

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 79 (1961)
Heft: 46

Artikel: Wärmeübergang an einer durch Luftstrahlen gekühlten Platte
Autor: Ott, Hanns H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-65632>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 23.02.2026

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

oftmals die Rohre nicht genügend nahe an den Mantel herangebracht werden können.

In Bild 11 ist eine Rohranordnung dargestellt, bei der die kritischen Schnittstellen vermieden sind und die deshalb als entlüftungstechnisch einwandfrei angesprochen werden kann. Im vorderen Teil, wo noch viel Dampf durchfliest, sind die Rohre locker und fluchtend angeordnet statt eng und mit einer Gasse. Der Druckverlust wird damit klein gehalten, und Umströmungen im Sinne des Bildes 8 können nicht auftreten. Erst im zweiten Rohrfeld wird dann auf eine dichtere Berohrung übergegangen, plötzlich oder allmählich, je nachdem ob etwas mehr oder weniger Druckverlust zugelassen werden kann.

Ergänzend zu den Entlüftungsversuchen am Modell ist zu sagen, dass, sobald Luft in das Wassermodell eingeblasen wird, nicht mehr Ähnlichkeit in dem strengen Sinne besteht zwischen der Modellströmung Wasser + Luft und der wirklichen Strömung Dampf + Inertgas, sondern die ins Modell

eingeblesene Luft dient lediglich zum Anzeigen, ob irgendwelche Druckminimumstellen vorhanden sind, die sich in der Grossausführung schädlich auswirken können.

Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass sich die Dampfströmung in Kondensatoren auf Grund der Ähnlichkeitstheorie mit einem hydraulischen Modell nachbilden lässt, das so gebaut ist, dass sich die Rohre in einfachster Weise umordnen und so druckverlustarme Anordnungen finden lassen. Mit Hilfe von eingeblasener Luft können mögliche Druckminima in den Rohrfeldern aufgespürt werden. An diesen Stellen würde sich in der Grossausführung die Luft ansammeln und zu einer Verschlechterung der über alle Rohre gemittelten Wärmedurchgangszahl führen. Insgesamt ergibt das Modell anschauliche Vorstellungen von Strömungen in Kondensatoren, aus denen bestehende Lösungen beurteilt und Richtlinien für die Konstruktion neuer Lösungen gewonnen werden können.

Wärmeübergang an einer durch Luftstrahlen gekühlten Platte

DK 536.24.244

Von Dr. Hanns H. Ott, Baden

Zusammenfassung

Mit einem Versuch wird die Wärmeübergangszahl an einer geheizten ebenen Wand bestimmt, die durch Luftstrahlen gekühlt wird. Die Kühlung strömt durch eine gelochte Platte senkrecht gegen die zu kühlende Fläche. Wählt man den Durchmesser d_L der Luftlöcher als charakteristische Länge, so lässt sich der Wärmeübergang bei der untersuchten Anordnung und dem gewählten Lochabstand darstellen durch

$$Nu = 0,067 Pr^{1/3} e^{-0,061 h/d_L} Re^{0,74}$$

wobei h der Abstand zwischen Wand und Lochplatte ist. Die Art, wie die Luft weggeführt wird, hat im Bereich der durchgeföhrten Messungen keinen Einfluss auf den Wärmeübergang. Unter Heranziehung von Angaben aus der Literatur werden die eigenen Messungen auf andere Strahlabstände umgerechnet.

1. Problemstellung und prinzipielle Versuchsanordnung

Beim Bau von thermischen Maschinen, die mit hohen Temperaturen betrieben werden, ist vielfach die Kühlung einzelner Bauteile notwendig. Dies kann beispielsweise durch Anblasen mit einem Medium geschehen. Im nachstehend beschriebenen Versuch wird die Wärmeübergangszahl an einer heißen ebenen Wand ermittelt, die durch gleichmäigig verteilte Luftstrahlen gekühlt wird.

Auf Bild 1 ist die Versuchsanordnung schematisch dargestellt. Durch die Löcher L wird aus einem Raum A Luft gegen die geheizte horizontale Wand P geblasen, wobei diese gekühlt wird. Aus dem Raum C gelangt die Luft nach oben ins Freie, so dass an der gekühlten Wand an nähernd der Druck der freien Atmosphäre herrscht. Die Verteilung der Anblaslöcher L und der Abströmlöcher (Senken) S ist gemäß Bild 2 festgelegt. Zu messen ist die mittlere Wärmeübergangszahl zwischen der Platte und der auftreffenden Luft, wobei der Druckabfall an der Lochplatte beim Versuch etwa im Bereich von 0,5 bis 1,5 % des

absoluten Druckes der Kühlung variiert soll. Die Platte P ist im Vergleich zu den Loch- und Senkenabständen als gross zu betrachten.

Die Dicke des Bleches B und der Durchmesser der Löcher L betragen je 4 mm und der Innendurchmesser der Senkenrohre 8 mm. Der Einfluss des Plattenabstandes ist im Gebiet zwischen $h = 15$ mm und $h = 60$ mm zu untersuchen.

2. Versuchseinrichtung

Die Versuchseinrichtung, mit der die Wärmeübergangsmessungen durchgeführt wurden, setzt sich aus zwei Hauptteilen zusammen: der wärmeabgebenden Platte und dem Luftführungsteil.

Für die Herstellung der wärmeabgebenden Platte, die auf einem begrenzten Flächenbereich einen bestimmten messbaren Wärmestrom liefern muss, wurde die in Bild 3 dargestellte Anordnung gewählt.

In einer Kupferschale Y ist ein Heizgeflecht H (Widerstand 50 Ω) angebracht, das nach unten durch eine Lage Asbest abgeschirmt ist. Dieses gibt seine Wärme fast ausschliesslich nach oben an die zu kühlende Platte P ab, die ebenfalls aus Kupfer besteht. Die Schale Y ist nach aussen durch eine dicke Schicht Asbest isoliert und liegt in einer zweiten Kupferschale X . Diese ist seitlich wiederum isoliert und ruht unten auf einer elektrischen Heizplatte. Ueber der Schale X ist ohne Zwischenisolation ein Ring aufgeschraubt. Dieser ist gegen die Platte P durch Asbest isoliert, während zwischen P und Y metallische Berührung herrscht.

Wird nun bei einer bestimmten elektrischen Belastung des Heizgeflechtes H die Leistung der Heizplatte W derart reguliert, dass zwischen den beiden Schalen X und Y kein Temperaturgefälle besteht, so muss die ganze Heizleistung von H durch die Platte P weggeführt werden. Um innerhalb der einzelnen Schalen X und Y und in der Platte P möglichst ausgeglichenen Temperaturfelder zu haben, wurde als Werk-

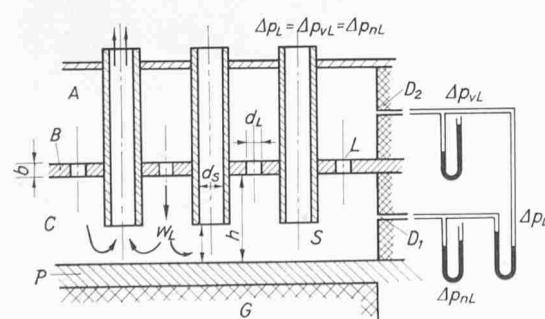


Bild 1 (links). Schema der Versuchsanordnung. A Zuströmraum der Kühlung. B Lochplatte. C Raum zwischen geheizter Wand und Lochplatte. D₁, D₂ Druckmessstellen. L Luftlöcher. G Heizkörper. P angeblasene Wand. S Abströmrohr (Senke)

Bild 2 (rechts). Anordnung der Zuströmlöcher und der Abströmrohre. L Zuströmlöcher (Lufteneintritt). S Abströmrohr (Senken)

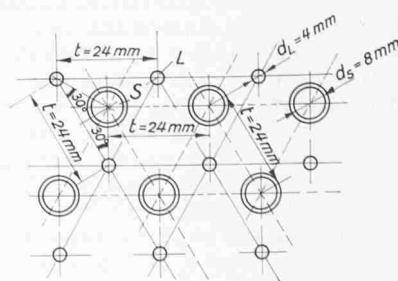
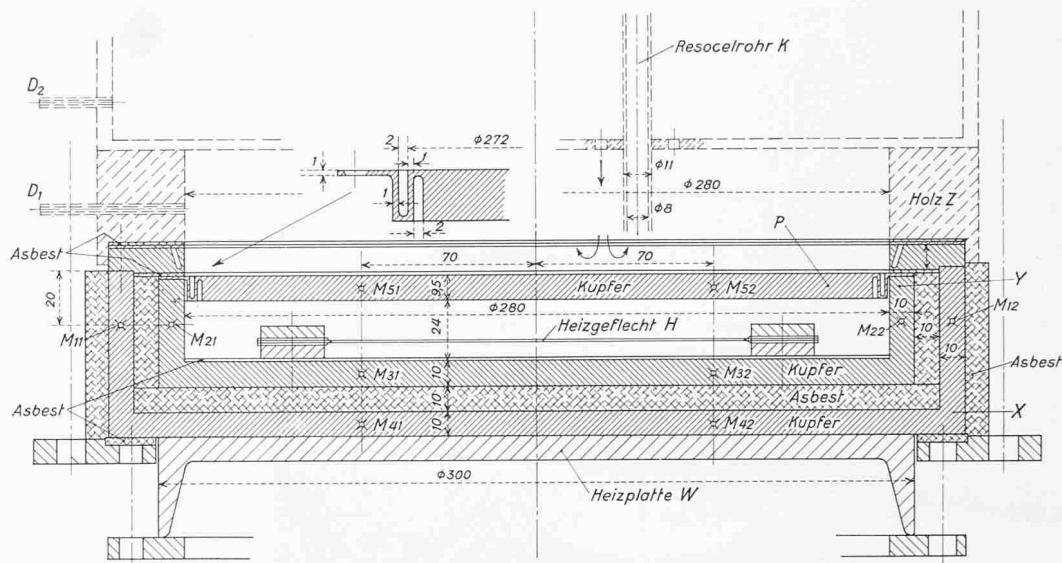


Bild 3. Unterer Teil der Versuchseinrichtung.
Wärmeabgebende Platte, Bezeichnungen im Text



stoff Elektrolytkupfer gewählt, wobei die Bodennahtschweißungen der Schalen ebenfalls mit demselben Material ausgeführt wurden. Zur Drosselung des Wärmeflusses zwischen der Schale Y und der Platte P wurde diese am Rande doppelt eingestochen und aussen an der Einspannstelle dünn gehalten (Bild 3).

Für die Messung der Temperaturen in den Schalen X und Y und in der Platte P wurde eine Reihe von Thermoelementen eingebaut. Die Lage der Messstellen geht aus Bild 3 hervor. Um eine Kontrollmöglichkeit zu haben, liegen je zwei Thermoelemente symmetrisch zur Axe. Die Thermoelementdrähte (Chromel und Alumel von 0,6 mm Durchmesser) wurden mit zylindrischen Kupferköpfen einzeln eingestemmt; der Abstand der beiden Löcher, die in einer horizontalen Ebene parallel verlaufen, beträgt 6 mm (Bild 4). Sowohl das Heizgeflecht H als auch die Heizplatte W wurden mit Wechselstrom betrieben, wobei der Strom durch Widerstände reguliert werden konnte.

Der *Luftführungsteil* (Bild 6) besteht aus einer flachen Schale, die einen mit Löchern von 4 mm Durchmesser versehenen Boden aufweist. Durch diese tritt die Luft aus, die die Platte kühlt. Die Luft wird durch einen seitlich angeflanschten Stutzen zugeführt. Der an den Flansch anschliessende, im Sinne der Strömungsrichtung sich ausweitende Kanal ist mit vertikalen Leitblechen N versehen, um eine gleichmässige Verteilung der Luft über die ganze Breite des Querschnittes zu erreichen. Die Luft wird nach der Berührung mit der zu kühlenden Platte durch Resocelrohre K (Innendurchmesser 8 mm, Wandstärke 1,5 mm), die verschiebar in Stahlbüchsen geführt sind, nach oben ins Freie geleitet. Die Verwendung des thermisch schlecht leitenden Resocels war deshalb notwendig, um eine Aufheizung der eintretenden Luft durch die Abluft zu verhindern.

Die Lufttemperatur wurde an zwei Stellen unmittelbar nach dem Austritt durch die Löcher mit Thermoelementen gemessen (stumpf zusammengeschweißte Chromel- und Alumel-Drähte von 0,6 mm Durchm.; Messtelle M₆ auf Bild 5). Außerdem wurden noch je zwei Messtellen am oberen und unteren Ende der Resocelrohre angebracht (Messtellen M₇ und M₈).

Die Einstellung des Abstandes zwischen der wärmeabgebenden Platte und der Lochplatte des Luftführungsteiles geschah durch Einlegen von Asbest- und Holzringen, die in Bild 3 angedeutet sind. Für die Messung der Drücke vor und nach der Lochplatte waren im Luftführungsteil und an den Distanzringen zwei Druckmesstutzen D₁ und D₂ angebracht (Bilder 3 und 6).

Als Kühlluft war zunächst Luft aus dem Druckluftnetz der Fabrik vorgesehen, doch erwies sich diese als zu stark mit Öl und Wasser verschmutzt, so dass die Versuche damit nicht durchgeführt werden konnten. Statt dessen wurde ein Turbolader an das Druckluftnetz angeschlossen und die Ladeluft für die Speisung der Versuchsapparatur

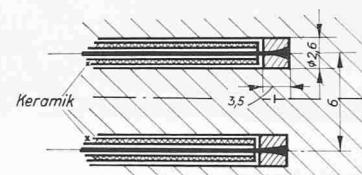


Bild 4. Einbau der Thermoelemente in der Kupferplatte

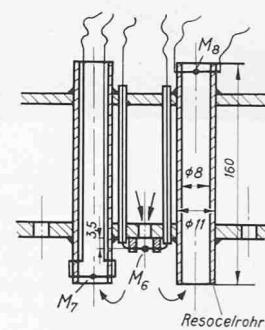


Bild 5 (rechts). Thermoelement-Messstellen für Temperaturmessung im Zu- und Abstrom der Kühlluft

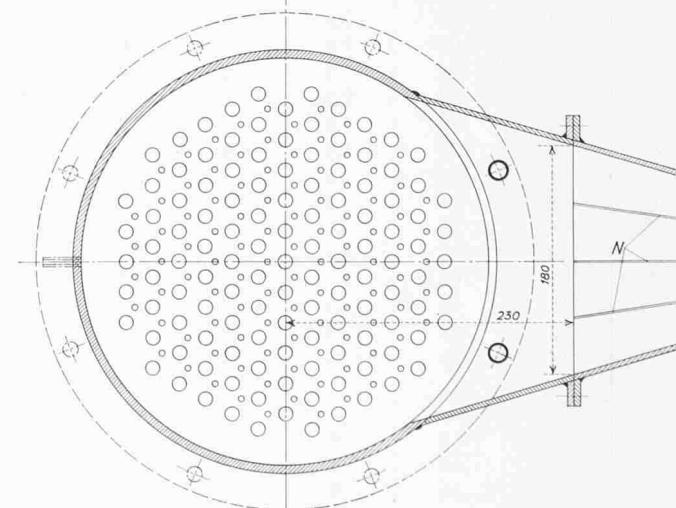
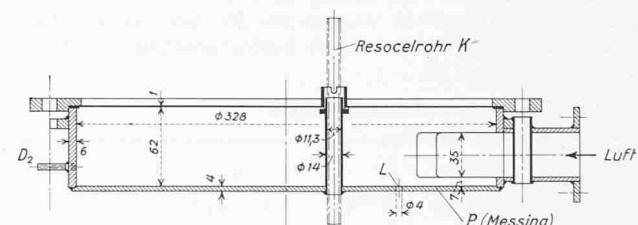


Bild 6. Oberer Teil der Versuchseinrichtung, Luftführungsteil. Bezeichnungen im Text

verwendet. Zur Messung des Luftdurchsatzes war zwischen der Ladegruppe und der Messapparatur eine Messdüse eingeschaltet. Bild 7 zeigt den ganzen Versuchsstand mit den verwendeten Messgeräten.

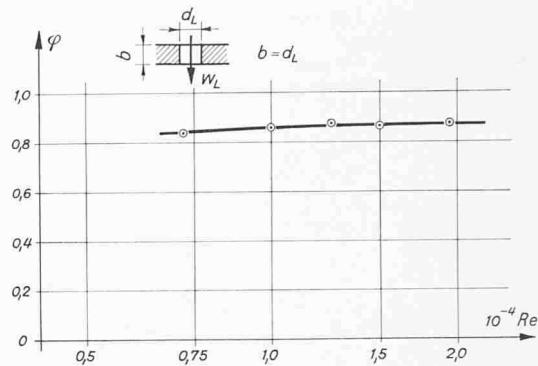
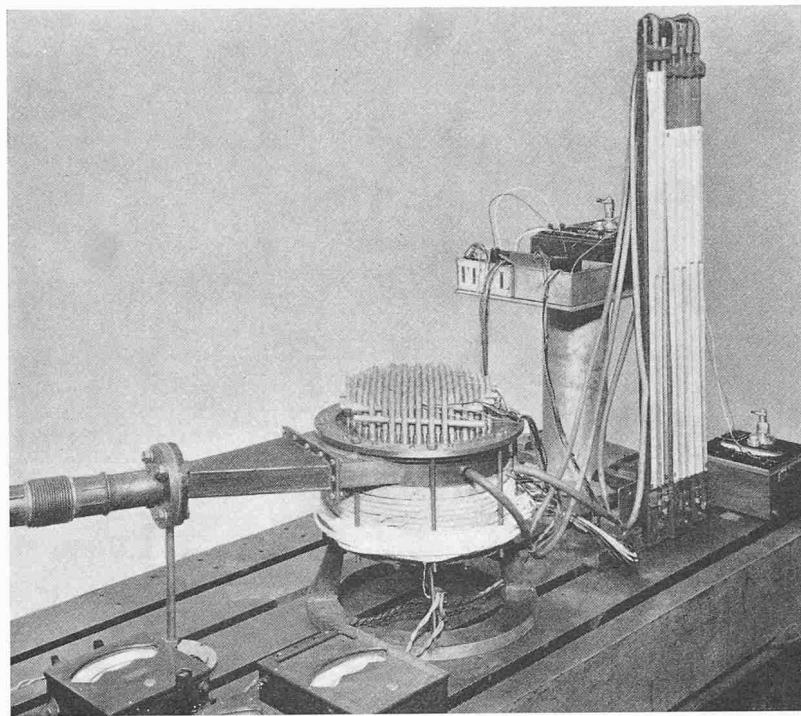


Bild 8. Durchflusszahl der Lochplatte

Bild 7 (links). Versuchsanlage zur Messung des Wärmeüberganges bei Strahlkühlung

3. Durchgeföhrte Versuche und Messwerte

Zunächst war in einem Vorversuch (Versuchsreihe I) der Einfluss des Senkenabstandes s von der Platte P zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden mit dem willkürlich gewählten Plattenabstand $h = 26$ mm drei Messreihen aufgenommen mit $s = 4,1$ mm, $s = 7,5$ mm und $s = 13,7$ mm. Diese Messungen zeigten, dass die Variation von s im untersuchten Bereich keinen Einfluss auf den Wärmeübergang ausübt. Deshalb wurden die Hauptversuche (Versuchsreihe II) einheitlich mit dem Senkenabstand $s = 8$ mm

durchgeführt; dieser Abstand ist gleich gross wie der Innendurchmesser der Senkenrohre. Der Abstand zwischen der Lochplatte und der zu kührenden Platte betrug $h = 15$ mm, $h = 30$ mm und $h = 60$ mm.

Bei sämtlichen Messungen konnte die äussere Schutzheizung so reguliert werden, dass die Temperaturdifferenzen zwischen der äusseren Schale X und der inneren Schale Y, d. h. zwischen den Messtellen $M_{11,12}$ und $M_{21,22}$ einerseits und $M_{31,32}$ und $M_{41,42}$ anderseits, weniger als 1°C betragen. Zwischen $M_{31,32}$ und $M_{21,22}$ ergab sich ein Temperatur-

Tabelle 1. Messwerte und Auswertungen

	Pkt.	h mm	s mm	Δp_{nL} mm H ₂ O	Δp_{r} mm H ₂ O	ϑ_L °C	ϑ_P °C	q_K W/m ²	ΔT °K	a_K W/m ² K	$10^{-3} Re$	Nu
Versuchsreihe I	1	26	7,5	14	162	31,6	55,0	6530	23,4	279	12,48	41,9
	2	26	7,5	13	167	31,1	53,6	6660	22,5	269	12,73	44,5
	3	26	7,5	7	87	27,7	57,4	6580	29,7	222	9,33	33,8
	4	26	7,5	9	109	29,0	54,6	6530	25,6	255	10,37	40,1
	5	26	7,5	10	128	28,5	53,6	6530	25,1	260	11,24	39,4
	6	26	7,5	6	47	32,6	67,8	6520	35,2	185	6,70	27,7
	7	26	7,5	6	50	32,7	67,0	6520	34,3	190	6,91	28,4
	8	26	4,1	5	63	26,2	60,2	6450	34,0	190	8,01	29,0
	9	26	4,1	7	73	26,6	56,3	6480	29,7	218	8,57	33,3
	10	26	4,1	8	118	30,5	56,6	6570	26,1	252	16,72	38,0
	11	26	4,1	13	245	37,7	57,1	6480	19,4	334	14,94	49,5
	12	26	13,7	6	59	28,3	61,3	6490	33,0	197	7,68	29,8
	13	26	13,7	16	160	31,9	55,8	6500	23,9	272	12,40	41,9
	14	26	13,7	24	270	37,6	56,5	6570	18,9	347	15,70	51,4
Versuchsreihe II	15	15	8	10	115	44,4	68,3	7390	23,9	309	9,96	43,8
	16	15	8	6	52,5	26,3	57,0	7150	30,7	233	7,31	35,6
	17	15	8	6	51	26,3	57,9	7160	31,6	227	7,20	34,7
	18	15	8	19	252,5	34,9	52,4	7240	17,5	414	15,50	61,6
	19	30	8	10	117	29,7	59,1	7160	29,4	244	10,77	36,9
	20	30	8	6	50,5	29,7	69,4	7150	39,7	180	7,06	27,2
	21	30	8	16	204	33,9	57,2	6850	23,3	294	13,86	43,8
	22	60	8	15	246,5	35,1	71,4	7370	36,3	203	15,20	30,2
	23	60	8	14	241	34,4	70,9	7150	36,5	196	15,32	29,2
	24	60	8	8	121	27,1	74,8	7270	47,7	152	11,02	23,1
	25	60	8	4	49,5	35,8	99,8	7220	64,0	113	6,77	16,8
	26	60	8	4	52	35,8	99,3	7270	63,5	114	6,95	16,95

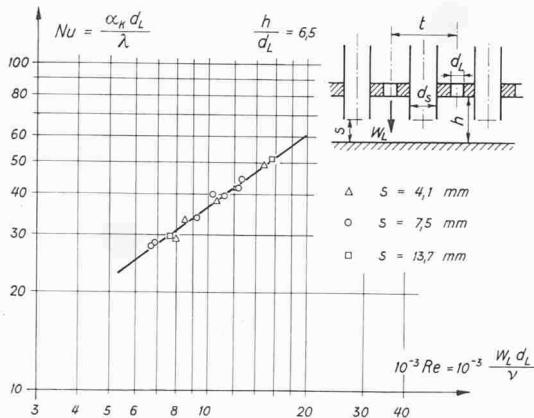


Bild 9 (links). Wärmeübergangsmessungen bei Strahlkühlung mit verschiedenen Abständen s der Abströmrohre.
 $d_L = 4 \text{ mm}$; $d_S = 8 \text{ mm}$;
 $t = 24 \text{ mm}$; $h = 26 \text{ mm}$;
 $Pr = 0,71$

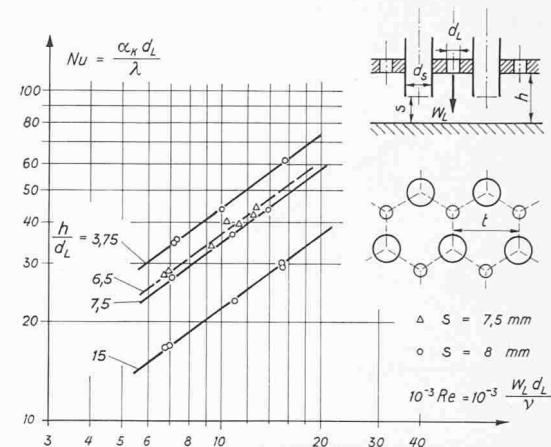


Bild 10 (rechts). Wärmeübergangsmessungen bei Strahlkühlung mit verschiedenen Platten-Abständen h . $d_L = 4 \text{ mm}$;
 $d_S = 8 \text{ mm}$; $t = 24 \text{ mm}$;
 $Pr = 0,71$

gefälle von 3 bis 5 C. Dieses kleine Gefälle ist auf den geringen Teil der im Heizgeflecht zugeführten Wärmemenge zurückzuführen, der durch den Boden und den vertikalen Rand der Schale X über die Einspannstelle in die zu kühlende Platte P hineinfliest (Bild 3). Dieser kleine Wärmezufluss bedeutet keine Verfälschung der Messung, da auch diese Wärme durch die Plattenkühlung erfasst wird. Bis zum Erreichen des stationären Zustandes war eine Aufheizzeit von 3 bis 4 Stunden erforderlich.

Die wichtigsten Messwerte der Versuche sind in Tabelle 1 enthalten. Die gemessenen Lufttemperaturen nach der Be- rührung mit der Platte sind nicht wiedergegeben, da sie wegen des schlechten Wärmeüberganges an den Lötstellen nur angenähert stimmen. Die Temperaturerhöhung kann jedoch ohne weiteres rechnerisch ermittelt werden. Sie liegt zwischen 3 und 10 C.

4. Auswertung der Messungen

a) Wärmeübergangszahl

Aus der elektrisch zugeführten Heizleistung Q_{tot} , der Fläche f_P der gekühlten Platte, der Temperaturdifferenz ΔT zwischen Plattentemperatur T_P und der gemessenen Lufttemperatur T_L am Austritt aus der Lochplatte ¹⁾ ergibt sich die totale Wärmeübergangszahl α_{tot} zu

$$(1) \quad \alpha_{tot} = \frac{Q_{tot}}{f_P \Delta T} = \frac{q_{tot}}{\Delta T}$$

wobei q_{tot} die pro Flächeneinheit zugeführte Leistung bedeutet. Neben Konvektion und Leitung ist am betrachteten Wärmeübergang die Strahlung beteiligt. Da wir uns hier nur für den durch die Strömung verursachten Wärmeübergang interessieren, muss der Strahlungsanteil eliminiert werden. Dieser ist verhältnismäig klein, und eine rohe Abschätzung genügt. Zieht man für die Berechnung der ausgetauschten Strahlung den Fall paralleler Platten heran, so gilt für die ausgetauschte Energie, wenn vorausgesetzt wird, dass die gelochte Platte die Temperatur der Luft aufweist,

$$(2) \quad q_{str} = C_{res} \left[\left(\frac{T_P}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_L}{100} \right)^4 \right]$$

C_{res} ist die resultierende Strahlungszahl; sie berechnet sich anhand der Strahlungskonstanten C_s des schwarzen Körpers und der Emissionskoeffizienten ε_{Cu} von Kupfer und ε_{Me} von Messing zu

$$C_{res} = \frac{C_s}{\frac{1}{\varepsilon_{Cu}} + \frac{1}{\varepsilon_{Me}} - 1}$$

1) Die gemessene Lufttemperatur stellt, wenn man ein Eigentemperaturverhältnis («recovery factor») des Thermoelementes von wenig unter Eins in Rechnung setzt, annähernd die Totaltemperatur der Luft dar. Die Umrechnung der vorliegenden ΔT -Werte auf die statische Lufttemperatur ist unter Annahme eines Eigentemperaturverhältnisses leicht möglich, ändert aber an den Wärmeübergangszahlen wenig.

Mit $\varepsilon_{Cu} = 0,17$ (schwach poliert) und $\varepsilon_{Me} = 0,22$ (matt) wird $C_{res} = 0,6$ Watt/m² C. Die berechneten Werte von q_{str} machen etwa 1 % des totalen Wärmestromes q_{tot} aus. Die korrigierten Werte der Flächenbelastungen

$$(3) \quad q_K = q_{tot} - q_{str}$$

sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Die Wärmeübergangszahl α_K für Konvektion und Leitung ergibt sich analog wie in Gleichung (1) zu

$$(4) \quad \alpha_K = \frac{q_K}{\Delta T}$$

Die berechneten α_K -Werte sind ebenfalls in Tabelle 1 angegeben. Als gekühlte Fläche wurde ein Kreis mit dem Durchmesser 272 mm angenommen.

b) Durchflusszahl der Löcher

Wie aus der Beschreibung der Messeinrichtung hervorgeht, war zwischen der Aufladegruppe und der Messapparatur eine Messdüse eingebaut, mit der der Luftdurchsatz bestimmt wurde. Daraus kann die Durchflusszahl φ der Löcher in der Lochplatte ermittelt werden. Ist M der Massenfluss pro Zeiteinheit und pro Loch, f_L die geometrische Lochfläche, ρ_L die Dichte (die in Anbetracht des praktisch isovolumetrischen Ausströmens als konstant betrachtet werden darf), und wird mit w_L die theoretische Ausströmgeschwindigkeit bezeichnet, die sich bei der Druckdifferenz Δp_L einstellt und sich nach

$$(5) \quad w_L = \sqrt{\frac{2 \Delta p_L}{\rho_L}}$$

berechnet, so lautet die Gleichung für die Durchflusszahl

$$(6) \quad \varphi = \frac{M}{f_L \rho_L w_L} = \frac{M}{\frac{\pi}{4} d_L^2 \sqrt{2 \rho_L \Delta p_L}}$$

Auf Bild 8 ist φ über der Reynoldszahl

$$(7) \quad Re = \frac{w_L d_L}{\nu}$$

aufgetragen, wobei ν die kinematische Zähigkeit am Austritt der Kühlluftstrahlen bedeutet. Die Messpunkte von Bild 8 sind nicht in der Tabelle I enthalten, sie wurden für die Bestimmung von φ speziell aufgenommen. Die Löcher, für welche die gemessene φ -Kurve gilt, sind werkstattmäig gebohrt und auf beiden Seiten leicht angesenkt.

c) Dimensionslose Darstellung der Wärmeübergangsmessungen

Um die Resultate in einem weiteren Rahmen verwenden zu können, müssen sie dimensionslos dargestellt werden. Ganz allgemein gilt für den Wärmeübergang bei einer erzwungenen Strömung

$$(8) \quad Nu = F \left(\frac{l_1}{d}, \frac{l_2}{d}, \dots, Re, Pr \right)$$

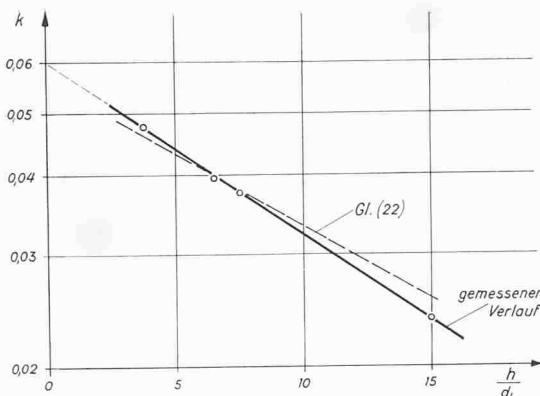


Bild 11 (links). Einfluss des Verhältnisses h/d_L auf den Faktor k in der Gleichung $Nu = k Re^{0,74}$ (Gleichung (12))

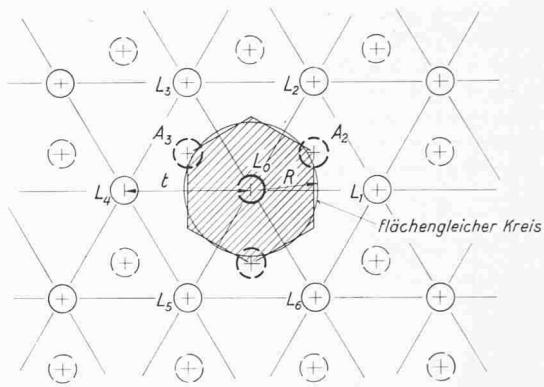


Bild 12 (rechts). Kühlbereich eines Luftstrahls. Das schraffierte Sechseck stellt die vom Luftstrahl L_0 gekühlte Fläche dar

Die Längenverhältnisse l_1/d , l_2/d , ... sind die mit einer charakteristischen Länge d gebildeten Abmessungsverhältnisse, die das betreffende Wärmeübergangsproblem kennzeichnen. Re bestimmt den Strömungszustand und Pr ist eine reine Stoffgrösse. In unserem Fall bietet sich als kennzeichnende Länge der Lochdurchmesser d_L an. Die übrigen wesentlichen geometrischen Parameter des Versuches werden zu dieser Grösse ins Verhältnis gesetzt und Gl. (8) schreibt sich

$$(9) \quad Nu = F \left(\frac{s}{d_L}, \frac{d_s}{d_L}, \frac{t}{d_L}, \frac{h}{d_L}, Re, Pr \right)$$

wobei

$$(10a) \quad Nu = \frac{\alpha_K d_L}{\lambda}$$

$$(10b) \quad Pr = \frac{\eta c_p}{\lambda}$$

und Re durch Gl. (7) definiert ist.

Die in den dimensionslosen Grössen Nu , Re und Pr vorkommenden Stoffwerte des strömenden Mediums beziehen wir auf den Zustand nach Austritt aus der Lochplatte.

Bei den durchgeführten Versuchen wurden lediglich die Grössen s/d_L und h/d_L und Re variiert, so dass unsere Versuche eine Gleichung von der Form

$$Nu = F \left(\frac{s}{d_L}, \frac{h}{d_L}, Re \right)$$

liefern, die für einen konstanten Wert von d_s/d_L und für die Pr -Zahl von Luft gilt.

Zunächst betrachten wir das Ergebnis der Versuchsreihe I, in welcher bei festem Plattenabstand h der Abstand s der Luftabströmrohre variiert wurde. Bild 9 zeigt, dass der Einfluss von s innerhalb des untersuchten Bereiches vernachlässigbar ist. Ebenso kann angenommen werden, dass der Rohrdurchmesser d_s eine untergeordnete Rolle spielt, solange die Abströmrohre die Wirkung der Kühlstrahlen nicht beeinträchtigen. Die Messungen sind folglich darstellbar durch

$$(11) \quad Nu = F \left(\frac{h}{d_L}, Re \right)$$

Bild 10 zeigt die Ergebnisse der mit $s = 8$ mm gemessenen Versuchsreihe II; außerdem sind jene Werte aus Versuchsreihe I eingetragen, die sich bei $s = 7,5$ mm ergeben haben.

In einem doppellogarithmischen Koordinatensystem ergibt sich eine lineare Abhängigkeit zwischen Nu und Re , wobei die Steigung der vier Geraden übereinstimmt. Der Zusammenhang kann folglich durch eine Potenzfunktion dargestellt werden, welche die Form hat

$$(12) \quad Nu = k Re^{0,74}$$

Der Faktor k ist von h/d_L abhängig. Trägt man die k -Werte der vier Geraden über h/d_L in einem halblogarithmischen System auf, so zeigt sich eine lineare Abhängigkeit (Bild 11). Somit kann k durch eine Exponentialfunktion wiedergegeben werden und Gl. (12) lässt sich schreiben

$$(13) \quad Nu = 0,060 e^{-0,061 h/d_L} Re^{0,74}$$

Die Gleichung ist für Luft bei einer Pr -Zahl von 0,71 und bei der vorliegenden geometrischen Anordnung gültig.

Zur Umrechnung der Gl. (13) auf andere Pr -Zahlen kann die Tatsache benutzt werden, dass die Nusseltzahl im Falle des Wärmeüberganges bei erzwungener Strömung etwa proportional zu $Pr^{1/3}$ läuft. Folglich lautet die Gl. (13) in einer auf beliebige Pr -Zahlen verallgemeinerten Form

$$(14) \quad Nu = 0,067 Pr^{1/3} e^{-0,061 h/d_L} Re^{0,74}$$

d) Abschätzung des Teilungseinflusses

Die hier beschriebenen Messungen wurden mit einer festen Teilung t von 24 mm durchgeführt (Bild 2). Aus Symmetriegründen kühlte ein bestimmter Kühlstrahl auf der Platte ein Flächenstück von der Form eines regulären Sechsecks (Bild 12). Da die aus der Literatur bekannten Wärmeübergangsversuche mit Flüssigkeits- oder Gasstrahlen meist bei axialsymmetrischer Anordnung durchgeführt wurden, liegt es nahe, den Radius R des mit dem Sechseck flächengleichen Kreises einzuführen. Dieser Radius ist

$$(15) \quad R = \sqrt{\frac{\sqrt{3}}{2\pi}} t = 0,525 t$$

Statt durch t/d_L kann der relative gegenseitige Abstand der Luftstrahlen durch das Verhältnis R/d_L angegeben werden. Es fragt sich nun, wie sich der Parameter R/d_L in unserem Fall auf den Wärmeübergang auswirkt. Bei den vorliegenden Versuchen hat R/d_L den Wert 3,15.

Aus der Literatur sind keine Arbeiten bekannt, die das hier untersuchte Wärmeübergangsproblem behandeln. Hingegen haben mehrere Autoren den Wärmeübergang zwischen einem einzelnen Kreisstrahl und einer ebenen, meist senkrecht zum Strahl stehenden Platte untersucht, [1], [2], [3], [4] *). Der systematischen Abklärung des Einflusses von R/d_L wurde dabei wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Einzig in der Arbeit von Thurlow [2] kommt eindeutig zum Ausdruck, dass der Wärmeübergang bei einem Strahl, der normal auf eine Platte auftrifft, sowohl von h/d_L als auch von R/d_L abhängt, wobei R den Radius der wärmeübertragenden Fläche darstellt (Bild 13a).

Wir ziehen die Resultate von Thurlow heran, um unsere Messungen auf andere Werte des Parameters R/d_L zu extrapoliieren. Dabei setzen wir voraus, dass unser Fall als kreissymmetrisch betrachtet werden darf, d. h. wir vernachlässigen den Unterschied zwischen Sechseck und Kreis (Bild 12) und rechnen mit dem Radius des flächengleichen Kreises.

Für die mit der örtlichen Wärmeübergangszahl α_{K_r} gebildete Nusseltzahl gilt nach Thurlow

$$(16) \quad Nu_r = \frac{\alpha_{K_r} d_L}{\lambda} = \frac{K Re^m}{\exp \left(c_1 \frac{r}{d_L} + \frac{c_2 \frac{h}{d_L}}{1 + \frac{r}{d_L}} \right)}$$

*) Die eckigen Klammern verweisen auf das Literaturverzeichnis am Schluss.

wobei sich diese Gleichung auf Messungen stützt, die alle im Gebiet $h/d_L < 10$ liegen. In Gl. (16) ist α_{K_r} die im Abstand r von der Strahlaxe gemessene örtliche Wärmeübergangszahl. K ist ein Faktor, der vom Strahldurchmesser d_L abhängt, für ein bestimmtes d_L also konstant ist. Der Exponent m hat bei Thurlow den Wert $\frac{1}{3}$. Die restlichen Konstanten c_1 und c_2 betragen

$$c_1 = 0,3 \quad c_2 = \frac{1}{7} = 0,143$$

Da Thurlow seine Messungen mit einem einzelnen Luftstrahl und einer ausgedehnten Platte (Bild 13a) ausgeführt hat, ist wegen des in Bild 13 dargestellten, zwischen den Bildern (a) und (b) vorhandenen Unterschiedes im Strömungsbild keine direkte Übereinstimmung mit unseren Resultaten zu erwarten. Hingegen kann näherungsweise angenommen werden, dass der relative Einfluss der Parameter h/d_L und R/d_L gleich sei. Wir übernehmen folglich den Ansatz von Thurlow mit den von ihm angegebenen Konstanten c_1 und c_2 , während die Konstante K und der Exponent m unseren Versuchen anzupassen sind. Dann ist zu prüfen, ob der Einfluss des Parameters h/d_L , der in unseren Versuchen variiert wurde, richtig wiedergegeben wird.

Da bei unserem Versuch der mittlere Wärmeübergang gemessen wurde, ist aus der örtlichen Nusseltzahl nach Gl. (16) zunächst die mit der mittleren Wärmeübergangszahl gebildete Nusseltzahl zu rechnen. Für einen Kreis vom Radius R ist diese

$$(17) \quad Nu = K Re^m \frac{1}{R^2} \int_0^R \frac{2r dr}{\exp \left(c_1 \frac{r}{d_L} + \frac{c_2 \frac{h}{d_L}}{1 + \frac{r}{d_L}} \right)}$$

Mit

$$(18) \quad J = \int_0^1 \frac{2 \left(\frac{r}{R} \right) d \left(\frac{r}{R} \right)}{\exp \left[c_1 \left(\frac{R}{d_L} \right) \left(\frac{r}{R} \right) + \frac{c_2 \frac{h}{d_L}}{1 + \left(\frac{R}{d_L} \right) \left(\frac{r}{R} \right)} \right]}$$

schreibt sich Gl. (17)

$$(19) \quad Nu = K Re^m J$$

Der Verlauf von J wurde auf einer Digitalrechenmaschine numerisch bestimmt und ist auf Bild 14 dargestellt. Die Auswertung ist erheblich über jenen (h/d_L) - und (R/d_L) -Bereich hinaus vorgenommen worden, in welchem die Formel von Thurlow experimentell belegt ist.

Nun können die Konstanten K und m bestimmt werden; m kann direkt aus den Messergebnissen übernommen wer-

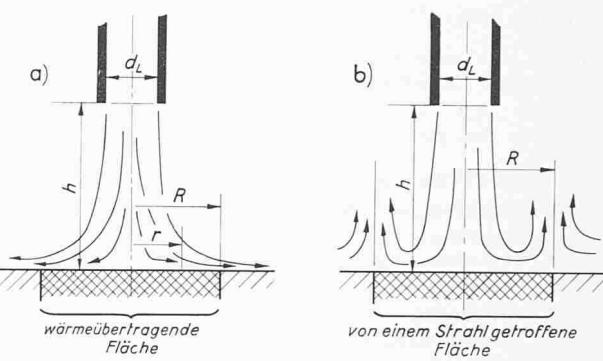


Bild 13. Bild der Strömung beim Auftreffen eines Strahls auf eine Wand. a) einzelner Strahl, b) Strahl mit regelmässig verteilten Nachbarstrahlen

den, Gl. (12), und beträgt $m = 0,74$. Die Konstante K wird so normiert, dass die experimentellen Werte von Nu durch Gl. (19) für ein mittleres h/d_L exakt wiedergegeben werden. Wir wählen für die Anpassung $h/d_L = 7$. Für den Wert $R/d_L = 3,15$ (bei welchem unser Versuch durchgeführt wurde) folgt aus Bild 14 bei $h/d_L = 7$ ein J -Wert von 0,190. Anderseits hat die Grösse k aus Gl. (12) für h/d_L den Wert 0,0385. Aus der Gleichsetzung $k = JK$ folgt

$$(20) \quad K = \frac{0,0385}{0,190} = 0,202$$

Somit lassen sich unsere Versuchsergebnisse darstellen durch

$$(21) \quad Nu = 0,202 Re^{0,74} J \left(\frac{h}{d_L}, \frac{R}{d_L} \right)$$

wobei diese Gleichung für Luft gilt.

Es bleibt nun zu prüfen, wie gut der gemessene Einfluss von h/d_L im untersuchten Bereich $3,75 < h/d_L < 15$ durch die Gleichung (21) wiedergegeben wird. Aus der Gleichsetzung der Gl. (12) und (21) folgt

$$(22) \quad k = 0,202 J$$

Auf Bild 11 ist der k -Verlauf nach obiger Gleichung (für $R/d_L = 3,15$) eingezeichnet. Man stellt eine befriedigende Übereinstimmung auch in grösserer Entfernung vom Normierungspunkt (bei $h/d_L = 7$) fest. Die Frage, wie gut die Gl. (21) den Einfluss von R/d_L erfasst, kann ohne Versuche nicht beantwortet werden. Deshalb soll eine Anwendung von Gl. (21) auf Fälle mit (R/d_L) -Werten, die weit von 3,15 entfernt liegen, mit Vorsicht geschehen.

Gl. (21) gilt analog wie die Gl. (12) und (13) für Luft. Für andere Medien muss der Einfluss der Pr -Zahl berücksichtigt werden. Dies kann in gleicher Weise wie bei Gl. (14) geschehen und man erhält aus Gl. (21) die allgemeine Beziehung:

$$(23) \quad Nu = 0,226 Pr^{1/3} Re^{0,74} J \left(\frac{h}{d_L}, \frac{R}{d_L} \right)$$

Eine genauere Betrachtung des numerischen Verlaufes von J in Bild 14 zeigt, dass J im Bereich $0 \leq R/d_L \leq 10$ angenähert dargestellt werden kann durch

Bild 14 (links). Abhängigkeit der Integalfunktion J von den Grössen R/d_L und h/d_L

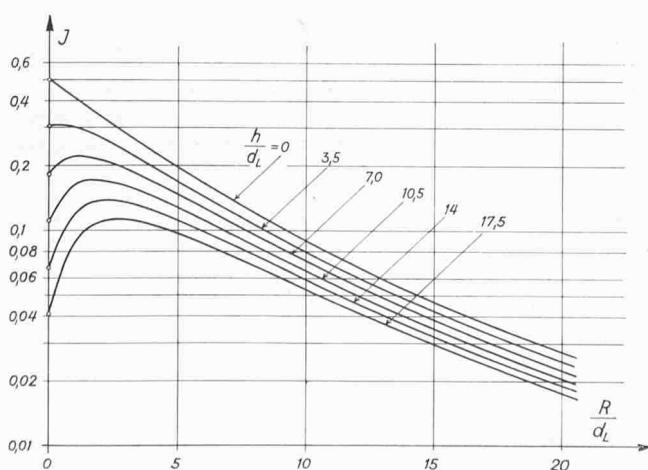
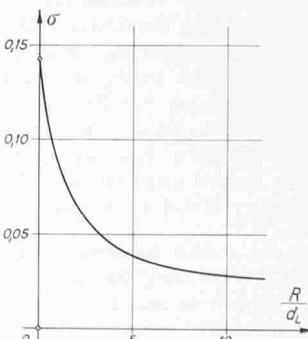


Bild 15 (rechts). Einfluss des Verhältnisses R/d_L auf die Grösse σ in der Gleichung (24)



$$(24) \quad J = 0,5 e - 0,177 R/d_L e - \sigma h/d_L$$

wobei σ gemäss Bild 15 von R/d_L abhängt. Diese Darstellung ist insofern aufschlussreich, als sie zeigt, dass die in der Literatur [2], [4] vorkommenden Ansätze mit einem konstanten σ von 0,037 nur beschränkt gültig sein können.

Zusammenstellung der verwendeten Formelzeichen

C_s	Strahlungskonstante des schwarzen Körpers
C_{res}	Resultierende Strahlungskonstante
J	Dimensionslose Funktion von h/d_L und R/d_L
M	Massenfluss
K	Konstante
Pr	Prandtl-Zahl ($\eta c_p/\lambda$)
Q	Wärmefluss
R	Radius der wärmetübertragenden Kreisfläche
Re	Reynolds-Zahl ($w_L d_L/\nu$)
T	Abs. Temperatur
b	Dicke der Lochplatte
$c_{1,2}$	Konstanten
c_p	Spez. Wärme bei konst. Druck
d	Durchmesser
f	Fläche
h	Abstand zwischen Lochplatte und zu kühlernder Platte
k	Konstante
m	Exponent
p	Statischer Druck
Δp	Stat. Druckdifferenz
q	Wärmefluss pro Flächeneinheit
r	Radius
s	Abstand zwischen Abströmöffnungen und zu kühlernder Platte
t	Teilung

w	Geschwindigkeit
α_{tot}	Totale Wärmeübergangszahl
α_K	Mittlere konvektive Wärmeübergangszahl
α_{Kr}	Oertliche konvektive Wärmeübergangszahl, im Abstand r von der Strahlaxe
ε	Strahlungskoeffizient
η	Dynamische Zähigkeit
ϑ	Temperatur in °C
λ	Wärmeleitzahl
ν	Kinematische Zähigkeit
σ	Faktor im Exponent
ρ	Dichte
φ	Durchflusszahl der Löcher

Allgemeine Indices:

K	auf konvektiven Wärmeübergang bezogen
L	Loch; Luftzustand am Lochaustritt
S	Abströmrohr
P	Oberfläche der wärmeabgebenden Platte
s	schwarze Strahlung

Literaturverzeichnis:

- [1] K. P. Perry, Heat transfer by convection from a hot gas jet to a plane surface. «Proc. Instn. Mech. Engrs.», Bd. 168 (1954), Nr. 30, S. 775.
- [2] G. G. Thurlow, Communication to [1]. «Proc. Instn. Mech. Ingrs.», Bd. 168 (1954), Nr. 30, S. 781.
- [3] E. Schmidt, W. Schurig und W. Sellschopp, Versuche über die Kondensation von Wasserdampf in Film- und Tropfenform. «Techn. Mech. und Thermodyn.», Bd. 1 (1930), Nr. 2, S. 53.
- [4] V. A. Smirnow, G. E. Verevochkin u. P. M. Brdlick: Heat transfer between a jet and a held plate normal to flow. «Int. Journ. Heat and Mass Transf.», Bd. 2 (1961), S. 1.

Aus der Abschiedsvorlesung des Jubilars

Ueber die fachliche Ausbildung hinaus war dabei die Pflege der kulturellen Belange seit je schon ein wesentliches Anliegen unserer Schule, im besonderen ihrer Freifächer-Abteilung. Deren Wirksamkeit bleibt allerdings an die Voraussetzung gebunden, dass der Studierende ein reges allgemein-geistiges Bedürfnis bereits mitbringt. Die Umsorgung dieser inneren Bereitschaft sollte früh, womöglich schon mit der Kinderstube und dem Elternhaus einsetzen, und muss über Primar- und Mittelschule sorgsam weiter genährt werden, allen Phasenverschiebungen ererbter Lehrpläne zum Trotz.

Und unsere ETH wird sich da nicht auf den Beitrag der Freifächer-Abteilung beschränken dürfen, sie wird darüber hinaus bei der Wahl neuer Dozenten immer vordringlicher auf das menschliche Gewicht achten, und sie sollte sich zudem mutig zum Verzicht auf jede nicht-allgemeinbildende Vorschulung an den Gymnasien bekennen, deren Auffächerung nicht durch Zwecksetzungen späterer Spezialberufe bestimmt sein sollte. (Unmissverständlich sei aber betont, dass zur Allgemeinbildung gerade auch das Denkspiel von Geometrie und Mathematik und die analysierende Schau der Naturwissenschaften Wichtiges beizutragen vermögen.)

Dass alsdann jedes Hochschulstudium und vor allem jeder Beruf in ein Spezialstudium führt, liegt in der Natur der Sache. Wohl zu Unrecht aber sieht man heute in der Spezialisierung eine Bedrohung, ja Vernichtung allgemeinmenschlicher Wesensbreite und umfassender Ganzheit. Und doch: wo der Rückhalt geistiger Verwurzelung da ist, dürfte jede Spezialisierung ohne Gefahr bestanden werden können, ja die Arbeit im Spezialgebiet wird sich dann als fruchtbare erweisen auch für die innermenschliche Fundierung der Persönlichkeit. Dies gilt für Technische Hochschulen wie für Universitäten; hier wie dort sind wir schicksalhaft im gleichen Schiff und für den Ausgang der gefährlichen Fahrt in gleicher Weise verantwortlich ...

In einem solchen Geschehen sind offenbar Beglückung und Gefährdung eng beschlossen.

Wenn es uns gelingt, in diesem Gefahrenfeld menschlich zu bestehen, dann könnte es möglich werden, den Menschen

von viel Last und Ueberlast äusserlich geschöpflicher Not frei zu machen — frei für die inneren Nöte. Dann könnte zum erstenmal seit Menschengedenken Kultur erblühen, anders als nur auf dem dunklen Untergrund von Sklaverei, dieser durch die Jahrtausende fraglosen Institution.

Heute, bei der Bewältigung moderner Massenfertigung und erbaulicher Umprägung der Landschaft, muss ohne Zweifel die gesteigerte Produktionsfähigkeit der Maschine an und für sich als eine positive Hilfe der Technik in der Hand des Menschen gewertet werden. Dabei liegt die Bedeutung aber entscheidend auf der Bedingung «in der Hand des Menschen», was besagen will, dass wirklich der Mensch als solcher —, und nicht als blosster Manager der Betriebsrentabilität — die Verantwortung übernehmen sollte, die Verantwortung nicht nur für das Wie des Produktions-Geschehens, sondern vor allem auch für das unserm Menschsein gegenüber vertretbare Ob des Produktions-Beschlusses.

Zur Zeit ist diese Bedingung unerfüllt, ja noch undiskutabel, und damit sind die Gefährdungen durch die Technik — die äusseren physischen und vor allem die inneren geistigen — noch unabsehbar im Wachsen. Die Hilfe, die der Mensch aus dem Einsatz der Technik erhoffte, — Hilfe vor allem auch für die innermenschlichen Wachstumskräfte — findet sich von einer Betriebsamkeit bedroht, die uns mehr und mehr in die Hast von Sinnlosigkeiten einspannt, und uns darin fesseln wird, bis die Verpflichtung unserm Menschsein gegenüber als entscheidender Richtpunkt auch des technisch-wirtschaftlichen Handelns Geltung bekommt.

Deutlich gibt sich diese — weniger bewusste, als bedrückende — Notlage in der Tatsache kund, dass heute unsere Jugend im Ausblick auf ihr künftiges Berufsleben (trotz bester Konjunktur) durch einen erschreckenden Mangel an geistigen Einsatzpunkten, durch eine Baisse an tragenden Richtwerten ihrer Arbeit beunruhigt ist.

Die Abschiedsvorlesung, gehalten am 25. Februar 1960 an der Eidgenössischen Technischen Hochschule, ist veröffentlicht in den Kultur- und Staatswissenschaftlichen Schriften der ETH, Heft 110, Zürich 1960, Polygraphischer Verlag AG.