

B e r m a n , L. D.

VERDUNSTUNG UND WÄRMEÜBERGANG VON DER OBERFLÄCHE EINES WASSER-
RIESELFILMS BEI ZWANGSKONVEKTION

Übersetzung aus:

Issledovanie processov regulirovanija, teploperedaci
i obratnogo ochlaždenija. - Sbornik rabot Laboratorii
parovych turbin.

Vsesojuznyj teploteničeskij institut im. F. Dzer-
žinskogo.

Moskva-Leningrad: 1938, S. 130 - 159.

Russ.: **ИСПАРЕНИЕ И ТЕПЛОТДАЧА С ПОВЕРХНОСТИ
ДВИЖУЩЕЙСЯ ВОДЯНОЙ ПЛЕНКИ
ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА**

Isparenie i teplootdača s poverchnosti
dvižuščejsja vodjanoj plenki
pri vynuždennom potoke vozducha

Die im folgenden beschriebene experimentelle Untersuchung wurde im
Dampfturbinen-Labor des VTI (F.E.-Dsershinski-Unions-Institut für
Wärmetechnik¹⁾) durchgeführt. Es wurde dabei gleichzeitig das Pro-
blem der Wärmeberechnung in Rieselkühltürmen behandelt.

Die bisher veröffentlichten experimentellen Forschungsarbeiten zu
Verdunstung und Wärmeübergang an der Oberfläche einer als dünner
Film fließenden Flüssigkeit lassen sich in 2 Gruppen unterteilen.
Die erste Gruppe befaßt sich mit der Untersuchung von Anlagen,
deren Austauschzone mit Raschig-Ringen, Koks oder sonstigen
Schüttungen gefüllt ist. Wenn es von der herabfließenden Flüs-
sigkeit benetzt wird, bildet sich eine größer Berührungsfläche mit
dem umgebenen Gas. W h i t m a n und K e a t s , M e r k e l ,
H a a n u.a. haben dies in ihren Arbeiten untersucht.

¹⁾ VTI = Vsesojuznyj teploteničeskij imeni F.E.-Dzeržinskogo
(Anm. d. Übers.)

In den darin beschriebenen Anlagen ist die genaue Größe der freien Oberfläche der Flüssigkeit meist nicht bekannt. Daher beziehen sich die Koeffizienten von Verdunstung und Wärmeübergang nicht auf die Oberfläche sondern auf die Fläche oder Volumen der Anlage.

Natürlich lassen sich diese Versuchsergebnisse nicht auf Rieselanlagen eines anderen Typs übertragen. Die zweite Gruppe, zu der es bisher jedoch erst wenige Arbeiten gibt, untersucht Verdunstung und Wärmeübergang einer an den Innenflächen von senkrechten Kanälen herabfließenden Flüssigkeit. Uns sind nur 2 ausführliche Untersuchungen bekannt, die zu dieser Gruppe gehören, nämlich die Arbeiten von M a t o u s e k sowie G i l l i l a n d und S h e r w o o d , wobei sich letztere nur auf die Untersuchung der Verdunstung bei fast isothermem Zustand beschränkt.

C h i l t o n und C o l b u r n veröffentlichten die Ergebnisse sehr weniger Versuche (insges. 5). Alle o.e. Versuche der zweiten Gruppe wurden mit einer an den Innenflächen runder Rohre herabfließenden Flüssigkeit durchgeführt¹⁾.

Die Ergebnisse der veröffentlichten Experimente weichen erheblich voneinander ab; ebenso die Schlußfolgerungen der theoretischen Untersuchung zur Verdunstungskühlung von Flüssigkeiten. Diese Tatsache sowie fehlende Versuchsdaten zu einer in rechtwinkligen Kanälen auf ebenen Flächen herabfließenden Flüssigkeit veranlaßte mich, eine experimentelle Untersuchung durchzuführen, anhand derer die Werte der Verdunstungs- und Wärmeübergangskoeffizienten bestimmt werden sollten. Dies sollte unter Bedingungen geschehen, die denen von Rieselkühltürmen, wie sie in der Industrie verwandt werden, ähnlich sind. Gleichzeitig sollten - soweit möglich - einige zugehörige theoret. Thesen überprüft werden. Diese Versuche wurden in den Jahren 1936. - 37 durchgeführt.

1) Im Leningrader Forschungsinstitut für Hydrotechnik (Naučno-isledovatel'skij institut gidrotechniki, Leningrad) untersuchte 1934 der Ingenieur D.N. Bibikov Verdunstung und Wärmeübergang von an ebenen vertikalen Platten herabfließendem Wasser. Die Ergebnisse dieser Versuche wurden bisher jedoch noch nicht veröffentlicht.

Bevor wir zur Versuchsbeschreibung übergehen, möchte ich noch kurz auf die wichtigsten Formeln und die darin enthaltenen Koeffizienten eingehen.

Nimmt man für die bei Kontakt übertragene Wärmemenge die gegenwärtig gebräuchliche Gleichung

$$Q = a(t - \vartheta) \cdot F,$$

so sind für die verdunstete Flüssigkeitsmenge mehrere Symbole zu finden. Neben Arbeiten, die die Menge verdunsteter Flüssigkeit mit der Differenz der Partialdrücke auf Flüssigkeitsoberflächen und umgebendem Gas in Bezug setzen (was erstmals von Dalton eingeführt wurde), gibt es auch Arbeiten, die anstelle der Differenz der Dampfdrücke die Differenz der Dampfkonzentrationen oder die Differenz des Feuchtigkeitsgehalts des Gases setzen.

Theoretische Überlegungen, mit denen wir uns jetzt jedoch nicht aufhalten können, zeigen, daß bei einem isothermen Vorgang mit gleicher Berechtigung sowohl die Differenz der Partialdrücke als auch die Differenz der Konzentrationen eingesetzt werden kann. Bei einem nichtisothermen Vorgang, d.h. bei Temperaturdifferenz von Flüssigkeit und umgebendem Gas, ist das Verhältnis von verdunsteter Flüssigkeitsmenge zur Differenz der Partialdampfdrücke eher gerechtfertigt. Da wir es in der Praxis meist mit einem nichtisothermen Verdunstungsvorgang zu tun haben, ergibt sich nach den in folgenden beschriebenen Versuchen für die Bestimmung des Verdunstungskoeffizienten folgende Formel:

$$G = \beta_p \cdot (P'' - P) \cdot F,$$

wobei G Menge der verdunsteten Flüssigkeit in kg/h

β_p Verdunstungskoeffizient in l/h

P'' und P Partialdampfdrücke an der Oberfläche der Flüssigkeit bzw. im Kern des Gasstroms in kg/m².

Ebenso erscheint es eher gerechtfertigt, den Diffusionskoeffizienten mit dem Partialdruckgradienten ins Verhältnis zu setzen und nicht mit dem Konzentrationsgradienten. Setzt man für den Diffusionskoeffizienten k ein und nimmt für die Größen, die sich jeweils auf Differenz und Gradient der Partialdrücke beziehen, den Index p sowie

c für die Größen, die sich auf Differenz und Gradient der Konzentrationen beziehen, so lassen sich folgende Beziehungsgleichungen aufstellen:

$$\beta_c = \beta_p \cdot RT,$$
$$k_c = k_p \cdot RT,$$

wobei T Temperatur in °K
und
R Gaskonstante des diffundierenden Stoffstromes.

Die Koeffizienten α und β_p in obigen Gleichungen können sich je nach Geschwindigkeit und Zustand der durchströmenden Luft, Temperatur und Oberflächenbeschaffenheit der Flüssigkeit u.ä. in relativ großen Bereichen ändern. Daher ist es nicht möglich, mit diesen vereinfachten empirischen Gleichungen für diese Koeffizienten, die meist nur deren Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit berücksichtigen und eher Zufallscharakter tragen, die ihnen zugrundeliegenden Versuchsdaten¹⁾ ausreichend vollständig und zuverlässig wiederzugeben. Weitaus zweckmäßiger erscheint heutzutage die Methode, Versuchsergebnisse zusammenzufassen. Dies führt zur Ähnlichkeitstheorie²⁾, die bei der Untersuchung des Wärmeaustauschs häufig angewandt wird.

Seit einiger Zeit gibt es theoretische Untersuchungen, die diese Methode auch auf dem Gebiet der Verdunstung von Flüssigkeiten einsetzen. Hervorzuheben sind dabei die Arbeiten von Schmidt und Nusselt sowie die weiterführenden Arbeiten von Ackermann und Arnold. Die Anwendung der Ähnlichkeitstheorie

1) Eine relativ ausführliche Übersicht über die empirischen Gleichungen für die Geschwindigkeit der Wasserverdunstung findet man bei Thiessenhusen, Lur'e und Michajlov u.a.. Das Literaturverzeichnis befindet sich am Schluß dieses Artikels.

2) Skljarenko und Baranavev versuchten, die Aufgabe der Verdunstungsgeschwindigkeit von Flüssigkeiten rein analytisch zu lösen, ohne die Ähnlichkeitstheorie zu Hilfe zunehmen. Eine solche Lösung ist jedoch mit entsprechendem Näherungsgrad nur bei laminarer Strömung des Gases, das die Flüssigkeit umgibt, möglich. Bei Turbulenz scheint eine analytische Lösung nach unserem momentanen Wissensstand nicht möglich zu sein. Skljarenko und Baranavev erhielten die Endgleichung für die turbulente Strömung, indem sie die Differentialausgangsgleichung unter Bedingungen anwandten, bei denen sie ihre Gültigkeit verliert.

auf die Untersuchung der Verdunstungskühlung von Flüssigkeiten wird dadurch wesentlich erleichtert, daß die Folgerungen die sich nach dieser Theorie für den Wärmeaustausch ergeben, aufgrund der Analogie zwischen Wärmeleitfähigkeits- und Diffusionserscheinungen größtenteils auch für den Stoffaustausch gelten.

Bei turbulenter Strömung des durchfließenden Mediums können die Abhängigkeiten für die Wärmeübergangs- und Verdunstungskoeffizienten der Ähnlichkeitstheorie entsprechen und mit den zur Verfügung stehenden Daten durch folgende Bedingungsgleichungen ausgedrückt werden:

$$Nu = c \cdot K_1 \cdot Re^m \cdot Pr^n \cdot \left(\frac{l}{d}\right)^p,$$

$$Nu' = c \cdot K_2 \cdot Re^m \cdot Pr'^n \cdot \left(\frac{l}{d}\right)^p.$$

Nu' entspricht der Nusselt-Zahl für den Wärmeaustausch und läßt sich aus der Gleichung

$$Nu' = \frac{\beta_c \cdot d}{k_c}$$

bestimmen.

Früher dargelegte Beziehungen zeigen, daß sich der Wert dieses Kriteriums nicht ändert, wenn man bei o.e. Gleichung die Größen β_c und k_c durch β_p bzw. k_p ersetzt.

Die Koeffizienten K_1 und K_2 berücksichtigen den Einfluß der Massendiffusions- und -konvektionsströme bei gleichzeitiger Verdunstung und Wärmeübertragung. In den theoretischen Gleichungen von A c k e r m a n n ergibt sich bei durchschnittlichen Arbeitsbedingungen in Kühltürmen für K_1 ca. 0,98 und für K_2 ca. 1,02. Dabei ist zu berücksichtigen, daß A c k e r m a n n s Formeln, die er anhand sehr vereinfachter Verfahrensschemata ableitete, nur als erste Näherung angesehen werden können.

Seit Erscheinen der Arbeit von L e w i s , die dieses Problem behandelt, befaßt sich die Literatur intensiv mit der Klärung der Abhängigkeit von Wärmeübergangs- und Verdunstungskoeffizienten. L e w i s ' Arbeit brachte jedoch ebensowenig wie die späteren Arbeiten von H i r s c h und K i r s c h b a u m die richtige Lösung dieses Problems. Der Hauptfehler der o.e. Arbeiten sind nicht

die in der Literatur erwähnten Ungenauigkeiten bei den Ableitungen, sondern der Versuch, die gesuchte Abhängigkeit nur über eine Untersuchung der Gleichungen für Wärme- und Stoffausgleich zu erhalten, die in theoretischen Formeln ausgedrückt sind und nicht die physikalischen Gegebenheiten von Wärme- und Stoffaustausch widerspiegeln. Daher erscheint der Weg richtiger, den *Schmidt* und *Nusselt* bei der Untersuchung dieses Problems eingeschlagen haben. Sie gingen von identischen Differentialgleichungen für Wärmeaustausch und Diffusion aus und wandten das Ähnlichkeitsprinzip an.

Die Ähnlichkeitstheorie ergibt für das Verhältnis der Wärmeübergangs- und Verdunstungskoeffizienten eine kompliziertere Abhängigkeit als bei *Lewis*. Gleichzeitig ergeben die nach der Ähnlichkeitstheorie ermittelten Formeln für die Verdunstung von Wasser in Luft zahlreiche, ziemlich nah bei *Lewis*' Wert liegende Werte für dieses Verhältnis und bestätigen vor allem *Lewis*' Ableitung insofern, als der Wert des o.e. Verhältnisses nicht von der Strömungsgeschwindigkeit des Gases und nur verhältnismäßig wenig von den Temperaturverhältnissen während des Prozesses abhängig ist.¹⁾ Setzt man in obige Gleichung für Nu und Nu' die Werte K_1 und K_2 aus der Ackermann-Gleichung ein, so erhält man bei einem Gesamtdruck von 1,013 ata und einer Differenz der Wasserdampfpartialdrücke von ca. 0,1 ata für den Quotienten $\frac{\alpha}{\beta_p}$ folgende Werte:

Temperatur	°C	0	10	20	30	40
Relation $\frac{\alpha}{\beta_p} \cdot 10^{-4}$	kal/m ² °C	0,353	0,352	0,351	0,349	0,348

Dabei gilt $n = 0,37$ (nach *Krausold*).

¹⁾ Nach *Kirschaum* kann sich das Verhältnis der Wärmeübergangs- und Verdunstungskoeffizienten in relativ breiten Bereichen in Abhängigkeit der Anfangs- und Endparameter von Wasser und Luft ändern. Dies läßt sich dadurch erklären, daß die Ableitung nicht den tatsächlichen Wert für das Verhältnis der untersuchten Koeffizienten angibt, sondern nur zeigt, wie dieses Verhältnis aussehen müßte, damit bei den gegebenen Anfangs- und Endparameter die Wärmemenge, die bei Berührung an das Wasser übertragen wird, den Wärmeverbrauch für die Verdunstung ausgleicht.

Theoretische Überlegungen führen für den Fall der turbulenten Luftströmung zu folgenden wichtigen Schlußfolgerungen:

1. Bei getrennten Wärmeaustausch- und Verdunstungsprozessen ergeben sich identische Bedingungsgleichungen für analoge Kriterien; vernachlässigt man den Unterschied im Grenzbereich, was für die Verdunstung bei kleinen Partialdruckdifferenzen zulässig ist, dann müssen auch die konstanten Größen obiger Gleichung für beide Vorgänge identisch sein.
2. Bei normalen Arbeitsbedingungen in Kühltürmen, d.h. bei Anfangstemperaturen des Wassers von max. 50 - 60 °C, dürfen sich die Werte Nu und Nu' , die dem gemeinsamen Verlauf von Wärmeübergang und Verdunstung entsprechen, bei sonst gleichen Bedingungen nur wenig von den Zahlenwerten unterscheiden, die den getrennten Vorgängen entsprechen.
3. Der Quotient der Wärmeübergangs- und Verdunstungskoeffizienten $\frac{\alpha}{\beta_p}$ ist hauptsächlich von den physikalischen Konstanten abhängig, die sich je nach Temperatur nur geringfügig ändern und sich daher für oben genannten Temperaturbereich nur in sehr engen Grenzen ändern.

Die experimentelle Überprüfung o.e. Folgerungen ist für die Praxis von wesentlicher Bedeutung, da deren Bestätigung es möglich machen würde, bei der Bestimmung des Verdunstungskoeffizienten auf das im Forschungsbereich Wärmeübergang reichlich vorhandene empirische Material zurückzugreifen.

Bisher gibt es hierzu jedoch nur wenige empirische Arbeiten. Sie liefern auch nicht genügend Material für die praktische Untersuchung. In o.e. Arbeiten von *M a t o u s e k*, *G i l l i l a n d* und *S h e r w o o d* ergibt sich für die Verdunstungswerte eine Divergenz bis zu 50 %. Die Auswertung der Daten von Versuchen für Industrie- und Laborzwecke führte für den Quotienten von Wärmeübergangs- und Verdunstungskoeffizient zu Werten, die mit Erhöhung der Wassertemperatur erheblich ansteigen und im Vergleich zu den theoretischen Werten (*R o b i n s o n*, *M e r k e l*, *W o l f*)

zwei- bis dreimal größer sind. Dies führte zu einer Reihe von Schlußfolgerungen, die dieses Ergebnis und insbesondere die Folgerung über den sinkenden Partialdruck auf Flüssigkeitsoberflächen bei Temperaturerhöhung erklären. Jedoch können die Daten, die man bei Versuchen in Kühltürmen erhielt, als nicht ausreichend zuverlässig angesehen werden, da es überaus schwierig ist, die Wärmemenge, die vom Wasser im Kühlturm abgegeben wird, in die durch Konvektion an die Luft übertragene Wärme und die Wärme, die bei Verdunstung verbraucht wird, jeweils genau aufzuteilen.

Die obigen theoretischen Überlegungen gelten nur bei voll ausgebildeter turbulenter Luftströmung. Bei Auswertungen im Falle von Kühltürmen kommt gewöhnlich keine laminare Luftströmung vor, jedoch ist der Übergangsbereich von laminarer zu turbulenter Strömung für die Praxis von großer Bedeutung. Die Erscheinung des Wärme- und insbesondere des Stoffaustauschs ist für o.e. Übergangsbereich bisher nur wenig erforscht; ebenso gibt es für diesen Bereich noch keine überzeugenden Formeln zur Bestimmung der Wärmeübergangs- und Verdunstungskoeffizienten.

Der Einfluß der Rauigkeit auf die Intensität des Wärmeaustauschs ist ebensowenig erforscht. Die vorhandenen Untersuchungen zum Wärmeübergang beziehen sich mit nur wenigen Ausnahmen (z.B. J ü r g e s) auf glatte Oberflächen. So hat man es bei der Untersuchung der Verdunstungskühlung von Flüssigkeiten, die als Film fließen, mit einer Gasströmung (Luft) entlang einer sich bewegenden welligen Oberfläche zu tun. Selbst die Oberflächenvergrößerung des Films kann sich - wie die theoretische Untersuchung von M e l v i l l e zeigt - aufgrund der Welligkeit nicht wesentlich auf die Menge verdunsteter Flüssigkeit auswirken. Dies trifft jedoch nicht auf den hydrodynamischen Luftstrom zu, dessen Einfluß M e l v i l l e nicht berücksichtigte. Das Vorhandensein einer sich bewegenden welligen Oberfläche muß sich auf die Hydrodynamik des Luftstroms auswirken, was sich wiederum in den Werten der Verdunstungs- und Wärmeübergangskoeffizienten widerspiegelt. Die im folgenden beschriebenen Versuche bestätigen dies.

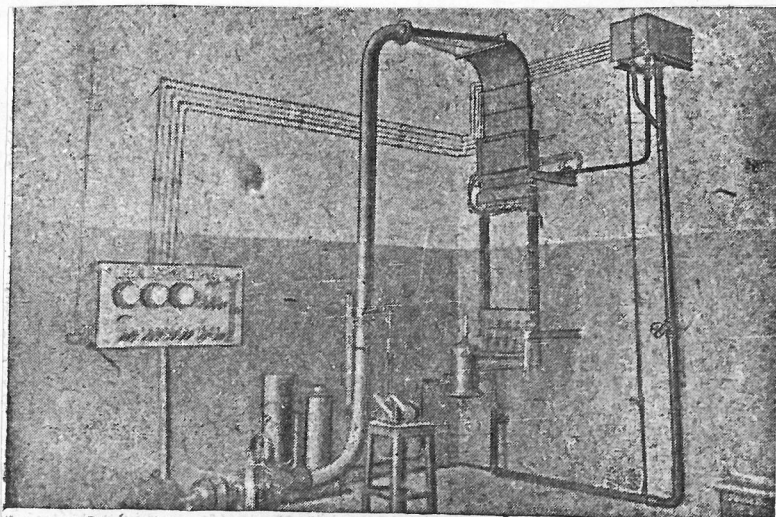
Versuchsanlage und Meßmethoden

In Abb. 1 ist die gesamte Versuchsanlage abgebildet, während Abb. 2 die schematische Darstellung mit Angabe der Meßpunkte zeigt.

Die Meßstrecke der Anlage ist ein rechtwinkliger senkrechter Kanal, der aus zwei Glasplatten mit abgrenzenden Holzplatten dazwischen besteht. Die Platten sind an den offen liegenden Teilen 0,5 m breit und 1 m hoch. Da die Meßstrecke, die in Abb. 3 detaillierter dargestellt ist, zerlegt werden kann, kann der Plattenabstand durch Austauschen der Latten, die die engen Kanalwände bilden, geändert werden. Bei Versuchen mit einer Wassertemperatur über Zimmertemperatur wurden die Platten außen mit 6 mm dicken Asbestplatten isoliert. Da die Platten aus Glas sind, kann man den Wasserfilm ständig kontrollieren.

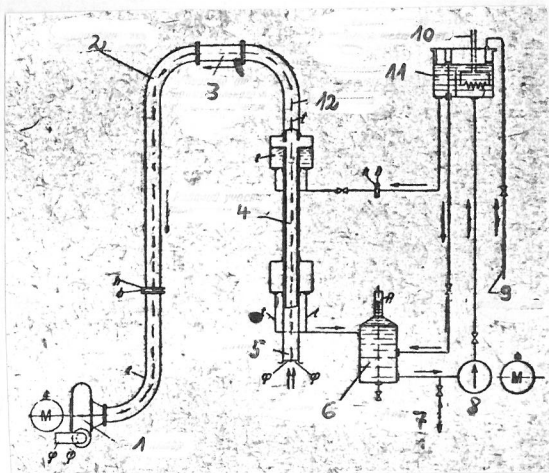
Das Wasser im Überlaufbehälter, in dem sich ein elektrisches Heizgerät befand, floß aufgrund der Schwerkraft in zwei Auffangbehälter, die außen an den Platten befestigt waren. Es floß in einem dünnen, die gesamte Plattenoberfläche benetzenden Film über den oberen Rand der Platten, die die Innenwände der Behälter bildeten, über die 25 % geneigten Unterkanten in die Auffangbehälter und von da in den unteren Meßbehälter. Zahl und Größe der Rohre für das aus den Aufnahme- rinnen abfließende Wasser wurden so gewählt, daß keine Luft in das System gelangen konnte. Aus dem Meßbehälter wurde das Wasser in den Überlaufbehälter zurückgepumpt, und o.e. Kreislauf begann von neuem. Der beim Pumpen entstehende Wasserüberlauf gelangte durch ein Überlaufrohr direkt in die untere Aufnahme- rinne.

Abb. 1 Gesamtansicht der Versuchsanlage



Die gleichmäßige Verteilung des Wassers zwischen den beiden Platten wurde anfangs durch die direkte Volumenmessung der Durchflußmenge kontrolliert, dann anhand der Temperaturdifferenz des auf die Platten gelangenden und abfließenden Wassers. Zahlreiche Maßnahmen wurden getroffen, um die gleichmäßige Verteilung des Wassers über die Plattenbreite zu gewährleisten. Dies gelang jedoch nicht vollständig, was vor allem auf einen ungenauen Schliff der Oberkanten der Glasplatten zurückzuführen ist. Daher ergab sich an den Platten-seiten eine etwas höhere Durchflußmenge als im Mittelfeld.

Abb. 2 Schemat. Darstellung der Versuchsanlage



- 1 Ventilator
- 2 Zylindr. Luftkanal
- 3 Übergang vom rechtwinkligen zum runden Querschnitt
- 4 Meßstrecke (rechtwinkliger Kanal)
- 5 Lufteintritt
- 6 Meßbehälter
- 7 Entleerung
- 8 Pumpe
- 9 Von der Wasserleitung
- 10 Zum elektrischen Heizgerät (11 kW)
- 11 Überlaufbehälter
- 12 Dämpfer

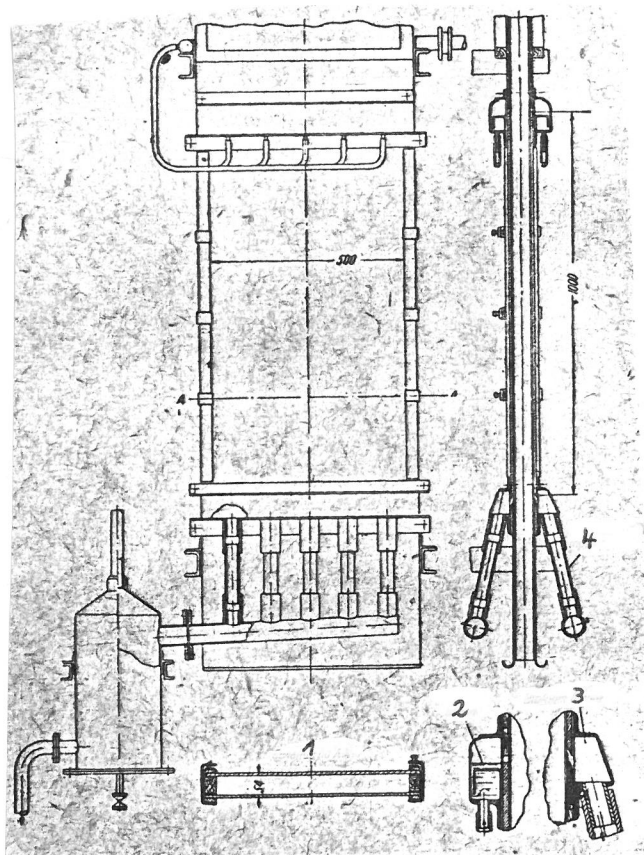
Durch einen Ventilator wurde Luft durch die Anlage gesaugt. Am Lufteintritt gab es keine Beruhigungsstrecke. Unregelmäßigkeiten im Luftstrom konnten vor Eintritt der Luft in die Meßstrecke aufgrund einer geringfügigen Verlagerung des Auffangbehälters in den Luftkanal hinein vorkommen.

Die Durchflußmenge des auf die Platten gelangenden Wassers wurde mittels einer geeichten gespannten Membran bestimmt. Der Druckabfall in der Membran wurde mit zwei U-förmigen Wasserdifferenzdruckmessern gemessen. Die verdunstete Wassermenge bestimmte man mittels eines Wasserstandglases mit konischem Deckel nach dem Flüssigkeitsspiegel im Auffangbehälter. Durch regelmäßiges Nachfüllen der verdunsteten Wassermenge wurde der Flüssigkeitsspiegel auf einer bestimmten Höhe

gehalten. Ein möglicher Meßfehler hinsichtlich der verdunsteten Wassermenge hing vor allem von der Versuchsdauer ab, die jedoch so gewählt wurde, daß der max. Meßfehler nicht über $\pm 5\%$ lag.

Zur Bestimmung der Luftmenge wurden zwei auswechselbare gespannte Membrane verwandt. Mit zwei Mikromanometern wurde der Druckabfall in der Membran gemessen (Fjuss oder N.E. Schukowski-Zentralinstitut für Aero- und Hydrodynamik¹⁾).

Abb. 3 Meßstrecke der Versuchsanlage



- 1 Querschnitt bzgl. AA
- 2 Auffangbehälter
- 3 Aufnahmeerinne
- 4 Glasrohr

Die Wassertemperatur vor und nach den Platten wurde mit Quecksilberthermometern gemessen. Bei nichtisothermem Zustand wurden auch noch die Wassertemperaturunterschiede vor und nach der Abkühlung mit zwei Differential-Kupfer-Konstantan-Thermoelementen gemessen. Mit diesen Thermoelementen maß man die Temperaturverteilung des Wassers über der Plattenhöhe sowie die Lufttemperaturdifferenz vor und nach der Meß-

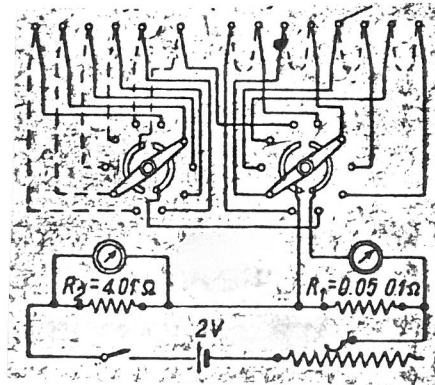
1) CAGI-Central'nyj aërogidrodinamičeskij institut im. N.E. Žukovskogo (Anm. d. Übers.)

strecke. Alle Thermoelemente waren nach der Kompensationsschaltung von Lindex-Rothe angeschlossen (Abb. 4).

Abb. 4 Schemat. Darstellung der Schaltung der Thermoelemente

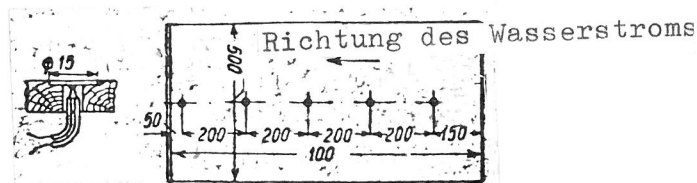
Differentialthermoelemente
an der Plattenhöhe

Differentialthermoelemente
am Ein- und Auslaß von Luft
und Wasser



Bei der Untersuchung der Temperaturverteilung bzgl. der Plattenhöhe wurde eine Glasplatte durch eine Holzplatte ersetzt, die an der Innenseite mit dünnen Kupferbändern abgedichtet war, an die Kupfer- und Konstantandraht angelötet war (Abb. 5). Die zweite Lötstelle des Differentialthermoelementes befand sich dabei in dem Rohr auf der Wassereintrittsseite.

Abb. 5 Anordnung der Thermoelemente in der Platte



In einigen Versuchen wurde der Lufttemperaturunterschied mit 5 Differentialthermoelementen gemessen, die gleichmäßig entlang der Kanalbreite verteilt waren. In den übrigen Versuchen wurden nur zwei Thermoelemente aufgestellt, deren Durchschnittswerte relativ eng mit o.e. Anzeigen der 6 Thermoelemente zusammenfielen.

Temperatur und Feuchtigkeit der eintretenden Luft wurden mit zwei Assmann-Aspirationspsychrometern gemessen, Temperatur und Feuchtigkeit der austretenden Luft mit zwei August-Psychrometern. Letztere befanden sich hinter dem Ventilator in einem Auslaßrohr, in dem die minimale Luftgeschwindigkeit ca. 3 m/sec betrug. Zur Beseitigung des Strahlungseinflusses wurden die Rohrwände innen mit einer Aluminiumglanzfolie verkleidet. Die August-Psychrometeranzeigen dienten zur Bestimmung des Wasserdampfpartialdrucks in der ausströmenden Luft. Die Erwärmung der Luft im Ventilator um 2 - 3°C konnte sich nicht auf den Wert des Partialdampfdruckes auswirken, da dieser bei gegebenem Barometerdruck mit ziemlicher Genauigkeit nur vom Feuchtigkeitsgehalt der Luft abhängt.

Die Quecksilberthermometer zur Messung der Lufttemperatur waren direkt hinter der Meßstrecke im Rohr vor dem Ventilator angebracht.

Auswertung der Versuchsdaten

Die Versuchsergebnisse werden als Abhängigkeit zwischen den Nusselt- und Reynolds-Zahlen dargestellt. Dabei ergibt sich für den konvektiven Wärmeübergang

$$Nu = \frac{ad}{\lambda}$$

und für die Verdunstung

$$Nu' = \frac{\beta_p \cdot d}{k_p}$$

- wobei
- | | |
|-----------|---|
| d | äquivalenter hydraulischer Durchmesser, bestimmt als doppelter Plattenabstand, in m |
| λ | Wärmeleitfähigkeitskoeffizient der Luft, in kcal/m h °C |
| | und |
| k_p | Diffusionskoeffizient, bezogen auf den Partialdruckkoeffizienten in m/h. |

Der Verdunstungskoeffizient errechnet sich nach der Gleichung

$$\beta_p = \frac{G_u}{(P'' - P)_m \cdot F} \left[\frac{l}{h} \right],$$

- wobei G_u Menge des verdunsteten Wassers, gemessen im Behälter, in kg/h
- $(P'' - P)_m$ mittlere Partialdruckdifferenz des Wasserdampfs auf der Flüssigkeitsoberfläche und im Stromkern, in kg/m^2
- und
- F Plattenoberfläche, in m^2 .

Die Partialdrücke des Wasserdampfs auf die Oberflächen sind gleich dem Druck des gesättigten Dampfs bei jeweiliger Temperatur der Flüssigkeit. Die Partialdrücke des Wasserdampfs in der durchströmenden Luft werden nach der psychrometrischen Gleichung von E p j o i n - F e r r e l mit den von B r o o k s nach neuen Daten korrigierten Koeffizienten errechnet:

$$p = p''_{\text{feucht}} - 0,000652 \cdot B (\vartheta_{\text{trocken}} - \vartheta_{\text{feucht}}) \cdot (1 + 0,000102) \quad [\text{ata}]$$

- wobei p''_{feucht} Druck des gesättigten Wasserdampfs bei einer Temperatur von $\vartheta_{\text{feucht}}$, in ata,
- B Barometerdruck, in ata,
- $\vartheta_{\text{trock.}}$ Lufttemperatur am trockenen Thermometer, in $^{\circ}\text{C}$
- und
- $\vartheta_{\text{feucht}}$ Temperatur am feuchten Thermometer, in $^{\circ}\text{C}$.

Die Temperaturen $\vartheta_{\text{trocken}}$ und $\vartheta_{\text{feucht}}$ sind die Durchschnittswerte der zwei Psychrometer. Hierzu sei anzumerken, daß sich die psychrometrischen Differenzwerte an den beiden Geräten in der Regel max. $0,1^{\circ}$ unterscheiden.

Da die Partialdruckdifferenzen bei Luftein- und -austritt um max. 20 % voneinander abwichen, ermittelte man $(P'' - P)_m$ als arithmetisches Mittel aus den jeweiligen Partialdruckdifferenzen in den Ein- und Austrittsquerschnitten der Meßstrecke.

Die Psychrometeranzeigen dienten vor allem zur Bestimmung der Partialdrücke des Wasserdampfs. Es war von Anfang an klar, daß diese Angaben nicht zur Bestimmung der verdunsteten Wassermenge verwandt wurden, da sich bei einer Ablesegenauigkeit der Temperatur von $0,1^{\circ}$ bei der Bestimmung der Differenz des Feuchtigkeitsgehalts der Luft ein Fehler von 10 - 15 % ergibt. Die Berechnung der verdunsteten Wassermenge anhand der Differenz des Feuchtigkeitsgehalts und der Luftmenge erfolgte daher nur zur Kontrolle. Ergab sich eine Differenz dieser Werte gegenüber den Daten am Behälter, die über der Fehlersumme dieser beiden Meßmethoden lag, so wurde der Versuch von einer weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Für den Diffusionskoeffizienten des Wasserdampfs in der Luft ergab sich ausgehend von der Mache-Gleichung die Abhängigkeit

$$k_p = \frac{2,86 \cdot 10^{-8}}{BR} \cdot \left(\frac{T}{273}\right)^{0,89} \left[\frac{m}{h}\right],$$

die auch für die Berechnungen verwandt wurde. Hierbei ist T in $^{\circ}K$ ausgedrückt und B in ata .

Die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten erfolgte nach der Gleichung

$$\alpha = \frac{G_L c'_{pl} \cdot \Delta \vartheta}{(t - \vartheta)_m \cdot F} \left[\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}C}\right],$$

wobei	G_L	Luftmenge, in kg/h
	c'_{pl}	Wärmekapazität der feuchten Luft bei konstantem Druck, in $kcal/kg^{\circ}C$
	$\Delta \vartheta$	Differenz von End- und Anfangstemperatur der Luft anhand der Thermoelementangaben, in $^{\circ}C$
	$(t - \vartheta)_m$	mittlere Temperaturdifferenz von Wasser und Luft, in $^{\circ}C$.

Die mittlere Temperaturdifferenz $(t - \vartheta)_m$ errechnete sich entsprechend den Überlegungen für die Partialdampfdrücke als arithmetisches Mittel aus den Temperaturdifferenzen im Anfangs- und Endquerschnitt der Meßstrecke.

Der Wert λ ist aus den bei T e n - B o s c h aufgeführten Tabellen zu ersehen. Aus der gleichen Quelle sind auch die kinematischen Viskositätswerte der Luft ν zur Bestimmung der Reynolds-Zahl entnommen.

Die Luftgeschwindigkeit w bei der Berechnung von Re ist auf die Oberfläche des Wasserrieselfilms bezogen. Die Strömungsgeschwindigkeit des Films wurde dabei nach der theoretischen Nusselt-Gleichung bestimmt:

$$w_w = \sqrt[3]{\frac{G_w^2}{3\gamma\eta}} \left[\frac{m}{sec} \right],$$

wobei G_w Wasserdurchflußmenge auf 1 m Plattenbreite, in kg/m sec
 γ spez. Gewicht des Wassers, in kg/m³
und
 η Koeffizient der dynamischen Viskosität des Wassers, in kg sec/m².

Die physikalischen Konstanten für Nu , Nu' und Re werden anhand der mittleren Lufttemperatur in der Meßstrecke bestimmt.

Bemerkungen zum Feuchtigkeitstransport

Der Wasserrieselfilm hat, wie schon erwähnt, eine wellige Oberfläche, wobei die Wellenhöhe mit erhöhter Durchflußmenge zunimmt. Die an dieser Oberfläche vorbeifließende Luft reißt, vor allem bei großer Geschwindigkeit, einzelne Wassertropfen ab und trägt sie mit sich fort. Wie aus obiger Beschreibung der durchgeführten Messungen zu ersehen ist, kann sich viel von der Luft mitgeführte Flüssigkeit, erheblich auf die genaue Bestimmung des Zustands der austretenden Luft und vor allem auf die Meßgenauigkeit der verdunsteten Wassermenge auswirken. Es wurden daher Voruntersuchungen zur Bestimmung der maximalen Luftgeschwindigkeit, die ohne größeren Schaden für die Genauigkeit der Ergebnisse möglich ist, durchgeführt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Luftgeschwindigkeit, wo ein sichtbares Abreißen der Tropfen von der Filmoberfläche beginnt, sind in Tab. 1 aufgeführt und mit den Ergebnissen analoger Untersuchungen von **W e r n e r** und **B i b i k o v** verglichen.

Tabelle 1

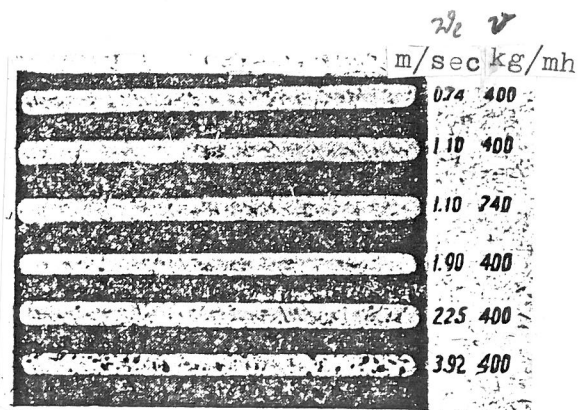
Material der Platte	Wasserdurchflußmenge kg/m · h	Luftgeschwindigkeit bei sichtbarem Tropfenabreißen m/sec	Quelle
Eisen (Rohr)	-	2,5	Werner
Hobelbretter	151	6,4	Bibikov
"	238	5,0	
"	256	4,0	
Glas	232	4,2	eigene Untersuchungen
"	455	3,5	
"	732	3,0	

Die Tabelle zeigt, daß die Luftgeschwindigkeit, bei der ein Abreißen der Tropfen zu bemerken ist, von der Wasserdurchflußmenge bezügl. der Plattenbreite abhängt. Je größer die Durchflußmenge desto geringer ist die Geschwindigkeit. Dies läßt sich durch die größeren Wellen auf der Filmoberfläche bei erhöhter Durchflußmenge erklären.

Um ein Mitführen der Tropfen bei niedrigeren als in Tab. 1 angegebenen Geschwindigkeiten festzustellen, wurde folgende Methode angewandt: 1,25 % Eisen(III)-chlorid wurde im Wasser gelöst. Im Luftkanal (quer zur Längsachse) wurde im Abstand von ca. 400 mm von der oberen Plattenkante ein Glasrohr mit einem Durchmesser von 6 mm angebracht. Das Rohr wurde mit Filterpapier umwickelt, das vorher in einer 4%igen Ammoniumrhodanid-Lösung getränkt und dann getrocknet wurde. Fielen von der Luft mitgeführte Tropfen auf das Papier, reagierten Ammoniumrhodanid und Eisen(III)-chlorid, und dort, wo die Tropfen auftrafen, bildete sich dunkelrotes Eisenrhodanid. Mit dieser Methode ließen sich die kleinsten Tropfen feststellen. Der Test wurde bei einem Plattenabstand von 54 mm und einer Luftgeschwindigkeit von 0,7 - 3,9 m/sec durchgeführt.

Abb. 6 zeigt eine Aufnahme mit 6 Rohren, die sich 30 Minuten bei unterschiedlicher Wasserdurchflußmenge und Luftgeschwindigkeit im Luftkanal befanden. Die Flecken an den Stellen, wo die Tropfen auftrafen, sind auf dem Bild gut zu erkennen.

Abb. 6 Tropfentransport bei verschiedenen Luftgeschwindigkeiten und Wasserdurchflüssen



Die Untersuchungen haben gezeigt, daß selbst bei einer Luftgeschwindigkeit von 0,7 m/sec kleine Tropfen mitgeführt werden. Bei Erhöhung der Luftgeschwindigkeit nahm die Tropfengröße zu. Es zeigte sich außerdem eine erhebliche Abhängigkeit der Transportmenge von der Wasserdurchflußmenge.

Die quantitative Auswertung des Tropfentransports konnte nur relativ grob durchgeführt werden. So wurden auf die mit der Ammoniumrhodanid-Lösung getränkten Filterpapiere bestimmter Größe Wassertropfen gegeben, die Eisen(III)-chlorid enthielten. Menge und Größe der Tropfen entsprachen dem am dichtesten mit Tropfen bedeckten Rohr auf der Aufnahme. Das Gefäß, aus dem das Wasser entnommen wurde, wurde vor und nach dem Auftragen der Tropfen auf sein genaues chemisches Gewicht gewogen. Die Transportmenge wurde - ausgehend von der Verteilung der so erhaltenen Durchflußmenge - über den gesamten Kanalquerschnitt mit einem Durchmesser von 0,5 x 0,054 m berechnet. Bei $G_w = 400$ kg/m · h ergaben sich folgende Werte:

Luftgeschwindigkeit m/sec	Transport kg/m ² h
1,9	0,0013
2,3	0,0022
3,9	0,0031

Bei einer Luftgeschwindigkeit von 0,7 m/sec waren die Tropfen sehr klein und mengenmäßig verschwindend gering.

Das mit der Ammoniumrhodanid-Lösung getränkte Filterpapier wurde außerdem gegenüber der Auslaßöffnung des Ventilators angebracht. Es zeigten sich jedoch keine Tropfenspuren. Die von der Luft mitgeführten kleinen Tropfen verdunsteten offensichtlich teilweise auf dem Weg zum Ventilator, teilweise schieden sie sich am Ventilator ab, der mit 3 000 U/min. arbeitete.

Aufgrund der o.e. Voruntersuchungen wurde die max. Luftgeschwindigkeit in den Versuchen auf 3,8 - 4,4 m/sec bei einer Wasserdurchflußmenge von 400 - 450 kg/m · h begrenzt. Eine geringere Durchflußmenge war wegen der Schwierigkeit, einen gleichmäßigen Wasserfilm aufrecht zu erhalten, ungünstig.

Bei einem annähernd isothermen Verdunstungsprozeß und einer Luftgeschwindigkeit von 3,8 m/sec betrug die verdunstete Wassermenge über 0,6 kg/h. Nach den genannten Daten durfte dann der Transport max. 0,5 % der verdunsteten Wassermenge betragen. Bei geringerer Luftgeschwindigkeit verringerte sich der prozentuale Anteil mitgeführter Tropfen rasch. Noch auffälliger war diese Abnahme beim Übergang zum nichtisothermen Zustand aufgrund der erheblichen Zunahme der Verdunstungsgeschwindigkeit. So konnte sich der Tropfentransport bei der gegebenen Luftgeschwindigkeit und Wasserdurchflußmenge nicht wesentlich auf die Meßgenauigkeit der verdunsteten Wassermenge auswirken; ebenso nicht auf die Partialdruckwerte des Wasserdampfs in der austretenden Luft, die am Psychrometer hinter dem Ventilator bestimmt wurden. Wie schon erwähnt gelangten keine Tropfen direkt hinter den Ventilator. Die Erhöhung des Feuchtigkeitsgehalts der austretenden Luft aufgrund der mitgeführten Tropfen war unerheblich.

Weniger günstig erwies sich die Temperaturmessung der austretenden Luft hinter der Meßstrecke. Um den Einfluß des Tropfentransports zu verringern, wurde die Lötstelle der Thermoelemente unmittelbar hinter der Meßstrecke im Luftkanal auf Vorschlag von Ja.M. Rubinštein mit einer Vaselinschicht überzogen, was eine Tropfenansammlung auf der Lötfläche verhindern sollte. Diese Maßnahme hatte zwar die gewünschte Wirkung, jedoch gelang es offensichtlich nicht ganz, den Einfluß des Tropfentransports auf die Thermoelemente zu beseitigen.

Versuchsergebnisse

Die Versuche waren ohne die zahlreichen Voruntersuchungen in 3 Reihen angelegt. Aufgabe der 1. Versuchsreihe war die Untersuchung des Verdunstungskoeffizienten bei einem annähernd isothermen Zustand. Zu diesem Zweck wurde die Temperatur des auf die Platten gelangenden Wassers annähernd auf Lufttemperatur gehalten. Die 2. Versuchsreihe sollte den Einfluß auf den Verdunstungskoeffizienten beim Übergang vom isothermen zum nichtisothermen Zustand klären sowie die Wärmeübergangskoeffizienten liefern. Diese Versuchsreihe beinhaltete auch Messungen der Temperaturverteilung des Wassers bzgl. der Plattenhöhe. Die 3. Versuchsreihe sollte schließlich den Einfluß der Beziehung $\frac{1}{d}$ untersuchen, die für die geometrischen Maße der Anlage charakteristisch ist.

Die ersten beiden Versuchsreihen wurden bei einem Plattenabstand von $b = 54$ mm oder $d = 2b = 108$ mm durchgeführt, die 3. Versuchsreihe bei $b = 20,5$ mm oder $d = 41$ mm. $\frac{1}{d}$ betrug 9,26 bzw. 24,4.

Die Wasserdurchflußmenge betrug meist $G_w = 430$ kg/m h; in wenigen Versuchen der 1. Versuchsreihe $G_w = 260$ kg/m h und $G_w = 730$ kg/m h.

Der erfaßte Bereich der Reynolds-Zahlen von 5 700 - 27 000 entspricht dem Größenbereich in der Praxis unter Arbeitsbedingungen in industriellen Rieselfilmkühltürmen.

Die wichtigsten Werte der drei Versuchsreihen sind in den Tabellen 2 - 4 aufgeführt. Von den Größen, die mit 2 Apparaten gemessen wurden sind darin jeweils die Durchschnittswerte angegeben. Tab. 5 führt die Meßbereiche der wichtigsten Größen auf.

Die Ergebnisse der 1. Versuchsreihe sind in Abb. 7 dargestellt. Wie aus dem Schaubild zu ersehen ist, liegen nach logarithmischer Umwandlung von $Nu' = (Re)$ die Versuchspunkte relativ nah an der Geraden mit der Steigung 0,8. Die Versuchspunkte weichen mit einzelnen Ausnahmen nicht über ± 6 % ab. Bei $Re \leq \sim 7 300$ verläuft die Gerade steiler, was für den Übergang charakteristisch ist.

Tab. 2, Blatt 1

1. Versuchsreihe

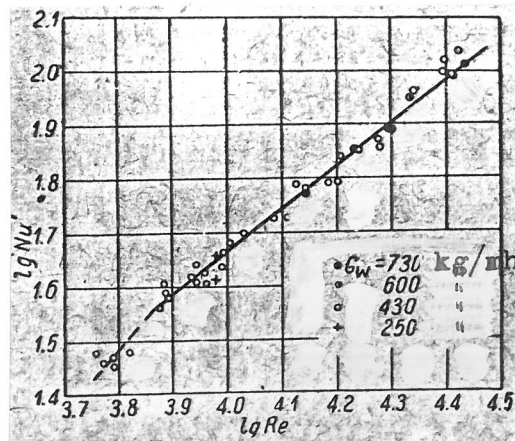
1	—	—	34	35	47	50	51	52	53	54	55	56
2	τ	min	120	105	120	90	120	90	90	120	150	180
3	B	ata	1,034	1,035	1,032	1,010	1,025	1,025	1,037	1,037	1,037	1,041
4	G_w	kg/mh	439	426	630	480	734	730	734	734	732	428
5	t_1	°C	19,7	18,4	19,3	21,0	20,0	19,9	18,8	19,3	20,0	19,3
6	t_2	°C	19,4	17,9	19,0	20,6	19,7	19,6	18,5	19,1	19,8	18,8
7	G_{un}	kg	0,989	1,248	1,454	1,007	1,110	0,976	1,115	1,094	1,317	1,587
8	G_u	kg/m ² h	0,495	0,713	0,727	0,671	0,555	0,650	0,743	0,547	0,527	0,529
9	G_l	kg/h	239,2	383,0	314,0	327,2	266,0	372,3	376,1	265,6	220,0	204,0
10	w_a	m/sec	2,10	3,37	2,76	2,88	2,34	3,27	3,31	2,34	1,93	1,79
11	w	m/sec	2,45	3,72	3,11	3,23	2,84	3,77	3,81	2,84	2,43	2,14
12	θ_1	°C	21,5	20,3	23,1	24,5	23,1	23,7	22,3	23,4	24,0	20,7
13	θ_1^{fucht}	°C	13,4	12,0	12,1	14,9	13,8	14,6	12,4	13,5	14,0	10,3
14	θ_2	°C	20,8	19,6	21,7	23,5	21,8	22,4	21,0	21,8	22,4	20,2
15	θ_2^{fucht}	°C	21,8	21,6	24,5	26,2	24,7	25,1	23,4	25,0	25,8	23,4
16	θ_{Aus}	°C	14,9	14,1	14,8	17,5	16,3	16,7	14,7	15,9	16,6	14,0
17	φ_1	%	39,1	35,6	24,0	34,7	34,0	36,1	28,8	30,7	30,9	23,0
18	φ_{Aus}	%	47,4	43,0	33,8	42,1	41,6	42,2	37,9	37,5	38,1	33,4
19	p_1	ata	0,0234	0,0215	0,0228	0,0253	0,0238	0,0237	0,0221	0,0228	0,0238	0,0228
20	p_2	ata	0,0229	0,0209	0,0224	0,0247	0,0234	0,0232	0,0217	0,0225	0,0235	0,0221
21	p_n^{Eini}	ata	0,0102	0,0086	0,0069	0,0109	0,0098	0,0108	0,0079	0,0090	0,0094	0,0057
22	p_n^{Aust}	ata	0,0126	0,0113	0,0106	0,0146	0,0132	0,0137	0,0111	0,0121	0,0129	0,0098
23	Δp_m	ata	0,0118	0,0113	0,0139	0,0123	0,0121	0,0112	0,0124	0,0121	0,0125	0,0147
24	$\beta_p \cdot 10^4$	l/h	41,9	63,1	52,3	54,6	45,9	58,0	59,9	45,2	42,2	36,0
25	β_c	m/h	57,8	86,8	72,4	76,1	63,6	80,6	82,7	62,6	58,6	49,7
26	Nu'	—	71,8	108,7	89,1	90,7	77,7	98,2	102,8	77,5	72,1	62,3
27	Re	—	17 290	26 470	21 700	21 870	19 670	26 030	26 820	19 880	16 960	15 270

- 1 Versuchsnummer
- 2 Versuchsdauer
- 3 Barometerdruck
- 4 zu kühlende Wassermenge
- 5 Wassertemperatur bis zur Kühlung
- 6 Wassertemperatur nach der Kühlung
- 7 Während des Versuchs verdunstete Wassermenge
- 8 Verdunstete Wassermenge in 1 Stunde

- 9 Luftmenge
- 10 Absolute Luftgeschwindigkeit
- 11 Relative Luftgeschwindigkeit
- 12 Lufttemperatur bei Einlaß am trockenen Thermometer
- 13 Lufttemperatur bei Einlaß am feuchten Thermometer
- 14 Lufttemperatur hinter der Meßstrecke
- 15 Lufttemperatur hinter dem Ventilator am trockenen Thermometer
- 16 Lufttemperatur hinter dem Ventilator am feuchten Thermometer
- 17 Relative Feuchtigkeit der einströmenden Luft
- 18 Relative Feuchtigkeit der ausströmenden Luft¹⁾
- 19 Partialdampfdruck auf die Wasseroberfläche am Einlaß
- 20 Partialdampfdruck auf die Wasseroberfläche am Auslaß
- 21 Partialdampfdruck im Luftstrom am Einlaß
- 22 Partialdampfdruck im Luftstrom am Auslaß
- 23 Mittlere Partialdampfdruckdifferenz
- 24 Verdunstungskoeffizient
- 25 Verdunstungskoeffizient
- 26 Kriterium
- 27 Reynolds-Zahl

1) Hinter dem Ventilator

Abb. 7 1. Reihe. Abhängigkeit des Verdunstungskoeffizienten (Nu') von Re bei isothermem Zustand ($\frac{1}{d} = 9,26$)



Tab. 2 Blatt 2
1. Versuchsreihe

1	Versuchsnummer	57	58	59	60	62	64	65	67	68	69	70	71	72	74	77	79
2	τ	180	180	180	150	150	240	210	120	180	120	180	90	90	120	120	90
3	B	1,052	1,042	1,048	1,048	1,044	1,046	1,037	0,993	0,995	0,996	1,009	1,022	1,021	1,019	1,023	1,028
4	G_w	732	733	428	248	255	428	430	428	424	425	427	429	427	428	431	432
5	t_1	19,5	20,0	20,7	20,5	20,1	19,8	20,7	16,7	18,4	18,1	17,8	17,8	18,4	19,0	19,7	18,8
6	t_2	19,3	19,8	20,4	20,0	19,6	19,6	20,4	16,4	18,2	17,9	17,6	17,4	18,0	18,7	19,3	18,3
7	G_{un}	1,482	1,575	1,091	1,010	0,886	1,097	1,300	0,659	0,699	0,659	0,858	0,669	0,788	0,813	1,168	1,078
8	G_u	0,494	0,525	0,364	0,404	0,354	0,274	0,371	0,330	0,233	0,330	0,286	0,446	0,526	0,407	0,584	0,719
9	G_l	163,0	163,6	105,3	123,5	123,2	64,9	85,0	121,5	56,0	105,3	83,5	218,9	272,5	174,1	271,7	367,5
10	w_a	1,43	1,44	0,93	1,09	1,08	0,57	0,75	1,07	0,49	0,93	0,73	1,93	2,40	1,53	2,39	3,23
11	w	1,93	1,94	1,28	1,34	1,33	0,92	1,10	1,42	0,84	1,28	1,08	2,28	2,75	1,88	2,74	3,58
12	θ_2	23,3	21,8	21,9	22,0	21,9	19,5	21,9	17,1	20,4	20,2	19,6	21,2	22,6	23,2	23,7	23,4
13	θ_1	11,9	11,0	11,3	11,4	11,2	8,9	10,2	8,2	10,0	9,6	9,0	11,0	12,1	12,3	13,1	12,6
14	θ_3	21,8	21,1	21,4	21,3	20,9	19,8	21,3	17,1	19,2	19,1	18,9	19,8	21,0	21,7	22,1	21,6
15	θ	25,5	24,7	25,5	25,4	25,1	24,8	25,7	20,7	24,5	23,2	23,1	22,9	24,0	25,2	25,1	24,2
16	θ_{Fuchs}	15,5	15,0	15,7	15,4	15,3	15,1	15,6	12,4	15,4	13,8	13,8	14,0	14,7	15,6	15,6	15,1
17	φ_{15}	21,7	22,6	23,9	24,2	23,1	18,6	17,5	26,6	23,4	21,6	20,3	25,4	26,2	25,2	27,4	25,9
18	φ_{15}	33,0	33,8	34,2	32,9	33,5	33,9	33,2	37,5	37,6	34,1	34,4	36,3	35,5	35,5	36,0	36,7
19	P_1	0,0231	0,0238	0,0248	0,0245	0,0239	0,0235	0,0248	0,0194	0,0215	0,0211	0,0207	0,0207	0,0215	0,0224	0,0234	0,0221
20	P_2	0,0228	0,0235	0,0244	0,0238	0,0232	0,0232	0,0244	0,0190	0,0213	0,0209	0,0205	0,0202	0,0210	0,0220	0,0228	0,0214
21	P_n^{Enl}	0,0063	0,0060	0,0064	0,0065	0,0062	0,0043	0,0047	0,0053	0,0057	0,0052	0,0047	0,0065	0,0073	0,0073	0,0082	0,0076
22	P_n^{Aval}	0,0110	0,0107	0,0114	0,0109	0,0109	0,0108	0,0112	0,0093	0,0118	0,0099	0,0099	0,0103	0,0108	0,0116	0,0117	0,0113
23	Δp_m	0,0143	0,0153	0,0157	0,0155	0,0150	0,0158	0,0167	0,0119	0,0127	0,0135	0,0133	0,0121	0,0122	0,0128	0,0132	0,0123
24	$\beta_p \cdot 10^4$	34,6	34,3	32,2	26,1	23,6	17,3	22,2	27,7	18,3	24,4	21,5	36,9	43,1	31,8	44,2	58,5
25	β_c	47,9	47,5	32,1	36,1	32,7	23,9	30,7	37,8	25,2	33,6	29,6	50,7	59,5	44,0	61,2	81,0
26	Nu'	60,2	59,4	40,3	45,4	40,9	30,2	38,2	46,3	30,4	46,5	36,2	62,7	72,8	53,5	74,5	99,3
27	Re	13730	13810	9140	9570	9470	6646	7775	9870	5735	8760	7510	15930	19030	12950	18860	24830

Tab. 2 Blatt 3
1. Versuchsreihe

1	Versuchsnummer	80	81	82	83	84	85	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
2	τ	120	120	120	120	120	120	180	150	180	120	120	90	90	180	150	120
3	B	1,028	1,028	1,024	1,020	1,011	0,993	1,000	1,018	1,031	1,031	1,032	1,033	1,040	1,039	1,038	1,018
4	G_w	428	425	429	425	430	431	432	428	425	425	423	424	431	434	428	425
5	t_1	18,9	18,8	20,1	18,1	20,5	19,9	19,4	18,3	16,0	17,5	17,9	17,2	18,8	19,8	20,2	19,7
6	t_2	18,5	18,4	19,6	17,8	20,3	19,7	19,3	18,0	16,9	17,2	17,7	16,6	18,2	19,5	19,8	19,4
7	G_{un}	1,078	0,978	1,028	0,830	0,729	0,719	0,689	0,834	0,569	0,648	0,738	1,058	1,079	0,718	0,838	0,636
8	G_a	0,539	0,489	0,514	0,415	0,365	0,360	0,230	0,334	0,190	0,324	0,369	0,705	0,719	0,239	0,335	0,319
9	G_l	219,6	175,4	154,1	131,7	121,7	105,1	56,6	84,4	57,7	195,6	123,3	369,0	365,0	58,7	84,6	105,5
10	w_a	1,93	1,54	1,36	1,16	1,07	0,92	0,50	0,74	0,51	0,93	1,08	3,24	3,21	0,52	0,74	0,93
11	w	2,28	1,89	1,71	1,51	1,42	1,27	0,85	1,09	0,86	1,28	1,43	3,59	3,56	0,87	1,09	1,28
12	θ_1	21,6	20,7	18,6	19,0	22,7	21,3	19,4	18,8	18,8	19,5	20,9	18,9	22,9	21,6	22,3	22,2
13	θ_{mittel}	11,4	10,6	8,6	8,7	12,4	11,2	10,3	8,7	9,0	9,2	10,2	9,5	12,7	11,0	11,4	12,8
14	θ_2	20,4	19,8	18,7	18,5	21,4	20,3	19,2	18,3	17,8	18,3	19,4	17,9	21,3	20,4	21,1	20,8
15	$\theta_{\text{Ausl.}}$	23,8	23,4	22,0	22,2	25,2	24,4	24,0	22,6	22,6	22,4	23,4	20,7	23,7	25,6	25,7	24,8
16	$\theta_{\text{Einl.}}$	14,5	14,3	13,4	13,2	16,3	15,1	15,3	13,5	13,7	13,2	13,8	12,2	15,1	16,2	15,9	16,3
17	φ_1	26,2	25,0	21,6	20,1	27,8	27,1	29,7	20,8	23,1	20,8	21,4	25,7	28,2	23,2	23,0	32,4
18	$\varphi_{\text{Ausl.}}$	35,3	35,5	36,8	34,6	39,4	36,5	39,1	34,8	35,5	33,3	32,8	35,1	38,8	36,7	34,7	41,4
19	p_1	0,0222	0,0221	0,0239	0,0211	0,0245	0,0237	0,0229	0,0214	0,0185	0,0204	0,0209	0,0200	0,0221	0,0285	0,0241	0,0234
20	p_2	0,0217	0,0215	0,0232	0,0207	0,0242	0,0234	0,0228	0,0210	0,0196	0,0200	0,0206	0,0192	0,0213	0,0231	0,0235	0,0229
21	$p_n^{\text{Einl.}}$	0,0069	0,0062	0,0047	0,0045	0,0078	0,0070	0,0068	0,0046	0,0051	0,0048	0,0054	0,0057	0,0080	0,0061	0,0063	0,0088
22	$p_n^{\text{Ausl.}}$	0,0106	0,0104	0,0099	0,0094	0,0129	0,0114	0,0119	0,0097	0,0099	0,0092	0,0096	0,0087	0,0116	0,0123	0,0117	0,0132
23	Δp_m	0,0132	0,0135	0,0163	0,0140	0,0140	0,0144	0,0133	0,0141	0,0116	0,0132	0,0133	0,0124	0,0119	0,0139	0,0148	0,0122
24	$\beta_p \cdot 10^4$	40,8	36,2	31,5	29,6	26,1	25,0	17,3	23,7	16,4	24,5	27,7	56,9	60,4	17,2	22,6	26,1
25	β_o	56,3	50,0	43,5	40,7	36,3	34,6	23,9	32,6	22,5	33,6	38,1	78,0	83,4	23,8	31,3	36,1
26	Nu'	69,6	62,0	54,0	50,5	43,6	41,2	28,9	40,4	28,3	42,2	47,6	98,3	103,9	29,6	38,9	44,0
27	Re	15980	13320	12130	10650	9730	8610	5862	7684	6143	9110	10120	25710	25080	6165	7690	8850

Tab. 3, Blatt 1

2. Versuchsreihe

1	2	3	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109
2	t	min.	60	60	60	60	60	60	60	90	30	90	90	90	120
3	B	ata	1,011	1,011	1,011	1,016	1,016	1,017	1,017	1,012	1,013	1,012	1,016	1,017	1,017
4	G_w	kg/mh	420	418	417	434	431	428	428	422	435	430	427	425	425
5	t_1	$^{\circ}C$	39,9	40,1	40,3	40,4	40,0	40,4	41,0	39,9	39,5	40,5	40,3	40,3	40,3
6	t_2	$^{\circ}C$	37,5	37,9	38,4	36,9	36,1	36,7	37,6	37,5	35,8	38,2	38,3	33,5	38,7
7	G_{un}	kg/m ² h	1,250	1,161	0,972	2,599	2,391	2,202	2,024	1,900	1,161	1,924	1,676	1,478	1,616
8	G_u	kg/m ² h	1,250	1,161	0,972	2,599	2,391	2,202	2,024	1,266	2,321	1,223	1,118	0,986	0,508
9	G_l	kg/m ² h	120,6	105,2	84,8	351,0	322,5	278,7	214,8	131,5	822,3	119,7	104,3	84,6	13,3
10	w_a	m/sec.	1,06	0,98	0,75	3,11	2,86	2,43	1,90	1,17	2,86	1,06	0,93	0,75	0,56
11	w_r	m/sec.	1,48	1,35	1,17	3,53	3,28	2,85	2,32	1,59	3,28	1,48	1,35	1,17	0,98
12	θ_1	$^{\circ}C$	22,6	23,0	23,6	23,4	23,0	22,8	23,5	22,9	24,3	23,7	24,0	24,1	22,7
13	θ_1 feucht	$^{\circ}C$	13,8	14,0	14,4	17,1	16,1	15,7	16,3	14,7	16,3	14,9	15,6	15,4	13,9
14	θ_2	$^{\circ}C$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15	θ_2	$^{\circ}C$	27,1	27,4	28,0	26,8	25,4	25,5	26,9	26,2	26,2	27,0	27,5	27,8	26,6
16	θ_{AUS}	$^{\circ}C$	28,0	28,3	29,0	27,5	27,4	27,6	28,4	28,0	28,2	28,9	29,1	29,5	29,4
17	θ_{AUS} feucht	$^{\circ}C$	22,5	22,9	23,3	23,1	22,5	22,7	23,6	23,0	22,4	23,2	23,8	23,8	23,4
18	φ_1	%	36,6	36,0	35,4	53,6	49,0	47,3	47,5	40,9	43,6	38,1	40,8	38,9	36,7
19	φ_{AUS}	%	62,4	63,2	61,8	68,8	65,7	65,8	66,8	65,3	60,8	62,0	64,2	62,0	60,2
20	p_1	ata	0,0748	0,0756	0,0764	0,0769	0,0752	0,0768	0,0793	0,0748	0,0732	0,0772	0,0764	0,0764	0,0760
21	p_2	ata	0,0657	0,0672	0,0690	0,0616	0,0609	0,0629	0,0661	0,0657	0,0599	0,0683	0,0686	0,0694	0,0701
22	p_n	ata	0,0102	0,0103	0,0105	0,0157	0,0140	0,0134	0,0140	0,0116	0,0135	0,0114	0,0124	0,0119	0,0103
23	p_n Ausl	ata	0,0241	0,0248	0,0253	0,0258	0,0245	0,0248	0,0264	0,0252	0,0237	0,0252	0,0264	0,0261	0,0252
24	Δp_m	ata	0,0531	0,0539	0,0542	0,0485	0,0488	0,0508	0,0525	0,0519	0,0480	0,0545	0,0531	0,0539	0,0553
25	$\Delta p \cdot 10^4$	l/h	23,6	21,5	17,7	53,6	48,8	43,4	38,5	24,4	48,3	23,5	21,0	18,3	14,6
26	β_c	m/h	33,8	30,9	25,8	76,9	69,8	62,1	55,2	35,0	49,4	33,8	30,1	26,3	21,0
27	Nu'	—	39,3	35,7	29,3	89,3	81,8	72,7	64,4	40,6	80,2	39,0	34,9	30,5	24,4
28	$(t-\theta)_m$	$^{\circ}C$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
29	Nu	kal/m ² h ^{0,5}	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
30	Nu	kal/m ² h ^{0,5}	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
31	Re	—	10 120	9 124	7 878	23 947	22 406	19 450	15 846	10 772	22 180	9 990	9 259	7 920	6 670

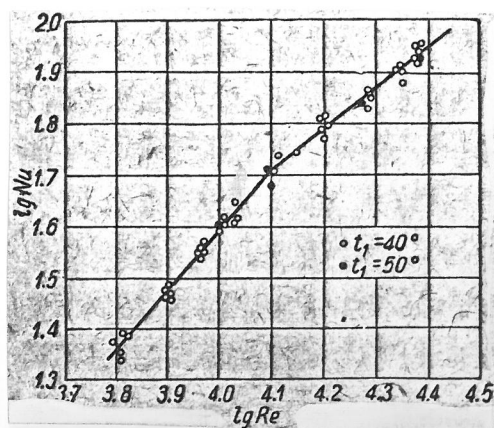
- 1 Versuchsnummer
- 2 Versuchsdauer
- 3 Barometerdruck
- 4 zu kühlende Wassermenge
- 5 Wassertemperatur bis zur Kühlung
- 6 Wassertemperatur nach der Kühlung
- 7 Während des Versuchs verdunstete Wassermenge
- 8 Verdunstete Wassermenge in 1 Stunde
- 9 Luftmenge
- 10 Absolute Luftgeschwindigkeit
- 11 Relative Luftgeschwindigkeit
- 12 Lufttemperatur bei Einlaß am trockenen Thermometer
- 13 Lufttemperatur bei Einlaß am feuchten Thermometer

- 14 Temperaturdifferenz bei Luftein- und -austritt
- 15 Lufttemperatur hinter der Meßstrecke
- 16 Lufttemperatur hinter dem Ventilator am trockenen Thermometer
- 17 Lufttemperatur hinter dem Ventilator am feuchten Thermometer
- 18 Relative Luftfeuchtigkeit der einströmenden Luft
- 19 Relative Feuchtigkeit der ausströmenden Luft¹⁾
- 20 Partialdampfdruck auf die Wasseroberfläche am Einlaß
- 21 Partialdampfdruck auf die Wasseroberfläche am Auslaß
- 22 Partialdampfdruck im Luftstrom am Einlaß
- 23 Partialdampfdruck im Luftstrom am Auslaß
- 24 Mittlere Partialdruckdifferenz
- 25 Verdunstungskoeffizient
- 26 Verdunstungskoeffizient
- 27 Kriterium $\frac{\beta_p \cdot d}{k_p}$
- 28 Mittlere Temperaturdifferenz von Wasser und Luft²⁾
- 29 Wärmeübergangskoeffizient
- 30 Nusselt-Zahl
- 31 Relation $\frac{\alpha}{\beta_p} \cdot 10^{-4}$
- 32 Reynolds-Zahl

1) Hinter dem Ventilator

2) Die Versuche 97-111 wurden bis zur Aufstellung der Thermoelemente in der Luft durchgeführt

Abb. 8 2. Reihe. Abhängigkeit des Verdunstungskoeffizienten (Nu') von Re bei nichtisothermem Zustand ($\frac{1}{d} = 9,26$)



Tab. 3 Blatt 2

2. Versuchsreihe

1	Versuchsnummer	110	111	112	114	115	116	117	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129
2	τ	60	90	40	60	45	40	60	90	90	90	90	75	60	60	60	40	40	40
3	B	1,011	1,010	1,028	1,027	1,027	1,027	1,024	1,028	1,028	1,028	1,029	1,028	1,026	1,026	1,027	1,023	1,028	1,028
4	G_w	432	432	430	423	427	425	426	435	429	425	428	427	431	428	426	427	423	425
5	t_1	40,5	41,0	40,0	40,3	40,4	40,1	40,5	40,6	40,0	40,2	40,1	40,5	40,1	39,7	40,5	40,7	40,2	40,2
6	t_2	37,9	38,2	36,8	37,2	37,3	36,6	38,1	38,8	37,8	38,6	38,3	39,4	37,8	37,5	37,8	37,8	37,0	37,0
7	G_{un}	2,122	2,040	1,815	1,449	1,448	1,409	1,349	1,408	1,875	1,259	1,438	1,488	1,259	1,309	1,488	1,260	1,358	1,408
8	G_u	2,122	1,693	2,728	1,797	1,683	2,112	1,849	0,939	1,250	0,840	0,992	1,190	1,259	1,309	1,735	1,890	2,037	2,247
9	G_l	218,3	164,4	356,4	166,8	218,9	272,6	120,6	84,4	104,8	83,6	84,4	105,8	120,8	129,8	182,1	215,2	269,4	324,2
10	w_a	1,03	1,46	8,16	1,46	1,91	2,41	1,07	0,75	0,92	0,52	0,74	0,93	1,07	1,14	1,62	1,91	2,89	2,88
11	w	2,36	1,88	3,58	1,88	2,86	2,83	1,49	1,17	1,84	0,94	1,16	1,85	1,49	1,56	2,04	2,38	2,51	3,30
12	θ_1	21,1	23,4	22,9	21,6	22,2	22,4	23,6	21,6	19,4	20,1	21,0	21,6	23,6	21,9	22,4	23,9	23,8	24,3
13	$\phi_{1, \text{dort}}$	13,0	15,2	14,6	13,6	14,7	15,5	14,5	15,3	10,3	10,7	11,3	12,6	13,8	12,9	14,3	14,9	16,2	17,0
14	$\Delta \theta_1$	—	—	2,8	3,5	3,2	2,9	3,2	3,7	4,6	4,6	4,2	4,1	3,6	3,6	3,5	3,3	3,0	2,7
15	θ_2	24,8	26,6	25,3	25,1	25,1	25,3	26,8	27,1	21,5	24,5	25,1	25,6	25,3	25,2	25,5	26,8	26,2	26,5
16	ϕ_{AUS}	26,3	28,3	26,9	26,7	27,0	27,1	27,7	23,4	25,2	25,8	26,3	27,2	27,0	27,0	27,3	27,0	27,8	28,0
17	ϕ_{AUS}^{dort}	21,5	23,5	21,3	22,3	22,5	22,4	22,8	25,5	20,4	22,0	21,6	22,1	22,4	22,0	22,5	22,4	22,9	22,8
18	φ_1	38,8	41,3	39,8	39,9	41,1	45,2	36,0	40,4	28,8	23,0	23,1	32,7	36,2	33,9	40,2	41,9	45,3	47,4
19	φ_{AUS}	65,6	66,9	60,8	63,2	67,9	66,7	66,0	66,1	64,8	71,7	66,2	64,1	67,4	64,6	66,0	67,0	65,4	64,0
20	p_1'	0,0773	0,0788	0,0752	0,0784	0,0788	0,0756	0,0772	0,0776	0,0753	0,0760	0,0756	0,0772	0,0756	0,0740	0,0772	0,0780	0,0760	0,0760
21	p_2'	0,0640	0,0689	0,0599	0,0667	0,0647	0,0328	0,0679	0,0705	0,0668	0,0698	0,0686	0,0690	0,0672	0,0657	0,0688	0,0663	0,0640	0,0629
22	p_n	0,0789	0,0121	0,0113	0,0106	0,0120	0,0138	0,0107	0,0120	0,0086	0,0067	0,0071	0,0036	0,0101	0,0091	0,0111	0,0119	0,0186	0,0147
23	$p_n^{\text{Ausl.}}$	0,0229	0,0263	0,0220	0,0244	0,0247	0,0244	0,0250	0,0231	0,0211	0,0243	0,0231	0,0236	0,0245	0,0235	0,0245	0,0244	0,0230	0,0247
24	Δp_m	0,0542	0,0546	0,0509	0,0536	0,0524	0,0503	0,0547	0,0550	0,0573	0,0574	0,0570	0,0570	0,0541	0,0538	0,0542	0,0543	0,0507	0,0493
25	$\beta_p \cdot 10^4$	-39,2	31,0	39,5	32,4	36,9	41,9	24,7	17,1	21,9	14,6	17,4	23,9	23,8	24,4	32,9	34,8	40,2	45,1
26	β_c	56,1	41,5	76,5	46,4	52,8	60,0	36,5	24,6	31,3	20,9	24,9	29,9	34,2	34,9	47,3	50,0	57,7	64,8
27	N_u	65,4	51,5	80,5	55,0	62,7	71,3	41,6	23,9	37,4	24,9	29,6	35,5	40,2	41,3	55,8	55,8	67,8	76,0
28	$(t-\theta)_m$	—	—	14,3	15,6	15,0	14,5	14,1	14,9	17,2	17,0	16,1	15,8	14,6	14,9	15,0	14,7	13,3	12,5
29	α	—	—	17,1	9,1	11,4	13,4	6,7	5,8	6,8	3,9	5,4	6,7	7,8	7,7	10,4	11,8	14,9	16,8
30	$N_{u, \text{Ausl.}}$	—	—	84,5	45,1	56,4	66,3	39,0	26,1	35,8	19,4	26,8	33,2	36,1	39,1	51,4	58,3	73,4	82,7
31	$\alpha/\beta_p \cdot 10^{-4}$	—	—	0,320	0,281	0,309	0,320	0,271	0,310	0,311	0,287	0,310	0,321	0,307	0,316	0,316	0,339	0,371	0,373
32	Re	16 087	12 710	24 450	13 050	16 330	19 580	10 300	8 037	9 390	6 565	8 030	9 350	10 370	10 790	14 070	18 078	19 300	22 630

Tab. 3 Blatt 3

2. Versuchsreihe

1	Versuchsnummer	130	131	132	133	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	146	147	148	149
2	r	40	30	80	40	50	40	40	40	40	40	90	90	75	60	50	40	40	40
3	B	1,038	1,038	1,038	1,023	1,023	1,028	1,023	1,023	1,019	1,019	1,018	1,018	1,019	1,013	1,013	1,013	1,013	1,013
4	G _w	425	434	435	461	426	416	431	428	421	438	432	431	429	481	421	420	420	420
5	t ₁	40,1	40,5	40,5	50,5	40,6	40,6	40,7	39,8	39,8	40,2	40,3	40,2	40,3	39,8	50,3	49,9	50,0	49,5
6	t ₂	36,5	39,1	39,1	44,5	38,9	38,3	37,9	36,5	36,5	36,7	39,0	38,6	38,4	38,0	47,0	43,5	44,4	45,6
7	G _{un}	1,587	0,357	0,367	2,927	1,130	1,028	1,200	1,378	1,378	1,487	1,090	1,388	1,359	1,220	1,867	2,706	2,411	1,700
8	G _u	2,381	0,714	0,734	4,892	1,357	1,533	1,846	2,068	2,068	2,232	0,727	0,926	1,067	1,220	2,241	4,194	3,617	2,550
9	G _l	352,5	37,2	57,2	330,3	125,7	163,0	215,0	268,0	268,0	338,0	56,3	83,4	108,5	119,8	118,6	351,8	287,4	182,1
10	v _a	3,13	0,50	0,51	3,11	1,14	1,44	1,91	2,39	2,39	2,87	0,50	0,74	0,92	1,06	1,06	3,12	2,87	1,44
11	w	3,55	0,92	0,98	3,55	1,56	1,86	2,33	3,56	3,56	3,29	0,92	1,16	1,34	1,48	1,50	3,56	2,81	1,68
12	φ ₁	24,8	22,1	22,5	23,0	33,1	23,7	24,3	24,7	22,8	23,7	23,6	24,0	23,2	22,4	24,2	24,8	24,6	24,2
13	φ _{act}	17,6	13,6	13,9	19,6	17,6	17,7	17,8	18,4	16,9	18,5	16,6	17,0	16,9	15,7	16,4	17,7	16,7	15,7
14	Δθ _{el}	2,7	—	—	4,3	4,4	3,4	3,1	2,4	2,9	2,7	3,8	3,5	3,7	3,4	5,2	3,8	4,0	4,6
15	φ ₁	26,7	25,8	26,2	27,1	26,1	26,4	26,6	26,5	25,2	25,9	26,9	27,0	26,5	25,7	29,0	27,8	28,0	28,2
16	φ _{AUS}	28,3	26,1	27,6	28,4	28,7	29,0	29,2	28,8	27,2	28,2	30,0	30,2	29,8	27,1	31,2	30,2	30,8	31,1
17	φ _{act}	33,2	23,7	24,0	25,9	25,4	25,0	24,7	24,0	23,2	24,2	25,9	25,2	24,9	23,5	28,2	26,8	26,9	27,5
18	φ ₁	48,9	37,3	37,1	51,7	58,3	55,2	52,6	54,3	55,1	60,9	48,8	49,4	52,8	49,7	44,8	49,5	44,8	40,6
19	φ _{AUS}	65,6	81,8	74,0	82,0	76,6	73,4	69,0	67,0	71,5	72,0	72,3	66,9	67,3	74,0	79,9	77,0	74,2	76,2
20	p ₁	0,0756	0,0772	0,0772	0,1290	0,0785	0,0776	0,0780	0,0744	0,0744	0,0760	0,0764	0,0760	0,0764	0,0744	0,1277	0,1252	0,1258	0,1227
21	p ₂	0,0821	0,0717	0,0717	0,0952	0,0709	0,0686	0,0672	0,0621	0,0621	0,0629	0,0713	0,0698	0,0698	0,0675	0,1082	0,0904	0,0947	0,1008
22	p _n	0,0156	0,0101	0,0108	0,0148	0,0168	0,0165	0,0163	0,0172	0,0156	0,0182	0,0145	0,0150	0,0153	0,0137	0,0138	0,0158	0,0141	0,0125
23	p _n	0,0256	0,0282	0,0278	0,0324	0,0308	0,0286	0,0286	0,0271	0,0268	0,0281	0,0313	0,0293	0,0288	0,0271	0,0370	0,0337	0,0386	0,0351
24	Δp _m	0,0483	0,0553	0,0554	0,0885	0,0508	0,0501	0,0502	0,0459	0,0473	0,0463	0,0510	0,0508	0,0507	0,0506	0,0926	0,0831	0,0863	0,0880
25	β _p · 10 ⁴	49,3	12,9	13,2	49,6	26,7	30,6	36,8	52,1	43,7	48,2	14,3	18,2	21,4	24,1	24,2	50,5	41,9	29,0
26	β _c	70,8	18,5	19,0	72,2	38,4	44,0	52,9	74,8	63,6	69,2	20,5	28,1	30,7	34,5	35,4	73,7	61,2	42,3
27	N _h	32,9	22,1	22,6	83,8	44,8	51,3	61,6	87,1	73,2	80,6	23,9	30,3	35,8	40,2	40,1	83,7	69,4	48,0
28	(t-θ) m	12,2	—	—	22,4	14,6	14,1	13,5	12,2	13,9	13,4	14,2	13,7	14,3	14,8	21,9	20,1	20,6	21,1
29	α	19,2	—	—	16,6	9,6	9,7	12,1	17,1	13,8	16,1	3,7	5,2	6,6	6,8	7,0	15,6	12,8	8,7
30	N _u	94,4	—	—	81,9	47,3	47,8	59,6	84,2	68,2	79,4	18,2	25,6	32,5	33,6	34,4	76,7	62,9	42,7
31	α/β _p · 10 ⁻⁴	0,389	—	—	0,385	0,360	0,317	0,329	0,328	0,316	0,334	0,259	0,286	0,308	0,282	0,289	0,309	0,305	0,300
32	R _s	4,270	6,427	6,460	24,390	10,660	12,660	15,830	24,210	19,210	22,400	6,250	7,860	9,125	10,080	10,060	23,910	18,870	12,630

Tab. 4

3. Versuchsreihe

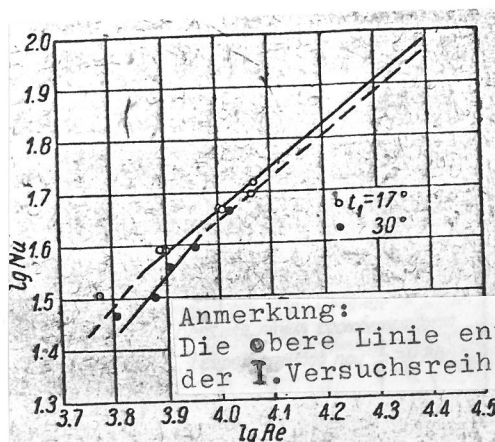
1			158	159	160	164	165	166	167	168	169	172	173	174
2	τ	min.	180	180	180	120	120	150	150	90	90	90	90	90
3	G_w	ata	1,022	1,025	1,025	1,008	1,006	1,007	1,025	1,008	1,008	1,010	1,011	1,011
4	G_w	kg/mh	426	429	428	431	431	431	429	435	433	422	424	428
5	t_1	$^{\circ}C$	17,0	17,0	17,0	19,4	17,5	17,6	15,2	31,4	30,9	30,5	30,0	30,1
6	t_2	$^{\circ}C$	16,6	16,6	16,7	19,2	17,0	17,3	14,8	28,9	28,8	28,5	28,3	28,5
7	G_{un}	kg	1,329	1,199	0,969	0,599	1,029	1,049	1,120	2,271	1,853	1,743	1,404	1,255
8	G_u	kg/m ² h	0,452	0,408	0,329	0,306	0,525	0,428	0,461	1,544	1,260	1,185	0,955	0,854
9	G_l	kg/h	111,9	114,3	82,6	177,0	178,6	151,4	151,8	159,7	183,3	116,7	109,6	89,3
10	w_a	m/sec.	2,53	2,59	1,87	4,05	4,07	3,46	3,41	3,65	3,09	2,69	2,53	2,06
11	w	m/sec.	2,88	2,94	2,22	4,40	4,42	3,81	3,76	4,04	3,48	3,08	2,92	2,45
12	θ_1	$^{\circ}C$	19,4	18,8	19,3	21,1	19,0	19,5	16,5	19,4	20,3	19,7	20,1	20,6
13	θ_1 feucht	$^{\circ}C$	11,8	12,2	12,4	17,3	13,2	14,0	10,4	16,3	16,5	15,3	16,3	16,7
14	$\Delta\theta_{el}$	$^{\circ}C$	—	—	—	—	—	—	—	4,2	3,7	4,1	4,0	4,0
15	θ_x	$^{\circ}C$	21,9	21,7	22,6	23,2	21,1	21,7	19,0	25,8	26,1	25,6	26,4	26,9
16	θ_{feucht} AUS	$^{\circ}C$	15,9	16,1	16,6	19,2	16,2	16,8	13,9	23,8	23,9	23,3	23,8	24,3
17	ϕ_1	%	39,3	45,2	43,9	69,0	51,8	54,6	46,1	73,4	68,6	63,2	63,6	68,0
18	ϕ_{AUS}	%	53,4	56,1	54,1	68,6	60,8	61,4	56,7	84,7	83,2	82,1	80,4	80,7
19	p_1'	ata	0,0197	0,0197	0,0197	0,0229	0,0204	0,0205	0,0176	0,0469	0,0456	0,0445	0,0433	0,0435
20	p_1''	ata	0,0192	0,0192	0,0194	0,0226	0,0197	0,0201	0,0172	0,0407	0,0404	0,0397	0,0393	0,0397
21	p_n^{Einl}	ata	0,0090	0,0100	0,0100	0,0176	0,0116	0,0126	0,0088	0,0168	0,0166	0,0148	0,0164	0,0168
22	p_n^{AUSl}	ata	0,0148	0,0148	0,0151	0,0199	0,0155	0,0162	0,0127	0,0287	0,0287	0,0275	0,0282	0,0292
23	Δp_m	ata	0,0075	0,0068	0,0067	0,0039	0,0064	0,0068	0,0065	0,0211	0,0204	0,0210	0,0190	0,0186
24	$p \cdot 10^4$	l/h	60,3	60,0	49,1	78,5	82,0	73,8	70,9	78,2	61,8	56,4	50,3	45,9
25	β_c	m/h	82,6	82,2	67,3	108,0	112,4	101,2	96,5	108,1	87,0	79,2	70,8	64,6
26	Nu'	—	39,1	39,1	32,0	50,0	52,4	47,1	46,5	46,5	39,2	35,9	32,0	29,1
27	$(t-\theta)_m$	$^{\circ}C$	—	—	—	—	—	—	—	8,7	7,7	7,8	7,1	6,7
28	a	kal/m ² h ⁰ C	—	—	—	—	—	—	—	19,5	16,3	15,5	15,4	13,4
29	Nu	—	—	—	—	—	—	—	—	36,9	30,8	29,3	29,1	25,3
30	—	kal/m ² 0C	—	—	—	—	—	—	—	0,266	0,264	0,275	0,306	0,292
31	R_0	—	7 730	7 940	5 980	11 500	11 710	10 070	10 280	10 540	9 050	8 040	7 620	6 880

- 1 Versuchsnummer
- 2 Versuchsdauer
- 3 Barometerdruck
- 4 zu kühlende Wassermenge
- 5 Wassertemperatur bis zur Kühlung
- 6 Wassertemperatur nach der Kühlung
- 7 Während des Versuchs verdunstete Wassermenge
- 8 Verdunstete Wassermenge in 1 Stunde
- 9 Luftmenge
- 10 Absolute Luftgeschwindigkeit
- 11 Relative Luftgeschwindigkeit
- 12 Lufttemperatur bei Einlaß am trockenen Thermometer
- 13 Lufttemperatur bei Einlaß am feuchten Thermometer
- 14 Temperaturdifferenz bei Luftein- und -austritt

- 15 Lufttemperatur hinter dem Ventilator am trockenen Thermometer
- 16 Lufttemperatur hinter dem Ventilator am feuchten Thermometer
- 17 Relative Feuchtigkeit der **einströmenden** Luft
- 18 Relative Feuchtigkeit der ausströmenden Luft¹⁾
- 19 Partialdampfdruck auf die Wasseroberfläche am Einlaß
- 20 Partialdampfdruck auf die Wasseroberfläche am Auslaß
- 21 Partialdampfdruck im Luftstrom am Einlaß
- 22 Partialdampfdruck im Luftstrom am Auslaß
- 23 Mittlere Partialdruckdifferenz
- 24 Verdunstungskoeffizient
- 25 Verdunstungskoeffizient
- 26 Kriterium $\frac{\beta_p \cdot d}{k_p}$
- 27 Mittlere Temperaturdifferenz von Wasser und Luft
- 28 Wärmeübergangskoeffizient
- 29 Nusselt-Zahl
- 30 Relation $\alpha/\beta_p \cdot 10^{-4}$
- 31 Reynolds-Zahl

1) Hinter dem Ventilator

Abb. 9 3. Reihe. Abhängigkeit des Verdunstungskoeffizienten (Nu') von Re bei $\frac{1}{d} = 24,4$ (isothermer und nichtisothermer Zustand).



Tab. 5

Meßbereich der wichtigsten Größen in den Versuchen

№	Reihe		I		IIa		IIb		IIIa		IIIb	
			min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1	t_1	°C	16,0	21,0	39,7	41,0	49,5	50,5	15,2	19,4	30,0	31,4
2	t_2	°C	16,4	20,6	35,8	39,1	43,5	47,0	14,8	19,2	28,3	28,9
3	ϑ_1	°C	17,1	24,5	19,4	24,8	23,0	24,8	16,5	21,1	19,4	20,6
4	φ_1	%	17,5	39,1	28,0	53,6	40,6	51,7	39,3	69,0	63,2	73,4
5	ϑ_2	°C	17,1	23,5	23,5	28,0	27,1	29,0	—	—	23,6	24,6
6	φ_2	%	40,2	52,8	65,5	89,3	87,0	90,5	53,4 ¹	68,6 ¹	91,7	96,6
7	$(p^* - p)_m$	ata	0,0112	0,0167	0,0459	0,0574	0,0831	0,0926	0,0039	0,0075	0,0186	0,0211
8	$(t - \vartheta)_m$	°C	—	—	12,2	17,2	20,1	22,4	—	—	6,7	8,7
9	w_a	m/sec.	0,49	3,37	0,50	3,16	1,06	3,12	1,87	4,07	2,06	3,65
10	w	—	0,84	3,81	0,92	3,58	1,50	3,56	2,22	4,42	2,45	4,04
11	R	—	5 735	26 820	6 250	24 270	10 060	24 390	5 980	11 710	6 380	10 540

- 1 Temperatur der einströmenden Luft
- 2 Temperatur des abgekühlten Wassers
- 3 Temperatur der Luft am Einlaß, gemessen am trockenen Thermometer
- 4 Relative Luftfeuchtigkeit beim Einlaß
- 5 Lufttemperatur hinter der Meßstrecke
- 6 Relative Luftfeuchtigkeit hinter der Meßstrecke
- 7 Mittlere Partialdruckdifferenz
- 8 Mittlere Temperaturdifferenz von Wasser und Luft
- 9 Absolute Luftgeschwindigkeit
- 10 Relative Luftgeschwindigkeit
- 11 Reynolds-Zahl

Bei der 2. Versuchsreihe war das Wasser, das auf die Platte gelangte, erwärmt. Für den Turbulenz- und Übergangsbereich zeigte sich schon ein wesentlich deutlicherer Unterschied im Kurvenverlauf von $Nu' = (Re)$ (Abb. 8). Im Bereich ausgebildeter turbulenter Luftströmung hat die Gerade für den nichtisothermen Zustand (2. Versuchsreihe) wie

in der 1. Versuchsreihe eine Steigung von 0,8, ist jedoch deutlich nach unten verschoben. Im Übergangsbereich verläuft sie wesentlich steiler (Steigung 1,18). In beiden Bereichen liegt der Anstieg der Meßpunkte für den Verdunstungskoeffizienten in dieser Versuchsreihe nicht über $\pm 5\%$.

Was die Steigung der Geraden im Übergangsbereich angeht, so kann man die Ergebnisse der beiden Versuchsreihen nicht miteinander vergleichen, da die 1. Versuchsreihe diesen Bereich nur sehr begrenzt behandelt. Der Wert Re , der die obere Grenze des Übergangsbereichs verdeutlicht, betrug in der 2. Versuchsreihe ca. 12 500 gegenüber ca. 7 300 in der 1. Versuchsreihe. Die Abnahme der Absolutwerte von Nu' beim Übergang in den nichtisothermen Zustand, die im Bereich der ausgebildeten turbulenten Luftströmung ca. 9 % betrug, erhöht sich mit abnehmenden Re beträchtlich und erreicht bis zu 26 %.

Zur Überprüfung, ob die festgestellte Abnahme der Nu' -Zahlen - vor allem bei kleinen Re' -Werten - nicht auf einen Versuchsfehler zurückzuführen ist, wurden zahlreiche Kontrolltests durchgeführt.

Die Auswertung der Meßmethoden für die einzelnen Größen, die sich auf die Bestimmung der Nu' -Werte auswirken, zeigt, daß die wahrscheinlich einzige Ursache für eine Abnahme dieser Werte eine Verzerrung der Psychrometerangaben am Luftaustritt aufgrund von Dampfkondensation an den Luftkanalwänden hinter der Meßstrecke ist. Bei Dampfkondensation müßte diese selbst bei kleinen Re -Werten wesentlich deutlicher bemerkbar sein, da diesen eine höhere relative Feuchtigkeit der austretenden Luft entspricht. Daher wurde der Luftkanal bei den Kontrolltests von der Meßstrecke bis zum Auslaßrohr des Ventilators vollständig mit Asbestpappe isoliert. Die Kontrolltests bestätigten die Ergebnisse, die beim nichtisolierten Luftkanal erzielt wurden.

Die 3. Versuchsreihe wurde bei annähernd isothermem Zustand sowie bei erwärmter einströmender Luft durchgeführt. Diese Versuchsreihe bestätigte ebenfalls die Ergebnisse der beiden ersten Versuchsreihen bzgl. des Einflusses des nichtisothermen Prozesses auf die Nu' -Zahlen (Abb. 9). Wegen der starken Sättigung der austretenden Luft mußte in der 3. Versuchsreihe der Maximalwert auf Re 12 000 und die Erwärmungstemperatur des Wassers auf 30° begrenzt werden. Die Verschiebung der Kurve

beim Übergang zum nichtisothermen Zustand war hier etwas geringer als in der 2. Versuchsreihe.

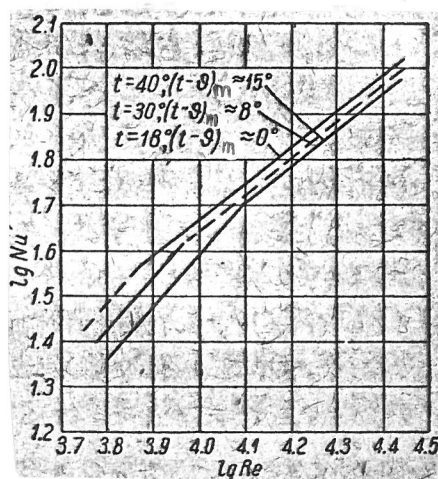
Die Versuche brachten keine deutliche Abhängigkeit der Nu' -Zahl von der Größe des Verhältnisses $\frac{1}{d}$ zum Ausdruck. Dies ist an der Zusammenstellung der Ergebnisse der 1. und 2. Versuchsreihe zu ersehen, die in Abb. 9 dargestellt ist. Nimmt man anhand der gegebenen Daten zum Wärmeübergang (K r a u s s o l d) an, daß Nu' im turbulenten Bereich dem Wert $(\frac{1}{d})^{-0,054}$ proportional sei, so müßten die Nu' -Zahlen für $\frac{1}{d} = 24,4$ um ca. 5 % niedriger liegen als für $\frac{1}{d} = 9,26$. Diese Divergenz liegt innerhalb des Genauigkeitsbereichs unserer Versuche. Nach R u b i n š t e j n¹⁾ ist die Nusselt-Zahl für $\frac{1}{d} > 10$ proportional dem Wert von

$$1 + \left(\frac{1}{d}\right)^{-0,7}$$

R u b i n š t e j n s Formel ergibt bei o.g. Änderung von $\frac{1}{d}$ eine Abnahme der Nu' -Zahl um ca. 9 %. Man muß jedoch berücksichtigen, daß sich die Angaben von R u b i n š t e j n und K r a u s s o l d auf die Strömung entlang unbeweglicher Wände in runden Rohren beziehen. Daher können sie nicht vollständig für unseren Fall übernommen werden.

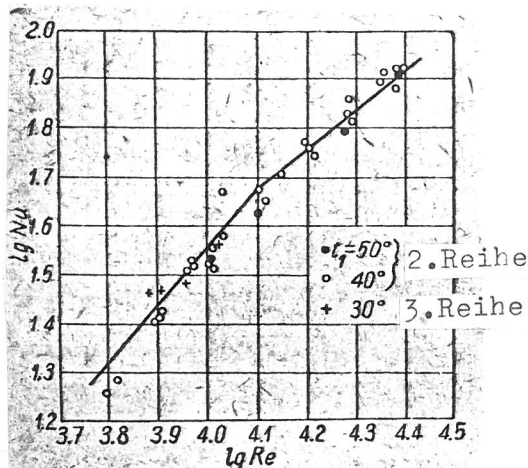
Abb. 10 zeigt die Kurven der Abhängigkeit Nu' von Re für die Verdunstung nach den Daten der drei Versuchsreihen.

Abb. 10 Abhängigkeit des Verdunstungskoeffizienten (Nu') von Re bei den 3 Versuchsreihen.



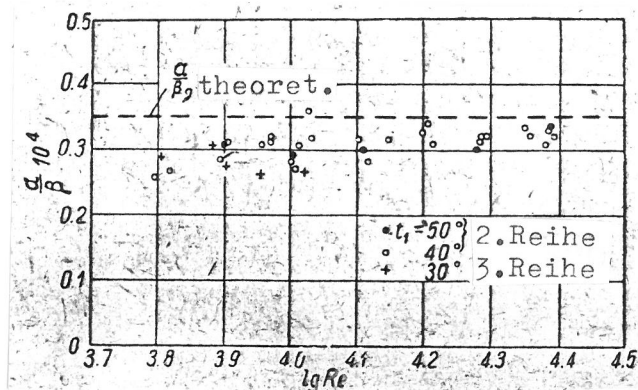
1) Siehe: Rubiņštejn, Ja.M.: Metod analogii s diffuziej i primenenie ego dlja issledovanija teploperedaci v nacal'nom ucastke trubny (Die Diffusionsanalogiemethode und ihre Verwendung in Untersuchungen des Wärmeübergangs im Rohranfangsabschnitt; russ.). In: Issledovanie processov regulirovanija, teploperedaci i obratnogo ochlaždenija. Moskva-Leningrad: 1938, S. 31 - 82; hier: S. 67.

Abb. 11 2. und 3. Reihe. Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten (Nu) von Re



In Abb. 11 ist die Kurve der Abhängigkeit Nu von Re für den Wärmeübergang abgebildet. Die Versuchspunkte der 2. und 3. Versuchsreihe haben in diesem Schaubild eine stärkere Streuung als die entsprechenden Versuchspunkte für die Verdunstung. Dies erklärt sich durch oben schon erwähnte Schwierigkeit, die Temperatur der austretenden Luft hinter der Meßstrecke genau zu messen. Der Kurvenverlauf von $Nu = f(Re)$ entspricht der entsprechenden Kurve für die Verdunstung. Trotz des Anstiegs der Versuchspunkte und einer weniger deutlich ausgeprägten Tendenz haben die Nu-Zahlen bei höherem Grad des nichtisothermen Prozesses ebenfalls abnehmende Tendenz.

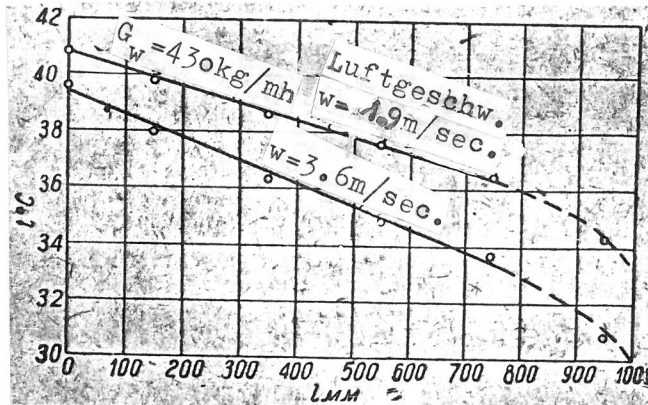
Abb. 12 2. und 3. Reihe. Koeffizientenverhältnis von Wärmeübergang und Verdunstung $\frac{\alpha}{\beta_p}$



Eine geringere Genauigkeit der Versuchswerte der Wärmeübergangskoeffizienten wird ebenfalls anhand der Streuung der Punkte für die Beziehung $\frac{\alpha}{\beta_p}$ deutlich (Abb. 12). Im turbulenten Bereich bleibt der Durchschnitts-

wert konstant. Die Versuchspunkte, die den verschiedenen Wassertemperaturen entsprechen, weichen nirgends wesentlich ab.

Abb. 13 2. Reihe. Änderung der Wassertemperatur bzgl. der Plattenhöhe

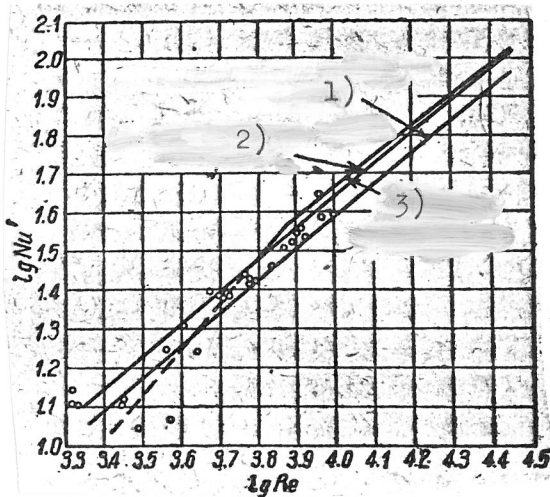


Die Meßergebnisse der Wassertemperaturen bzgl. der Plattenhöhe sind für zwei Versuchsreihen in Abb. 13 aufgeführt. Dabei bedeutet l der Abstand vom oberen Plattenrand. Es sei anzumerken, daß aufgrund der Krümmung der Holzplatten, auf denen die Messungen durchgeführt wurden, die Wasserverteilung über die Plattenbreite ungleichmäßig war. Die Kurven tragen somit lokalen Charakter und unterscheiden sich von den Kurven der homogenen Temperaturen bzgl. der gesamten Plattenbreite. Die Abbildung zeigt - bis auf einen verhältnismäßig kleinen Abschnitt beim Lufteintritt - einen praktisch geradlinigen Temperaturverlauf.

Vergleich mit Daten anderer Untersuchungen zu Verdunstung und Wärmeübergang an Filmoberflächen.

Abb. 14 zeigt die Ergebnisse unserer 1. Versuchsreihe sowie die von G i l l i l a n d und S h e r w o o d, die ihre Versuche ebenfalls bei annähernd isothermem Zustand durchführten. Die Kurve nach G i l l i l a n d und S h e r w o o d in Abb. 14 ist eine Verallgemeinerung für alle von ihnen durchgeführten Versuche zur Verdunstung von Wasser und einiger anderer Flüssigkeiten, u.a. Versuche mit Parallel- und Gegenluftstrom. Bei der Auswertung dieser Versuche bezogen G i l l i l a n d und S h e r w o o d die Absolutgeschwindigkeit der Luft in die Reynolds-Zahl ein.

Abb. 14 Vergleich der Ergebnisse der 1. Versuchsreihe mit den Versuchsdaten von Gilliland und Sherwood.
Anmerkung: Die Versuchspunkte von Gilliland und Sherwood für Wasser bei Gegenluftstrom sind mit den Korrekturfaktoren $\frac{1}{d}$ und k_c eingetragen.



- 1) Gilliland u. Sherwood
 $Nu' = 0.029 Re^{0.89} Pr^{0.44}$
bei $l = 49.8$
 d
- 2) Gilliland u. Sherwood
für $l = 9.26$ mit
 d
Korrekturfaktor k_c
- 3) eigene Versuche
1. Reihe $l = 9.26$
 d

In der Abbildung sind auch 24 Versuchspunkte eingetragen, die Bedingungen entsprechen, die denen in unseren Versuchen sehr nah kommen, nämlich die Versuche bei Gegenluftstrom. Beim Eintragen dieser Punkte setzten wir Re-Werte ein, die nach dem Verhältnis Luftgeschwindigkeit zu Rieselfilm errechnet wurden, und nahmen Korrekturen zur Berücksichtigung der Beziehung $\frac{1}{d}$ vor, die erheblich von unserer abwich (43,8 gegenüber 9,26), sowie Korrekturen zum Diffusionskoeffizienten¹⁾. Bei der Korrektur von $\frac{1}{d}$ wurde Nu' proportional zu $(\frac{1}{d})^{-0,054}$ vorausgesetzt. Analoge Korrekturen wurden bei der Eintragung der 2. Kurve nach Gilliland und Sherwood in Abb. 14 vorgenommen.

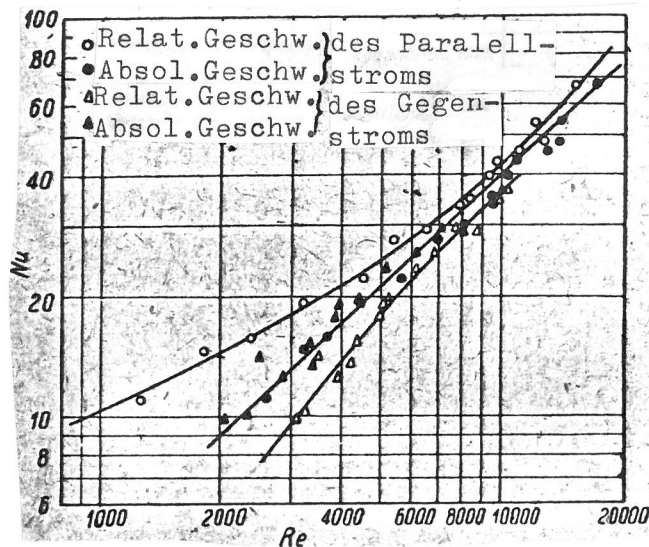
Abb. 14 zeigt ziemlich dicht zusammenfallende Ergebnisse für enge rechteckige und runde Rohre²⁾. Eine wesentliche Verschiebung der Kurve und

1) Gilliland und Sherwood berechneten den Diffusionskoeffizienten nach den Daten früherer Versuche von Gilliland (Ind. Eng. Chem. Nr. 5, 1934). Für das System Wasserdampf-Luft ist der Diffusionskoeffizient nach Gilliland ca. 4 % größer als nach Mache.

2) Bei einer Korrektur von $\frac{1}{d}$ nach Rubinštejn (siehe oben) lagen die Ergebnisse noch enger beieinander.

der Versuchspunkte nach G i l l i l a n d und S h e r w o o d nach unten läßt sich durch den vorhandenen Beruhigungsabschnitt und die höheren Wassertemperaturen in ihren Versuchen erklären. Interessanterweise läßt sich durch die Versuchspunkte von G i l l i l a n d und S h e r w o o d , - unabhängig von ihrer Lage - , vor allem bei kleinen Re-Zahlen mit steilem Anstieg eine schnellere Abnahme der Nu'-Zahlen feststellen, was für Übergangsformen typisch ist. Ein Unterschied zu unseren Versuchen besteht nur darin, daß sich der Übergang von einer Kurvenverlaufsform zur anderen bei niedrigeren Re-Zahlen ergibt. Die Tatsache, daß G i l l i l a n d und S h e r w o o d diesen Übergang bei ihrer Versuchsauswertung nicht aufzeigten und für den turbulenten Bereich einen etwas steileren Geradenanstieg für $Nu' = f(Re)$ erhielten, resultiert offensichtlich daraus, daß sie versuchten, die gesamte Abhängigkeit $Nu' = f(Re, Pr')$ auf der Grundlage von Versuchen zu erhalten, die bei unterschiedlichen verdunstenden Flüssigkeiten und Luftrichtungen durchgeführt wurden.

Abb. 15 Die Versuche von G i l l i l a n d und S h e r w o o d (Wasserverdunstung). Punkteverteilung bei der Bildung der Reynolds-Zahl mit der relativen Luftgeschwindigkeit



Eine solche Verallgemeinerung der Versuchsdaten ist nicht ausreichend gerechtfertigt. Bei Verdunstung einer Flüssigkeit an einer Rieselfilmoberfläche müssen die Nu'-Werte (Analog auch die Nu-Werte beim nicht-isothermen Zustand) nicht nur von der Geschwindigkeit und den physikalischen Konstanten des Gasmediums und Diffusionskoeffizienten des

Systems Dampf-Gas abhängen, die in Re und Pr' eingehen, sondern auch von den physikalischen Konstanten und Bedingungen des Films, die vor allem die Oberflächenbeschaffenheit bestimmen. Dieser Schluß ergibt sich aus unseren Versuchsergebnissen. Von diesem Standpunkt aus muß man auch eine Nichtübereinstimmung der Versuchsergebnisse bei Parallel- und Gegenluftstrom als gesetzmäßig betrachten, die sich bei $Gilliland$ und $Sherwood$ mit Einbringen der jeweiligen Luftgeschwindigkeit in Re ergab (Abb. 15).

Angesichts des Einflusses des Wärmestroms und der Temperatur des Wasserfilms ist eine Übereinstimmung unserer Ergebnisse mit den Versuchsdaten von $Chilton$ und $Colburn$ interessant, da diese ihre Versuche bei umgekehrter Wärmestromrichtung und wesentlich niedrigeren Wassertemperaturen durchführten. In Abb. 16 sind die von uns nach diesen Daten errechneten Nu' -Werte eingetragen. Die Wasserverdunstungsmenge wurde bei der Berechnung nach den Psychrometeranzeigen bestimmt. Die Versuchspunkte von $Chilton$ und $Colburn$ befinden sich oberhalb der Kurven zu unserer 1. und 2. Versuchsreihe. Dies stimmt mit den Ergebnissen für Nu' bei Richtungsänderung überein.

Abb. 16 Vergleich der Versuchsergebnisse der 2. Reihe mit den Versuchsdaten von $Chilton - Colburn$ und $Matousek$. Auf der Ordinate ist $\lg Nu'$ eingetragen.

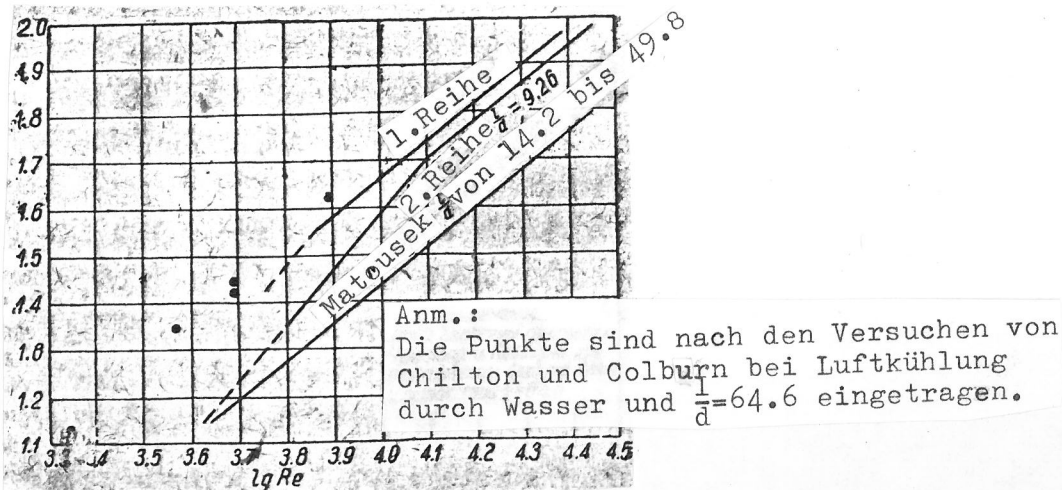


Abb. 16 zeigt auch die Abhängigkeit $Nu' = (Re)$, die $Matousek$ anhand sämtlicher Versuchsdaten ohne Einschränkung auf iso-

therme und nichtisotherme Bedingungen erhielt. Die wesentlich niedrigeren Nu' -Werte von M a t o u s e k sind sehr interessant. Ein erhebliches Abweichen der Versuchsergebnisse von M a t o u s e k von den übrigen Versuchsdaten zur Verdunstung an einer Filmoberfläche sowie von den Versuchsdaten zum Wärmeübergang läßt annehmen, daß in der Durchführung seiner Versuche oder deren Auswertung ein Fehler unterlaufen ist.

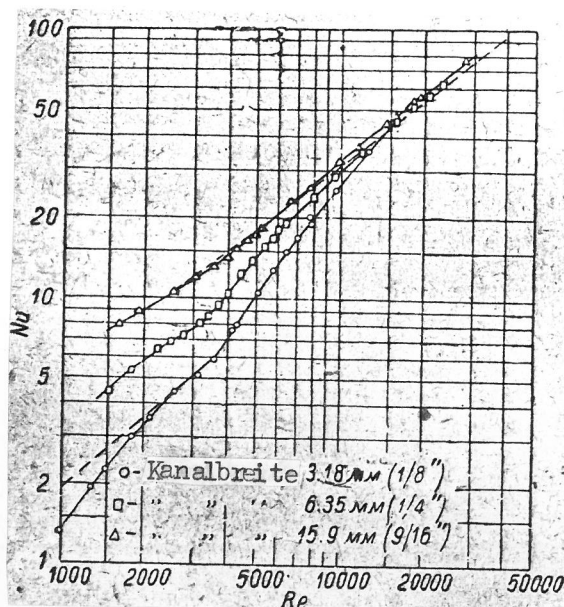
Diskussion der Ergebnisse

Frühere experimentelle Untersuchungen zeigten keinen wesentlichen größeren Einfluß des Übergangs von der turbulenten zur gemischten Strömungsform sowie dem Grad des nichtisothermen Verlaufs auf dessen Intensität. Im Unterschied zu diesen Untersuchungen lassen sich zu den oben beschriebenen Versuchen folgende Feststellungen machen:

1. Die Gesetze der Veränderung von Nu' als Funktion von Re für den Bereich eines ausgebildeten turbulenten Luftstroms und den Übergangsbereich sind unterschiedlich, wobei mit abnehmendem Re Nu' im Übergangsbereich wesentlich schneller abnimmt als bei ausgebildeter Turbulenz.
2. Bei nichtisothermem Zustand, wie er für einen warmen, von der Flüssigkeitsoberfläche ausgehenden Strom (Erwärmung der durchströmenden Luft) charakteristisch ist, verschiebt sich die Kurve $Nu' = f(Re)$ im Vergleich zur Kurve für den annähernd isothermen Prozeß nach unten, d.h. die Verdunstungs- und Wärmeübergangsintensität wird geringer.
3. Mit höherem Grad des nichtisothermen Prozesses erfolgt der Übergang von der gemischten Strömungsform zur reinen Turbulenz bei höheren Re -Zahlen, und die entsprechende Abnahme der Nu -Zahlen im Übergangsbereich erweist sich als wesentlich größer als im Bereich des ausgebildeten turbulenten Strömungs

Eine schneller abnehmende Intensität der Verdunstungs- und Wärmeübergangsprozesse im Übergangsbereich im Vergleich zum turbulenten Bereich bzgl. abnehmender Re-Zahlen stimmen völlig mit der heutigen Darstellung zur Struktur der Strömung in den angegebenen Bereichen überein und wird auch durch zahlreiche Untersuchungen zum Wärmeübergang von festen Wänden bestätigt. So weist Kraussold, ausgehend von eigenen Versuchen und denen einiger amerikanischer Forscher (Morris und Whitman, Sherwood u.a.) darauf hin, daß für $Re < 10\,000$ der Exponent bei Re in der Korrelationsgleichung wesentlich größer ist als für $Re > 10\,000$ und auch bisweilen größer als 1 ist. Ilin, der den Wärmeübergang im rechteckigen Kanal bei Re-Werten von 3 570 - 9 940 untersucht hat, erhielt einen Exponenten von 1,27 im Vergleich zu 1,18 in unseren Versuchen. In diesem Zusammenhang sind die Versuchsergebnisse von Washington und Marks interessant. Bei der Untersuchung des Wärmeübergangs in einem waagrechten rechteckigen Kanal ohne Beruhigungsstrecke erhielten sie im Übergangsbereich bei unterschiedlichem Abstand zwischen den Breitseiten des Kanals verschiedene Steigungen der Kurven und einen Knick in den Kurven (Abb. 17). Bei $Re \approx 13\,000$ ergab sich bei Washington und Marks der Übergang zur ausgebildeten turbulenten Strömung.

Abb. 17 Die Versuche von Washington und Marks (Wärmeübergang im rechteckigen Kanal). Abhängigkeit des Kurvenverlaufs $Nu = (Re)$ im Übergangsbereich von der Kanalbreite



Die nicht übereinstimmenden Ergebnisse der Einzeluntersuchungen hinsichtlich der Re-Zahlen, bei denen ein Übergang von einer Strömungsform zu anderen zu beobachten ist, sowie hinsichtlich des Gesetzes zur Änderung von Nu (oder Nu') als Funktion von Re für den Übergangsbereich lassen sich durch den Einfluß der Eintrittsbedingungen der Flüssigkeit (oder des Gasmediums) der Kanalform und der Wandbeschaffenheit erklären. In seinen Untersuchungen zum Rohrwiderstand zeigte Schiller besonders deutlich den Einfluß der Störungen beim Strom Eintritt und der Länge des Eintrittsabschnitts auf die Art des Übergangs vom laminaren zum turbulenten Zustand. Dies mußte sich offensichtlich auch in unseren Versuchsergebnissen widerspiegeln, die ohne Beruhigungsstrecke und bei kleinen $\frac{l}{d}$ durchgeführt wurden. Neben den o.g. Faktoren zur Art des Übergangs von einer Strömungsform zur anderen müssen sich natürlich auch Größe und Richtung des Wärmestroms und bei der Verdunstung auch der Stofffluß auswirken. In unseren Versuchen zeigte sich dies darin, daß mit höherem Grad des nichtisothermen Prozesses bei gleichzeitiger Verschiebung der Kurven $Nu' = f(Re)$ auch eine Verlagerung des Kurvenknicks zu höheren Re-Werten hin zu beobachten ist.

Der Einfluß des Wärmeübergangs auf die hydrodynamische Stromstruktur wurde erstmals bei der Untersuchung des Rohrwiderstands festgestellt, dann in Versuchen zum Wärmeübergang an festen Wänden. Diese Erscheinung ist jedoch noch nicht genügend erforscht. Keevil und Mc Adams erklären dies mit einer Viskositätsänderung des durchströmenden Mediums bzgl. des Kanalquerschnitts, die vor allem bei laminarer Bewegung erheblich ist und eine Änderung des Geschwindigkeitsprofils und der Grenzschichtdicke bewirkt. Mc Adams verweist auch auf mögliche zusätzliche Stromverzerrungen aufgrund geänderter Dichte des durchfließenden Mediums im Querschnitt. In der UdSSR kamen Il'in und Miceev zu den gleichen Ergebnissen. Sie bemerkten in ihren Versuchen auch bei turbulenter Strömung einen wesentlichen Einfluß der Richtung und Größe des Wärmestroms.

Bei der Verdunstungskühlung in unseren Versuchen darf man sich natürlich nicht nur auf die Berechnung der Temperaturbedingungen beschränken, da sich auf die Verteilung der Viskosität und Dichte in feuchter Luftströmung auch die Stoffübertragung auswirkt. Ackert -

m a n n hat schon früher auf den Einfluß von Diffusions- und Konvektionsstrom auf die Dicke der Grenzschicht hingewiesen. Daher muß man neben der Größe der Temperaturdifferenz, die den Grad des nichtisothermen Prozesses charakterisiert, auch die Größe des Partialdruckunterschiedes berücksichtigen.

Ein zweiter, für unsere Bedingungen spezifischer Faktor ist die Oberflächenbeschaffenheit des Wasserrieselfilms, die offensichtlich von der Viskosität der Flüssigkeit abhängt. Dies spricht auch für einen möglichen Einfluß der absoluten Wassertemperatur, die sich in unseren Versuchen in verhältnismäßig großen Bereichen bei wenig veränderter Temperatur der eintretenden Luft änderte. Auch bei verändertem Wasserdurchfluß mußte sich der Einfluß auf die Struktur der Luftströmung, Art und Größe der Rauigkeit des Films zeigen. Leider gelang es nicht, dies zu bestätigen.

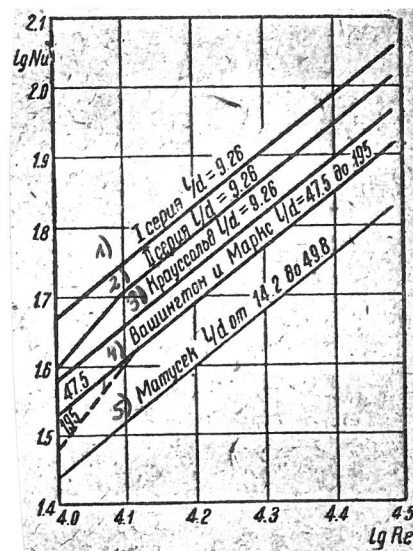
Im Übergangsbereich der Strömung kann sich bei verhältnismäßig geringen Luftgeschwindigkeiten wahrscheinlich auch die natürliche Konvektion auf die eine oder andere Art auf die Nusselt-Zahl auswirken. Diese mußte bei horizontaler und vertikaler Lage der Kanalachse sowie bei Wärmeübergang von einer festen Wand und Verdunstungskühlung unterschiedlich sein, da bei der Verdunstungskühlung nicht nur die Erwärmung der Luft sondern auch die Erhöhung des Feuchtigkeitsgehalts eine Änderung des spezifischen Gewichts der durchströmenden Luft bewirkt. Beim Vergleich unserer Versuchsergebnisse mit den Versuchsergebnissen zum Wärmeübergang von festen Wänden ist in unserem Fall ein wesentlich größerer Einfluß des Grads des nichtisothermen Prozesses zu bemerken.¹⁾ Berechnet man z.B. für die Bedingungen der 2. Versuchsreihe die Änderung der Nu' -Werte aufgrund veränderter Viskosität des Mediums nach S i e d e r und T a t e , so ergäbe sich für den turbulenten Bereich eine Abweichung von nur ca. 1 % im Vergleich zum nichtisothermen Zustand. Diesen oder einen noch kleineren Wert erhält man nach den Daten von K r a u s s o l d , S t i l l u.a. Um dies zu erklären, sind noch weitere Untersuchungen erforderlich. Vorläufig muß man sich auf den Hinweis über einen

1) Würde man die physikalischen Konstanten die sich auf die Temperatur der Wand beziehen (McIntyre, Micheev) in Nu' einbringen, ergäbe sich für die Versuche bei isothermem und nichtisothermem Zustand eine noch größere Divergenz dieser Werte.

offensichtlichen Unterschied der Bedingungen bei Verdunstungskühlung des Films aufgrund der Stoffübertragung und der jeweiligen Oberflächenbeschaffenheit des Films beschränken.

Die Ergebnisse unserer Versuche weisen noch einen Unterschied zu den Versuchen über den Wärmeübergang von festen Wänden auf. Berechnet man nach diesen Versuchen - unter Annahme einer Analogie zur Wärmeleitung und Diffusion - die Nu' -Zahlen, so liegen diese wesentlich unter unseren Werten (Abb. 18). Für einen solchen Vergleich wählten wir die Formel von Kraussold als Allgemeinformel für die experimentellen Arbeiten zahlreicher Forscher zum Wärmeübergang in runden Rohren sowie für die Ergebnisse von Washington und Marks aus ihren Versuchen zum Wärmeübergang in rechteckigen Kanälen. Die von Haucke und Molly durchgeführten Untersuchungen zum Wärmeübergang im rechteckigen Kanälen ergaben Resultate, die relativ eng mit der Kraussold-Formel übereinstimmen. Gilliland und Sherwood stellten beim Vergleich ihrer Ergebnisse mit der Matousek-Formel bei Verdunstung ebenfalls eine Verschiebung der Kurve nach oben fest.

Abb. 18 Vergleich der Versuchsergebnisse zur Verdunstung mit den Versuchsdaten zum Wärmeübergang von festen Wänden



- 1) 1. Reihe
- 2) 2. Reihe
- 3) Kraussold
- 4) Washington & Marks
- 5) Matousek $1/d$ von 14.2 bis 49.8

A c k e r m a n n , der die Versuchsergebnisse von G i l l i l a n d und S h e r w o o d detailliert untersuchte, erklärt die Kurvenverschiebung mit dem Unterschied zwischen der in die Berechnung ein-

gehenden Rohrwandoberfläche und der tatsächlichen Verdunstungs-
fläche, die wegen der gewellten Oberfläche des Wasserfilms größer ist.
Wir haben oben schon darauf hingewiesen, daß sich die Vergrößerung
der Verdunstungsfläche durch Wellen allein nicht wesentlich auf
den aus den Versuchen zu bestimmenden β_p -Wert auswirkt. Hier ist
noch hinzuzufügen, daß nach der Untersuchung zur Größe der Wellen die
max. Oberflächenvergrößerung des Films aufgrund der Welligkeit 0,5 -
1 % nicht überschreiten soll.

Es ist viel wahrscheinlicher, daß diese Nichtübereinstimmung der Kur-
ven durch die unterschiedlichen hydrodynamischen Zustände des Luft-
stroms bedingt ist. Diese Unterschiede ergeben sich hauptsächlich auf-
grund der uneinheitlich starken und gearteten Rauigkeit der Wände,
die entweder unbewegliche Metalloberflächen, im Normalfall technisch
glatte, oder bewegliche wellige Oberflächen eines Wasserrieselfilms
darstellen.

Bei der Untersuchung der Größe von $\frac{\alpha}{\beta_p}$ muß man darauf hinweisen, daß
unsere Versuche mit Erhöhung der Temperatur des verdunstenden Wassers
diesen Wert nicht vergrößerten.

Die erhaltenen Werte liegen erwartungsgemäß etwas niedriger als die
theoretischen, da sich der Wassertransport auf eine Abnahme der Luft-
temperatur auswirkte, die hinter der Meßstrecke gemessen wurde, und
somit auch auf die Werte von α . So hat sich im untersuchten Wasser-
temperaturbereich und in dessen Genauigkeitsbereich A c k e r m a n n s
Feststellung, daß der Partialdruck auf der Flüssigkeitsoberfläche we-
sentlich geringer wird, nicht bestätigt.

Es ist eine gewisse Tendenz zu beobachten, daß mit höheren Re-Zahlen
im Bereich kleiner Werte, die der Übergangsform der Strömung entspre-
chen, $\frac{\alpha}{\beta_p}$ größer wird. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, daß
die theoretische Abhängigkeit für $\frac{\alpha}{\beta_p}$, nach der die gestrichelte
Linie in Abb. 12 konstruiert wurde, nicht für den Übergangsbereich
der Strömung gilt.

Schlußbetrachtung

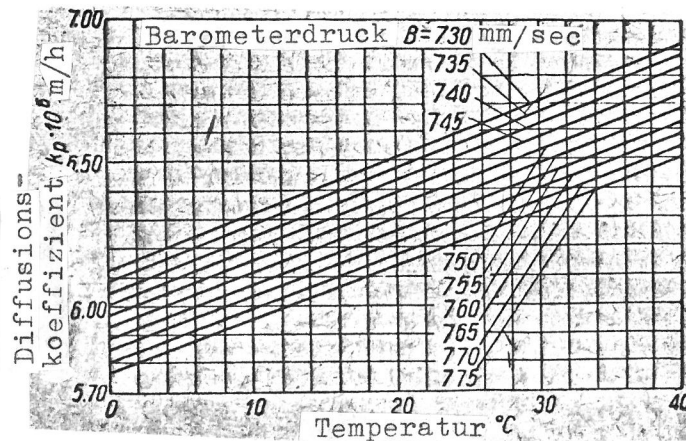
Die Versuche bestätigen die grundsätzlichen Schlußfolgerungen, die sich aus der Analogie von Wärmeleitfähigkeit und Diffusion sowie aus der Anwendung des Ähnlichkeitsprinzips bei Verdunstungskühlung einer Flüssigkeit ergeben. Insbesondere wird die Folgerung dadurch bestätigt, daß bei turbulenter Strömung des Gasmediums die Wärmeübergangs- und Verdunstungskoeffizienten, die durch die dimensionslosen Nu- und Nu'-Zahlen ausgedrückt sind, durch eine Gleichung desselben Typs bestimmt werden können¹⁾:

$$Nu = C \cdot Re^m,$$

$$Nu' = C_1 \cdot Re^m.$$

Auch im Genauigkeitsbereich, der bei der Bestimmung der Wärmeübergangskoeffizienten erreicht werden konnte, kann man die Schlußfolgerung bestätigt sehen, daß die Absolutwerte der Exponenten m in o.e. Gleichungen als gleich angenommen werden können.

Abb. 19 Diffusionskoeffizient des Wasserdampfs in der Luft



Die Werte von $\frac{\alpha}{\beta_p}$ liegen nah am theoretischen Wert und zeigen keine wesentlichen Abweichungen bei der Versuchsauswertung für Kühltürme.

Außerdem behandeln die Versuche das Vorhandensein der in den theoretischen Arbeiten nicht berücksichtigten Faktoren, die sich wesentlich auf die hydrodynamische Struktur des Luftstroms und gleichzeitig auch

¹⁾ Der Einfluß des Pr-Kriteriums wurde in unseren Versuchen nicht untersucht.

auf die Absolutwerte der untersuchten Koeffizienten auswirken. Dies gilt in erster Linie für den Einfluß der beweglichen welligen Oberfläche des Wasserrieselfilms, deren Beschaffenheit von der Viskosität und somit auch von der Temperatur der Flüssigkeit abhängen muß. Dieser Einfluß läßt sich dadurch erklären, daß die Koeffizienten C und C_1 in obigen Gleichungen für Nu und Nu' wesentlich größer sind als man nach den Versuchen zum Wärmeübergang von festen Wänden angenommen hätte. Für Verdunstung und Wärmeübergang bei Rieselfilmen müssen diese Gleichungen einen zusätzlichen Ausdruck enthalten, der die physikalischen Konstanten und die Geschwindigkeit des Wasserrieselfilms beinhaltet.

Die Versuche zeigen einen deutlicheren Einfluß des Grads des nicht-isothermen Prozesses auf die Verdunstungs- und Wärmeübergangskoeffizienten als beim Wärmeübergang von festen Wänden. Neben anderen Faktoren mußte sich hier offensichtlich der Massenstrom und der Zustand der Wasserfilmoberfläche auswirken.

Die Gesetze zur Änderung von Nu' und Nu als Funktion von Re für die ausgebildete turbulente Luftströmung und den Übergangsbereich sind unterschiedlich; der Übergang von einer Strömungsform zur anderen hängt jedoch auch vom Grad des nichtisothermen Prozesses ab.

Im untersuchten Bereich für Re kann obige Potenzform der Abhängigkeit Nu' und Nu von Re für praktische Berechnungen auch auf gemischte Strömungsformen des Luftstroms erweitert werden, und dabei können die Werte der in die Gleichungen eingehenden Koeffizienten und Exponenten bei Re entsprechend geändert werden. Man muß berücksichtigen, daß sich die Bedingungen des Lufteintritts in die Meßstrecke des Kanals auf den Verlauf der Kurve Nu und Nu' im Übergangsbereich auswirken.

Die Abhängigkeiten der Verdunstungs- und Wärmeübergangskoeffizienten von $\frac{1}{d}$ wurde nicht behandelt. Der relativ enge Bereich, in dem es gelang, $\frac{1}{d}$ zu ändern, erlaubt anhand der Versuche keine Schlußfolgerung über deren Einfluß.

Bezgl. des Wärmeübergangskoeffizienten, dessen Bestimmungsgenauigkeit bei den Berechnungen der Kühltürme wesentlich niedriger lag, bestätigen die Versuche, daß man ihn mit dem Verdunstungskoeffizienten und der gegebenen theoretischen Abhängigkeit $\frac{\alpha}{\beta_p}$ berechnen kann.

Die Berechnungsformeln für die Verdunstungs- und Wärmeübergangskoeffizienten können folgendermaßen dargestellt werden:

$$\beta_p = C_1 \cdot \frac{k_p}{v^m} \cdot d^{m-1} \cdot w^m \left[\frac{1}{h} \right],$$

$$\alpha \approx 0,35 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_p \left[\frac{\text{cal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}} \right],$$

Folgende Dimensionen gehen in die Gleichungen ein:

$$k_p \left[\frac{\text{M}}{\text{h}} \right], \quad v \left[\frac{\text{M}^2}{\text{SEC}} \right], \quad d \left[\text{M} \right], \quad w \left[\frac{\text{M}}{\text{SEC}} \right].$$

Die Werte der Konstanten C_1 und m sind für die verschiedenen Strömungszustände und Temperaturbedingungen in Tab. 6 aufgeführt. Sie gelten für die Wasserverdunstung in Luft bei Luftgegenströmung. Abb. 19 zeigt die Diffusionskoeffizientenwerte k_p (nach M a c h e). Eine Umrechnung der Werte β_p und α für $\frac{1}{d}$, die sich von unseren Versuchswerten ($\frac{1}{d} = 9,26$) unterscheiden, ist bis zur genauen Klärung der Frage, welchen Einfluß dieses Kriterium hat, möglich, wenn man von den Untersuchungsergebnissen des Wärmeübergangs von festen Rohrwänden ausgeht. Das nach den Versuchsdaten aufgestellte Nomogramm zur Bestimmung von β_p und α ist in der vorausgegangenen Abhandlung auf S. 121¹⁾ aufgeführt.

Aufgabe weiterer Untersuchungen ist die Klärung der Fragen, die mit dem Einfluß des nichtisothermen Prozesses, der Partialdruckdifferenz und dem Verhältnis $\frac{1}{d}$ auf die Verdunstungs- und Wärmeübergangskoeffizienten zusammenhängen. Neben Laboruntersuchungen müssen außerdem unbedingt Versuche unter industriellen Bedingungen durchgeführt werden.

1) Berman, L.D.: Metody teplogogo rasčeta bašennyh ochladitelej plenočnogo tipa (Wärmeberechnungsverfahren für Rieselfilmkühltürme; russ.). In: Issledovanie processov regulirovanija, teploperedai i obratnogo ochlazdenija. Moskva-Leningrad: 1938, S. 107 - 130.

Tab. 6

C_1 und m

Zustand (Durchschnittsbedingungen)			Re		C_1	m
Wasser- temperatur °C	Temp. diff. von Wasser und Luft °C	Partial dampfdruck- diff. ata	von	bis		
18	0	0,014	5 000 7 300	7 300 27 000	(0,001) 0,0294	(1,18) 0,8
30	8	0,020	5 000 9 400	9 400 27 000	0,00086 (0,0280)	1,18 0,8
40	15	0,050	5 000 12 500	12 500 27 000	0,00074 0,0267	1,18 0,8

Der Autor dankt Ja.M. Rubinštejn, der ihm bei der Arbeit zahlreiche wertvolle Hinweise gegeben hat, dem Ingenieur A.V. Pevcev, der mit Hilfe der Technikerin L.P. Krapivenskaja und der Laborantin M.V. Kuznecova in Zusammenhang mit der Durchführung der Versuche und ihrer Auswertung große Arbeit geleistet hat.

L i t e r a t u r v e r z e i c h n i s

1. Биби́ков Д. Н., „Тепло и сила“ № 6, 1937. Отчет НИИГ, Л-д, 1935.
Bibikov, D.N.: Laboratornye issledovanija konstruktivnych form oro-
sitelja plenocnych gradiren.
In: Teplo i sila. Leningrad, 1937, Nr 6, S. 28 - 32.
<Laboruntersuchungen zu konstruktiven Rieselflächenkühler-Formen;
russ.>
Bibikov, D.N.
In: Otcet NIIG (Naučno-issledovatel'skij institut gidrotechniki).
Leningrad, 1935.
<Titel nicht nachweisbar; russ.>
2. Гребер Г. и Эрк С., Основы учения о теплообмене, ОНТИ, 1936.
Greber, G., Erk, S.
Osnovy ucenija o teploobmene.
Moskva: Ob"edinennoe naučno-techničeskoe izdatel'stvo, 1936.
Übersetzung aus dem Deutschen:
Gröber, Heinrich, Erk, Siegmund: Die Grundgesetze der Wärmeübertragung.
Berlin: Springer, 1933, 2. Aufl.
3. Ильин Л. Н. и Михеев М. А., „Журнал технической физики“ № 4 и 8, 1933
Il'in, L.N., Micheev, M.A.: Iskaženie gidravličeskogo soprotivlenija
kanalov pri nalicii teploobmena.
In: Žurnal techničeskoj fiziki. Moskva, 3 (1933), Nr 4, S. 509 - 517.
<Verzerrung des hydraulischen Kanalwiderstandes beim Wärmeübergang;
russ.>
Il'in, L.N., Micheev, M.A.: Vlijanie teploobmena na gidravličeskoe
soprotivlenie kanalov.
In: Žurnal techničeskoj fiziki. Moskva, 3 (1933), Nr 8, S. 1301 bis
1309.
<Einfluß des Wärmeübergangs auf den hydraulischen Kanalwiderstand;
russ.>
4. Ильин Л. Н., Отчет ЦКТИ, наряд № 1024, 1936.
Il'in, L.N.
In: Otcet CKTI (Central'nyj naučno-issledovatel'skij kotloturbinnyj
institut). Moskva, 1936, Nr 1024.
<Titel nicht nachweisbar; russ.>
5. Лурье М. Ю. и Михайлов Н. И., „Известия ВТИ“ № 3, 1935.
Lur'e, M.Ju., Michajlov, N.M.: Isparenie vody so svobodnoj poverch-
nosti.
In: Izvestija. VTI (Vsesozuznyj teplotechničeskij naučno-issledova-
tel'skij institut im. F.Ė. Dzeržinskogo). Moskva, 1935, Nr 3, S. 25
bis 32.
<Wasserverdunstung von freier Oberfläche; russ.>
6. Мак-Адамс В., Теплопередача, ОНТИ, 1936.

Mak-Adams, V.

Теплопередача.

Moskva: Ob"edinennoe naučno-techničeskoe izdatel'stvo, 1936.

Übersetzung aus dem Englischen:

McAdams, William Henry: Heat Transmission. New York: McGraw-Hill, 1933.

7. Склярёнко С. И. и Баранаев М. К., „Журнал физической химии“ № 9 1935 и № 1, 1936.
Skljarenko, S.I., Baranaev, M.K.: K voprosu o skorosti isparenija židkosteј.
In: Žurnal fizičeskoј chimii. Moskva, 6 (1935), Nr 9, S. 1180 bis 1191.
(Zur Verdunstungsgeschwindigkeit von Flüssigkeiten; russ.)
Skljarenko, S.I., Baranaev, M.K.: O skorosti isparenija židkosteј v dvizuscemsja vozduche.
In: Žurnal fizičeskoј chimii. Moskva, 8 (1936), Nr 1, S. 51 - 60.
(Über die Verdunstungsgeschwindigkeit von Flüssigkeiten in bewegter Luft; russ.)
8. Ackermann, G.: Diffusion von Dämpfen in schäumende Luft.
In: Forschung im Ingenieurwesen. Düsseldorf, 6 (1935), Nr 1, S. 53 bis 55.
Ackermann, G.: Wärmeübergang und molekulare Stoffübertragung im gleichen Feld bei großen Temperatur- und Partialdruckdifferenzen.
In: Forschung im Ingenieurwesen. Beil. VDI-Forschungsheft. Düsseldorf, 382 (1937), S. 1 - 16.
9. Arnold, J.Howard: The Theory of the Psychrometer. I. The Mechanism of Evaporation.
In: Journal of Applied Physics. Lancaster, Pa., 4 (1933), S. 255 bis 262.
Arnold, J.Howard: The Theory of the Psychrometer. II. The Effect of Velocity.
In: Journal of Applied Physics. Lancaster, Pa., 4 (1933), S. 334 bis 340.
10. Brooks, D.P.: Psychrometric Charts for High and Low Pressures.
In: Miscellaneous Publications. U.S. Department of Commerce. National Bureau of Standards. Washington, D.C., 146 (1935), S. 2 - 8.
11. Chilton, T.H., Colburn, A.P.: Mass Transfer (Absorption) Coefficients. Prediction from Data in Heat Transfer and Fluid Friction.
In: Industrial and Engineering Chemistry. Washington, D.C., 26 (1934), Nr 11, S. 1183 - 1187.
12. Gilliland, E.R., Sherwood, T.K.: Diffusion of Vapors into Air Streams.
In: Industrial and Engineering Chemistry. Washington, D.C., 26 (1934), Nr 5, S. 516 - 523.
13. Haan, Franz: Kennlinien des Naßluftkühlers.
In: Zeitschrift für die gesamte Kälte-Industrie. Berlin, 41 (1934), Nr 1, S. 7 - 13.

14. Hancke, Erwin: Der Wärmeübergang an Luft zwischen zwei ebenen parallelen Platten bei Wirbelströmung.
In: Archiv für Wärmewirtschaft und Dampfkesselwesen. Berlin, 11 (1940), Nr 2, S. 53 - 58.
15. Hirsch, Moritz
Die Trockentechnik. Grundlagen, Berechnung, Ausführung und Betrieb der Trockeneinrichtungen.
Berlin: Springer, 1932.
16. Jürgens, Walter: Der Wärmeübergang an einer ebenen Wand.
In: Gesundheits-Ingenieur. gi. Beiheft Reihe 1. München, 19 (1924), S. 52.
17. Kirschbaum, Emil: Wärme- und Stoffaustausch im Mollierschen i,x-Bild.
In: Forschung im Ingenieurwesen. Düsseldorf, 7 (1936), Nr 3, S. 109 bis 113.
18. Kraussold, H.: Die Wärmeübertragung an Flüssigkeiten in Rohren bei turbulenter Strömung.
In: Forschung im Ingenieurwesen. Düsseldorf, 4 (1933), Nr 1, S. 39 bis 44.
19. Lewis, W.K.: The Evaporation of a Liquid into a Gas.
In: Mechanical Engineering. Easton, Pa., 44 (1922), Nr 7, S. 445 bis 446.
Lewis, W.K.: The Evaporation of a Liquid into a Gas - A Correction.
In: Mechanical Engineering. Easton, Pa., 55 (1933), Nr 9, S. 567 bis 568.
20. Matousek, Robert
Über die Wärmeübergangs- und Verdunstungszahl bei künstlich belüfteten Verdunstungskühlern mit senkrechten ebenen oder zylindrischen von Wasser berieselten Wänden.
Dissertation. Technische Hochschule München, 1933.
21. Melville, H.W.: A Note on Evaporation from Irregular Surfaces.
In: Transactions of the Faraday Society. Aberdeen, 32 (1936), Teil 7, S. 1017 - 1020.
22. Merkel, Friedrich: Verdunstungskühlung.
In: Forschung im Ingenieurwesen. Beil. VDI-Forschungsheft. Düsseldorf, 275 (1925).
23. Molly, Hermann
Der Wärmeübergang an einen zwischen zwei ebenen parallelen Platten bewegten Luftstrom.
Dissertation. Technische Hochschule Dresden, 1935.
24. Nusselt, Wilhelm: Wärmeübergang, Diffusion und Verdunstung.
In: Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. ZAMM! Düsseldorf, 10 (1930), Nr 2, S. 105 - 121.
Nusselt, Wilhelm: Der Wärmeaustausch am Berieselungskühler.
In: VDI-Z. Düsseldorf, 67 (1923), Nr 9, S. 206 - 210.

25. Robinson, C.S.: The Design of Cooling Towers.
In: Mechanical Engineering. Easton, Pa., 45 (1923), Nr 2, S. 99 - 102.
26. Schiller, L.: Neue Versuche zum Turbulenzproblem.
In: Physikalische Zeitschrift. Leipzig, 25 (1924), Nr 21, S. 541 bis 544.
Schiller, Ludwig: Grenzschichtdicke und kritische Zahl.
In: Physikalische Zeitschrift. Leipzig, 26 (1925), Nr 1, S. 64 - 69.
Schiller, L.: Rauigkeit und kritische Zahl. Ein experimenteller Beitrag zum Turbulenzproblem.
In: Zeitschrift für Physik. Berlin, 3 (1920), S. 412 - 416.
27. Schmidt, Ernst: Verdunstung und Wärmeübergang.
In: Gesundheits-Ingenieur. gi. München, 52 (1929), Nr 29, S. 525 bis 531.
28. Sieder, E.N., Tate, G.E.: Heat Transfer and Pressure Drop of Liquids in Tubes.
In: Industrial and Engineering Chemistry. Washington, D.C., 28 (1936), Nr 12, S. 1429 - 1435.
29. Still, E.W.: Some Factors Affecting the Design of Heat Transfer Apparatus.
In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. London, 134 (1936), S. 363 - 435.
30. Ten-Bosch, Maurits
Die Wärmeübertragung. Ein Lehr- und Nachschlagebuch für den praktischen Gebrauch.
Berlin: Springer, 1936, 3. Aufl.
31. Thiesenhusen, H.: Untersuchung über die Wasserverdunstungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur des Wassers, der Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit.
In: Gesundheits-Ingenieur. gi. München, 53 (1930), Nr 8, S. 113 bis 119.
32. Werner, W.: Ein Hochleistungskühlturm aus Eisenbeton.
In: Archiv für Wärmewirtschaft und Dampfkesselwesen. Berlin, 10 (1929), Nr 2, S. 37 - 43.
33. Whitman, W.G., Keats, J.G.: Rates of Absorption and Heat Transfer between Gases and Liquids.
In: Industrial and Engineering Chemistry. Washington, D.C., 14 (1922), Nr 3, S. 186 - 191.
34. Wolf, Friedrich
Untersuchungen über die Wasserrückkühlung in künstlich belüfteten Kühlwerken.
München/Berlin: Oldenbourg, 1928.

35. Washington, Lawrence, Marks, William M.: Heat Transfer and Pressure Drop in Rectangular Air Passages.
In: Industrial and Engineering Chemistry. Washington, D.C. 29
(1937), Nr 3, S. 337 - 345.
-

Stuttgart, den 6. Februar 1981

übersetzt von

U. Friess-Ehlers

(Ulrike Friess-Ehlers)
Dipl.-Übersetzerin

Ottmar Pertschi

(Ottmar Pertschi)
Dipl.-Übersetzer