

**Zeitschrift:** Mémoires de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles.  
Botanique = Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in  
Freiburg. Botanik

**Herausgeber:** Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles

**Band:** 4 (1926-1947)

**Heft:** 2: Über den Einfluss einer partiellen Erwärmung des Stengels auf die  
Wasserversorgung

**Artikel:** Über den Einfluss einer partiellen Erwärmung des Stengels auf die  
Wasserversorgung

**Autor:** Koller, P. Joachim

**Kapitel:** II: Versuche mit leblosen Modellen

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-306868>

### **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:** 14.02.2026

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

## II. Versuche mit leblosen Modellen

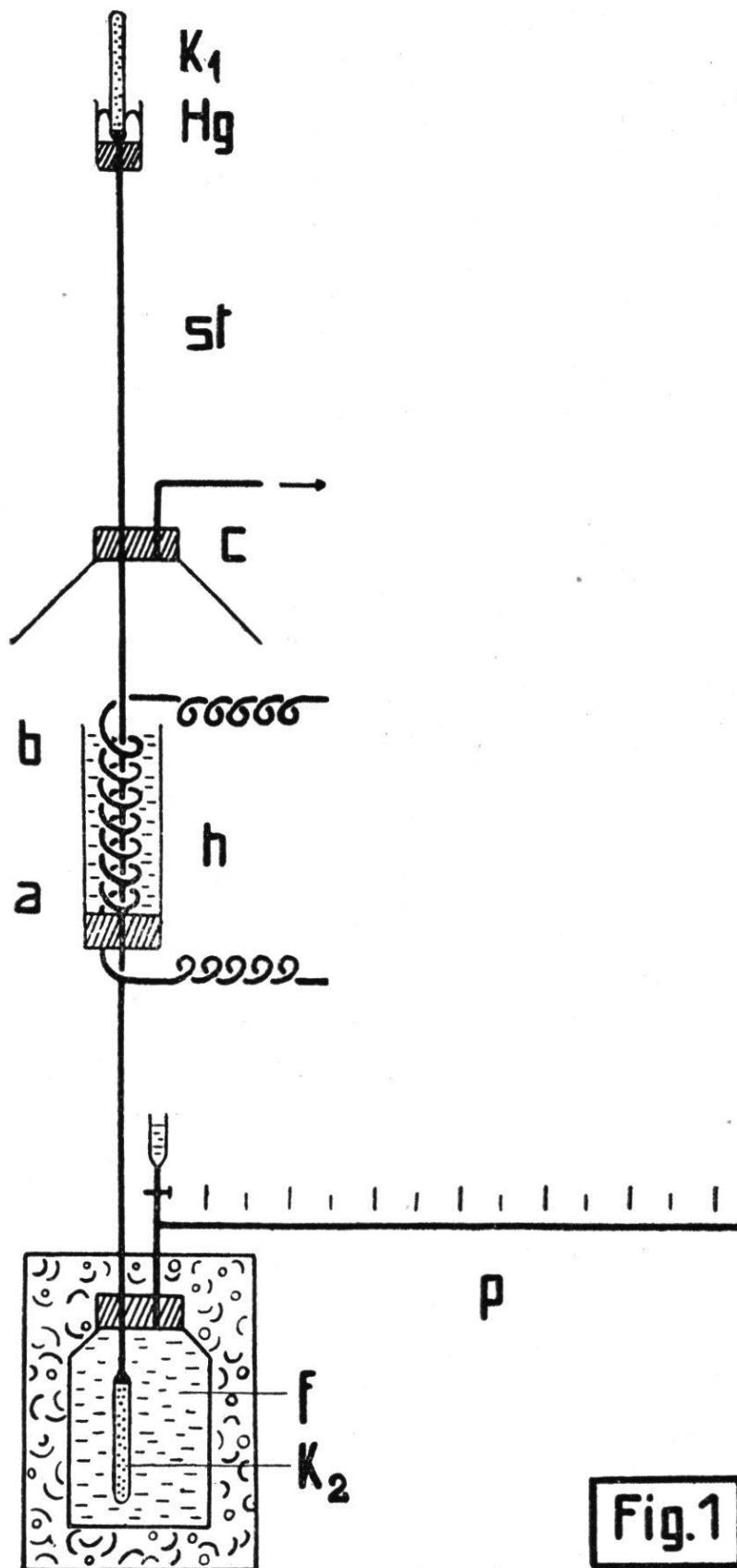
### 1. Methode.

In die mit guter Wärmeisolation versehene, mit Gummistopfen verschlossene Potometerflasche *f* (Fig. 1) münden 2 Kapillaren: das Steigrohr *st* (148 cm lang, 0,89 mm Lumenweite) und die Meßkapillare *p* (1,15 mm Lumendurchmesser) mit Einrichtung zum Nachfüllen. Das mit Wasser gefüllte Steigrohr *st* trägt oben unter Quecksilberdichtung Hg eine entlüftete (Methode bei URSPRUNG 1913, S. 388; 1915, S. 253), mit ausgekochtem Wasser gesättigte Kitasato-Kerze  $k_1$  und in bestimmten Versuchsserien unten eine zweite, gleiche Kerze  $k_2$ . Zur Erwärmung einer 22 cm langen Strecke des Steigrohres dient die Heizvorrichtung *h*, bestehend aus einem mit Wasser gefüllten Kupferrohr, einem das Steigrohr nicht berührenden Heizdraht (Transformator, Widerstand) einem (nicht gezeichneten) Rührer und einem Thermometer. Der Messinghut *c* dient zur Absaugung der warmen, feuchten Luft, die dadurch von  $k_1$  ferngehalten wird. Ein neben  $k_1$  aufgestellter Ventilator erlaubt die Verdunstung zu steigern. In diesem Modell stellt  $k_1$  das Blatt,  $k_2$  die Wurzel, *st* den Stengel dar. In andern Versuchen wurde das Stück *a* *b* des Steigrohres herausgeschnitten und dafür ein totes, entlüftetes, wasser-gefülltes Sproßstück von *Calamus* oder ein totes, ebenso vorbehandeltes Aststück von *Abies alba* eingesetzt. In gewissen Fällen erwies es sich als zweckmäßig, die Saugung der Kerze  $k_1$  durch die Saugung einer Wasserstrahlpumpe zu ersetzen.

### 2. Folgen der partiellen Erwärmung.

#### Theoretisches.

Folgen der Erwärmung sind: Ausdehnung des anfänglichen Wasservolumens während der Erwärmung und Verminderung der Viskosität des Wassers.



**Fig.1**

a) Ausdehnung während der Erwärmung.

Eine Vorstellung der Längenänderung der erwärmten Wassersäule  $a\ b$  geben folgende Daten. Aus den Angaben von HAGEN (WINKEL-

MANN, Hdb. d. Physik, 1906, 3, 91) folgt, daß eine 1 m lange Wassersäule von konstantem Querschnitt folgende Verlängerungen zeigt :

Bei Erwärmung von 10° auf 20° eine Verlängerung um 1,5 mm,	
» 20° » 30° » 2,5 mm,	
» 30° » 40° » 3,5 mm,	
» 40° » 50° » 4,3 mm,	
» 50° » 60° » 5,0 mm,	
» 60° » 70° » 5,7 mm,	
» 70° » 80° » 6,3 mm,	
» 80° » 90° » 6,8 mm,	
» 90° » 100° » 7,3 mm.	

Unter Vernachlässigung der gleichzeitigen Dimensionsänderung des kapillaren Saugrohres stellen diese Werte die Verlängerung einer 1 m langen Wassersäule dar. Wenn auch die Dimensionen des Steigrohres nicht genau konstant bleiben, so sehen wir doch, daß bei der Erwärmung um je 10° die Ausdehnung mit steigender Temperatur ständig zunimmt. Sie ist von 90° bis 100° fast 5 mal so stark wie von 10° bis 20°. Ist das Steigrohr oben geschlossen, so zeigt der Meniskus der Potometerkapillare p die Ausdehnung an. Je größer das erwärmte Wasservolumen in der Versuchszone und je enger die Potometerkapillare p ist, um so deutlicher wird ceteris paribus die Erscheinung sichtbar.

Bewegt sich das Wasser, wie in unserem Apparat, im Steigrohr aufwärts, so hängt das Verhalten des Meniskus in p natürlich ab von der Geschwindigkeit der Vorwärtsbewegung und der Geschwindigkeit der Wärmeausdehnung. Bedingt die Verdunstung von  $k_1$  eine Bewegung pro Minute von z. B. bloß +1 mm, die Erwärmung von —1,5 mm, so resultiert eine Rückwärtsbewegung von —0,5 mm ; betragen aber die gleichzeitigen Bewegungen +10 mm und —1,5 mm, so resultiert eine Vorwärtsbewegung von +8,5 mm.

In diesem Zusammenhang sei auch an eine Beobachtung von URSPRUNG (1916, S. 412) erinnert, nach welcher in einer vertikal stehenden, mit kaltem Wasser gefüllten Kapillare warmes Wasser durch den Auftrieb unter Umständen rasch emporsteigen kann. Bei meinen Versuchen dürfte dies schon deshalb nicht von wesentlicher Bedeutung sein, weil in den Experimenten mit lebenden Pflanzen die Stengel horizontal lagen.

### b) Viskositätsänderung.

Bleibt die Heizflüssigkeit nach der Erwärmung konstant auf z. B. 30°, und steigt das Wasser im Steigrohr empor, so kühlt sich die aus der erwärmten Zone austretende Wassersäule wieder ab, die in die erwärmte Zone eintretende Wassersäule erwärmt sich, so daß die erhitzte Strecke stets ungefähr gleich lang bleibt.

Die Viskosität des Wassers zeigt (nach BINGHAM und WHITE, LANDOLT-BÖRNSTEIN, 1, S. 136) folgende Abhängigkeit von der Temperatur :

°C	Viskosität	°C	Viskosität	°C	Viskosität
0	0,01797	40	0,006563	80	0,003570
10	0,01301	50	0,005500	90	0,003143
20	0,01006	60	0,004735	95	0,002993
30	0,007998	70	0,004075		

Die Bedeutung der Viskosität ergibt sich aus der Formel von POISEUILLE :  $Q = \frac{\pi}{8 \eta} \cdot \frac{PR^4}{L} \cdot T$ , worin  $Q$  = Ausflußmenge in der Zeit  $T$ ,  $P$  = Druck,  $R$  = Radius des Rohrlumens,  $\eta$  = Viskositätskoeffizient,  $L$  = Länge des Rohres bezeichnen. Da  $Q$  = Geschwindigkeit der Bewegung ( $V$ )  $\times$  Querschnitt ( $R^2 \pi$ )  $\times$  Zeit ( $T$ ) ist, folgt  $V = \frac{Q}{R^2 \pi \cdot T} = \frac{PR^2}{8 L} \cdot \frac{1}{\eta}$ . Setzen wir den ersten Term als konstant voraus, so verhält sich  $\frac{V_{20^\circ}}{V_{30^\circ}} = \frac{\eta_{30}}{\eta_{20}}$ ; dabei erstreckt sich die Erwärmung auf die ganze Rohrlänge. Je kürzer das erwärmte Rohrstück ist, um so geringer ist die Bedeutung der Viskositätsänderung.

### c) Veränderung der Versuchszone a b.

Ersetzen wir das Stück a b des Steigrohres st mit einem Lumen-durchmesser von 0,89 mm durch ein 6,3 mm dickes *Calamus*-Sproßstück, so wird der Wasser leitende Querschnitt erweitert und das erwärmte Wasservolumen vergrößert. Dies hat zur Folge, daß während der Erwärmung ceteris paribus der Meniskus im Potometerrohr p eine stärkere Tendenz zur Rückwärtsbewegung zeigt.

Ersetzen wir die einfache Glaskapillare a b durch ein *Abies*-Zweigstück, so wird dadurch auch der Filtrationswiderstand erhöht, wobei sich die Verminderung der Viskosität des Wassers um so deutlicher auswirken muß.

#### d) Erhitzung und Blasenbildung.

Da das durch das Steigrohr gesogene Wasser gelöste Gase enthält, kann die Temperaturerhöhung und Druckverminderung eine Blasenbildung einleiten (URSPRUNG 1915, S. 140, 108), die sich aber um so schwieriger einstellt, je besser die adhärierende Gasschicht von der Glaswand und eventuellen « Kernen » entfernt ist.

Die Siedetemperatur des Wassers hängt vor allem vom Luftdruck ab. Nachfolgende Tabelle, zusammengestellt nach LANDOLT-BÖRNSTEIN (2, S. 1316) gibt die dem betreffenden Barometerstand entsprechende Siedetemperatur an.

°C	mm Hg	°C	mm Hg	°C	mm Hg
0	4,579	60	149,38	97,714	700,0
10	9,209	70	233,7	98,106	710,0
20	17,535	80	355,1	98,494	720,0
30	31,824	90	525,76	100	760,0
40	55,324	96,916	680,0	110	1074,6
50	92,51	97,317	690,0		

Bei einem Außendruck von 17,5 mm siedet also das Wasser schon bei 20° C, bei 710 mm bei 98,1°.

In den Leitungsbahnen der Pflanzen ist aber Siedeverzug anzunehmen wegen der guten Benetzbarkeit (z. B. CHWOLSON, 1905, 3, 639) der Wände, des Fehlens von « Kernen » mit adsorbierter Luft und des geringen Durchmessers der Leitbahnen ; fand doch NÄGELI (1866, 366), daß Wasser unter der Luftpumpe in engen Röhren nicht kochte, während es in einem weiten Gefäß kräftig aufwallte. Entsprechend wird auch, wie MOUSSON (1858, 161) gezeigt hat, das Gefrieren erschwert. Tatsächlich vermochte ich in mit Wasser gefüllten Längsschnitten durch *Abiesholz* bei Erhitzung auf ca. 95° C keine Blasenbildung zu beobachten.

#### e) Einfluß von Stengel-, Blatt- und Wurzelwiderstand.

Es sei  $W_s$  = Widerstand des Stengels,  $W_w$  = Widerstand der Wurzel,  $W_b$  = Widerstand des Blattes,  $J$  = Stromstärke,  $P$  = bewegendende Kraft, so wird  $J = \frac{P}{W_s + W_w + W_b}$ .

Setzen wir willkürlich  $P = 1000$ ,  $W_{s\ 20^\circ} = 1000$ ,  $W_{s\ 80^\circ} = 333$ ,  $W_w = 0$  bzw. 1000,  $W_b = 0$  bzw. 1000, so erhalten wir

für $W_w = 0$ , $W_b = 0$ , $J_{20^\circ} = \frac{1000}{1000} = 1$	}	Durch Erwärmung des Stengels von $20^\circ$ auf $80^\circ$ steigt J von 1 auf 3.
für $W_w = 0$ , $W_b = 0$ , $J_{80^\circ} = \frac{1000}{333} = 3$		
für $W_w = 1000$ , $W_b = 0$ , $J_{20^\circ} = \frac{1000}{2000} = 0,5$	}	Durch Erwärmung des Stengels von $20^\circ$ auf $80^\circ$ steigt J von 1 auf 1,5.
für $W_w = 1000$ , $W_b = 0$ , $J_{80^\circ} = \frac{1000}{1333} = 0,75$		
für $W_w = W_b = 1000$ , $J_{20^\circ} = \frac{1000}{3000} = 0,33$	}	Durch Erwärmung des Stengels von $20^\circ$ auf $80^\circ$ steigt J von 1 auf 1,3.
für $W_w = W_b = 1000$ , $J_{80^\circ} = \frac{1000}{2333} = 0,43$		

Sind die Wurzel- und Blattwiderstände bedeutend größer als der Stengelwiderstand z. B.  $P = 1000$ ,  $W_w = W_b = 1000$ ,  $W_{s\ 20^\circ} = 10$ ,  $W_{s\ 80^\circ} = 3,3$ , so erhalten wir :

$J_{20^\circ} = \frac{1000}{2010} = 0,497$	}	Durch Erwärmung des Stengels von $20^\circ$ auf $80^\circ$ steigt J von 1,000 auf 1,004.
$J_{80^\circ} = \frac{1000}{2003,3} = 0,499$		

Je größer der relative Widerstand von Blatt und Wurzel ist, um so weniger macht sich die Widerstandsänderung durch Erwärmung bemerkbar.

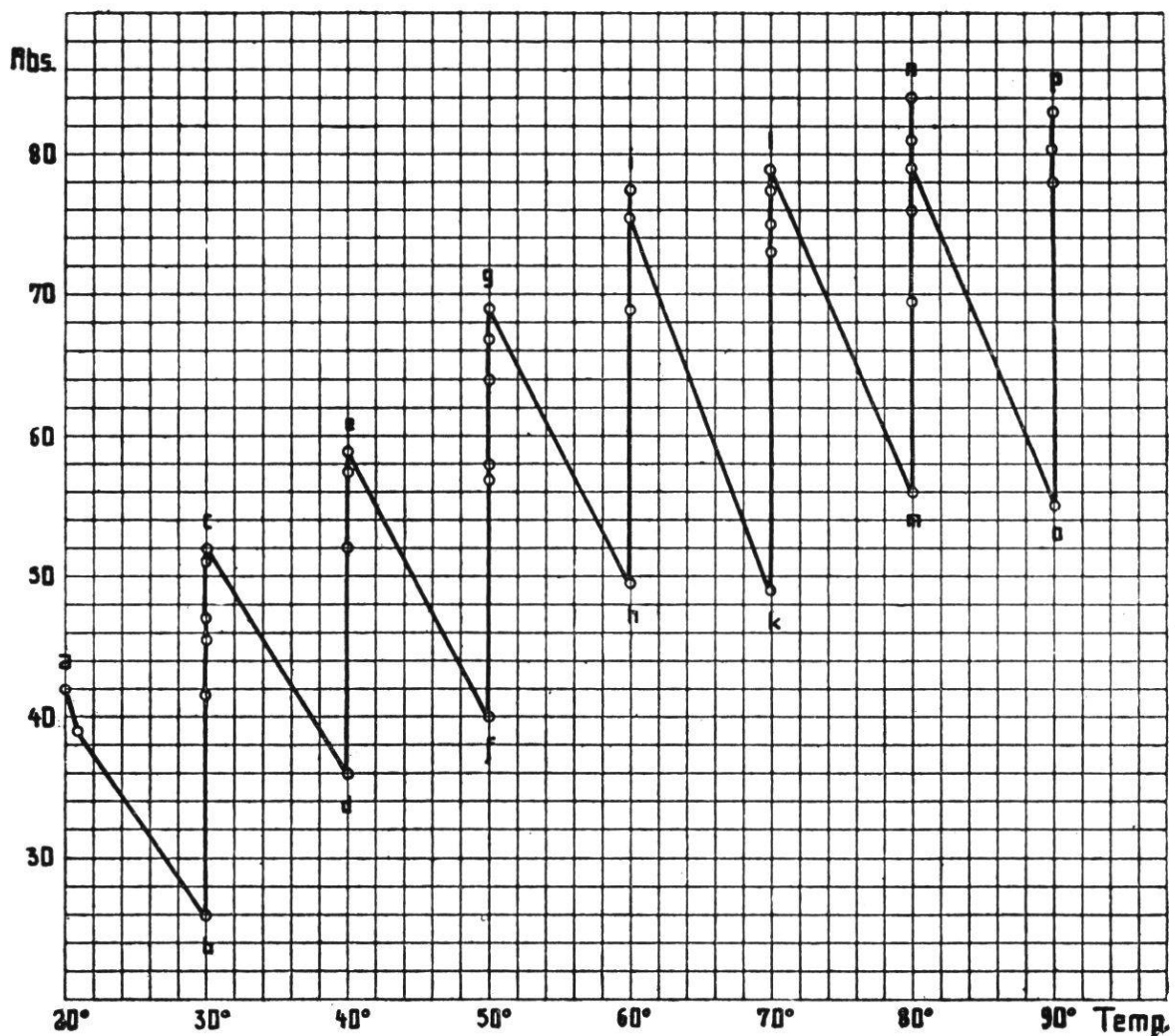
### 3. Versuche mit *Abies*.

Vorangestellt seien Versuche mit einem 27 cm langen, berindeten, toten, entlüfteten (URSPRUNG 1915, 253), wassergefüllten *Abies*-Zweigstück, das an der Stelle a b (Fig. 1) in die Steigkapillare eingeschaltet wurde. Die Saugung der Kerze  $k_1$  ist hier durch die Saugung einer Wasserstrahlpumpe (mit Manometer) ersetzt ; sie beträgt 695 mm Hg. Kerze  $k_2$  fehlt. Die Reaktionen sind deutlicher als bei der Glaskapillare a b, weil der *Abies*zweig 6,5 mm dick war, das Lumen der Kapillare aber nur 0,89 mm weit. Die erwärmte Wassermenge und ihre Volumen-zunahme ist beim Zweig größer als bei der Glaskapillare.

Versuch 1. Wie Kurve 1 zeigt, erfolgt die Erwärmung stufenweise. Auf der Abszisse ist die Temperatur in  $C^\circ$  abgetragen, auf der Ordinate die Absorption (Abs.), d. h. die Bewegung des Potometer-



meniskus pro 3 Minuten. Die Entfernung benachbarter Meßpunkte beträgt 3 Minuten. Während der Temperatursteigerung (a-b, c-d, e-f, g-h, i-k, l-m, n-o) fällt die Absorptionsgeschwindigkeit. Dieses Sinken ist offenbar bedingt durch die bei Temperaturzunahme eintretende Ausdehnung des Wassers, welche die Bewegung des Potometermeniskus verlangsamt. Bei Temperaturkonstanz (b-c, d-e, f-g, h-i, k-l, m-n, o-p) steigt die Absorptionsgeschwindigkeit wieder an, bis sie jenen Wert erreicht hat, der bei der konstanten Pumpensaugung für die jeweilige Viskosität des Wassers charakteristisch ist. Da die Viskosität mit steigender Temperatur abnimmt, erklärt sich das Ansteigen der Kurvenpunkte a, c, e, g . . . Daß dabei  $\frac{V_{20^{\circ}}}{V_{30^{\circ}}}$  nicht genau  $= \frac{\eta_{30}}{\eta_{20}}$ ,  $\left(\frac{1}{1,21} \text{ statt } \frac{1}{1,25}\right)$  (vgl. S. 58), dürfte auf experimentellen Unvollkommenheiten beruhen: Pumpensaugung und Temperaturkonstanz unterliegen kleinen Schwankungen; nicht die ganze Zweiglänge wurde auf die betreffende Tempe-



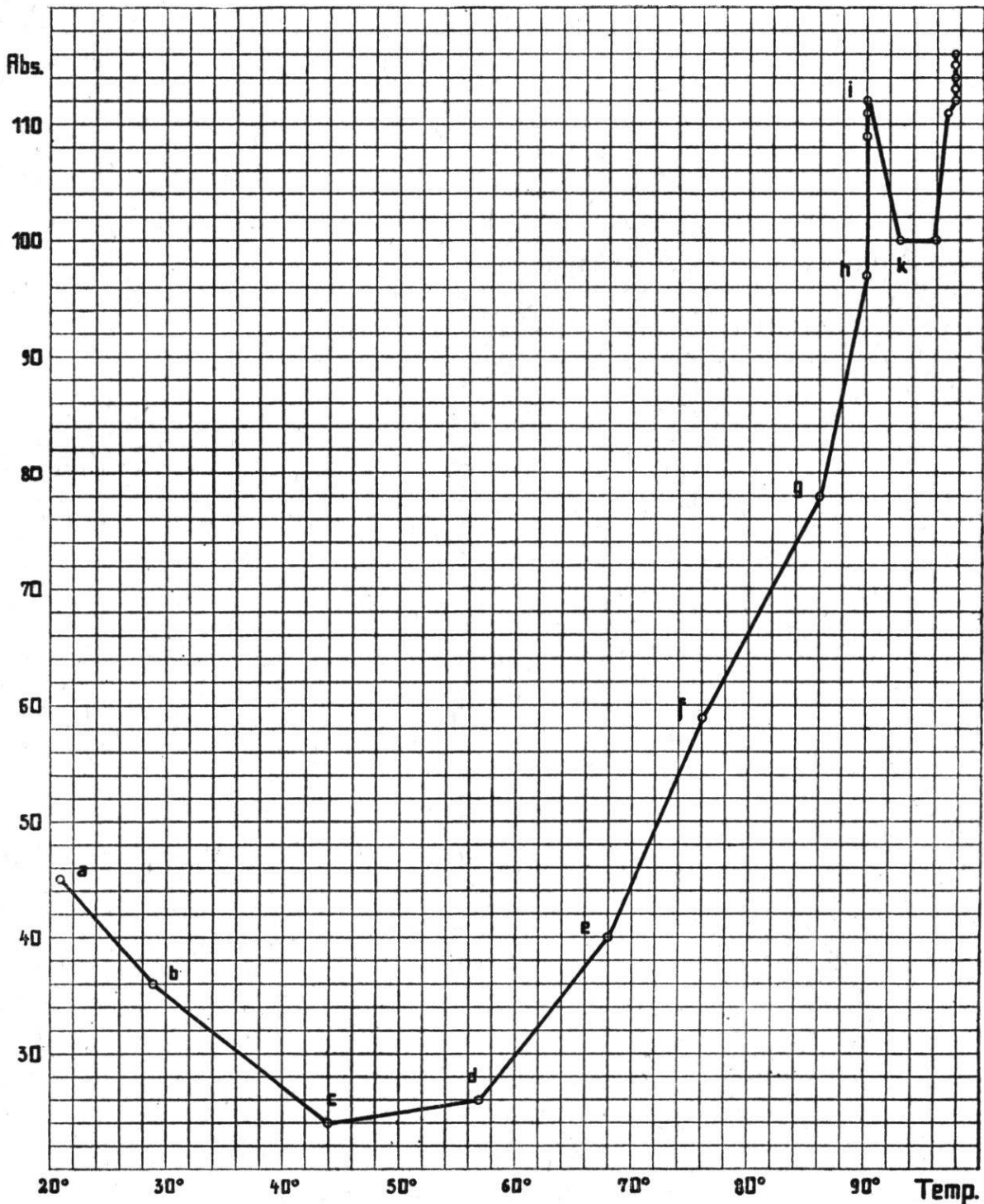
Kurve 1.

*Abies alba* I, tot, stufenweise erwärmt.



ratur erwärmt ; eventuell im Zweig verbliebene Blasen können durch ihre Ausdehnung bei Erwärmung die leitende Querschnittfläche ändern (vgl. auch BRAUNER 1935).

Versuch 2. Dasselbe *Abies*zweigstück wird hier nicht stufenweise, sondern gleichmäßiger erwärmt. Das Fallen der Absorptionskurve von a-c (Kurve 2) beweist, daß in dieser Zone die Hemmung



Kurve 2.

*Abies alba* I, tot, gleichmäßiger erwärmt.

der Absorptionsgeschwindigkeit durch Ausdehnung des Wassers größer ist als die Förderung durch Viskositätsabnahme. Die Erwärmung erfolgt zuerst rascher (von b-c in 3 Minuten um 15°). Von c-i geht die Temperatursteigerung immer langsamer vor sich (in 3 Minuten nur 13°, 11°, ... 4°, 0°), so daß nun die Hemmung schwächer wird, und die Förderung überwiegt. Von i-k ist wiederum die Hemmung durch Ausdehnung stärker.

#### 4. Versuche mit *Calamus*.

Ein 26 cm langes, 6,3 bzw. 7,2 mm dickes, totes, entlüftetes, wasser-gefülltes Sproßstück von *Calamus* wurde zwischen a und b in das Steigrohr st (Fig. 1) eingeschaltet. Die Bewegung des Wassers erfolgte hier nicht wie vorhin durch Pumpensaugung, sondern durch Verdunstung der Kerze  $k_1$ . Diese hängt ab vom Sättigungsdefizit  $S_d$  der umgebenden Luft und kann durch einen Ventilator wesentlich gesteigert werden. Die einen Versuche wurden mit, die anderen ohne Kerze  $k_2$  ausgeführt.

Obschon meine Untersuchungen nicht die Bedeutung des Sättigungsdefizites  $S_d$  verfolgen wollten, geht doch aus den Protokollen hervor, daß ceteris paribus die Verdunstung und damit auch die Absorptionsgeschwindigkeit mit dem Sättigungsdefizit  $S_d$  annähernd proportional zunimmt. Da Hygrometer und Thermometer etwa 10 cm von der Kerze entfernt waren, konnten die in Betracht fallenden Größen nicht genau erfaßt werden. Besonders groß war der Einfluß des Windes, indem mit Ventilator die Absorptionsgeschwindigkeit von 17 auf 200 anstieg.

Durch die Filterkerze  $k_2$ , die den Wurzelwiderstand andeuten soll, wird naturgemäß die Absorptionsgeschwindigkeit verlangsamt (II. 2e). Sie fiel unter möglichst gleichen übrigen Bedingungen von 84 mm auf 67 mm.

Die Erwärmung hat im Prinzip denselben Einfluß wie beim *Abies*-zweig, weshalb ich die diesbezüglichen Tabellen und Kurven nicht wiedergebe. Erfolgt die Temperatursteigerung stufenweise, so fällt die Absorptionsgeschwindigkeit während der Erwärmung und steigt an bei Temperaturkonstanz. Auch bei gleichmäßiger Erwärmung ist das Verhalten dem bei *Abies* ähnlich, nur hat die Viskosität bei dem aus Tracheiden bestehenden Koniferenholz offenbar eine größere Bedeutung; der Endanstieg der Absorptionskurve ist daher bei *Calamus* viel schwächer.

## 5. Versuche mit einer Glaskapillare.

Diese Versuche wurden zuerst ausgeführt, als das Steigrohr noch intakt war. Die Anordnung ist in Fig. 1 skizziert. Erwärmt wird eine 22 cm lange Zone des innen 0,89 mm weiten Steigrohres. Die Bewegung des Meniskus erfolgt durch die Verdunstung der Kerze  $k_1$ .

Das Verhalten bei Erwärmung ist im Prinzip dasselbe wie bei *Abies* und *Calamus*. Die Reaktionen sind aber viel schwächer, da in der erwärmten Zone die Wassermenge und der Filtrationswiderstand kleiner sind. Daher machen sich auch Störungen durch mangelhafte Konstanz der Badtemperatur, des Sättigungsdefizites  $S_d$  usw. viel stärker bemerkbar.

Zusammenfassung der Versuche mit leblosen Modellen, in welchen Wurzel und Blatt durch je eine Filterkerze dargestellt sind, der lebende Stengel durch ein Glasrohr oder ein totes Zweigstück. Die Transpiration der lebenden Blätter ist ersetzt durch die Verdunstung einer Filterkerze oder durch Pumpensaugung.

Während der Erwärmung erfolgt Ausdehnung des Steigrohr-, Gefäß- oder Tracheideninhaltes und daher, unter sonst gleichbleibenden Verhältnissen, Verminderung der Absorptionsgeschwindigkeit. Die Absorptionsgeschwindigkeit, d. h. die Meniskusbewegung in der Potometerkapillare pro Zeiteinheit, hängt, außer von der Viskosität des Wassers, ab: 1. von der Geschwindigkeit der Vorwärtsbewegung des Meniskus durch die Verdunstung der Kerze oder durch die Pumpensaugung; 2. von der Geschwindigkeit der Rückwärts- oder Vorwärtsbewegung des Meniskus durch Wärmeausdehnung oder Kontraktion. Beträgt z. B. Bewegung 1 pro Minute = +1 mm, Bewegung 2 pro Minute = -1,5 mm, so resultiert eine Rückwärtsbewegung von -0,5 mm; bei Bewegung 1 = +1 mm und Bewegung 2 = +1,5 mm, erfolgt eine Vorwärtsbewegung von +2,5 mm. Beträgt Bewegung 1 pro Minute = +10 mm, Bewegung 2 pro Minute = -1,5 mm, so resultiert eine Vorwärtsbewegung von +8,5 mm. Bewegung 2 ist bei gleicher Temperaturänderung um so stärker, je größer das erwärmte Volumen der Wasserleitbahnen ist. Zudem ist ceteris paribus Bewegung 2 um so größer, je rascher die Erwärmung erfolgt. Mit der Temperatur sinkt und steigt die Wandquellung und damit die Permeabilität der Wand, was sich besonders bei Koniferenholz auswirken muß.

Nach Temperaturkonstanz. Höhere Temperatur bedeutet Verminderung der Viskosität, also *ceteris paribus* Steigerung der Absorptionsgeschwindigkeit. Im gleichen Sinne wirkt Verlängerung der erwärmten Zone. Je größer der Filtrationswiderstand der erwärmten Stengelpartie ist, um so stärker macht sich *ceteris paribus* die Veränderung der Viskosität bemerkbar. Besonders deutlich zeigt die graphische Darstellung beim *Abieszweig*, daß *ceteris paribus* bei rascher Temperatursteigerung die Absorptionsgeschwindigkeit fällt, bei Temperaturkonstanz aber wieder auf jenen Wert ansteigt, welcher der jeweiligen Viskosität entspricht.