

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 125/126 (1945)  
**Heft:** 17

**Artikel:** Ueber das Trocknen von Textilien  
**Autor:** Honegger, E. / Bellenot, Ch.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-83650>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### 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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### 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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 22.02.2026

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

Inhalt: Ueber das Trocknen von Textilien. — Grundwasser-Fassungen und -Fernleitungen. — Projet d'un Institut de Physique à Genève. — Betonstrassen im Ausland. — Mitteilungen: Die heiz- und lufttechnischen Installationen des Werkes Ad. Saurer in Arbon. Die Rhonebrücke Jonction der Genfer Verbindungsbahn. Speicherpumpen für Wasserkraftwerke. Zwei neue Juraübergänge im Kanton Solothurn. Gegendruck-Kolbendampfmaschine der SLM Winterthur. Eidg. Techn. Hochschule. Diagramme zur Berechnung elastisch gestützter Balken. — Nekrolog: Prof. Dr. Benno Strauss. Karl Böhi. Th. Baumgartner. — Wettbewerbe: Schulhaus in Beringen (Kt. Schaffhausen). Bebauungsplan Giubiasco. — Literatur. — Mitteilungen der Vereine. — Vortragkalender.

## Band 125

Der S.I.A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich  
Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet

Nr. 17

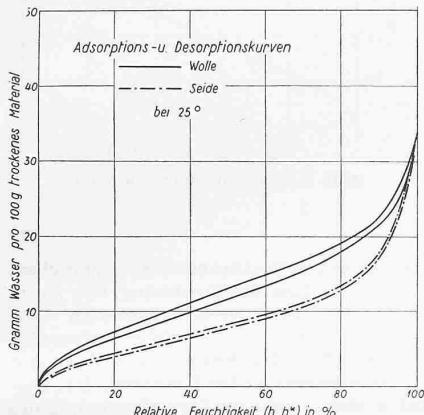


Abb. 1. Adsorptions- und Desorptionskurven für Seide und Wolle

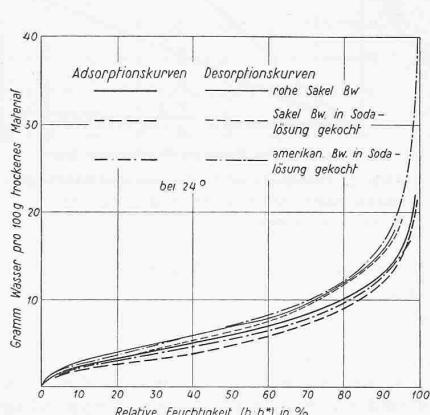


Abb. 2. Adsorptions- und Desorptions-Kurven für Sakel-Baumwolle in rohem Zustand, sowie für Sakel- und amerikanische Baumwolle nach Abkochen in Sodalösung

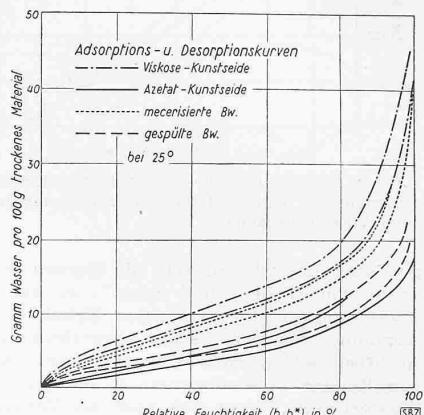


Abb. 3. Adsorptions- und Desorptionskurven für verschiedene Zellstofffasern

## Ueber das Trocknen von Textilien

Von Prof. Dr. E. HONEGGER E.T.H. und Ing. CH. BELLENOT, Zürich

[Rationelle Methoden zum künstlichen Trocknen hygrokopischer Stoffe begegnen nicht nur bei der Verarbeitung von Textilfasern, sondern auch in der holzverarbeitenden und in der Lebensmittelindustrie wachsendem Interesse. Neben einer beträchtlichen Abkürzung der Trockendauer soll gleichzeitig die Qualität des Trockengutes verbessert werden. Die im nachfolgenden Aufsatz vermittelten Erkenntnisse über das Trocknen von Textilien dürften auch auf andern Gebieten der Trocknungsindustrie sinngemäß angewendet werden können. Red.]

Das Verhalten von Textilien in Berührung mit Wasser interessiert die Technik von zwei verschiedenen Gesichtspunkten aus:

1. Textilien, die gewaschen worden sind, müssen getrocknet werden. Die Frage der Trocknung bildet den Hauptgegenstand des anschliessenden Berichtes.

2. Zu folge ihrer Hygrokopizität enthalten alle Textilien eine gewisse Menge an gebundenem Wasser. Das hygrokopische Verhalten der Textilfasern ist daher für alle Kreise, die mit Textilien zu tun haben, von Interesse. Auch bei der Trocknung spielt es eine gewisse Rolle, wenn auch nicht die ausschlaggebende.

Erst in den allerletzten Jahrzehnten ist das hygrokopische Verhalten von mit Luft in Berührung stehenden Textilien wissenschaftlich genau erforscht worden. Dabei hat sich gezeigt, dass die von den Fasern gebundene Menge an Wasser nicht eine eindeutige Funktion der Luftfeuchtigkeit und Temperatur ist, sondern auch von der Vorgeschichte der Fasern beeinflusst wird. Tatsächlich sind zwei Gleichgewichts-Isothermen der Textilfasern im hygrokopischen Gebiete zu unterscheiden: Die Adsorptionskurve gibt den Wassergehalt der Fasern in Funktion der Luftfeuchtigkeit für steigende Luftfeuchtigkeit an, während die Desorptionskurve bei fallender Luftfeuchtigkeit massgebend ist. Zwischen beiden Kurven tritt ein gewisser Abstand auf, der von Faserart zu Faserart verschieden ist und der einer Hysteresis der Feuchtigkeitsaufnahme und -abgabe entspricht. Der Wassergehalt der Textilfasern wird aber zudem noch weitgehend beeinflusst durch ihren besonderen Zustand.

Abb. 1 zeigt Adsorptions- und Desorptionskurven für Seide<sup>1)</sup> und Wolle<sup>2)</sup>. Abb. 2 gibt den Verlauf für Sakel-Baumwolle in rohem Zustand und für Sakel- und amerikanische Baumwolle nach Abkochen in Sodalösung. Wie daraus ersichtlich, hat schon die Waschung der Baumwolle eine Verschiebung der Isothermen zur Folge gehabt, aber auch Baumwollen verschiedener Provenienzen weisen, wenn auch kleine, Unterschiede auf<sup>3)</sup>.

Abb. 3 gibt die Isothermen für verschiedene Zellulosefasern wieder, die Kurven folgen sich in der Reihenfolge: Acetatseide, Baumwolle, mercerisierte Baumwolle und Viscose<sup>4)</sup>. Noch deutlicher geht das relative Verhalten der verschiedenen Textilfasern aus Abb. 4 hervor<sup>5)</sup>. Um das Bild nicht zu belasten, ist hier von jeder Faserart nur die Desorptionskurve eingetragen worden. Da sich die Kurven stellenweise überschneiden, ist die Reihenfolge der Aufnahmefähigkeit für Wasser in verschiedenen Feuchtigkeitsbereichen nicht immer die gleiche.

Auch die Temperatur hat einen Einfluss auf die Gleichgewichtskurven, wie Abb. 5 für Baumwolle zeigt<sup>6)</sup>. Von 0 bis 80% relater Luftfeuchtigkeit nimmt die Menge an hygrokopischem Wasser mit steigender Temperatur ab; für höhere Feuchtigkeiten überschneiden sich die Kurven.

Ueber die Art und Weise, wie das Wasser von den Textilfasern aufgenommen wird, besteht noch keine völlige Klarheit. Die oft vertretene Theorie, wonach das Wasser in kapillare Poren der Fasern eingelagert ist und diese nach und nach ausfüllt, und wonach die Abnahme des Dampfdruckes des hygrokopischen Wassers als Folge der Kapillarität von Poren verschiedener Grösse erklärt wird, trifft jedenfalls nur in einem

<sup>1)</sup> Siehe Literaturverzeichnis am Schluss des Aufsatzes.

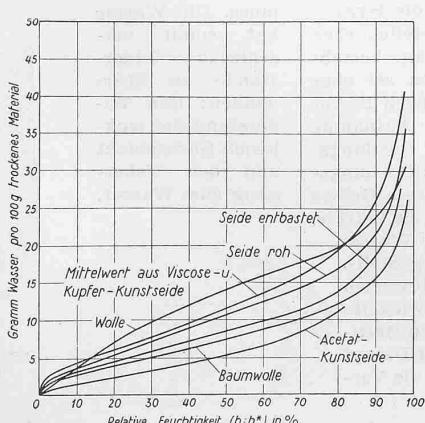


Abb. 4. Desorptionskurven verschiedener Textilfasern

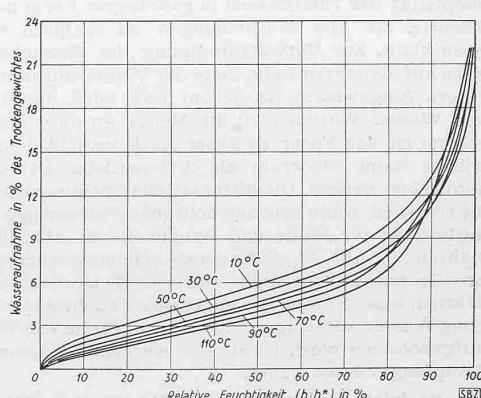


Abb. 5. Desorptionskurven für Baumwolle in Abhängigkeit der Temperatur

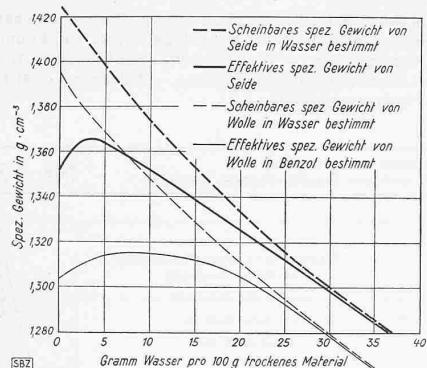


Abb. 6. Scheinbares und effektives spezifisches Gewicht von Seide und Wolle in Abhängigkeit der Wasseraufnahme

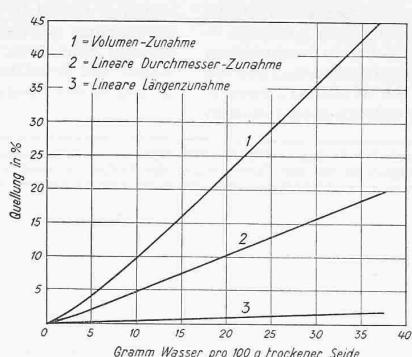


Abb. 7. Volumen- und Dimensionsänderungen abgekochter Seide in Abhängigkeit der Wasseraufnahme

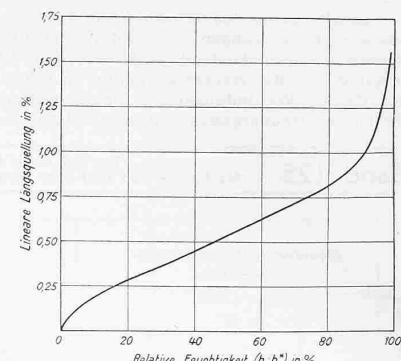


Abb. 8. Längsquellung von Seide

gewissen Bereich zu. Wie die Kurven für das spezifische Gewicht von Wolle<sup>1)</sup> und Seide<sup>1)</sup> in Abb. 6 zeigen, tritt durch Wasseraufnahme vorerst eine Erhöhung, sehr bald aber eine Abnahme des spezifischen Gewichtes ein. Die Zunahme des spezifischen Gewichtes wäre ohne weiteres durch die Einlagerung von Wasser in Faserporen zu erklären; schon bei mässigem Wassergehalt ändert sich aber das Verhalten, und mit weiterer Vermehrung des hygrokopischen Wassers nimmt das spezifische Gewicht ab: es tritt eine Volumenvergrösserung durch die Wasseraufnahme ein, die die Gewichtszunahme verhältnismässig übertrügt. — Der Vollständigkeit halber sind auf Abb. 6 noch die scheinbaren spezifischen Gewichte, wie sie durch Bestimmen in Wasser gefunden werden, angegeben; diese stimmen nur bei hohem Wassergehalt mit den effektiven Werten überein, weil in jenem Bereich keine nennenswerte weitere Wasseraufnahme mehr stattfinden kann.

Die durch Wasseraufnahme bei abgekochter Seide eintretenden Volumen- und Dimensionsänderungen<sup>1)</sup> sind in Abb. 7 dargestellt. Wie das Diagramm zeigt, treten durch Quellung Volumenvermehrungen ein, die 40% überschreiten können; diese Volumenänderungen sind in der Hauptsache die Folge einer Durchmesserzunahme, immerhin findet auch eine bescheidene Längenzunahme statt. Weil bei gewissen Feuchtigkeitsmessapparaten die Längsquellung von Seide zum Bestimmen der relativen Luftfeuchtigkeit benutzt wird, ist diese Längenzunahme in Abb. 8 noch in grossem Maßstab dargestellt.

Wenn Textilfasern Wasser aufnehmen, erscheint das Volumen der gequollenen Faser immer kleiner als die Summe der Volumina der Faser und des Wassers, auch in dem Gebiet, in dem mit zunehmender Quellung das spezifische Gewicht kleiner wird. Die stattfindende scheinbare Kontraktion ist für Zellstoff und Baumwolle<sup>8)</sup> in Funktion der Feuchtigkeit dargestellt in Abb. 9. Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, beträgt die integrale Kontraktion im Maximum etwa 0,02 cm<sup>3</sup>/gr Fasern. Die auf 1 gr Wasser bezogene differentielle Kontraktion kann bis zu 0,5 cm<sup>3</sup> betragen, wobei diese differentielle Kontraktion unter der Voraussetzung bestimmt worden ist, dass eine sehr grosse Menge an Fasern vorhanden sei, sodass die Aufnahme von 1 cm<sup>3</sup> Wasser ohne spürbare Änderung des prozentualen Wassergehaltes eintrete.

In vorstehenden Ausführungen ist versucht worden, die wichtigsten heute bekannten Zusammenhänge über die Hygrokopizität der Textilfasern in gedrängter Form darzustellen. Eine Theorie, die alle Erscheinungen zu erklären vermag, besteht noch nicht. Zur Vervollständigung der Betrachtungen sei aber kurz auf die thermische Seite der Wasseraufnahme durch Textilfasern hingewiesen. In jedem Fall wird durch die Aufnahme von Wasser Wärme frei; die Menge an entwickelter Quellungs-wärme ist von Faser zu Faser stark verschieden. Die Quellungs-wärme kann wiederum als differentielle oder integrale Grösse angegeben werden. Die differentielle Quellungs-wärme, die Wärme, die frei wird, wenn eine beträchtliche Fasermenge 1 gr Wasser auflöst, ist für Wolle und Baumwolle in Abb. 10 dargestellt, während in Abb. 11 die integrale Quellungs-wärme in Kalorien pro Gramm Fasern angegeben ist: Es ist dies die entwickelte Wärme, wenn Fasern von gegebener Feuchtigkeit bis zur Sättigung Wasser aufnehmen<sup>9)</sup>. Sofern an Stelle von Wasser Dampf aufgenommen wird, ist die frei werdende Wärme um die Verdampfungswärme höher.

Nachdem das Verhalten der Fasern gegenüber Wasser beschrieben worden ist, seien nachfolgend einige Aspekte der

Trocknung von Textilfasern oder von Textilprodukten besprochen. Dabei sei zum voraus festgestellt, dass die Trocknung, wie sie in der Technik durchgeführt wird, zum weitaus grössten Teil, möglicherweise zu über 85%, im nassen Gebiete erfolgt, sodass sich die hygrokopischen Eigenschaften der Fasern eigentlich erst gegen das Ende des Trockenprozesses geltend machen. Der Einfluss der Hygrokopizität besteht darin, die Dampfspannung des Wassers im hygrokopischen Gebiet zu erniedrigen. Der gegen die Sättigung zu sehr steile Verlauf der Isothermen bringt es übrigens mit sich, dass ein beträchtlicher Teil des hygrokopischen Wassers bei nur wenig erniedrigtem Dampfdruck entfernt werden kann. Das hygrokopische Gebiet kommt bei der Trocknung übrigens umso weniger stark zur Geltung, als Textilien meistens nicht bis zur vollkommenen Trockenheit, sondern nur bis zum normalen Feuchtigkeitsgehalt getrocknet werden.

Bei jedem Trockenvorgang wird Wasser verdampft und Wärme zugeführt. Der Vorgang wird als Verdampfung bezeichnet, wenn durch Erhitzen des Gutes das Wasser in Form von reinem Dampf aus dem Trockengut entweicht. Bei der Verdunstung wird hingegen das verdampfte Wasser als Feuchtigkeitsgehalt der Luft weggetragen und die Verdampfungswärme meistens der Luft selbst entnommen und dem Gut zugeführt. Mit der zweiten Form des Trocknens, die in der Textilindustrie meistens zur Anwendung kommt, befassen sich die nachfolgenden Ausführungen. Sie beziehen sich auf das Trocknen einer konischen Kreuzspule, einer Garnaufmachung, wie sie in der Ausrüstungsindustrie und Färberei in zunehmendem Masse verwendet wird. Die gemachten Feststellungen gelten aber auch für andere Textilien, z. B. für ein Haufwerk von losen Fasern und für Spinnküchen.

Beim Trocknen einer Kreuzspule umstreicht die Trockenluft den Garnkörper; an der Berührungsstelle zwischen Garn und Luft gibt die Luft Wärme an das Garn ab, die für die Verdampfung des Wassers verbraucht wird. Solange die ganze Spule nass ist, setzt der Trockenvorgang wie bei anderem Trockengut ein; dadurch wird sich an der Oberfläche des Garnkörpers eine trockene Schicht bilden, deren Dicke mit fortschreitender Trocknung grösser wird. Um den Trockenprozess fortzusetzen, muss somit die Wärme durch die Garnschicht ins Innere der Spule wandern, bis sie auf den noch nassen Teil gelangt, während anderseits das verdampfte Wasser durch die gleiche Garnschicht den Ausweg in die freie Luft suchen muss. Die Wärme hat somit verschiedene Widerstände zu überwinden: Den Widerstand der trockenen Garnschicht und den Übergang zum Wasser,

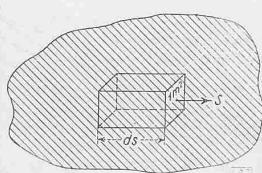


Abb. 12. Element des Garnkörpers

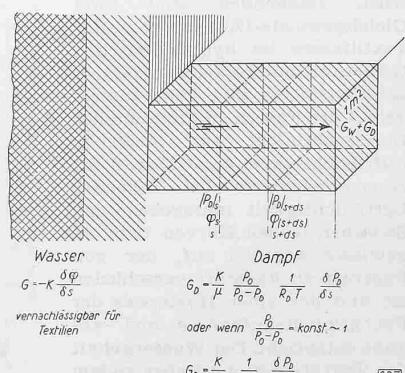


Abb. 13. Bewegung des Dampfes durch ein Garnkörperelement

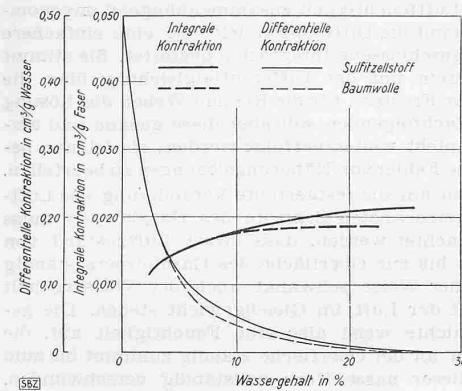


Abb. 9. Integrale und differentielle Kontraktion von Sulfitzellstoff und Baumwolle

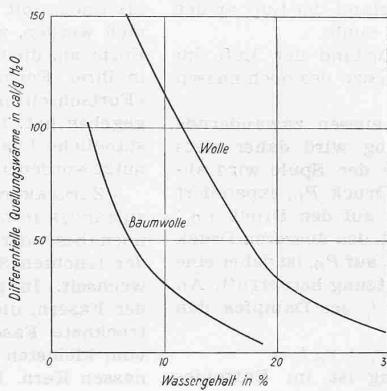


Abb. 10. Differentielle Quellungswärme von Wolle und Baumwolle

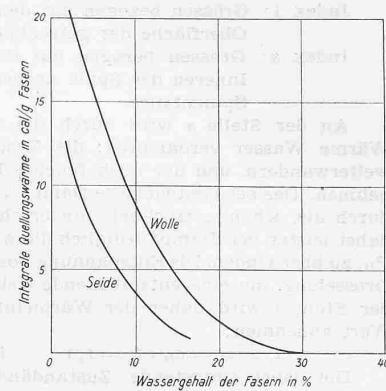


Abb. 11. Integrale Quellungswärme von Wolle und Baumwolle

bzw. zur feuchten oder hygrokopischen Faser. Gegenüber diesen Widerständen können die Leitungswiderstände im Innern der mikroskopisch feinen Fasern vernachlässigt werden; auch kann ohne weiteres angenommen werden, dass die Faser sich stets mit der sie umgebenden Luft im Gleichgewicht befindet.

Um den Vorgang der Trocknung zu berechnen, muss die Wanderung der Wärme und des Dampfes im Garnkörper verfolgt werden. Mit einer Wanderung des noch flüssigen Wassers aus den nassen Teilen des Garnes in die schon getrockneten Teile braucht kaum gerechnet zu werden, denn die eine solche Wanderung veranlassendem Kapillarkräfte sind zu klein, um eine spürbare Wirkung auszuüben.

Tatsächlich kann das Wasser in einem Garnkörper als aus drei Teilen bestehend aufgefasst werden: 1. das in den Fasern festgehaltene hygrokopische Wasser, 2. das zwischen den Fasern des Fadens festgehaltene Kapillarwasser, 3. das zwischen den verschiedenen Garnlagen festgehaltene Kapillarwasser.

Ist der Garnkörper vor der Trocknung mechanisch entwässert worden, so wird das Wasser der dritten Klasse nicht mehr oder nur noch in geringer Menge vertreten sein. Die Trocknung hat sich somit fast nur noch mit der Entfernung des hygrokopischen Wassers und des durch ganz feine Kapillare festgehaltenen Wassers zu befassen, wobei das zweite sehr viel stärker ins Gewicht fällt als das erste; eine Wanderung des Wassers von einer Garnlage zur anderen wird nur sehr langsam erfolgen, da es von den feinen Faserzwischenräumen durch die grösseren Garnzwischenräumen treten müsste. Die Berechnung hat sich somit hauptsächlich zu befassen mit der Wärmewanderung durch trockene Garnlagen und mit dem Abfließen des entstehenden Dampfes.

Abb. 12 gibt ein Element des betrachteten Garnkörpers wieder. Für die Berechnung gelten folgende Bezeichnungen:

$g_G$  Einheitsgewicht des trockenen Gutes in  $\text{kg m}^{-3}$   
 $g_w = \varphi$  Gewicht des in  $1 \text{ m}^3$  des Garnkörpers enthaltenen Wassers in  $\text{kg m}^{-3}$   
 $g_D$  Gewicht des in  $1 \text{ m}^3$  des Garnkörpers enthaltenen Dampfes in  $\text{kg m}^{-3}$   
 $V_l$  Hohlraum

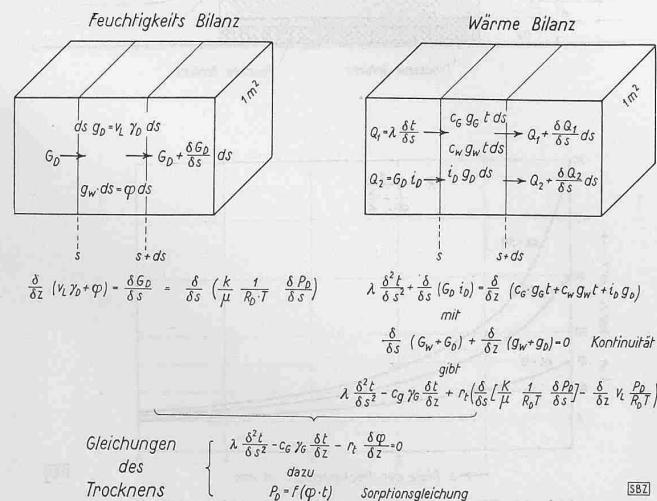


Abb. 12. Feuchtigkeits- und Wärmebilanz für ein Garnkörperelement

$\lambda$	Wärmeleitzahl des Körpers in $\text{kcal m}^{-3} \text{ °C}^{-1} \text{ h}^{-1}$
$t$	Temperatur in $^{\circ}\text{C}$
$c_G$	Spez. Wärme des trockenen Gutes in $\text{kcal kg}^{-1} \text{ °C}^{-1}$
$c_w$	Spez. Wärme des Wassers in $\text{kcal kg}^{-1} \text{ °C}^{-1}$
$c_D$	Spez. Wärme des Dampfes in $\text{kcal kg}^{-1} \text{ °C}^{-1}$
$i_p$	Verdampfungswärme des Wassers bei der Temperatur $t$ in $\text{kcal kg}^{-1}$
$\gamma_D$	Spezifisches Gewicht des Dampfes in $\text{kg m}^{-3}$
$P_0$	Gesamtdruck (Barometerstand) in $\text{kg m}^{-2}$
$P_D$	Dampfdruck in $\text{kg m}^{-2}$
$R_D$	Gaskonstante für Wasserdampf $\text{m kg }^{\circ}\text{C}^{-1}$
$T$	Absolute Temperatur in $n^{\circ}\text{C}$
$s$	Mass der Probe in $\text{m}$
$K$	Diffusionskoeffizient für Luft in $\text{m}^2 \text{ h}^{-1}$
$\mu$	Diffusionswiderstandsanzahl

Für das betrachtete Element eines porösen Körpers gilt:

Gewicht des Anteiles an trockenem Gut  $g_G ds$   
Gewicht des Wassers  $g_w ds = \varphi ds$   
Gewicht des Dampfes  $g_D ds$   
Hohlraum  $V_l ds$

Ferner gilt:  $g_D = V_l \gamma_D = V_l \frac{P_D}{R_D T}$

In Abb. 13 wird die Bewegung des Wassers und des Dampfes untersucht. Wie schon festgestellt, kann die Bewegung des Wassers durch einen Garnkörper vernachlässigt werden. Der Dampf wandert gemäss dem Gesetz von Stefan<sup>10)</sup>, wobei der Diffusionswiderstand je nach der Garndicthe mehr oder weniger gross zu bemessen ist; für Luft wird  $\mu = 1$ . Aus dem erwähnten Gesetz lässt sich das Gleichgewicht der Dampfbewegung unter Berücksichtigung der Erhaltung der Materie, Abb. 14, ableiten. In Abb. 14 ist ferner die Wärmebilanz für ein Element des Garnkörpers aufgestellt; sie drückt aus, dass die zuströmende Wärme verwendet wird für die Erwärmung des zu trocknenden Gutes, des in diesem enthaltenen Wassers und Dampfes, sowie für die Deckung der Verdampfungswärme.

Aus der Gleichsetzung der zugeströmten Wärmemenge mit der für die Verdampfung des wegwandern Dampfes benutzten Wärme ergibt sich die Gleichung des Trockenprozesses (Abb. 14). Die hier angeschriebene Gleichung berücksichtigt der Einfachheit halber nur den eindimensionalen Prozess. Es ist eine partielle Differential-Gleichung zweiten Grades für die Temperatur und den Wassergehalt pro Volumeneinheit des Körpers, wobei Ort und Zeit als Veränderliche auftreten.

Um diese Differentialgleichung für zwei Veränderliche aufzulösen zu können, muss noch ein Zusammenhang zwischen den beiden Veränderlichen, dem Wassergehalt  $\varphi$  des Gutes und der Temperatur, bekannt sein. In dem Gebiet, in dem das kapillare Wasser schon verdunstet ist, wird der Zusammenhang gegeben durch die Sorptionsgleichung, bzw. durch die Sorptionskurven, wie sie im ersten Teil dieses Aufsatzes wiedergegeben sind. Bei strenger Berücksichtigung des zwischen Temperatur, Faserfeuchtigkeit und Dampfspannung geltenden Zusammenhangs lässt sich die Gleichung nur graphisch auflösen; in vielen Fällen können vereinfachende Annahmen zu geschlossen integrierbaren Gleichungen führen, die die wahren Verhältnisse noch genugend genau wiedergeben.

Die Auflösung dieser Gleichung soll nicht weiter verfolgt, hingegen der Verlauf der Feuchtigkeit in der schon getrockneten Schichte untersucht werden. Gemäss Abb. 15 sei bezeichnet mit:

Index 0: Grössen bezogen auf den Zustand der Luft in grossem Abstand von der Spule.

Index 1: Größen bezogen auf den Zustand der Luft an der Oberfläche der getrockneten Spule.

Index s: Größen bezogen auf den Zustand der Luft im Inneren der Spule an der Grenze des noch nassen Spulenteiles.

An der Stelle s wird durch die von aussen zuwandernde Wärme Wasser verdampfen; die Trocknung wird daher stets weiterwandern, und der noch feuchte Kern der Spule wird abnehmen. Der bei s entwickelte Dampf vom Druck  $P_{Ds}$  expandiert durch die schon getrocknete Faserschicht auf den Druck  $P_{D1}$ ; dabei leistet der Dampf lediglich die Arbeit, den äusseren Druck  $P_{D1}$ , zu überwinden. Die Entspannung von  $P_{Ds}$  auf  $P_{D1}$  ist daher eine Drosselung, die eine entsprechende Ueberhitzung hervorruft. An der Stelle 1 wird daher der Wärmeinhalt  $i_1$  des Dampfes den Wert annehmen:

$$i_1 = i_s + c_D (t_1 - t_s) \quad i_s = r_s + c_w t_s$$

Die dabei eintretende Zuständanderung ist im Entropiediagramm für Wasserdampf in Abb. 15 graphisch dargestellt.

Der Wärmeinhalt des Luftpumpgemisches am Rand des noch nassen Teiles ist gleich:

$$I_s = c_l t_s + x_s i_s = c_l t_s + x_s r_s + x_s c_w t_s$$

wo  $c_l$  die spezifische Wärme von 1 kg trockener Luft bedeutet.

Beim Uebergang zur Oberfläche der Spule ändert sich der Wärmeinhalt I des Luft-Dampf-Gemisches wie folgt:

$$\Delta I = c_l (t_1 - t_s) + i_s (x_1 - x_s) + x_s \Delta i_s, \text{ wobei:}$$

$\Delta i_s = i_1 - i_s = c_D (t_1 - t_s)$  ist; hieraus folgt:

$$\Delta I = (c_l + x_s c_D) (t_1 - t_s) + r_s (x_1 - x_s) + c_w t_s (x_1 - x_s)$$

Nach dem Gesetz von Lewis<sup>11)</sup> gilt:

$$(c_l + x_s c_D) (t_1 - t_s) + r_s (x_1 - x_s) = 0$$

folglich ist:

$$\Delta I = c_w t_s (x_1 - x_s)$$

Diese Gleichung entspricht aber im J-x-Diagramm einer ins Ueberhitzungsgebiet verlängerten Nebelisotherme<sup>12)</sup>, also einer Linie  $\tau = \text{konst.}$ , die durch den dem Zustand an der Oberfläche des noch nassen Teiles entsprechenden Punkt geht.

Anderseits muss aber der Zustandspunkt im J-x-Diagramm für den Zustand 1 zugleich auf der durch den Punkt für den Zustand 0 gehenden  $\tau$ -Linie liegen, woraus gefolgt werden muss, dass alle drei Zustandspunkte 0, 1 und s auf der nämlichen  $\tau$ -Linie liegen müssen. Damit ist nachgewiesen, dass in dem von Kapillarwasser befreiten Teil der Spule der Luftzustand sich längs einer  $\tau$ -Linie ändert. Da die einzelnen Fasern mit der sie umgebenden Luft im Gleichgewichtszustand stehen, kann aus dem J-x-Diagramm in Verbindung mit der für das Fasermaterial geltenden Sorptionskurve der Feuchtigkeitsgehalt der Fasern gefolgt werden.

Ist somit der Verlauf von  $t$  und  $x$  durch die getrocknete Faserschicht bekannt, und anderseits die Hygroskopizität der Textilfasern als Funktion der Luftfeuchtigkeit und Temperatur ebenfalls gegeben, so sind alle Größen ermittelt, die für die Auflösung der Differentialgleichung der Trocknung notwendig sind. Darf der Wassergehalt der Faser annäherungsweise

als linear mit der Luftfeuchtigkeit zusammenhängend angenommen werden, so nimmt die Differentialgleichung eine einfache Form an, die eine geschlossene Integration gestattet. Sie stimmt in ihrer Form überein mit der Differentialgleichung über die «Fortschreitung des Frostes», für die Riemann-Weber die Lösung gegeben hat. Im Nachfolgenden soll aber diese genaue und umständliche Lösung nicht weiter verfolgt werden, sie ist nur benutzt worden, um die Fehler von Näherungslösungen zu beurteilen.

Zurückkommend auf die festgestellte Veränderung des Luftzustandes in der getrockneten Schicht des Garnkörpers muss noch besonders beachtet werden, dass dieser Luftzustand von der feuchten Stelle bis zur Oberfläche des Garnkörpers ständig wechselt. In gleicher Weise schwankt auch der Wassergehalt der Fasern, die mit der Luft im Gleichgewicht stehen. Die getrocknete Faserschicht weist also eine Feuchtigkeit auf, die vom kleinsten Wert an der Oberfläche ständig zunimmt bis zum nassen Kern. Ist dieser nasse Kern vollständig verschwunden, so wird trotzdem der Garnzustand von aussen nach innen noch grosse Feuchtigkeitsdifferenzen zeigen, die erst durch sehr lange Fortsetzung des Trockenprozesses ausgeglichen werden können. Die Zeitdauer für den Ausgleich wird immer grösser, weil das Trockengefälle fortgesetzt kleiner wird.

Für technische Zwecke können genügend genaue Berechnungen angestellt werden, wenn einfach angenommen wird, dass die ganze durch die Trockenluft zugeführte Wärmemenge für die Verdampfung des Wassers verwendet wird, da der Teil, der die Erwärmung der Fasern bewirkt, tatsächlich sehr klein ist. Die Zufuhr dieser Wärmemenge erfolgt aber ebenfalls durch Leitung durch die Garnschicht. Für den einfachsten Fall einer eindimensionalen Wärme- und Dampfwanderung sind die Wärmedurchgangszahlen in Funktion der Dicke der Fasertrockenschicht und des Wärmeübergangskoeffizienten (also der Luftgeschwindigkeit über der zu trocknenden Faserschicht) in Abb. 16 dargestellt. Wie aus dieser Abbildung hervorgeht, nimmt die übertragene Wärmemenge mit zunehmender Schichtdicke der trockenen Textilien sehr rasch ab. Besonders beachtenswert ist der Umstand, dass schon bei einer Dicke der Trockenschicht von 5 mm die übertragene Wärmemenge nur noch ganz unweitlich durch die Grösse des Wärmeübergangskoeffizienten, bzw. der Luftgeschwindigkeit beeinflusst wird. Der Trockenprozess wird also mit zunehmender Dicke der Trockenschicht rasch verlangsamt, weil die Wärme nicht in genügender Menge zu den nassen Fasern herangebracht werden kann.

Auf Grund dieser Feststellungen sind im Textil-Institut der E.T.H. Versuche gemacht worden, die Luft durch den zu trocknenden Garnkörper direkt hindurch zu pressen, um in kürzerer Zeit einen Trockenprozess zu Ende führen zu können, oder um ebenfalls in sehr kurzer Zeit einen vollkommen ausgeglichenen Feuchtigkeitszustand eines Garnkörpers herbeizuführen. Zu diesem Zwecke musste der Garnkörper auf eine gelochte Spule aufgebaut werden, wie solche auch in der Färberei benutzt werden, und es wurde Luft von angemessenem Ueberdruck von innen nach aussen durch den Garnkörper geblasen. Bei den behelfsmässigen zur Verfügung stehenden Einrichtungen konnte für

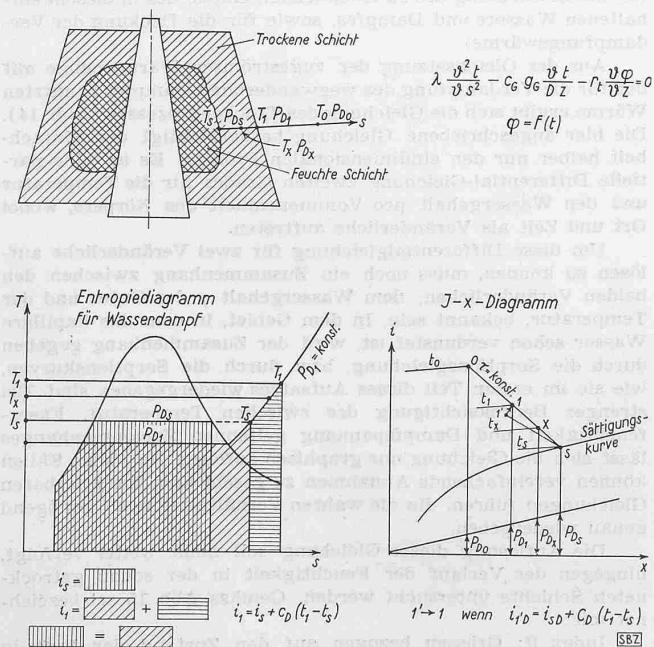


Abb. 15. Zur Theorie des Trockenvorganges

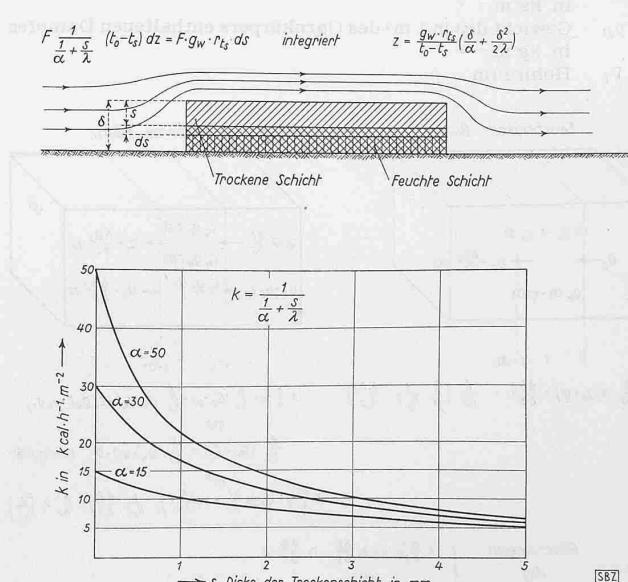


Abb. 16. Wärmedurchgangszahlen in Abhängigkeit der Dicke der Trockenschicht

die Trocknung einer Kreuzspule Druckluft von 600 mm Wassersäule angewendet werden. Dadurch liess sich die Trockenzeit auf eine Zeit von ganz anderer Größenordnung reduzieren: an Stelle von 120 bis 126 Stunden konnte die Spule in 3 Stunden vollkommen getrocknet werden. Dabei verlässt die Luft den Garnkörper in gesättigtem Zustand, solange Kapillarwasser im Garn überhaupt noch vorkommt.

Der Vorteil der Trocknung mit Druckluft ist die Folge des Umstandes, dass die Luft zwischen dem Garn überall durchströmt und die Verdunstungswärme daher nur einen Fadenradius tief durch die Fasern wandern muss. Das verdunstete Wasser wird von der strömenden Luft mitgeführt. Der so geführte Trockenprozess ist so wirksam, dass er nicht unbedingt an eine Vorwärmung der Luft gebunden ist: weist die Luft eine mittlere Feuchtigkeit von 40 bis 60% auf und 20 bis 30° Temperatur, so ist ihre Trockenkraft ausreichend, um die Kreuzspule in kurzer Zeit zu trocknen; das einzige notwendige Hilfsmittel ist also dann ein Ventilator für die Luftbewegung. — Im Winter wird die Luftvorwärmung natürlich nicht entbehrt werden können.

Das gleiche Verfahren ist mit gleichem Erfolg auch auf Kunstseide-Spinnküchen angewendet worden. Bei einem Luftüberdruck von 60 mm Wassersäule wurde dabei die Trockenzeit von 60 bis 70 Stunden auf 2½ Stunden reduziert. Selbstredend lässt sich das Verfahren auch auf andere Textilien anwenden, insbesondere erwiesen sich die durchgeföhrten Versuche an Kardenband, Kammzugband und losen Fasern als durchaus befriedigend.

Die Berechnung der Trocknung mit Druckluft gestaltet sich ganz besonders einfach. Ausgehend vom gegebenen Anfangszustand der Luft verändert sie sich gemäss einer  $\tau$ -Linie bis zur Sättigung. Aus der Differenz des Wassergehaltes im End- und Anfangszustand kann die für die Trocknung notwendige Luftmenge direkt berechnet werden. Die beiden in Abb. 17 wiedergegebenen Beispiele einer Kreuzspule und eines Spinnküchens haben die gleiche Luftmenge pro Zeiteinheit zugeführt erhalten: je 1 m<sup>3</sup> pro Minute. Die verschiedene Höhe des Luftdruckes war lediglich die Folge der verschiedenen Bewicklung der Garnkörper. Die Luft wurde in beiden Fällen auf 40° vorgewärmt, auf diese Lufttemperatur hat auch die Trockenzeit der beiden in der Abb. wiedergegebenen Vergleichsbeispiele von Trocknung im gewöhnlichen Luftstrom Bezug. Ergibt sich also die für die Trocknung notwendige Luftmenge unmittelbar aus dem aufzunehmenden Wasser und der Änderung der Luftbeschaffenheit, so ergibt sich anderseits die Dauer des Trockenverganges aus der Förderfähigkeit des benutzten Ventilators. Der Luftüberdruck ist eine Funktion des Garnkörpers und des benutzten Ventilators.

Da bei Anwendung von Druckluft infolge der kurzen Dauer des Trockenprozesses und der einfachen Konstruktion des Trockenapparates die Wärmeverluste sehr klein ausfallen, da ferner die Luft bis zur Sättigung befeuchtet und folglich sehr gut ausgenutzt wird, erweist sich das Verfahren als überaus wirtschaftlich. Die Tatsache der vollkommenen Sättigung der Abluft wirkt sich übrigens besonders günstig aus, wenn die Trockenanlage

mit einer Wärmerückgewinnungsanlage in Verbindung gebracht wird. Selbstredend lässt das Verfahren auch ohne weiteres die wiederholte Verwendung der nämlichen weiter geheizten Luft zu, um pro Lufteinheit eine möglichst grosse Wassermenge zu entfernen. Nicht zuletzt erweist sich als Vorteil der Drucklufttrocknung der Umstand, dass der ganze Garnkörper in sehr kurzer Zeit in einen vollkommen ausgeglichenen Zustand übergeführt werden kann, was auf keinem anderen Wege erreichbar ist.

#### Literatur-Verzeichnis

- [1] Goodings, A. C. & Turl, L. H.: Journal Textile Institute (J. T. I.) 1940, Band 31, Seite T 69.
  - [2] Speakman, J. B. & Cooper, C. A.: J. T. I. 1936, Bd. 27, Seite T 183.
  - [3] Urquhart, A. R., Bostock, W. and Eckersall, N.: J. T. I. 1932, Bd. 23, Seite T 135.
  - [4] Urquhart, A. R. & Eckersall, N.: J. T. I. 1932, Bd. 23, Seite T 163.
  - [5] Obermiller, J.: Melland 1926, Bd. 7, Seite 71.
  - [6] Urquhart, A. R. & Williams, A. M.: J. T. I. 1926, Bd. 17, Seite T 38.
  - [7] King, A. T.: J. T. I. 1927, Bd. 18, Seite T 274.
  - [8] Stamm, A. J. & Seborg, R. M.: J. physic. Chem. 1935, Bd. 39, Seite 133.
  - [9] Shorter, S. A.: J. T. I. 1924, Bd. 15, Seite 328.
  - [10] Krischer: «Die Wärme und Stoffaustausch im Trocknungs-gut», Zeitschrift VDI, Band 13, Juli/August 1942.
  - [11] Krischer & Rohalter: Forschungsarbeit VDI No. 402.
  - [12] Merkel, F.: «Verdunstungskühlung», Anhang II. For-schungsarbeit VDI No. 275.
  - Hirsch, M.: «Trockentechnik», Berlin 1932, Seite 66.
  - [13] Festchrift Prof. Dr. A. Stodola, Zürich 1929, Seite 438.
- Das J-x-Diagramm für Dampfluftgemische von Richard Möller, Dresden.

#### Grundwasser-Fassungen und -Fernleitungen

Ueber die in der SBZ, Bd. 124 (1944), S. 224 kurz erwähnten Vorarbeiten für ein Erweiterungs werk der stadtberlinischen Wasserversorgung berichtet Chefing. H. Gubermann im «Bull. SVGW» Bd. 25 (1945) No. 1 ausführlicher. Er behandelt Spezialuntersuchungen über die Temperatur des Grundwassers, den Temperaturinfluss des Bodens auf das Wasser in Fernleitungen, die Anwendung von Eisenbetonröhren in Fassungs- und Ableitungs-Anlagen, sowie eine neue Entlüftungseinrichtung bei Heber-Leitungen.

Die Temperatur eines Quell- oder Grundwassers ist in ihrem Jahresmittel eine Funktion der Höhenlage des betreffenden Fassungsgebietes und stimmt ungefähr mit der mittleren Lufttemperatur des Gebietes überein. In runder Zahl fällt diese Temperatur um 1,5°C bei 100 m Höhenunterschied. Je näher jedoch ein unterirdisches Wasservorkommen der Bodenoberfläche ist, umso grösser wird der Einfluss der Lufttemperatur und damit die Schwankungsbreite der Wassertemperatur. Ferner wird die Temperatur des Grundwassers durch Zustrom aus Tributär-Gewässern (Flüssen) und durch künstliche Eingriffe, z.B. Wasser-Eintnahmen, beeinflusst, so dass keine allgemeine Regel aufstellbar ist. Da auch die thermische Abdichtung der Bodenschichten keine vollkommene ist, muss bei der Fortleitung des Wassers und bei der Speicherung auf möglichst günstige Verhältnisse geachtet werden. So muss für die neue Aaretalleitung von 19 km Länge, die auch bei Sommerwasserstand oberhalb des Grundwasserspiegels liegen soll, mit einem längeren Rohrdamm von 1,20 m Ueberschüttung gerechnet werden, wenn die Wassererwärmung innert engen Grenzen bleiben soll. Praktische Versuche ergaben, dass der Durchfluss einer grösseren Wassermenge die Bodentemperatur im Sommer um 3 bis 4°C abkühlt, im Winter um fast ebensoviel erwärmt und dadurch einen Temperaturoausgleich und einen Selbstschutz der Leitung bewirkt, sodass keine besondere Wärmeisolation notwendig wird. Viel wichtiger sind die statischen Verhältnisse der Rohrüberdeckung.

Ein Kostenvergleich von Eisenbeton-, Gusseisen- und Stahl-Röhren zeigt, dass für Ueberlandleitungen grösserer Rohrweite Eisenbetonrohr bevorzugt ist, wenn es gelingt, die Anforderungen an Wasserinnendruck, Wasserdurchlässigkeit, Aussendruckfestigkeit und Dichtigkeit der Rohrfugen zu erfüllen. Eigene Versuche des Verfassers lassen ihn die Forderung aufstellen, dass für ein Rohr von 90 bis 92 cm l. W. ein Doppelpanzer von mindestens 0,5% Spiralarmierung und eine Betonzugsspannung bei Prüfdruck von 25 kg/cm<sup>2</sup> anzunehmen sind. Ein Grossexperiment an der neuen Aaretalleitung soll besondere Lieferbedingungen ermöglichen. Diese verlangen, dass sämtliche Rohre innert 15 min von Null auf einen fixierten Prüfdruck belastet werden müssen; dass 2% aller Röhren bis zum Bruch belastet, und dass alle Röhren bis zum Abtransport auf die Verlegungsstelle im Wasser gelagert werden müssen. Sobald das Rohr auf der Baustelle kommt, ist es zu verlegen, abzudichten und einzudecken. Die Wasserundurchlässigkeit wird durch Kornauswahl, Schleuder-Prozess und hohen Zementzusatz (> 400 kg/m<sup>3</sup> brutto) gesichert. Die Rohre werden für 1,20 m Ueberdeckung und 3,0 bzw. 4,5 at Prüfdruck bei 0 bzw. 1,8 at Innendruck fabriziert und auf der

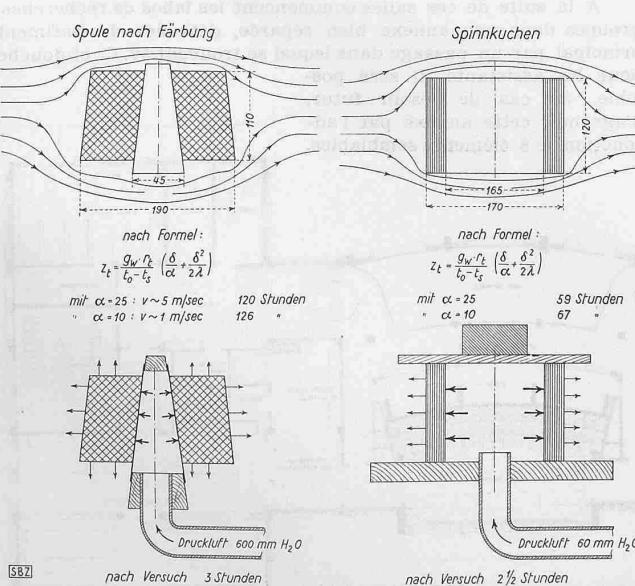


Abb. 17. Vergleich des bisherigen Trockenverfahrens (oben) mit dem Trocken durch eine Luftströmung von innen nach aussen (unten)