

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 51 (1960)  
**Heft:** 25

**Artikel:** Luftfeuchtigkeit und Faserstoffe  
**Autor:** Grimm, G.O.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-917095>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 24.05.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

GEMEINSAMES PUBLIKATIONSORGAN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS (SEV) UND  
DES VERBANDES SCHWEIZERISCHER ELEKTRIZITÄTSWERKE (VSE)

## Luftfeuchtigkeit und Faserstoffe

Von G. O. Grimm, Rapperswil.

551.571 : 621.315.614

*Im ersten Teil wird die Abhängigkeit des Feuchtigkeitsgehaltes von Celluloseprodukten in Funktion der Luftfeuchtigkeit gezeigt. Im Bereich des Raumklimas hängt der Gleichgewichtswassergehalt von Zellstoffen (Papier, Preßspan, usw.) stark von der relativen Feuchtigkeit, aber fast gar nicht von der absoluten Feuchtigkeit der Luft ab. Die Höhe des Wassergehaltes ist praktisch unabhängig von der technologischen Erscheinungsform der Celluloseprodukte, die Geschwindigkeit, mit der die Feuchtigkeit aufgenommen wird, hängt dagegen sehr stark von der geometrischen Gestalt ab, in der die Gebilde aus Cellulose vorliegen. Im zweiten Teil werden solche Unterschiede an Hand von Versuchsergebnissen gezeigt und die sich daraus ergebenden Folgerungen für die Praxis zusammengefasst.*

*Dans la première partie, l'auteur montre la relation entre la teneur en humidité de produits en cellulose et l'humidité de l'air. Dans l'étendue du climat des locaux, la teneur en eau pour un poids donné de cellulose (papier, presspan, etc.) dépend beaucoup de l'humidité relative de l'air, mais non de l'humidité absolue. La teneur en eau est pratiquement indépendante de la forme technologique des produits en cellulose, tandis que la vitesse avec laquelle l'humidité est absorbée dépend très grandement de la forme géométrique des structures en cellulose.*

*Dans la deuxième partie, ces différences sont indiquées à l'aide de résultats d'essais et les conséquences qui en découlent pour la pratique sont résumées.*

Unter den Isoliermaterialien der Elektrotechnik kommt den Fäden und Bändern aus Baumwolle, den Papieren und den Tafeln aus Preßspan, Transformierboard, usw. eine grosse Bedeutung zu. Alle diese Werkstoffe bestehen im wesentlichen aus Cellulose. In ihrem natürlichen Zustand enthalten sie eine bestimmte Menge Feuchtigkeit, welche die Zähigkeit, Geschmeidigkeit und Biegsamkeit günstig beeinflusst. Die ausgezeichneten elektrischen Eigenschaften dagegen erhalten die Celluloseprodukte erst im sorgfältig getrockneten Zustand.

Im Verlauf der Montage von elektrischen Apparaten, z. B. Transformatoren, treten Änderungen von Abmessungen ein, die von Dickenänderungen der organischen Isolierstoffe ausgehen. Im folgenden soll auf dieses Verhalten näher eingegangen werden, wobei die Versuchsergebnisse eines einzelnen Isoliermaterials, nämlich des Transformierboards, eingehender berücksichtigt werden.

Alles, was aus Cellulose besteht, tauscht mit der umgebenden Luft Feuchtigkeit aus, und es stellt sich bei genügend langer Dauer ein wohldefinierter Gleichgewichtszustand ein.

In der atmosphärischen Luft ist immer etwas Wasser in Dampfform enthalten. Unter Raumklima-Verhältnissen kann die Luft nur ein begrenztes Quantum Wasser aufnehmen, dann ist sie gesättigt. Als «absolute Feuchtigkeit» bezeichnet man das Gewicht des Wasserdampfes, das im Einheitsvolumen der Luft bei bestimmtem Druck und gegebener Temperatur enthalten ist. Die «relative Feuchtigkeit» gibt an, wieviel Prozent Wasser, bezogen auf den Sättigungswert, in der Luft vorhanden sind. Mit steigender Temperatur nimmt die Wasseraufnahmefähigkeit der Luft stark zu. Während 1 m<sup>3</sup> Luft bei

15 °C im gesättigten Zustand 12,7 g Wasser enthält, kann sie bei 30 °C bereits 30 g Wasser bis zur Sättigung aufnehmen.

Mit zunehmender relativer Feuchtigkeit der Luft steigt der Gleichgewichtswassergehalt des Zellstoffes stark an. Erstaunlicherweise aber ändert die Feuchtigkeitsmenge im Zellstoff nur wenig mit zunehmender absoluter Feuchtigkeit bei gleichbleibender relativer. An einem Beispiel ausgedrückt: Ob die Luft bei 15 °C eine relative Feuchtigkeit von 65 % und damit etwa 8,4 g Wasser im m<sup>3</sup> enthält, oder bei 30 °C eine relative Feuchtigkeit von 65 % und 20 g Wasser im m<sup>3</sup> enthält, ändert an der Wasseraufnahme trockener Cellulose nur wenig; sie liegt in beiden Fällen im Bereich von  $\approx 8\%$ .

Bei gegebenem Klimazustand stellt sich die Gleichgewichtsmenge des Wassers in der Cellulose verschieden ein, je nachdem, ob sich das Material von einem trockeneren oder feuchteren Anfangszustand her dem Gleichgewicht nähert. Wird z. B. ein trockenes Stück Zellstoff in eine Umgebung von 20 °C und relativer Feuchtigkeit von 65 % gebracht, so wird es nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes  $\approx 8\%$  Wasser enthalten, während das gleiche Stück Zellstoff in der gleichen Umgebung  $\approx 10\%$  Wasser enthalten wird, wenn es von einem stark feuchten Zustand her den Gleichgewichtszustand erreicht hat. Fig. 1 gibt die Gleichgewichtswerte für Adsorption und Desorption praktisch reiner Cellulose in Funktion der relativen Feuchtigkeit an.

Dieser Effekt bewirkt auch, dass ein Blatt Papier, das in der Luft von 65 % relativer Feuchtigkeit 8 % Wasser aufgenommen hat, erst wieder Wasser abgibt, wenn die relative Feuchtigkeit auf Werte unter 48 % sinkt.

Der Feuchtigkeitsgehalt ist für praktische Zwecke für alle Sorten und Arten von Isolierpapier und Preßspan etwa gleich.

Adsorptions- und Desorptionsvorgänge brauchen viel Zeit, da ja das Wasser durch die engen Poren der Faserfilze transportiert werden muss. Je mehr sich der Zustand dem Gleichgewicht nähert, desto kleiner wird auch die treibende Kraft, d. h. die Dampfdruckdifferenz zwischen dem Wasser in den

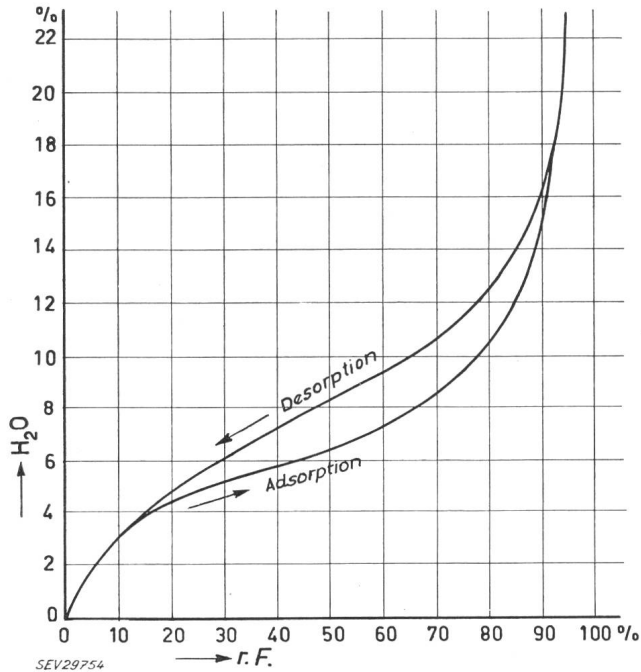


Fig. 1

Feuchtigkeitsgehalt von Cellulose in Abhängigkeit von der relativen Feuchtigkeit der Luft nach Erreichung des Gleichgewichtszustandes bei Adsorption und Desorption  
r. F. relative Luftfeuchtigkeit

Poren und in der umgebenden Luft. Die Austauschgeschwindigkeit hängt aber auch ab von der Beschaffenheit und der geometrischen Gestalt des Materials. Bei einem spezifisch schweren Produkt sind die Poren enger und setzen der Strömung grösseren Widerstand entgegen als bei einem spezifisch leichten. Bezogen auf gleiches Gewicht, hat ein Seidenpapier eine Oberfläche, die einige hundert Mal grösser ist als diejenige eines Distanzierklotzes. Je grösser die Oberfläche pro Gewichtseinheit ist, desto schneller kann der Feuchtigkeitsaustausch zwischen Cellulose und Luft erfolgen.

Sobald es sich nicht mehr um lose Proben von Transformerboard, Papier oder dergleichen handelt, sondern um Isolationsteile, die in Apparate oder Maschinen eingebaut sind, wird der Feuchtigkeitstransport auch von der Bauart des Apparates beeinflusst. Die Verbindung zwischen Isolationsteil und Luft ist in diesem Fall nicht mehr allseitig frei, sondern durch andere Bauteile mehr oder weniger stark abgesperrt.

Diese Ausführungen zeigen, dass es wohl möglich ist, eindeutige zahlenmässige Angaben zu machen über den Wassergehalt im Gleichgewichtszustand, dass es aber unmöglich ist, etwas Allgemeingültiges über die Austauschgeschwindigkeit zu sagen.

Was geschieht nun, wenn Werkstoffe aus Cellulose Feuchtigkeit aufnehmen? Die einzelnen Cellulosefasern quellen in ihrem Querschnitt, nicht aber in ihrer Länge. Bei Papieren und Preßspan liegen die Fasern vorwiegend in der Blattebene, wobei die Verteilung zwischen Länge oder Laufrichtung und Breite oder Querrichtung Unterschiede aufweist. Aus dieser Faseranordnung ergeben sich verschiedene Beträge für die Quellung in den verschiedenen Richtungen, wobei für Preßspan (Transformerboard) das Verhältnis Länge zu Breite zu Dicke  $\approx 2 : 3 : 20$  beträgt. Da sich die Änderung der Abmessungen in Richtung der Dicke am deutlichsten manifestiert, wird in Fig. 2 die Dickenänderung in Funktion des Wassergehaltes für Transformerboard angegeben. Die Kurve stellt das Ergebnis von Messungen dar an Tafeln von Transformerboard IV von 1...20 mm Dicke, und zwar sowohl bei Adsorption, als auch bei Desorption.

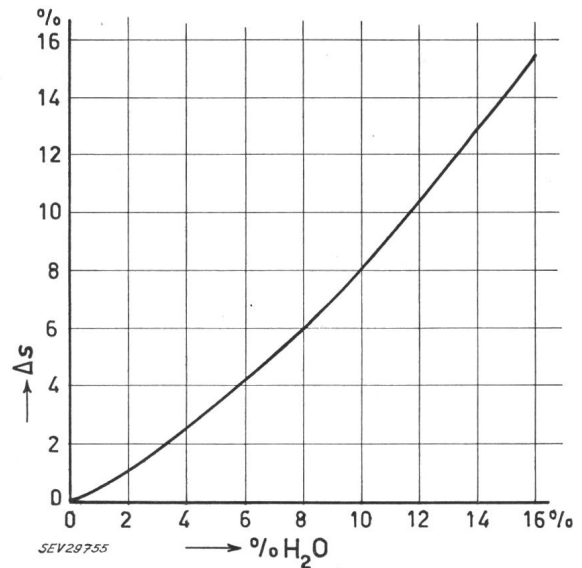


Fig. 2

Zunahme der Dicke von Transformerboard IV bei zunehmendem Wassergehalt

Für die Schwindung bei Wasserabgabe gilt dieselbe Kurve.  $\Delta s$  Prozentuale Dickenzunahme bezogen auf den Trockenzustand des Werkstoffes;  $\% H_2O$  Prozentualer Wassergehalt bezogen auf den Trockenzustand des Werkstoffes

Wie bereits erwähnt, können keine allgemeingültigen Angaben über die Geschwindigkeit des Feuchtigkeitsaustausches — und damit der Dickenänderung — gemacht werden; es sollen daher im folgenden einige Versuchsergebnisse angegeben werden, um zu zeigen, welcher Art die Faktoren sind, die Einfluss auf die Austauschgeschwindigkeit der Feuchtigkeit haben.

Proben von verschiedener Dicke, teils in Form von schmalen Streifen, teils in Form von Quadraten, wurden zuerst getrocknet und dann in verschiedener Luftfeuchtigkeit gelagert. Dabei erfolgt die Zunahme des Wassergehaltes, und damit der Dicke, ganz unterschiedlich schnell. Die Zunahme erfolgt, besonders ausgeprägt am Anfang, um so rascher, je grösser die Oberfläche im Verhältnis zum Gewicht ist. In Fig. 3 ist die Anfangssteigung der Quellungskurven als Tangens des Neigungswinkels  $\alpha$  aufgetragen in Abhängigkeit von der spezifischen Ober-

fläche [cm<sup>2</sup>/g] für 3 verschiedene Feuchtigkeitszustände der Luft. Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Zahlenwerte nur gerade für die im Versuch vorherrschenden Bedingungen gelten.

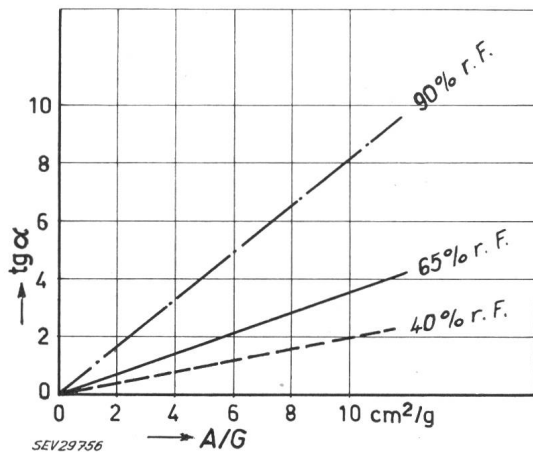


Fig. 3

Zunahme des Wassergehaltes pro Zeiteinheit in Funktion der spezifischen Oberfläche

Die Zunahme des Wassergehaltes ist dargestellt als Neigungswinkel  $\alpha$  der Wasseraufnahmekurven am ersten Tag der Versuchsdauer

A Oberfläche des Preßspans; G Gewicht des Preßspans  
r. F. relative Luftfeuchtigkeit

Fig. 4 zeigt die gleichen Versuchsdaten in anderer Auswertung. Die Zunahme der Dicke ist in Funktion der Zeit aufgezeichnet in Form von zwei Grenzkurven für jeden Feuchtigkeitszustand. Die Zunahme für die individuellen Prüflinge liegt je nach den geometrischen Abmessungen zwischen den beiden Grenzkurven. Der rascheste Anstieg entspre-

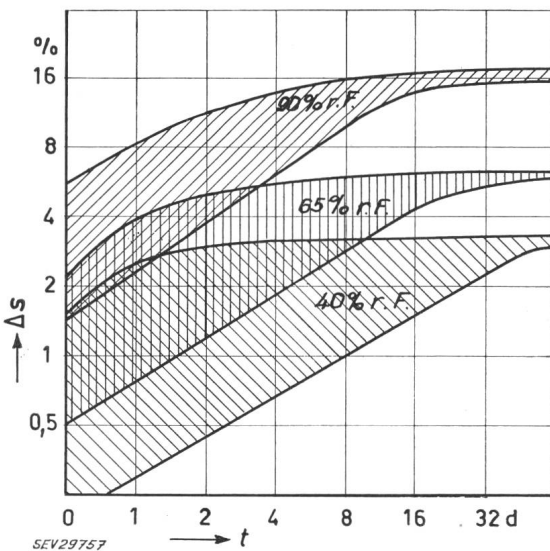


Fig. 4

Zunahme der Dicke von Transformerboard IV in Funktion der Zeit für drei verschiedene Klimazustände und für verschiedene Probeabmessungen

$\Delta s$  prozentuale Zunahme der Dicke bezogen auf den Trockenzustand des Werkstoffes; t Zeit; r. F. relative Luftfeuchtigkeit

chend der oberen Grenzkurve erfolgt bei Streifen von  $300 \times 10 \times 2$  mm; der langsamste, entsprechend der unteren Grenzkurve, bei quadratischen Proben von  $120 \times 120 \times 6$  mm.

Fig. 5 zeigt die Abhängigkeit der Zeit, die zur Erreichung des Gleichgewichtes für verschiedene Werte der spezifischen Oberfläche benötigt wird, wenn die trockenen Proben in ein Klima von 20 °C und 65 % relativer Feuchtigkeit gebracht werden. Aus den Kurven ist ersichtlich, dass deren Verlauf für quadratische und für streifenförmige Proben verschieden ist. Der Unterschied rührt daher, dass das Verhältnis der Flächen zu den Schnittkanten bei beiden Formen der Prüflinge verschieden ist.

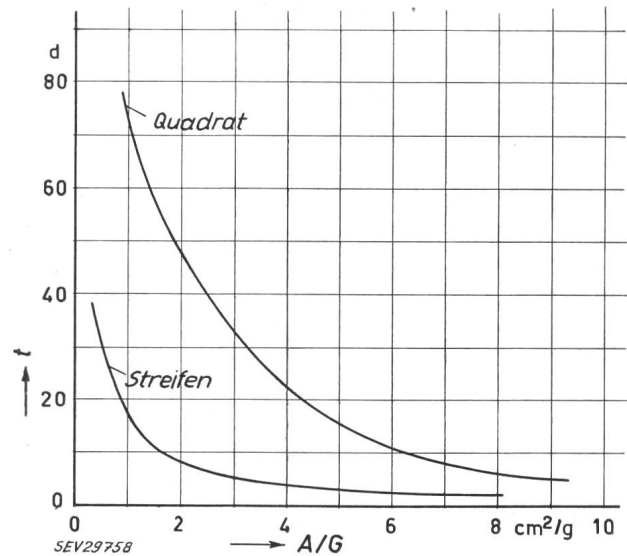


Fig. 5

Zeit t, die zur Erreichung des Gleichgewichtszustandes bei Klimatisierung solcher trockenen Proben nötig ist, deren Verhältnis von Oberfläche A zu Gewicht G ändert

Die Versuche wurden bei einer Temperatur von 20 °C und 65 % relativer Feuchtigkeit durchgeführt

Damit ist eine weitere Einflussgröße, das Verhältnis von Schnittkantenoberfläche zu Tafeloberfläche, angedeutet. An Klötzen aus Transformerboard IV, deren Schnittkantenoberflächen gleich gross waren wie die Tafeloberflächen, wurden einmal die Schnittflächen und einmal die Tafelflächen mit Metallfolien abgedeckt und dann die Wanderungsgeschwindigkeit der Feuchtigkeit beobachtet. Bezogen auf gleiche Flächen und gleiche Weglängen, wandert die Feuchtigkeit etwa 50...100mal leichter durch die Schnittflächen als durch die Tafeloberflächen.

Damit ist das Wesentliche gesagt, soweit es die Materialeite betrifft. Wie stark und wie schnell sich Schwindungs- und Quellungsvorgänge beim Bau eines Transformators auswirken, hängt von der Art der Konstruktion, von der Materialvorbereitung, Dauer und Art der Montage und vom Klima in den Arbeitsräumen ab.

Bei der Materialvorbereitung ist es von Vorteil, wenn das Material vorgetrocknet wird, weil gemäss Fig. 1 bei Adsorption der Wassergehalt deutlich niedriger ist als bei Desorption.

Weitaus am leichtesten aber lässt sich das Klima beeinflussen, wobei in diesem Begriff auch die Strömungsgeschwindigkeit der Luft inbegriffen sein soll. Ruhende Luft kann nur verhältnismässig kleine Mengen Feuchtigkeit abgeben (ein Kubikmeter Luft von 20 °C und 65 % relativer Feuchtigkeit enthält 11 g Wasser).

Um den Einfluss behinderter Luftzirkulation zu zeigen, wurde folgender Versuch durchgeführt:

Kleine Preßspan-Zylinder von 127, 92 und 57 mm Durchmesser und 200 mm Höhe wurden auf ein Aluminiumblech in einen grossen Behälter gestellt, in welchem eine relative Feuchtigkeit von 65 % aufrecht erhalten wurde. Drei Zylinder wurden ineinandergestellt und eine Haube aus Polyäthylenfolie darüber gestülpt. Drei weitere Zylinder wurden ohne Haube ineinandergestellt, und die letzten drei kamen einzeln zur Aufstellung. Fig. 6 zeigt, dass in der Feuchtigkeitsaufnahme ganz erhebliche Unterschiede auftreten. In strömender statt in ruhender Luft sind noch grössere Unterschiede zwischen verschiedenen Anordnungen der Zylinder zu erwarten.

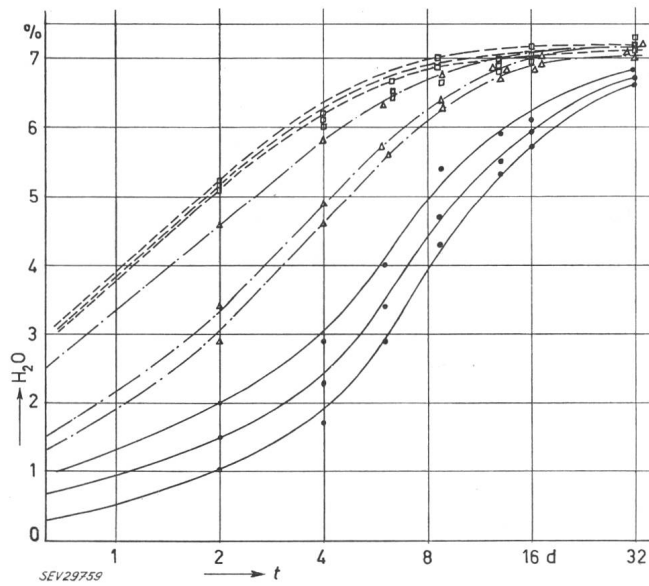


Fig. 6

Feuchtigkeitsaufnahme von Transformerboard-Zylindern aus der Luft von 20 °C und bei 65 % relativer Feuchtigkeit in Funktion der Zeit  $t$

- Messpunkte von 3 Zylindern, konzentrisch ineinandergestellt und mit Haube aus Polyäthylenfolie bedeckt
- △ Messpunkte von 3 Zylindern, konzentrisch ineinandergestellt
- Messpunkte von 3 Zylindern, einzeln aufgestellt

Aus Fig. 1 ist ersichtlich, wie viel zu gewinnen ist, wenn man die relative Feuchtigkeit möglichst gering hält. Während des grösseren Teils der Montagezeit wird nicht gearbeitet (pro Woche  $\approx$  120 von 168 h). Die Luft kann während dieser Zeit beliebig trocken sein. Während der eigentlichen Arbeitszeit wird man sich an einen als Behaglichkeitszone bezeichneten Klimabereich halten. Auch innerhalb dieser Zone darf die Luft noch recht trocken sein (z. B. bis 40 % relative Feuchtigkeit), sofern die Temperatur und die Strömungsgeschwindigkeit der Luft ebenfalls angepasst sind, und vor allem, wenn diese Luft möglichst staubfrei gehalten wird.

Über Klimaänderungen im Verlauf der Montage-Dauer, z. B. zwischen Tag und Nacht, braucht nicht mehr viel gesagt zu werden. Jede zeitweilige Erhöhung der relativen Feuchtigkeit wirkt sich schäd-

lich aus, weil bei der Rückkehr der Luftfeuchtigkeit zu ihrem Sollwert das Cellulosematerial die inzwischen aufgenommene Feuchtigkeit nicht mehr abgibt, sondern erst bei viel tieferer Luftfeuchtigkeit (Fig. 1). Temperaturschwankungen im Bereich des Arbeitsklimas sind an sich von geringer Bedeutung, solange dafür gesorgt wird, dass die relative Luftfeuchtigkeit konstant bleibt. Weil aber die absolute Feuchtigkeit der Luft bei höherer Temperatur für gleiche relative Sättigungswerte höher ist als bei tieferer, muss bei Abkühlung Feuchtigkeit aus der Luft künstlich entfernt werden, soll die relative Luftfeuchtigkeit konstant gehalten werden.

In der technischen Praxis werden die Dickenänderungen im allgemeinen kleiner ausfallen als bei den hier beschriebenen Versuchen, da meistens die Tafeln nach der Montage nicht frei liegen, sondern senkrecht zur Tafelebene auf Druck beansprucht sein werden. In diesen Fällen wird bei der Trocknung mit einsetzender Schwindung der äusserlich aufgewendete Druck kleiner. Damit tritt eine elastische Rückfederung des Transformerboards ein, die der Schwindung entgegenwirkt. Bei Feuchtigkeitsaufnahme wird durch die Quellung der Druck der Spannvorrichtung erhöht, der Quellung wirkt eine elastische Verdichtung entgegen. In Versuchen ergaben sich etwa folgende Werte:

a) Bei einer Wasseraufnahme von  $\approx$  3 % tritt unter einem Druck von 5 kg/cm<sup>2</sup> eine Quellung von 1,6 % ein, die durch eine Druckerhöhung auf 60 kg/cm<sup>2</sup> voll kompensiert wird.

b) Bei 5...6 % Wasseraufnahme und 2,8 % Quellung muss der Druck um  $\approx$  70...80 kg erhöht werden, um die Quellung zu kompensieren.

c) Bei einer Quellung von  $\approx$  5 % braucht es eine Druckerhöhung in der Grössenordnung von 200 kg/cm<sup>2</sup>.

Die Massnahmen lassen sich folgendermassen zusammenfassen:

Für die Verarbeitung (Biegen, Prägen, usw.) von Preßspan ist ein Wassergehalt von 8 % oder mehr von Vorteil. Eine Vortrocknung vor der Montage auf 1 % Wassergehalt (oder weniger) ist zweckmässig, weil während der Montagezeit der Feuchtigkeitsgehalt kleiner bleibt bei Adsorption, als wenn sich das Material durch Desorption gegen das Gleichgewicht zu bewegt. Das in Montage befindliche Material soll in ruhender Luft liegen, z. B. unter Hüllen aus Kunststoff-Folien. Die Umgebungsluft soll möglichst trocken sein, d. h. eine geringe relative Feuchtigkeit aufweisen. Während der eigentlichen Arbeitszeit soll die relative Feuchtigkeit der Luft an der unteren Grenze der Behaglichkeitszone liegen, in den Arbeitspausen (Nacht, Wochenende) aber, wenn möglich, noch trockener sein.

Mit solchen Massnahmen lassen sich die feuchtigkeitsbedingten Massänderungen von Faserstoffen auf Bruchteile des sonst Üblichen reduzieren.

Adresse des Autors:

Dr. G. O. Grimm, Halden, Rapperswil (SG).