher und nimmt innerhalb der Grenzschicht den Wert der Umgebungsfeuchte c_∞ an. Diese Grenzschicht ist in Bild 5 angedeutet. Wegen der höheren Wasserdampfkonzentration unmittelbar an der Folie, wo ja die Strömungsgeschwindigkeit gegen Null geht, wird andererseits die Permeation entscheidend beeinflusst: Je langsamer die Überströmung erfolgt und umso länger die Probe, desto mehr wird die Wasserdampfdiffusion durch die Folie vermindert. Dieser Effekt wird in der Praxis häufig nicht beachtet, beschränkt aber alle Permeationsmeßverfahren für hohe Wasserdampfdurchlässigkeiten. Hwang und Kammermeyer [5] haben darauf hingewiesen, daß die gemessene Wasserdampfdurchlässigkeit keine Eigenschaft der Membran bzw. Folie ist, sondern die Meßbedingungen, welche die Grenzschicht beeinflussen, beinhaltet. Dieser Effekt soll im folgenden mittels der Ergebnisse der Grenzschichttheorie abgeschätzt werden.

Der Stoffstrom durch die Grenzschicht an der Folie kann durch einen Stoffdurchgangskoeffizienten β (in m/s) beschrieben werden, welcher die Proportionalität zwischen der Stoffstromdichte j und der Konzentrationsdifferenz über die Grenzschicht beschreibt:

$$j = \beta (c_{H+\delta} - c_\infty) \quad (12)$$

Der Stoffdurchgangskoeffizient wird häufig in dimensionsloser Form als Sherwoodzahl angegeben, welche die Lauflänge L und den Diffusionskoeffizienten D enthält:

$$Sh = \frac{\beta L}{D} \quad (13)$$

In einem einfachen Modell kann die Folie als Platte mit unendlicher Ausdehnung quer zur Anströmrichtung behandelt werden. Für diese Anordnung existiert eine analytische Lösung der Grenzschichtgleichungen, welche folgende Korrelation der Sherwoodzahl zur Reynoldszahl $Re_L = \frac{u_\infty L}{\nu}$ (ν : kinematische D : Zähigkeit) und zur Schmittzahl $Sc = \nu/D$ angibt [6]:

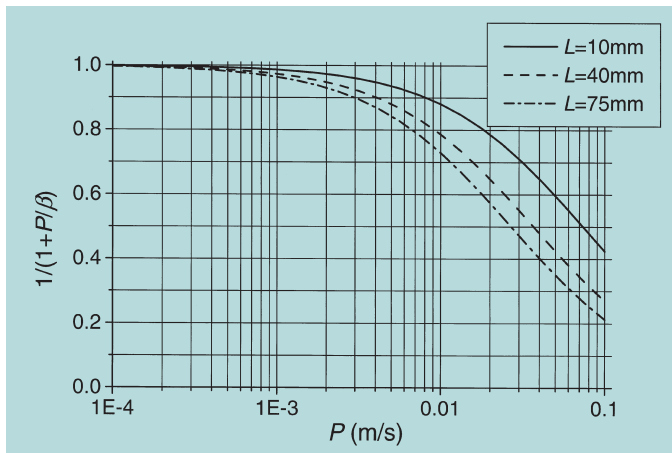


Bild 3. Faktor, welcher das Verhältnis der gemessenen zur tatsächlichen Permeabilität der Folie für verschiedene Lauflängen angibt

$$Sh_L = 0,664 Re_L^{1/2} Sc^{1/3} \quad (14)$$

Es kann nun der Stoffstrom durch die Folie mit dem Stoffstrom durch die Grenzschicht gleichgesetzt werden:

$$j = P(c_H - c_{H+\delta}) = \beta(c_{H+\delta} - c_\infty) \quad (15)$$

Durch Elimination der unbekannten Konzentration an der Folienoberseite kann der Stoffstrom schließlich als Funktion der gesamten Konzentrationsdifferenz $c_{H+\delta}$ angegeben werden:

$$j = \frac{P}{1 + P/\beta} (c_H - c_\infty) \quad (16)$$

Die tatsächliche Wasserdampfdiffusion durch die Folie ist also um einen Faktor $1/(1 + P/\beta)$ reduziert. Dieser Faktor kann aber mittels der Gleichungen 13 und 14 berechnet werden; er ist in Bild 3 als Funktion der Permeabilität für eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von 3 m/s für verschiedene Weglängen L aufgetragen. Wie bereits erwähnt, wird die Wasserdampfdiffusion mit zunehmender Permeabilität und Überströmlänge zunehmend zu klein gemessen.

Auch wenn das verwendete Modell eine relativ grobe Näherung für eine Folie ist, so zeigen die Abschätzungen doch die Problematik bei der Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit auf. Die beschriebenen Grenzschichteffekte werden in der Praxis i.A. nicht beachtet, können jedoch zu einer schlechten Reproduzierbarkeit der Messung durch eine unbemerkte Änderung der Meßbedingungen führen. Es ist ferner unmittelbar einsichtig, daß gerade für hohe Wasserdampfdurchlässigkeiten hohe Überström- bzw. Durchmischungsgeschwindigkeiten gewählt werden sollten.

2.2 Bestimmung der Wasserdampf-Durchlässigkeit durch räumlich aufgelöste Konzentrationsmessungen

Die direkte Messung der Konzentrationsprofile ober- und unterhalb von Folien erlaubt eine direkte Bestimmung der Permeabilität. Kehren wird für die folgenden Überlegungen kurz zu dem Modell aus Bild 2 zurück: Die Folie sei nun auf einem teilweise mit Wasser gefüllten Gefäß aufgespannt und werde mit trockener Luft überströmt, so daß sich die Konzentrationsprofile wie in der Abbildung angedeutet ausbilden. Die Grenzschicht oberhalb der Folie werde jedoch zunächst nicht berücksichtigt, da sie nicht direkt gemessen werden kann; der beschriebene Grenzschichteffekt soll jedoch a-posteriori abgeschätzt werden. Wenn man nun die Permeabilität durch die gesamte Konzentra-

tionsdifferenz $c_H - c_\infty$ berechnet, kann man den Stoffstrom durch die ruhende Luftsäule unter der Folie (Gleichung 7) und durch die Folie gleichsetzen und man erhält:

$$-D \frac{dc}{dy} = P(c_H - c_\infty) \quad (17)$$

Die Permeabilität P wird also bestimmt durch den Diffusionskoeffizient in der Gasphase und die meßbaren Konzentrationen c :

$$P = D \frac{dc}{dy} \frac{-1}{c_H - c_\infty} \quad (18)$$

Mit dem linearen Konzentrationsprofil 6 und der Sättigungsbedingung an der Wasseroberfläche $c_o = c_s$ kann die Permeabilität auch durch den Differenzenquotienten ausgedrückt werden:

$$P = \frac{D}{H} \frac{c_s - c_H}{c_H - c_\infty} \quad (19)$$

bzw. als Funktion der Wasserdampfkonzentration an der Folie c_H und der Luftsäulenhöhe in dem Gefäß:

$$P(c_H; H) = \frac{D}{H} \left(\frac{c_s - c_\infty}{c_H - c_\infty} - 1 \right) \quad (20)$$

Mit der Einführung der dimensionslosen Konzentration c^* :

$$c^*(y) = \frac{c(y) - c_\infty}{c_s - c_\infty} \quad (21)$$

läßt sich Gleichung 20 auch ausdrücken als:

$$P = \frac{D}{H} \left(\frac{1}{c^*(H)} - 1 \right) \quad (22)$$

Die dimensionslose Konzentration ist die auf die gesamte Konzentrationsdifferenz bezogene Differenz der Konzentration $c(y)$ zur Feuchtekonzentration oberhalb der Folie. Die Konzentration an der Folienunterseite ist insbesondere eine Funktion der Permeabilität und der Luftsäulenhöhe:

$$c^*(P; H) = \frac{1}{PH/D + 1} \quad (23)$$

Durch die Variation der Luftsäulenhöhe läßt sich der Meßbereich also etwas variieren. In Bild 4 ist die dimensionslose Konzentration als Funktion der Luftsäulenhöhe für verschiedene Werte der Permeabilität aufgetragen. Aus der Grafik bzw. aus Gleichung 23 läßt sich eine erste, grobe Abschätzung des Meßbereichs ableiten: Nimmt man beispielsweise an, daß an der Folie Konzentrationen in einem Bereich von $c^*(H) = 0,1$ bis $c^*(H)$

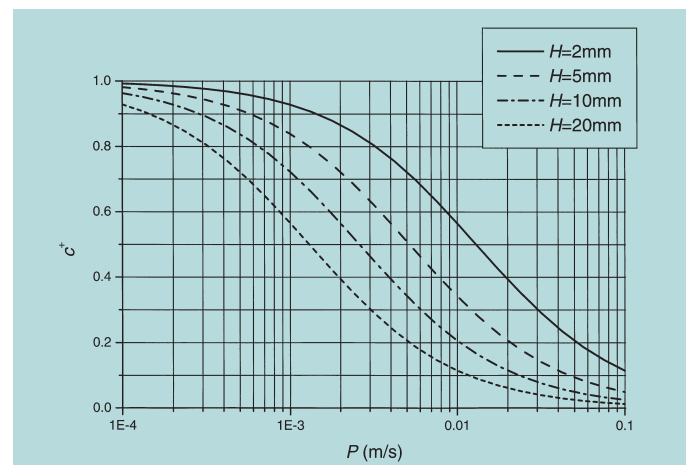


Bild 4. Dimensionslose Konzentration an der Unterseite der Folie als Funktion der Permeabilität bei verschiedenen Diffusionshöhen H

= 0,9 gut aufgelöst werden können, so entspricht dies bei einer Luftsäulenhöhe von 10 mm einem Meßbereich von $P = 3 \cdot 10^{-4}$ m/s bis $P = 2 \cdot 10^{-2}$ m/s. Bei einer Temperatur von 23 °C und einer Differenz der relativen Feuchten von 85 % (Klima D) entspricht dies einem Wasserdampf-Durchlässigkeitsbereich von 450 g/(m² · 24 h) bis 30000 g/(m² · 24 h).

3 Diodenlaserspektrometer und Meßaufbau

3.1 Diodenlaserspektrometer

Die Methode der Diodenlaser-Absorptionsspektroskopie wird seit einigen Jahren zur quantitativen Gasanalytik in verschiedenen Bereichen eingesetzt [7]. Dieses Lasermeßverfahren bietet einige herausragende Eigenschaften, weswegen es zunehmend an Bedeutung gewinnt. So erlaubt es insbesondere berührungslose, schnelle und genaue Konzentrationsbestimmungen. Im Gegensatz zu den breitbandigen, spektroskopischen Verfahren, ist es durch den Einsatz frequenzdurchstimmbarer Diodenlaser möglich, einzelne Absorptionslinien abzutasten. Hierdurch wird neben der hohen Empfindlichkeit auch eine extrem geringe Querempfindlichkeit gegenüber anderen Gasen gewährleistet. Ein ausführlicher Überblick über die Meßmethode und deren Anwendung zur Untersuchung von Diffusionsprozessen sowie zur Spurenfeuchtedetektion ist bei Schirmer [8] gegeben.

Wenn der Laserstrahl der Intensität I_0 auf der Länge L durch ein Gas mit einem Wasserdampfgehalt c tritt, so wird am Detektor die Intensität

$$I = I_0 \cdot \exp\left(-\alpha \int_0^L c(z) dz\right) \quad (24)$$

detektiert, wobei α den Absorptionsquerschnitt von Wasserdampf bei der Laserwellenlänge beschreibt. Für kleine Exponenten kann die Exponentialfunktion linear genähert werden, so daß sich für die Absorption, also den relativen Anteil der absorbierten Intensität, der Ausdruck ergibt:

$$a = \frac{\Delta I}{I_0} = \alpha \int_0^L c(z) dz \quad (25)$$

Das der Absorption proportionale Meßsignal ergibt also die entlang des Laserstrahls gemittelte Konzentration. Eine räumliche Auflösung kann in den beiden zum Laserstrahl senkrechten Richtungen erreicht werden.

Der schematische Aufbau des entwickelten Diodenlaser-Absorptionsspektrometers ist in Bild 5 dargestellt. Die Laserstrahlung wird mittels zweier asphärischen Linsen auf einen Durchmesser von 200 µm kollimiert. Die gesamte optische Weglänge von der Laserdiode bis zum Photodetektor beträgt 70 mm und ist somit recht kompakt. Die eigentliche Meßstrecke von der zweiten Linse bis zum Detektor beträgt 22 mm. Die gesamte Optik ist auf einer kleinen optischen Bank montiert, welche mittels eines Schrittmotors in der Vertikalen (y-Richtung) traversierbar ist. Der gesamte Aufbau ist weiterhin in einem Plexiglasgehäuse mit einem Volumen von 6,25 l integriert und mit Luft mit einem wohldefinierten Feuchtegehalt spülbar.

Als Laserquelle kommt eine DFB-Laserdiode bei 1,39 µm mit einer Leistung von etwa einem Milliwatt zum Einsatz. Diese Wellenlänge koinzidiert mit einer der stärksten Absorptionslinien von Wasserdampf im nahen Infrarot. Um eine hohe Nachweisempfindlichkeit zu erreichen, wird die Laserwellenlänge mit einer Frequenz von 30 kHz moduliert und phasenempfindlich bei der zweifachen Modulationsfrequenz detektiert (Lock-In Verfahren). Die Laserwellenlänge wird ferner mittels einer Laserstrom-Rampe moduliert, wodurch die gesamte Absorptionslinie kontinuierlich abgetastet werden kann. Das der

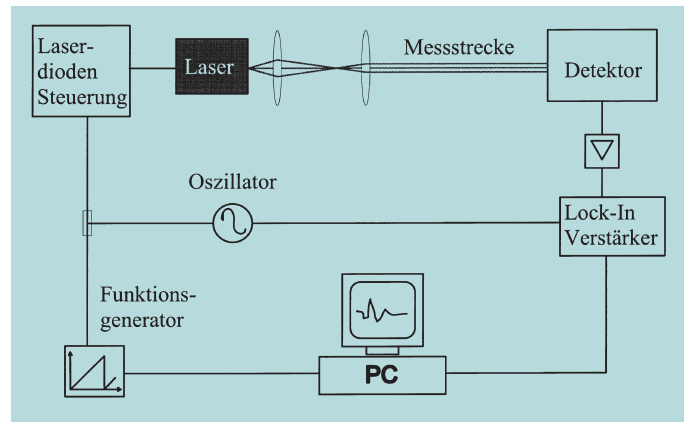


Bild 5. Aufbau des entwickelten Diodenlaser-Absorptionsspektrometers zur räumlich aufgelösten Wasserdampfdetektion in der Nähe einer Folie

Absorption und damit auch der Konzentration proportionale Meßsignal S wird schließlich mittels einer geeigneten Signalverarbeitung ausgewertet. Eine ausführliche Beschreibung des Meßsystems und dessen Anwendung für Diffusionsuntersuchungen ist auch bei Schirmer et al. [9] gegeben.

Messung der Permeabilität

Zur Kalibrierung des Spektrometers kann das Meßsignal S durch eine lineare Kalibrierkurve mit der Kalibrierkonstanten κ und der mittleren Wasserdampfkonzentration c entlang einer Meßstrecke der Länge l dargestellt werden:

$$S = \kappa c l + B \quad (26)$$

Der Untergrund B beinhaltet die als konstant angenommene Wasserdampfabsorption außerhalb der Meßstrecke. Wenn man nun gemäß dieser Beziehung die Konzentrationen c in den Gleichungen 18 und 19 durch die entsprechenden Meßsignale S ersetzt, so ergibt sich für die Permeabilität der Ausdruck:

$$P = D \frac{dS}{dy} (S_{\infty} - S_H)^{-1} \quad (27)$$

$$= \frac{D}{H} \frac{S_s - S_H}{S_H - S_{\infty}} \quad (28)$$

Die Kalibrierkonstante als auch der Untergrund fällt heraus und die Messung der Permeabilität ist somit kalibrierfrei.

3.2 Meßaufbau für Konzentrationsmessungen

Als Probengefäße, auf welchen die Folien befestigt wurden, kamen teilweise mit Wasser gefüllte Kunststoffküvetten mit einer optischen Weglänge von 10 mm zum Einsatz. Wegen der kleinen Probenfläche von nur einem Quadratzentimeter und der groben Struktur der Folien wurden diese mit den Küvetten verklebt, damit kein Wasserdampf an den Rändern austreten konnte. Für die Permeationsmessungen wurden zwei verschiedene experimentelle Anordnungen untersucht, welche in Bild 6 dargestellt sind. Für die erste Methode wurde die Küvette mit Trockenluft überspült, so daß sich ein Konzentrationsprofil wie in Bild 2 einstellte. Für die zweite Konfiguration wurde eine zweite, teilweise mit Trockenmittel (Baylioth Molekularsieve) Küvette umgekehrt auf der Dachfolie befestigt, so daß sich sowohl unterhalb als auch oberhalb der Folie ein lineares Konzentrationsprofil aufbauen konnte. Das Trockenmittel wurde durch eine zweite, in der Küvette eingeklemmten Folie mit hoher Wasserdampfdurchlässigkeit zurückgehalten.

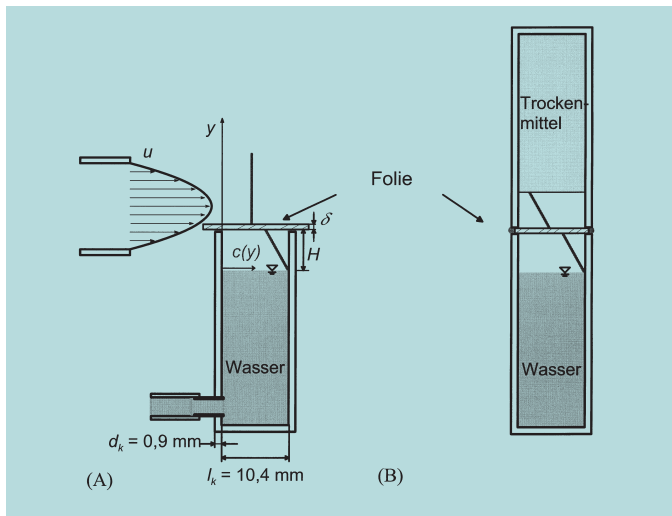


Bild 6. Experimentelle Anordnungen zur Messung der Wasserdampfdiffusion durch Folien

Der Meßstrahl tritt nun parallel zur Folie durch die Küvette hindurch. Zur Messung der Konzentrationsprofile wird er senkrecht hierzu traversiert, so daß das Konzentrationsprofil von der Wasseroberfläche bis in den Bereich oberhalb der Folie bzw. bis zum Trockenmittel mit einer Auflösung von 200 µm vermessen werden kann.

4 Wasserdampf-Durchlässigkeitsmessungen

Als Testfolien wurden Polyurethan-beschichtete Polypropylen Spinnfließe der Firma BWK Dachzubehör, Wolpertshausen untersucht. Diese Folien kommen als diffusions-offene Dachunterspannbahnen bei Dachkonstruktionen zum Einsatz. Die Folien sind 0,5 mm dick und besitzen eine raue Oberflächenstruktur. Für die Messungen wurde jeweils die Seite mit der rauheren Oberfläche der trockeneren Seite zugewandt.

In diesem Abschnitt wollen wir nun die Messungen an diesen Dachfolien vorstellen und damit die Möglichkeiten des Meßsystems aufzeigen. Wir diskutieren zunächst die Anordnung, welche im linken Teil von Bild 6 dargestellt ist und bezeichnen diese im folgenden als 'Methode A'. Es folgt dann die Beschreibung einer Messung nach der alternativen Anordnung (rechter Teil der Abbildung), welche als 'Methode B' bezeichnet werde.

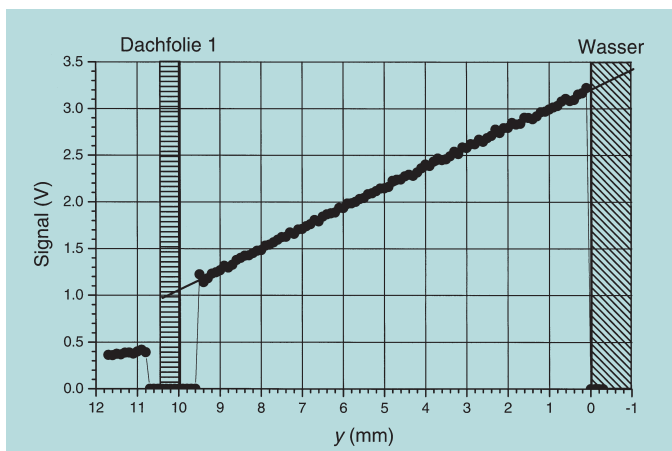


Bild 7. Konzentrationsprofile für die Wasserdampf-Durchlässigkeit durch die Dachfolie 'Allfo Top Light' nach der Methode A

4.1 Methode A

Für die Messung der Permeabilität nach dieser Methode kommt zunächst die Gleichung 27 zur Anwendung. Diese muß jedoch noch etwas modifiziert werden, um der Verkürzung der optischen Weglänge beim Durchtritt des Meßstrahls durch die Küvette mit den beiden Fenstern der Dicke d_k Rechnung zu tragen. Dies geschieht mittels des Geometriefaktors $\gamma = (L - 2d_k)/L$ mit der gesamten optischen Weglänge L , so daß sich für die Beziehung der Permeabilität ergibt:

$$P = D \frac{dS}{dy} (\gamma S_\infty - S_H)^{-1} \quad (29)$$

Die relative Meßunsicherheit der Meßwerte von P wird durch die Unsicherheit von $\Delta S_H = dS/dy \cdot \Delta H$, ΔS_∞ und der Ableitung $\Delta dS/dy$ bestimmt:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{1}{\gamma \cdot S_\infty - S_H} \cdot \sqrt{\left(\frac{dS}{dy} \Delta H\right)^2 + (\gamma \cdot \Delta S_\infty)^2 + \left(\frac{P}{D} \cdot \Delta \frac{dS}{dy}\right)^2} \quad (30)$$

Der Diffusionskoeffizient kann nach folgender empirischen Formel ausgewertet werden [10]:

$$D = \frac{2,31 \cdot 10^{-5} \text{ hPa} \left(\frac{T}{273 \text{ K}}\right)^{1,81} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}{p} \quad (31)$$

In Bild 7 ist eine Messung für eine Dachfolie (Typ 'Allfo Top Light') dargestellt. Die Folie wurde mit Trockenluft mit einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von 3 m/s überströmt um den ausdiffundierten Wasserdampfgehalt abzuführen. Wie aus der Abbildung ersichtlich, liegen bei der Folie in einem Bereich von etwa 1,3 mm keine Meßdaten vor. Dies rührt daher, daß der Strahl durch die Folie abgeschnitten wird und man aufgrund der Küvettenkanten und einer möglichen Verkipfung der Meßstrahls relativ zur Folie nicht beliebig nahe an die Folie herankommt. Es wird angenommen, daß sich die Folie in der Mitte dieses Bereichs bei $y = (10,20 \pm 0,15)$ mm befindet. Die Permeabilität wurde für diese Messung mittels den Beziehungen 29 und 30 zu $P = (7,9 \pm 0,8) \cdot 10^{-3}$ m/s berechnet. Die Auswertung vier weiterer Messungen ergab einen Wert von:

$$P = (9,1 \pm 0,9) \cdot 10^{-3} \text{ m/s.}$$

Die Meßunsicherheit der Einzelmessungen war in etwa vergleichbar mit der Standardabweichung der Meßreihe. Die relative Unsicherheit betrug 10 %.

Es soll nun der Effekt der Konzentrationsgrenzschicht an der Folienoberseite gemäß den Überlegungen aus Abschnitt 2 abgeschätzt werden. Mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit von 3 m/s und der Überströmlänge von $l = 10$ mm (dies ist gerade die Schichtdicke der Küvette) ergibt sich für die Sherwoodzahl nach Gleichung 14 ein Wert von 24,6 und für den Stoffdurchgangskoeffizienten ergibt sich nach Gleichung 12 $\beta = 0,064$ m/s. Die für die gesamte Konzentrationsdifferenz $c_H - c_\infty$ berechnete Permeabilität ist also näherungsweise um einen Faktor $1/(1+P/\beta)$ kleiner als die tatsächliche Permeabilität der Folie (Gleichung 16). Diese Abweichung liegt in derselben Größenordnung wie die aus den Meßdaten berechnete Meßunsicherheit.

Die Messung einer weiteren, weniger durchlässigen Dachfolie (Typ 'Trobafo') ist in Bild 8 dargestellt. Die Wasserdampf-Durchlässigkeit dieser Folie wurde vom Hersteller mit einem Wert von $2,8 \cdot 10^{-4}$ m/s spezifiziert. Aus der dargestellten Messung ergibt sich ein Wert von:

$$P = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ m/s.}$$

Dieses Ergebnis stimmt im Rahmen der Meßunsicherheit gut mit dem spezifizierten Wert überein.

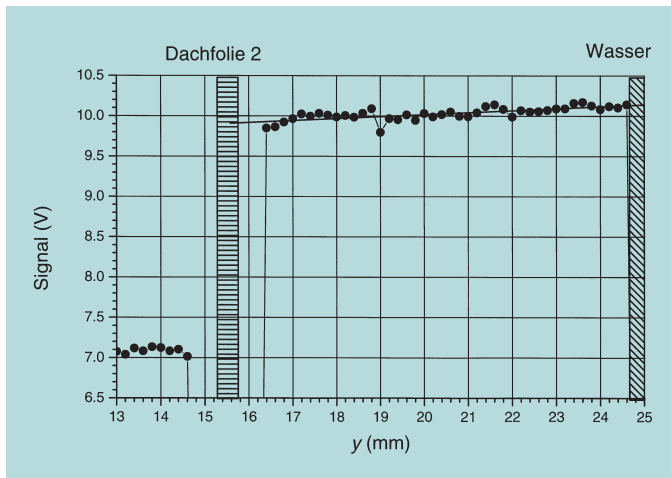


Bild 8. Konzentrationsprofile für die Wasserdampf-Durchlässigkeit durch die Dachfolie 'Trobafo' nach der Methode A

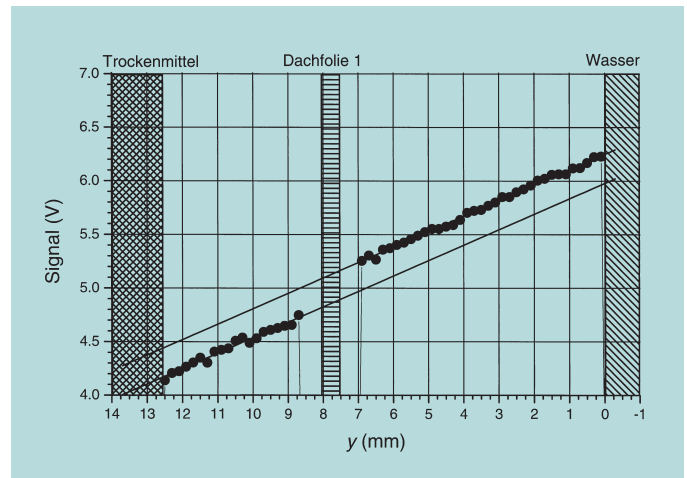


Bild 9. Konzentrationsprofile für die Wasserdampf-Durchlässigkeit durch die Dachfolie 'Alifo Top Light' nach der Methode B

4.2 Methode B

Es soll nun kurz auf die zweite in Bild 6 vorgeschlagene Meßanordnung eingegangen werden. Auch wenn die Probenpräparation hierfür etwas aufwendiger erscheint, ist diese Methode insofern interessant, als daß die Wasserdampf-Durchlässigkeit hierbei ohne eine Luftbewegung und somit ohne Grenzschichteinfluß untersucht werden kann.

Für die Messung wurde die Probe zwischen den beiden Küvetten verklebt. Die obere Küvette war teilweise mit einem Trockenmittel befüllt, welches mittels einer weiteren, in die Küvette geklemmten Folie zurückgehalten wurde. Da hier keine Luftbewegung stattfindet, bildet sich nun auch in der oberen Küvette zwischen der Folie und dem Trockenmittel ein lineares Konzentrationsprofil aus. Ein Gleichsetzen der Stoffströme durch die untere Küvette, die Folie und die obere Küvette ergibt die Beziehung:

$$-D \frac{dc}{dy} \Big|_u = -P(c_o(H + \delta_m) - c_u(H)) = -D \frac{dc}{dy} \Big|_o \quad (32)$$

mit den Indizes u für die untere und o für die obere Küvette. Der Anstieg der Profile in den beiden Küvetten muß also derselbe sein; ist dies nicht der Fall, so ist dies ein Indiz dafür, daß zusätzlicher Wasserdampf in Querrichtung durch die Folie ein- oder ausströmt. Wenn man die Beziehung nach der Permeabilität auflöst, so ergibt sich:

$$\begin{aligned} P &= D \frac{dc}{dy} \left((c_o(H) - c_u(H)) + \frac{dc}{dy} \cdot \delta_m \right)^{-1} \\ &= D \frac{dS}{dy} \left(\Delta S + \frac{dS}{dy} \cdot \delta_m \right)^{-1} \end{aligned} \quad (33)$$

mit dem Versatz der beiden Profile $\Delta S = S_o(H) - S_u(H)$. Der Term in den Klammern beschreibt die Konzentrationsdifferenz über die Folie. Da die Permeabilität nun nicht von dem Meßsignal unmittelbar an der Folie, sondern nur vom Versatz der beiden Konzentrationsprofile abhängt, ist der Informationsverlust in der Nähe der Folie nicht von Bedeutung. Andererseits muß die Dicke der Folie im Gegensatz zur Methode A bekannt sein. Die relative Meßunsicherheit der Permeabilitätsmessung wird nun durch die Unsicherheit im Versatz der Profile, die Unsicherheit der Foliendicke und die Unsicherheit in dem Anstieg der Profile bestimmt:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{1}{\Delta S + dS/dy \cdot \delta_m} \cdot \sqrt{(\Delta(\Delta S))^2 + \left(\frac{dS}{dy} \cdot \Delta \delta_m\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{dS/dy} \Delta \frac{dS}{dy}\right)^2} \quad (34)$$

Eine Messung nach dieser Methode an der Folie von Typ 'Alifo Top Light' ist in Bild 9 dargestellt. Die Folie wurde für die Messungen zwischen den beiden Küvetten verklebt und die Feuchtekonzentration in der Apparatur auf einen Wert entsprechend der Feuchtekonzentration an der Folie eingestellt, um so die Diffusion in der Richtung parallel zur Folie zu vermeiden.

Die beiden Profile wurden mittels einer linearen Regression approximiert. Die Anstiege der beiden Kurven wichen weniger als 1 % voneinander ab. Für den Versatz der beiden Profile ergab sich aus der Messung ein Wert von $\Delta S = 0,01$ V. Die Permeabilität betrug somit $P = 1,04 \pm 0,03 \cdot 10^{-2}$ m/s, wobei eine relative Unsicherheit von 5 % für die Foliendicke angenommen wurde. Die Auswertung fünf weiterer Messungen an derselben Folie ergab schließlich:

$$P = (9,9 \pm 0,8) \cdot 10^{-3} \text{ m/s.}$$

Dieser Wert stimmt im Rahmen der Meßunsicherheit mit dem Meßwert nach der Methode A am selben Folientyp überein. Wie erwartet, ist die Unsicherheit einer Einzelmessung geringer als nach der Methode A. Allerdings ist die Standardabweichung der Meßreihen vergleichbar. Ein möglicher Grund hierfür ist die doch nicht ganz konstante Feuchtekonzentration außerhalb der Küvetten.

5 Schlußfolgerungen und abschließende Bemerkungen

Die in dieser Arbeit vorgestellte Meßtechnik zur lokalen Messung der Wasserdampfkonzentrationsverteilung ober- und unterhalb einer Folie ermöglicht relativ schnelle Messungen der Dampfdurchlässigkeit. Damit ist prinzipiell die Möglichkeit gegeben, umfassende Untersuchungen anzustellen, um zeitliche Änderungen der Permeabilitätseigenschaften von Folien zu bestimmen. Die besonderen Eigenschaften des vorgestellten Meßverfahrens lassen absolute Wasserdampf-Durchlässigkeitsmessungen ohne die sonst notwendige Kalibrierung zu. Damit sind verlässliche Untersuchungen von Folien möglich, wie sie im Hausbau für Dampfsperren und Unterspannbahnen Anwendung finden. Offene Fragen bezüglich der Tauglichkeit neuer Folien, um im Hausbau Anwendung zu finden, lassen sich mittels des vorgeschlagenen Meßverfahrens zur Bestimmung der Dampfdurchlässigkeit von Folien beantworten. Die Meßmethode ist prinzipiell automatisierbar und somit auch im Hinblick auf industrielle Anwendungen von Interesse. Weitere Entwicklungen sind jedoch notwendig, vor allem im Hinblick auf die Probenpräparation.

Danksagung

Die Autoren danken der Firma BWK Dachzubehör, Wolpertshausen für die zur Verfügungstellung der Dachfolien. Weiterhin sei Herrn Dr. Adrian Melling für seine Unterstützung bei der Meßgeräteentwicklung gedankt.

Literatur

- [1] K. Becker and R. Heiss: Wasserdampfdurchlässigkeit einiger Packstoffe bei tiefen Temperaturen, Verpackungs-Rundschau, Technisch-wissenschaftliche Beilage, 21(10):75-79, 1970.
- [2] H. D. Baehr and K. Stephan: Wärme- und Stoffübertragung. Springer Verlag Berlin, 3. Auflage, 1998.
- [3] E. L. Cussler: Diffusion, Mass Transfer in Fluid Systems. Cambridge University Press, 1984.
- [4] H. Schlichting and K. Gersten: Grenzschicht-Theorie. Springer Berlin, 1997.
- [5] S.-T. Hwang and K. Kammermeyer: Membranes in separations, volume VII of Techniques of Chemistry. Wiley, New York, 1975.
- [6] A. Mersmann: Stoffübertragung. Springer Berlin, 1986.
- [7] D. J. Brassington: Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy for the Measurement of Atmospheric Species, chapter 3, pages 85-148. Spectroscopy in Environmental Science. Wiley, New York, 1995.
- [8] B. Schirmer: Hochaufgelöste Wasserdampfdetektion mittels Diodenlaser-Absorptionsspektroskopie. Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg 2001. ibidem-Verlag, Stuttgart, 2002, ISBN 3-89821-186-X.
- [9] B. Schirmer, A. Melling und F. Durst: Spektrometer für experimentelle Untersuchungen der Wasserdampfdiffusion in Gasen. Technisches Messen 6/2002 (2002), S. 292-301, Oldenbourg Verlag.
- [10] R. Schirmer: Die Diffusionszahl von Wasserdampf-Luft-Gemischen und die Verdampfungsgeschwindigkeit. Verfahrenstechnik: Schriftenfolge für Chemie-Ingenieure, Apparatebauer und verwandte Berufe, Bd. 6:170-177, 1938, Arbeitsgemeinschaft Verfahrenstechnik im VDI Berlin.