

Der Einbau von Kühlern.

Uebersicht: Es wird die Strömung vor einem in eine Verkleidung eingebauten Kühlerblock oder Sternmotor behandelt und insbesondere die Frage untersucht, ob man die Wände des Innenraumes vor dem Kühler so formen kann, dass eine Ablösung der Strömung vermieden wird, auch wenn sich diffusorartig erweiternde Wände zugelassen sind. Für eine Reihe von ebenen und rotationssymmetrischen Kühlerformen wird ein von der vorgegebenen Durchlässigkeit des Kühlerblockes abhängiger Wandverlauf vorgeschlagen und der Druckverlauf auf der Wand berechnet.

- Gliederung:
- I. Das Ziel der Untersuchung.
 - II. Das Rechenverfahren und Ergebnisse.
 1. Voraussetzungen und Grenzen des Verfahrens.
 2. Der ebene Kühler.
 - a. Der senkrecht angeblasene Kühler.
 - b. Der schräg angeblasene Kühler.
 3. Der rotationssymmetrische Kühler.
 - a. Der Kreisflächen- und Kreisringkühler.
 - b. Der Kühler in der Form eines Kreiskegels und eines Kreiskegelstumpfes.
 - III. Folgerungen für die praktische Anwendung und offene Fragen.
 - IV. Zusammenfassung.
 - V. Schrifttum.

Der Bericht umfasst:
41 Seiten Text mit
Abbildungen.

AERODYNAMISCHE VERSUCHSANSTALT GÖTTINGEN E.V.
Institut für theoretische Aerodynamik.

Der Leiter:

A. Betz

Die Bearbeiter:

D. Rühmann J. Dombur

I. Das Ziel der Untersuchung.

Die Fragen eines zweckmässigen Kühlereinbaues haben seit einiger Zeit an Gewicht zugenommen, da der Anteil des Widerstandes der Kühlanlage am Gesamtwiderstand des Flugzeuges unverhältnismässig gross ist. Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, bei möglichst kleinen Durchflussgeschwindigkeiten zu arbeiten, da der Kühlerwiderstand stärker mit der Durchflussgeschwindigkeit zunimmt als die Wärmeabgabe. Diese Erkenntnis hat seit langem dazu geführt, den Kühlerblock zu verkleiden. Mit einer Kühlerverkleidung kann man den Durchfluss regeln, z.B. in der Weise, dass dieser im Schnellflug herabgesetzt wird. Die hierdurch zu erwartende Widerstandsverringerung kann man in einfacher Weise mit Hilfe des Impulssatzes abschätzen (vgl. etwa [1]). Durch die Verkleidung selbst kommen jedoch zusätzliche Widerstände hinzu, die durch eine geeignete Formgebung der Verkleidung auf einem Mindestmass gehalten werden müssen.

Der Einlaufvorgang und die zweckmässige Gestaltung des vorderen Teiles der Aussenseite einer solchen Verkleidung ist bereits der Gegenstand von mehreren Untersuchungen gewesen (vgl. z.B. [2] und [3]; dort weitere Schrifttumsangaben). Bei diesen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Strömung auf der Aussenseite der Verkleidung praktisch unabhängig davon ist, wie die Strömungsverzögerung oder Beschleunigung im Innenraum hergestellt wird. Daher kann die Frage nach der Formgebung des Innenraumes unabhängig von der Gestaltung der Aussenseite der Verkleidung behandelt werden. Der vorliegende Bericht befasst sich mit der Formgebung des Innenraumes der Verkleidung vor dem Kühlerblock.

Der bei der üblichen Art des Einbaues zu erwartende Druckanstieg im Inneren der Verkleidung vor dem Kühler kann der Anlass zu vielfältigen Strömungsverlusten und damit Widerstandserhöhungen sein. Diese liessen sich dadurch vermeiden, dass man die Verkleidung nicht über die Kühlerstirnfläche hinaus vorzieht (falls die Möglichkeit dazu besteht), oder dass man den Querschnitt des Innenraumes vor dem Kühler konstant macht und damit den gesamten Druckanstieg in die freie Strömung verlegt (Fangdiffusor im Sinne von P. R u d e n [4]). Eine solche Anordnung führt jedoch zu ausserordentlich grossen Stirnflächen (da auch die Verkleidung selbst zur Vermeidung von unzulässigen Uebergeschwindigkeiten auf der Aussenseite eine verhältnismässig grosse Dicke haben muss, vgl. Abb. 16), was sich aus mehreren Gründen, wie z.B. Widerstand, Beschuss, nicht rechtfertigen lässt. Der Kühler wird daher stets zum Teil in den Rumpf oder den Flügel eingezogen, und es ist nun die Frage, ob man den sich erweiternden Innenraum so formen kann, dass eine Ablösung der Strömung vermieden wird. Diese Ablösung bedingt einen schlechten Diffusorwirkungsgrad und damit eine starke Erhöhung des inneren Widerstandes der Kühlanlage.

Wir ziehen die Tatsache heran, dass bereits der unverkleidete Kühler infolge seiner Verdrängungsströmung einen seiner gegebenen Durchlässigkeit entsprechenden Vorstau entgegen der Strömung hervorruft. Die Randstromfläche, welche durch die äussere Begrenzung des Kühlers hindurchgeht, erweitert sich daher bei Annäherung an den Kühler und bildet einen "geometrischen Diffusor". Macht man nun eine solche Randstromfläche

zu einer festen Wand, so kann man vermuten, dass die Strömung den auftretenden Druckanstieg überwindet, falls die Druckverhältnisse hinter dem Kühler durch den Einbau nicht wesentlich abgeändert werden, und dass sich keine Ablösungserscheinungen zeigen. Bestätigt sich diese Vermutung, so kann man für jeden gegebenen Kühler die Randstromfläche und damit die Form des Innenraumes der Kühlerverkleidung bestimmen. Bei einer solchen Kühleranordnung wird dann nur der zusätzliche Druckanstieg, welchen die Verkleidung hervorruft, indem sie den Durchfluss herabsetzt, in den Aussenraum verlegt und scheidet damit als Verlustursache aus.¹⁾ Die Aufgabe der vorliegenden Untersuchung ist darin zu sehen, für verschiedene ebene und rotationssymmetrische Kühlerformen die Randstromfläche und den Druckverlauf auf derselben zu berechnen. Insbesondere sollen die Erscheinungen bei senkrecht und schräg angeströmten Kühlern miteinander verglichen werden. Der Bericht umfasst nur theoretische Ergebnisse.

Nach Abschluss der Rechnungen wurde uns eine Arbeit von T. H a r a und Y. N i s i m u r a [5] bekannt, in welcher dasselbe Problem für den Fall des gerade angeströmten ebenen Kühlers behandelt wird. Die Umströmung des freifahrenden Kühlers wird darin mit Hilfe der Methode der konformen Abbildung ermittelt. Von besonderem Interesse sind für uns die experimentellen Untersuchungen, auf die wir weiter unten zurückkommen werden.

¹⁾ Eine eingehendere Formulierung und Besprechung dieser Entwurfsregel folgt im Abschnitt III.

II. Das Rechenverfahren und Ergebnisse.

1. Voraussetzungen und Grenzen des Verfahrens.

Die Umströmung eines Kühlers ist wesentlich dadurch gekennzeichnet, dass an der Kühlerfläche ein Drucksprung infolge von nichtpotentialtheoretischen Vorgängen innerhalb des Kühlerblockes auftritt, weshalb die Konstante der Bernoullischen Gleichung vor und hinter dem Kühler verschieden ist. Der Ersatz der Kühlerströmung durch eine Potentialströmung stösst daher auf grundsätzliche Schwierigkeiten. Es soll nun vorausgesetzt werden, dass in dem Gebiet stromaufwärts, welches lediglich behandelt werden soll, wesentlich die Verdrängung, die der Kühler hervorruft, den Strömungsverlauf bestimmt. Es besteht dann die Möglichkeit, die Kühlerströmung durch eine Belegung der Kühlerfläche mit Quellen zu ersetzen. Damit werden die Strömung hinter dem Kühler sowie vor allem die Kräfte am Kühler bestimmt nicht richtig erfasst. Wir kennzeichnen den Kühler durch seine Durchlässigkeit, worunter wir das Verhältnis zwischen der tatsächlich durchfliessenden Menge und der durch eine gleichgrosse Fläche mit der ungestörten Anströmgeschwindigkeit hindurchtretenden Menge verstehen wollen (vgl. auch Abschnitt II, 2, a). Ein verfeinerter Ersatz der Kühler- bzw. Propellerströmung ist u. a. von J. E. D i c k m a n n [6] und von J. B ö h m [7] in seiner demnächst erscheinenden Göttinger Dissertation vorgenommen worden. Ein Vergleich der von J. B ö h m berechneten Zuströmung mit unseren Ergebnissen zeigt im allgemeinen nur unwesentliche Unterschiede zwischen den beiden Verfahren. Ausführliche Experimente sowie eine kritische Beur-

teilung der verschiedenen Verfahren zur Kühlerberechnung stehen noch aus. Der vorliegende Bericht ist nur für die praktische Anwendung beim Einbau von Kühlern gedacht, wobei die vereinfachte Berechnung der Zuströmung genügt.

Beim Ersatz der Kühlerströmung durch eine Quellbelegung besteht eine weitere Unsicherheit darin, dass man nicht weiss, wie die Durchlässigkeit örtlich über die Kühlerfläche verteilt ist, da diese möglicherweise durch Schräganblasung einzelner Partien örtlich verschieden sein könnte. Wir haben bei unseren Rechnungen angenommen, dass die Kühlerfläche eine gleichmässige Durchlässigkeit besitzt und stützen uns dabei auf die experimentellen Ergebnisse von I. F a u s t [8], welcher (mit einer den vorliegenden Fall jedoch nicht ganz kennzeichnenden Anordnung) bei schräg angeblasenen Kühlerblöcken nur eine geringe Abhängigkeit der Durchlässigkeit vom Anblaswinkel festgestellt hat.

2. Der ebene Kühler.

a. Der senkrecht angeblasene Kühler. Im Folgenden sollen die zu einer gegebenen den Kühler ersetzenden Quellbelegung gehörige Stromfunktion und die von der Belegung induzierten Geschwindigkeiten berechnet werden. Zunächst wird das ebene Problem behandelt. Das Koordinatensystem sei so gewählt, dass die positive Richtung der x-Achse mit der Anströmrichtung zusammenfällt. Ein Quellelement der Stärke $q(y')dy'$, das sich im Punkte $P' (x', y')$ befindet, liefert zur Stromfunktion ψ

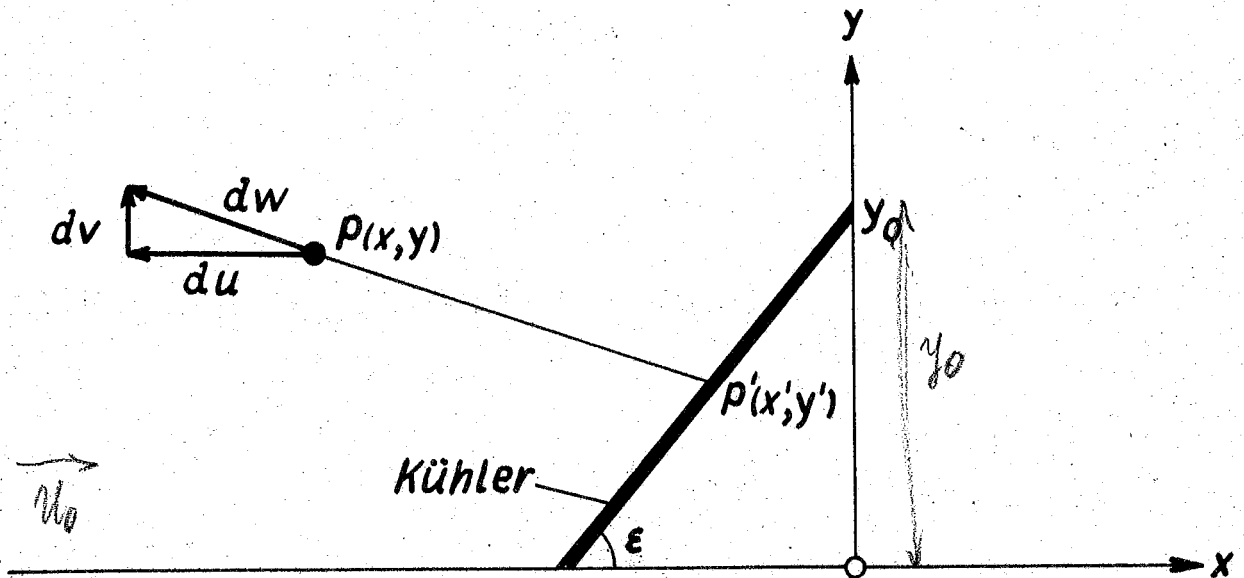


Abb. 1: Bezeichnungen.

im Aufpunkt $P(x, y)$ den Beitrag (vgl. Abb. 1):

$$d\psi(x, y) = \frac{q(y')}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{y-y'}{x-x'} dy' \quad (1)$$

Das Quellelement $q(y')dy'$ induziert im Aufpunkt $P(x, y)$ die Geschwindigkeit:

$$dw(x, y) = \frac{q(y')}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}} dy' \quad (2)$$

Diese Geschwindigkeit hat die Richtung des Fahrstrahles $P'P$. Wir zerlegen die Geschwindigkeit dw in die Komponente du in Richtung der Anströmgeschwindigkeit U_0 und in die dazu senkrechte Komponente dv :

$$du(x, y) = \frac{q(y')}{2\pi} \frac{x-x'}{(x-x')^2 + (y-y')^2} dy' \quad (3)$$

$$dv(x, y) = \frac{q(y')}{2\pi} \frac{y-y'}{(x-x')^2 + (y-y')^2} dy' \quad (4)$$

Wir behandeln den Fall einer mit Quellen konstanter Ergiebigkeit belegten endlichen Strecke, die unter dem Winkel ε gegen die Anströmrichtung geneigt sei und die sich von $y = 0$ bis $y = y_0$ erstrecke. Legt man die y -Achse durch den Endpunkt $y = y_0$ der Quellstrecke, so ist:

$$\frac{x'}{y_0} = a \cdot \frac{y'}{y_0} - a$$

wobei

$$a = \cotg \varepsilon$$

Die konstante Quelldichte - auf die Längeneinheit in y -Richtung bezogen - sei q_0 . Wir führen die Rechengröße

$$k = \frac{q_0}{2\pi u_0}$$

ein. Dann erhalten wir für die Stromfunktion das Integral:

$$\frac{1}{k} \cdot \frac{\psi(x, y)}{y_0 u_0} = \int_0^1 \operatorname{arctg} \frac{\frac{y}{y_0} - \frac{y'}{y_0}}{\frac{x}{y_0} + a - a \frac{y'}{y_0}} d\left(\frac{y'}{y_0}\right)$$

Dieses Integral lässt sich geschlossen auswerten mit dem Ergebnis:

$$\begin{aligned} \frac{1}{k} \cdot \frac{\psi(x, y)}{y_0 u_0} = & \frac{a \frac{x}{y_0} + \frac{y}{y_0} + a^2}{1 + a^2} \operatorname{arctg} \frac{\frac{x}{y_0} - a \frac{y}{y_0} + a}{\left(\frac{x}{y_0}\right)^2 + a \frac{x}{y_0} + \left(\frac{y}{y_0}\right)^2 - \frac{y}{y_0}} + \\ & + \operatorname{arctg} \frac{\frac{y}{y_0} - 1}{\frac{x}{y_0}} + \\ & + \frac{\frac{x}{y_0} - a \frac{y}{y_0} + a}{2(1 + a^2)} \ln \frac{\left(\frac{x}{y_0}\right)^2 + \left(\frac{y}{y_0} - 1\right)^2}{\left(\frac{x}{y_0} + a\right)^2 + \left(\frac{y}{y_0}\right)^2} \end{aligned} \quad (5)$$

Für die induzierten Geschwindigkeiten erhält man aus (3) und (4):

$$\frac{1}{k} \frac{u(x, y)}{U_0} = \frac{1}{1+a^2} \operatorname{arctg} \frac{\frac{x}{y_0} - a \frac{y}{y_0} + a}{\left(\frac{x}{y_0}\right)^2 + a \frac{x}{y_0} + \left(\frac{y}{y_0}\right)^2 - \frac{y}{y_0}} +$$

$$-\frac{a}{2(1+a^2)} \ln \frac{\left(\frac{x}{y_0}\right)^2 + \left(\frac{y}{y_0} - 1\right)^2}{\left(\frac{x}{y_0} + a\right)^2 + \left(\frac{y}{y_0}\right)^2} \quad (6)$$

$$\frac{1}{k} \frac{v(x, y)}{U_0} = \frac{-a}{1+a^2} \operatorname{arctg} \frac{\frac{x}{y_0} - a \frac{y}{y_0} + a}{\left(\frac{x}{y_0}\right)^2 + a \frac{x}{y_0} + \left(\frac{y}{y_0}\right)^2 - \frac{y}{y_0}} +$$

$$-\frac{1}{2(1+a^2)} \ln \frac{\left(\frac{x}{y_0}\right)^2 + \left(\frac{y}{y_0} - 1\right)^2}{\left(\frac{x}{y_0} + a\right)^2 + \left(\frac{y}{y_0}\right)^2} \quad (7)$$

Wir haben als erstes Beispiel den gerade angeströmten Kühlerblock rechnerisch behandelt. In diesem Fall ist die mit Quellen konstanter Dichte belegte Gerade die zur Anströmrichtung senkrechte Strecke $x = 0; -1 \leq y/y_0 \leq +1$.

Für $\varepsilon = 90^\circ$, d.h. $a = 0$ erhält man aus den oben abgeleiteten Formeln für die Stromfunktion und die induzierten Geschwindigkeiten die Ausdrücke:

$$\frac{1}{k} \frac{\psi(x, y)}{y_0 U_0} = \left(\frac{y}{y_0} + 1\right) \operatorname{arctg} \frac{\frac{y}{y_0} + 1}{\frac{x}{y_0}} - \left(\frac{y}{y_0} - 1\right) \operatorname{arctg} \frac{\frac{y}{y_0} - 1}{\frac{x}{y_0}} +$$

$$+ \frac{1}{2} \frac{x}{y_0} \ln \frac{\left(\frac{x}{y_0}\right)^2 + \left(\frac{y}{y_0} - 1\right)^2}{\left(\frac{x}{y_0}\right)^2 + \left(\frac{y}{y_0} + 1\right)^2} \quad (8)$$

$$\frac{1}{k} \frac{u(x, y)}{U_0} = \operatorname{arctg} \frac{\frac{y}{y_0} + 1}{\frac{x}{y_0}} - \operatorname{arctg} \frac{\frac{y}{y_0} - 1}{\frac{x}{y_0}} \quad (9)$$

$$\frac{1}{k} \cdot \frac{v(x, y)}{u_0} = -\frac{1}{2} \ln \frac{\left(\frac{x}{y_0}\right)^2 + \left(\frac{y}{y_0} - 1\right)^2}{\left(\frac{x}{y_0}\right)^2 + \left(\frac{y}{y_0} + 1\right)^2} \quad (10)$$

Die gesamte Kühlerströmung erhalten wir durch Ueberlagerung der Quellströmung mit einer Parallelströmung. Von den sich ergebenden Stromlinien interessieren vor allem diejenigen, welche durch die Endpunkte der Quellstrecke hindurchgehen, die sogenannten Randstromlinien. Den Wert der Stromfunktion auf diesen Linien erhält man mit Hilfe von (8) zu:

$$\frac{\psi(0, y_0)}{y_0 u_0} = -1 + k\pi \quad (11)$$

Wir brauchen nun noch den Zusammenhang zwischen der Rechengrösse k und der Durchlässigkeit des Kühlerblockes. Wir erhalten die Durchflussmenge aus dem Werte der Stromfunktion auf den Randstromlinien und daraus die Durchlässigkeit²⁾

$$\frac{Q}{y_0 u_0} = 1 - k\pi = \frac{u_k}{u_0} \quad (12)$$

wobei u_k den Mittelwert der Geschwindigkeit am Kühler bedeutet.

²⁾ Die Frage, wie die Durchlässigkeit u_k/u_0 des freifahrenden Kühlers mit dem im Rohr am Kühler gemessenen Drucksprung $\Delta p / \frac{\rho}{2} u_k^2 = -C_{wk}$ zusammenhängt, ist noch nicht eindeutig geklärt. Eine Impulsbetrachtung entsprechend der einfachen Strahltheorie des Propellers liefert die Beziehung (vgl. [9]):

$$\left[\frac{u_k}{u_0} = \frac{1}{1 + C_{wk}/4} \right]$$

Aus einer anderen Ueberlegung erhält man (vgl. [10]):

$$\frac{u_k}{u_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + C_{wk}}}$$

Einen Vergleich beider Formeln mit Messungen an Sieben [9] findet man in [11].

In Abb. 2 sind die für verschiedene Durchlässigkeiten berechneten Randstromlinien und die Druckverteilungen auf denselben, welche mit Hilfe der induzierten Geschwindigkeiten (9) und (10) ermittelt sind, dargestellt. Die Druckverteilungen zeigen einen charakteristischen Abfall kurz vor dem Kühlerblock, d.h. es ergibt sich auf dem stark aufgebogenen letzten Teil der Randstromlinien kein Druckanstieg. Die starke Erweiterung, die man nach dem üblichen Sprachgebrauch einen "steilen Diffusor" nennen könnte, ist also im physikalischen Sinne gar kein Diffusor, da jedenfalls auf der Randstromlinie kein Druckanstieg stattfindet. Wie die Druckverhältnisse auf den anderen Stromlinien sind, geht aus Abb. 3 hervor, wo für eine bestimmte Durchlässigkeit die gesamte Kühlerumströmung dargestellt ist, sowie die Druckverteilungen auf den einzelnen Stromlinien. Ein solcher Druckabfall ergibt sich z.T. auch noch auf den inneren Stromlinien, die durch den Kühlerblock hindurchgehen, und vor allem auf den äusseren am Kühlerblock vorbeigehenden. — Es sei in diesem Zusammenhang noch auf eine Besonderheit unseres Rechenverfahrens hingewiesen. Aus Gl. (10) geht hervor, dass die von der Quellbelegung induzierte y -Komponente der Geschwindigkeit an der Stelle $x = 0; y = y_0$ logarithmisch unendlich wird. Dies macht sich im Stromlinienbild durch eine in der Zeichnung nicht hervortretende senkrechte Tangente und bei den Druckverteilungen durch einen unendlich grossen Unterdruck bemerkbar. Wie die Druckverteilungen auf den Nachbarstromlinien zeigen, ist der charakteristische Druckabfall auf den Randstromlinien aber nicht durch diese Singularität bedingt.

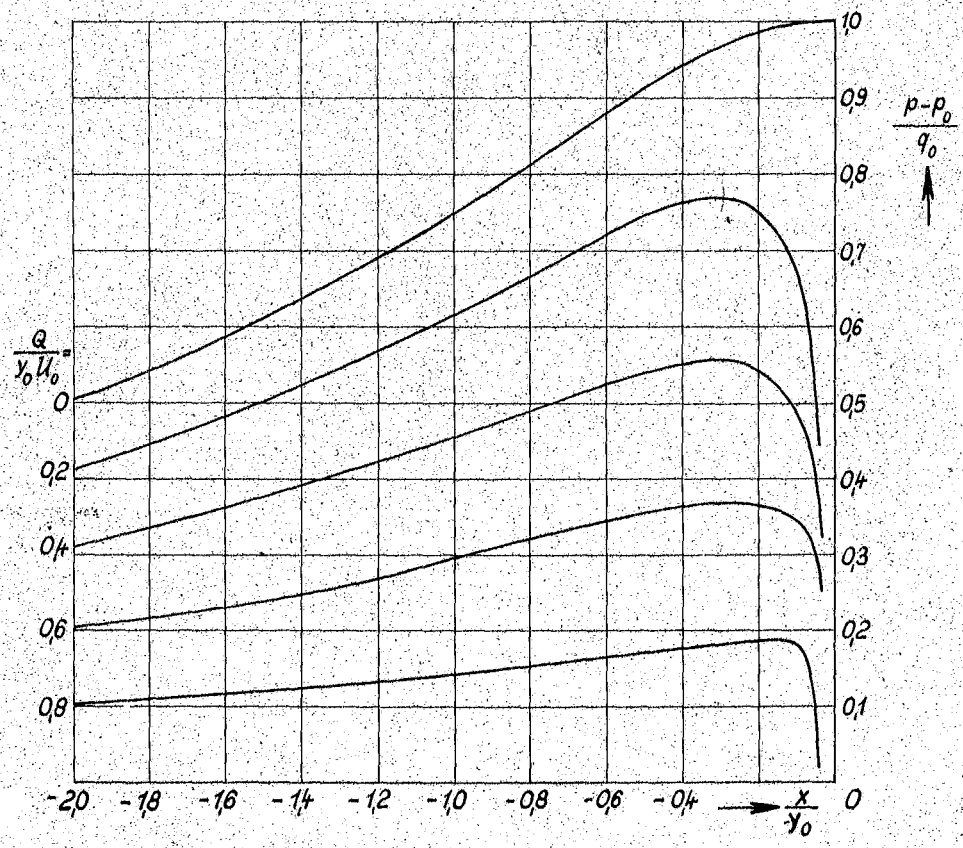
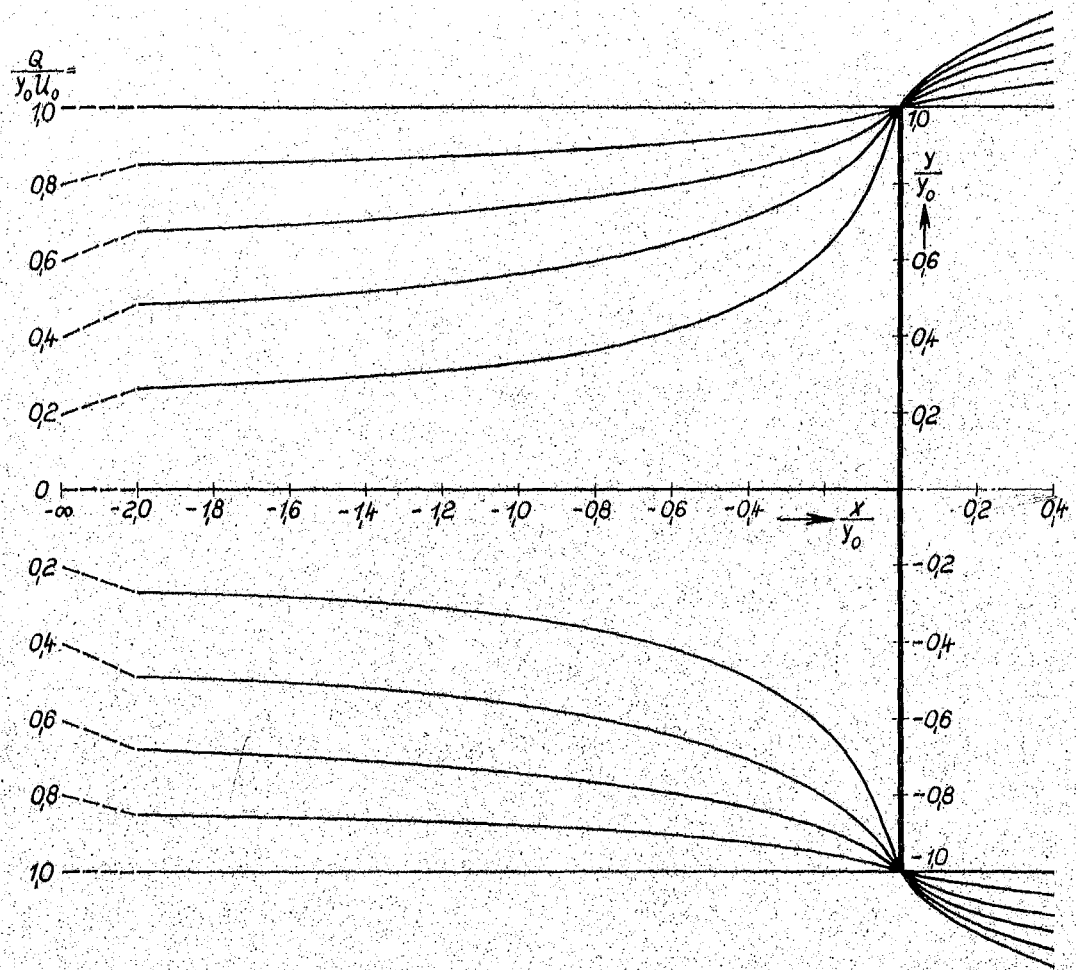


Abb. 2. Ebener gerader Kühler. Randstromlinien bei verschiedenen Durchlässigkeiten.

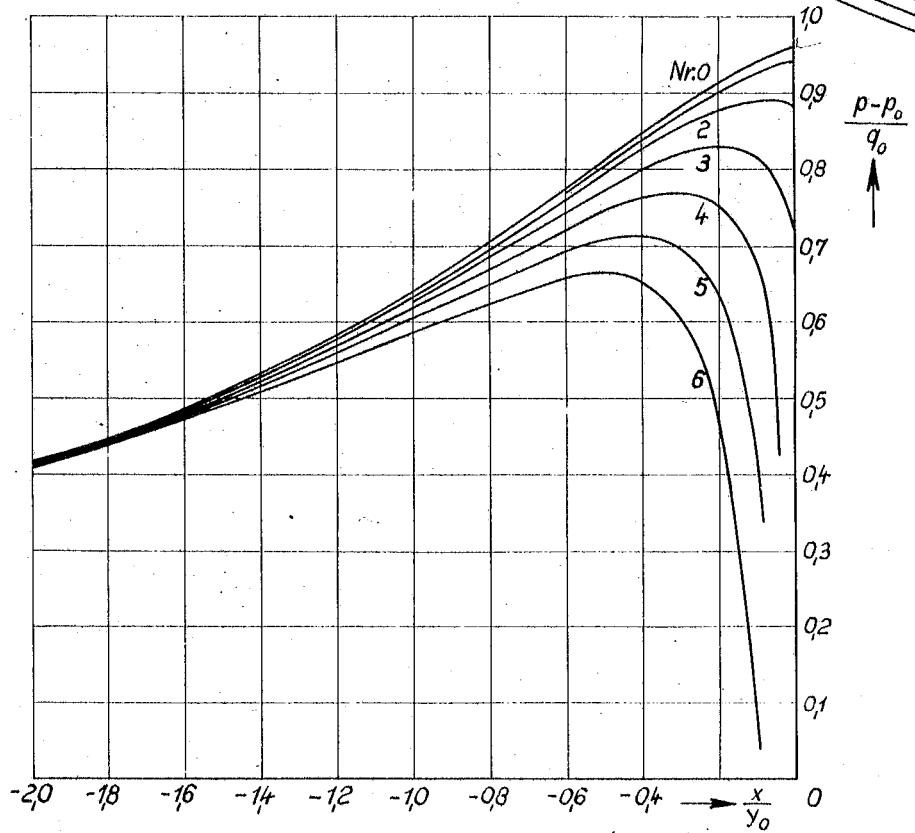
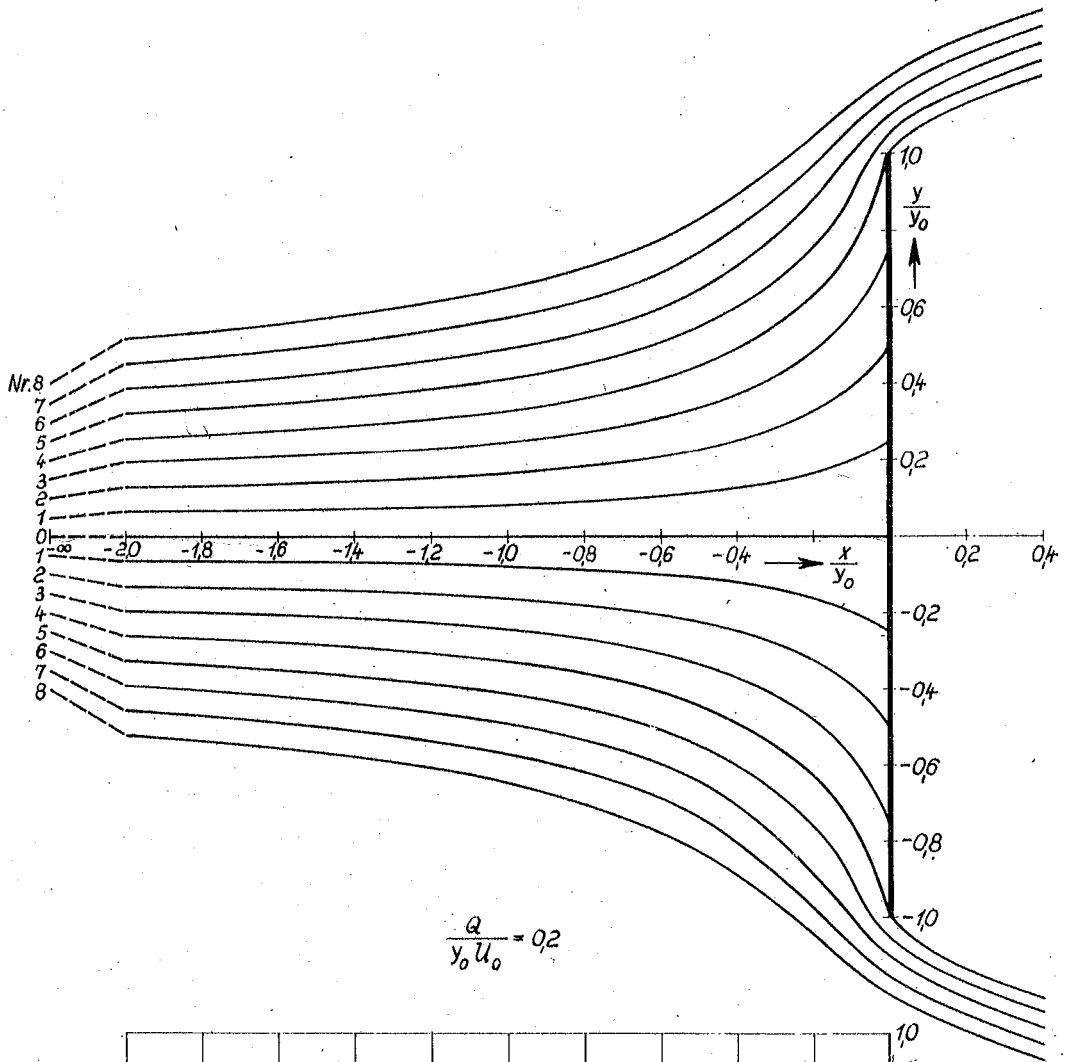


Abb. 3. Ebener gerader Kühler. Stromlinienbild.

In der eingangs erwähnten japanischen Arbeit [5] ist der soeben behandelte Fall des gerade angeströmten ebenen Kühlers auch experimentell untersucht. Wir entnehmen dieser Arbeit eine Aufnahme von der freien Umströmung eines Kühlerblockes (Abb.4). Zum Vergleich haben wir die von uns gewonnene Randstromlinie für die Durchlässigkeit $Q/y_0 U_0 = 0,4$ eingetragen. Die gute Übereinstimmung der theoretischen und experimentellen Stromlinien zeigen, dass unser Rechenverfahren die Verdrängungsströmung vor dem Kühler in brauchbarer Weise wiedergibt.

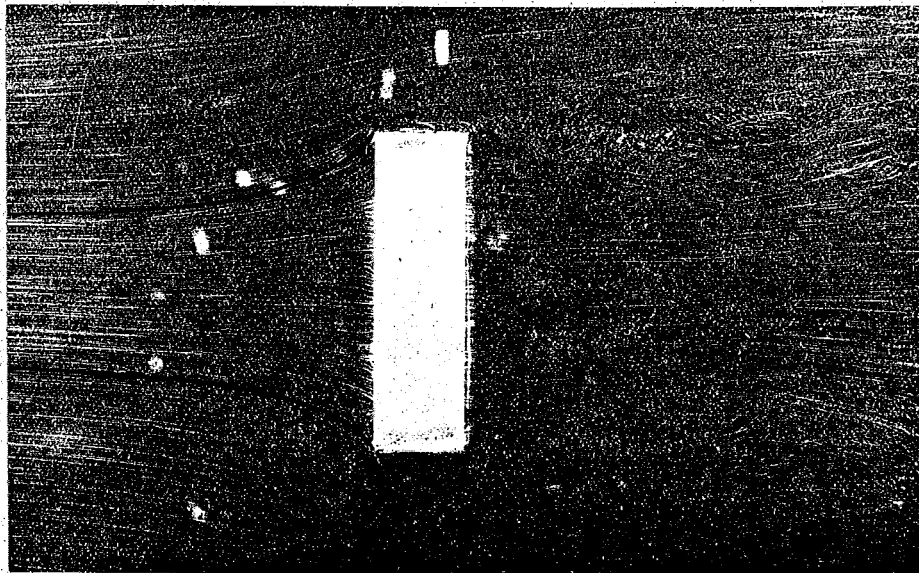


Abb.4: Strömungsaufnahme von einem freifahrenden Kühler nach [5] (ebene Strömung.).

6. Der schräg angeblasene Kühler. Die Umströmung eines nicht senkrecht zur Anströmung stehenden Kühlers erhält man, wenn man in den Gleichungen (5), (6) und (7) a von Null verschieden annimmt. Wir behandeln den Fall $a = 1$, d.h. den unter 45°

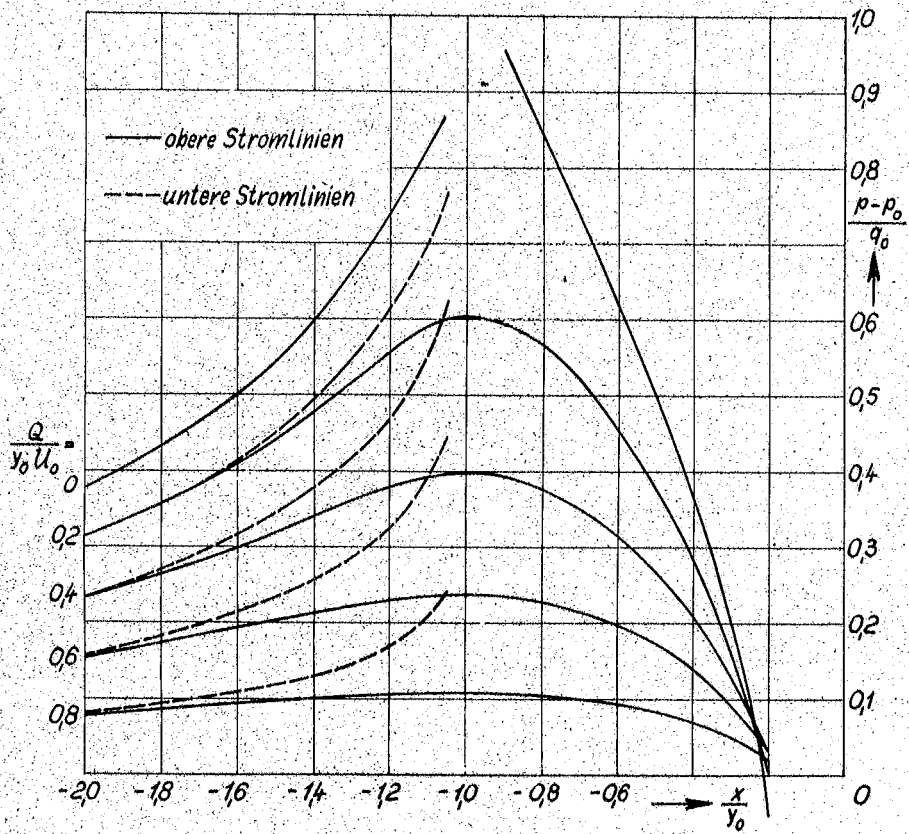
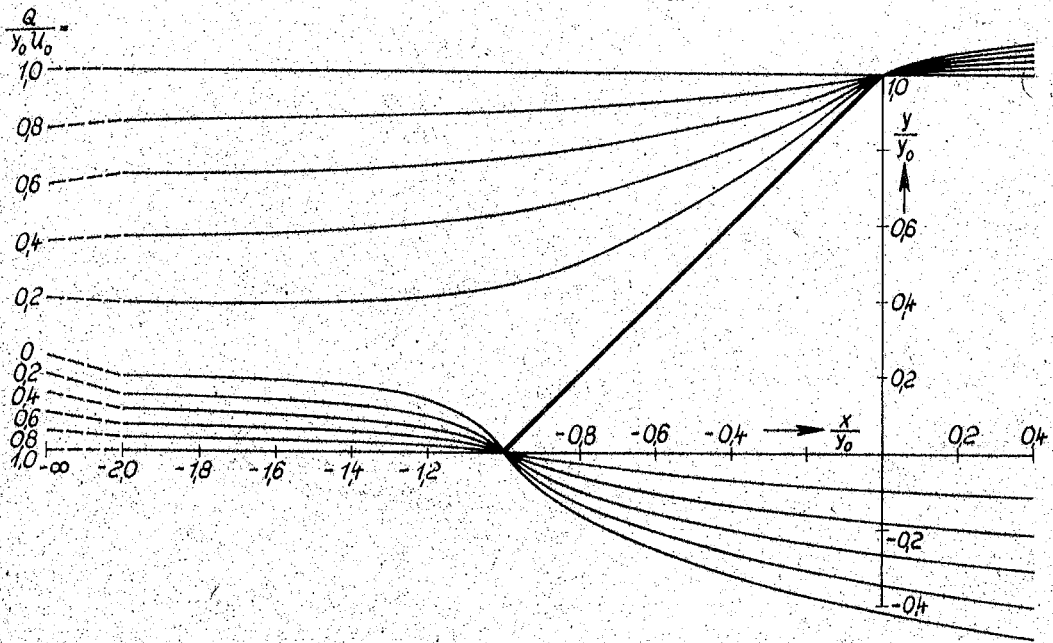


Abb. 5. Ebener schräger Kühler. Randstromlinien bei verschiedenen Durchlässigkeiten.

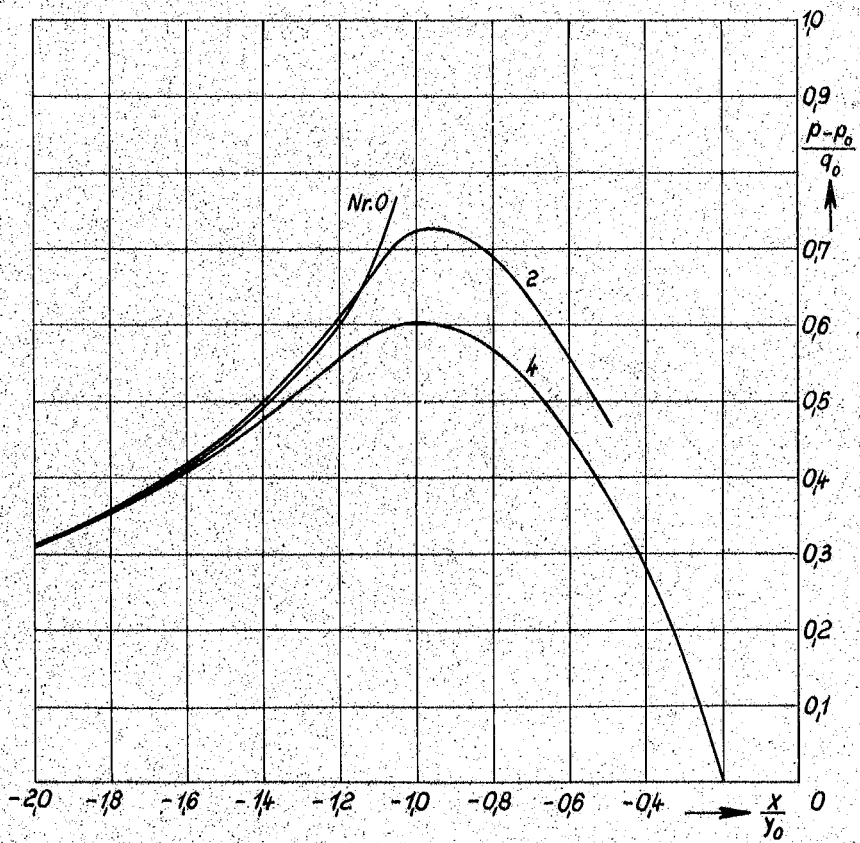
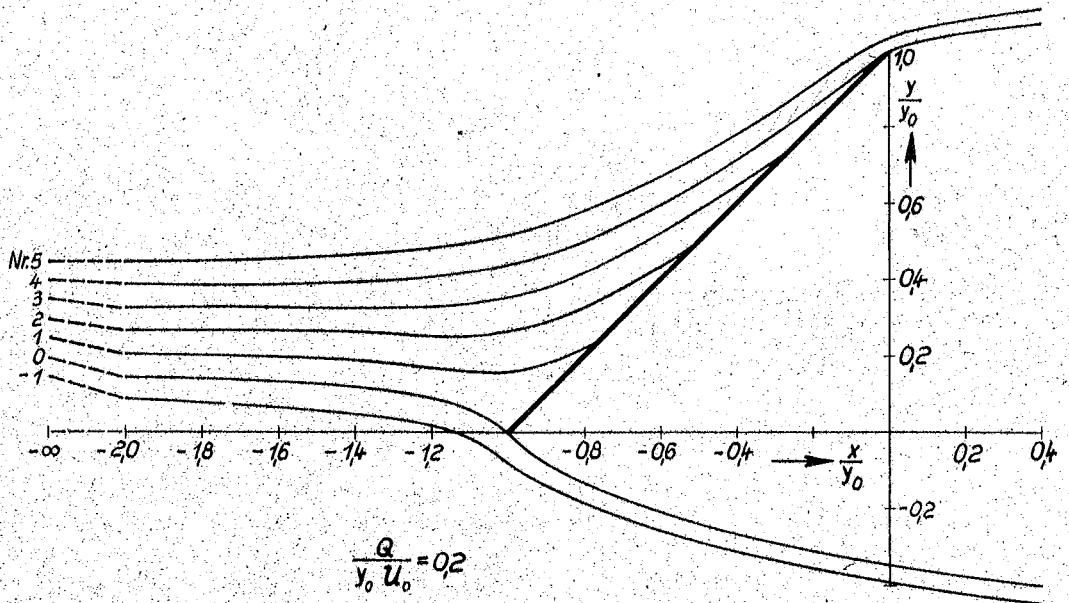


Abb. 6. Ebener schräger Kühler. Stromlinienbild.

geneigten Kühler. Die Ergebnisse sind in derselben Form wie beim senkrechten Kühler in den Abb. 5 und 6 aufgetragen. Besonders bemerkenswert ist, dass der erwähnte Druckabfall auf den oberen Randstromlinien erheblich früher einsetzt als beim senkrecht angeströmten Kühler.

Ausserdem wurde noch eine Anordnung behandelt, welche einem Kühler entspricht, der aus zwei unter 45° bzw. -45° gegenüber der Anströmrichtung geneigten Blöcken gebildet wird. Die Strömung um einen solchen "Winkelkühler" erhält man durch Ueberlagerung aus zwei Quellströcken. Die Randstromlinien und ein Stromlinienbild sind in den Abb. 7 und 8 wiedergegeben. Bei der Behandlung des Winkelkühlers kommt eine neue theoretische Schwierigkeit hinzu: Für den Fall der vollkommenen Undurchlässigkeit (wenn sie durch eine konstante Belegungsdichte erreicht werden soll) ist die Belegungslinie nicht mehr Stromlinie, im Gegensatz zu den bisher behandelten Fällen mit einer Quellstrecke. In Abb. 7 ist die Stromlinie, welche sich für den mittleren Durchfluss Null ergibt, gestrichelt eingezeichnet. Man kann durch Abänderung der Belegungsdichte erreichen, dass die beiden Geradenstücke für die Durchlässigkeit Null zur Stromlinie werden. Dazu muss die Belegungsfunktion so bestimmt werden, dass die Normalkomponente der Gesamtgeschwindigkeit an der Belegung verschwindet. Diese Bedingung führt auf eine Integralgleichung zweiter Art, die sich durch Iteration lösen lässt. Die abgeänderte Quellbelegung entspricht dann aber einem Kühler mit örtlich verändertem Durchfluss. Ein gleichmässiger örtlicher Durchfluss lässt sich bei vorgegebener Kühlerform

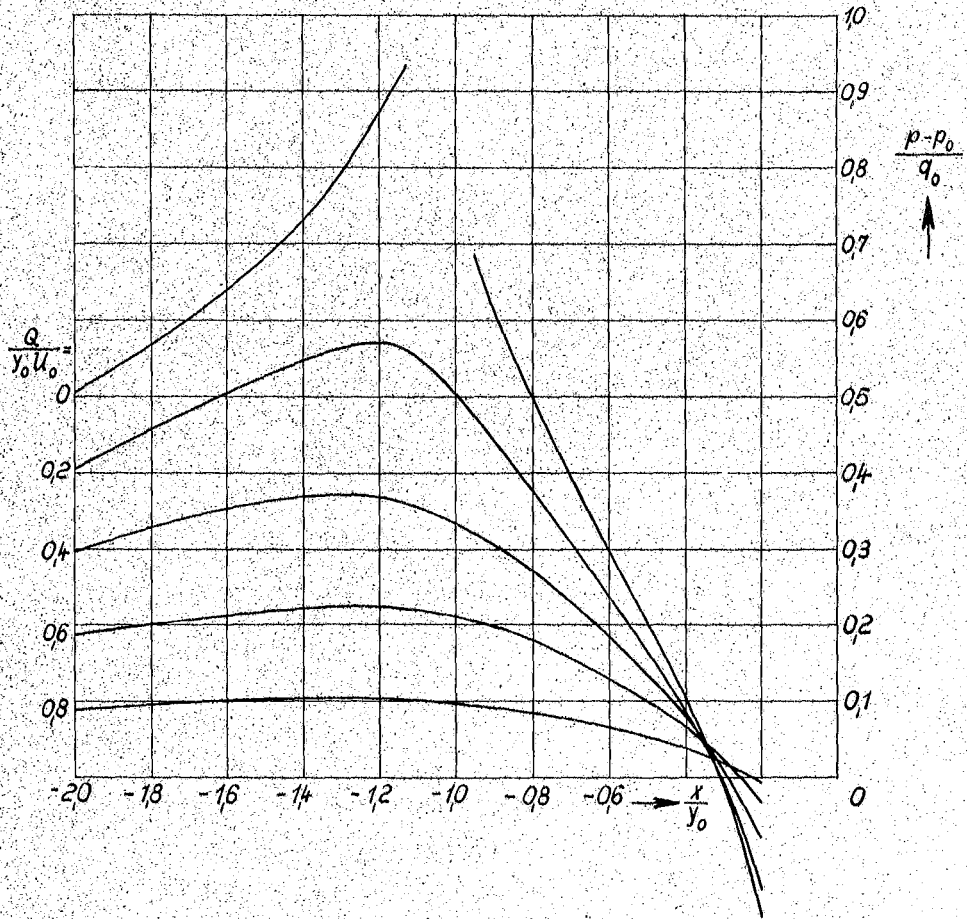
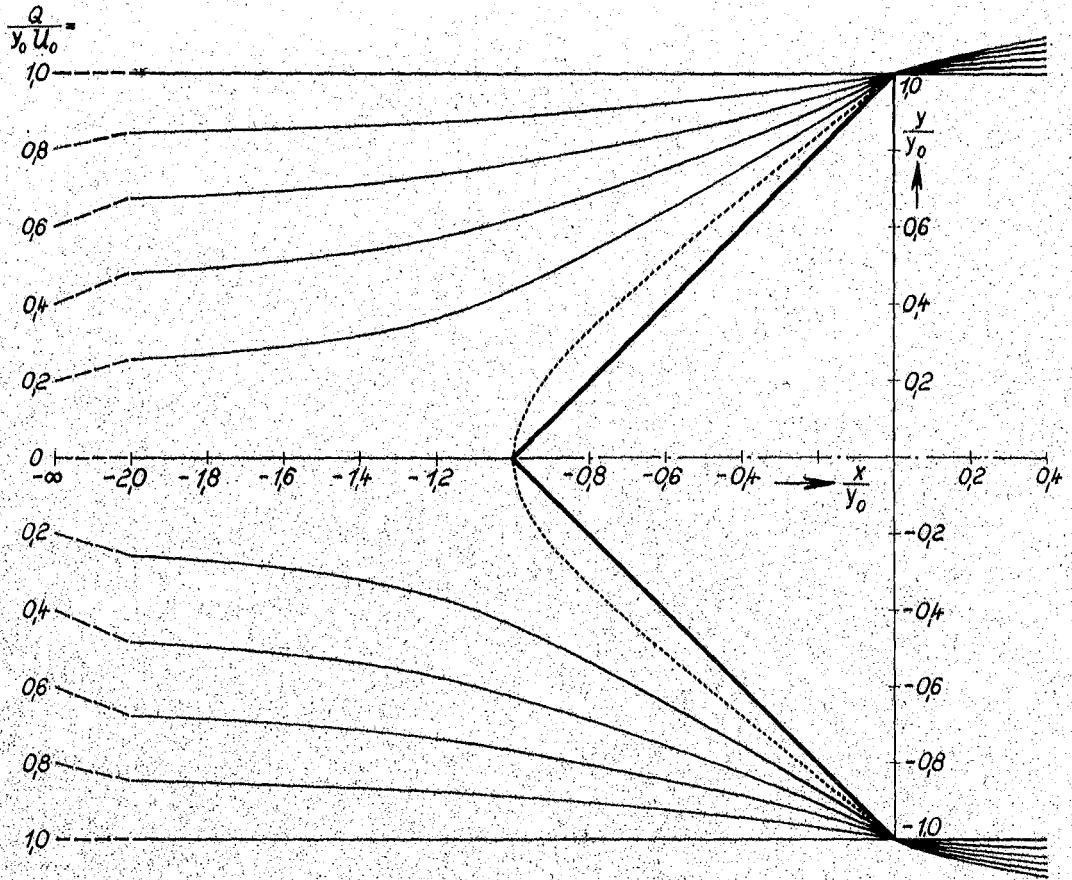


Abb. 7. Ebener Winkelkühler. Randstromlinien bei verschiedenen Durchlässigkeiten.

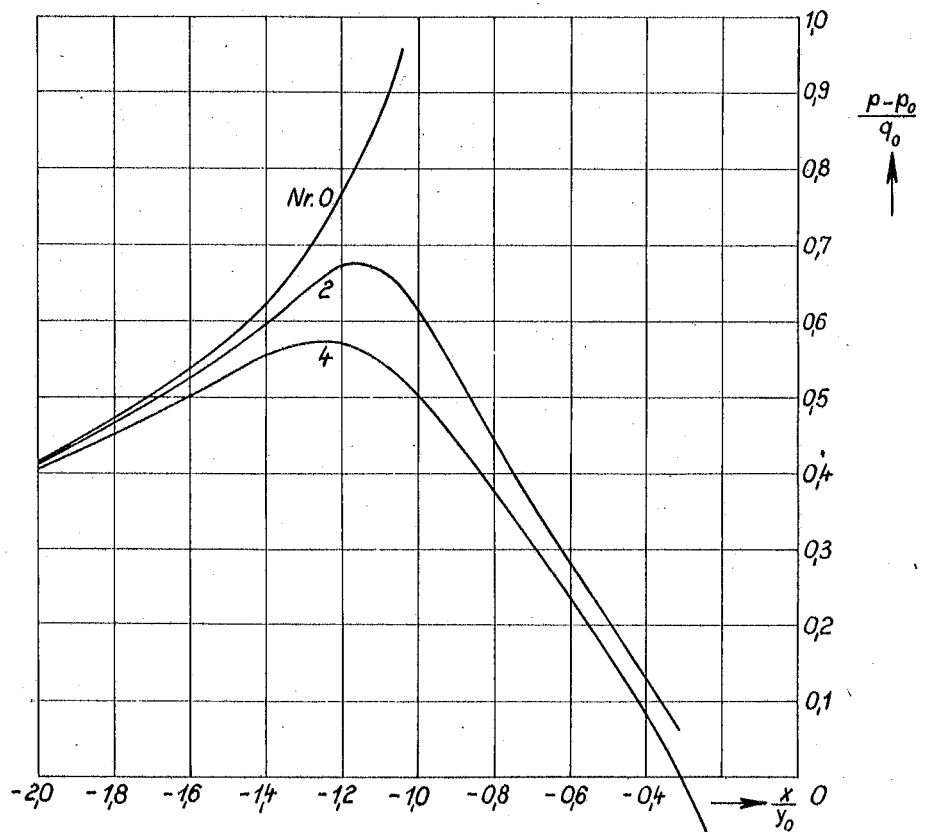
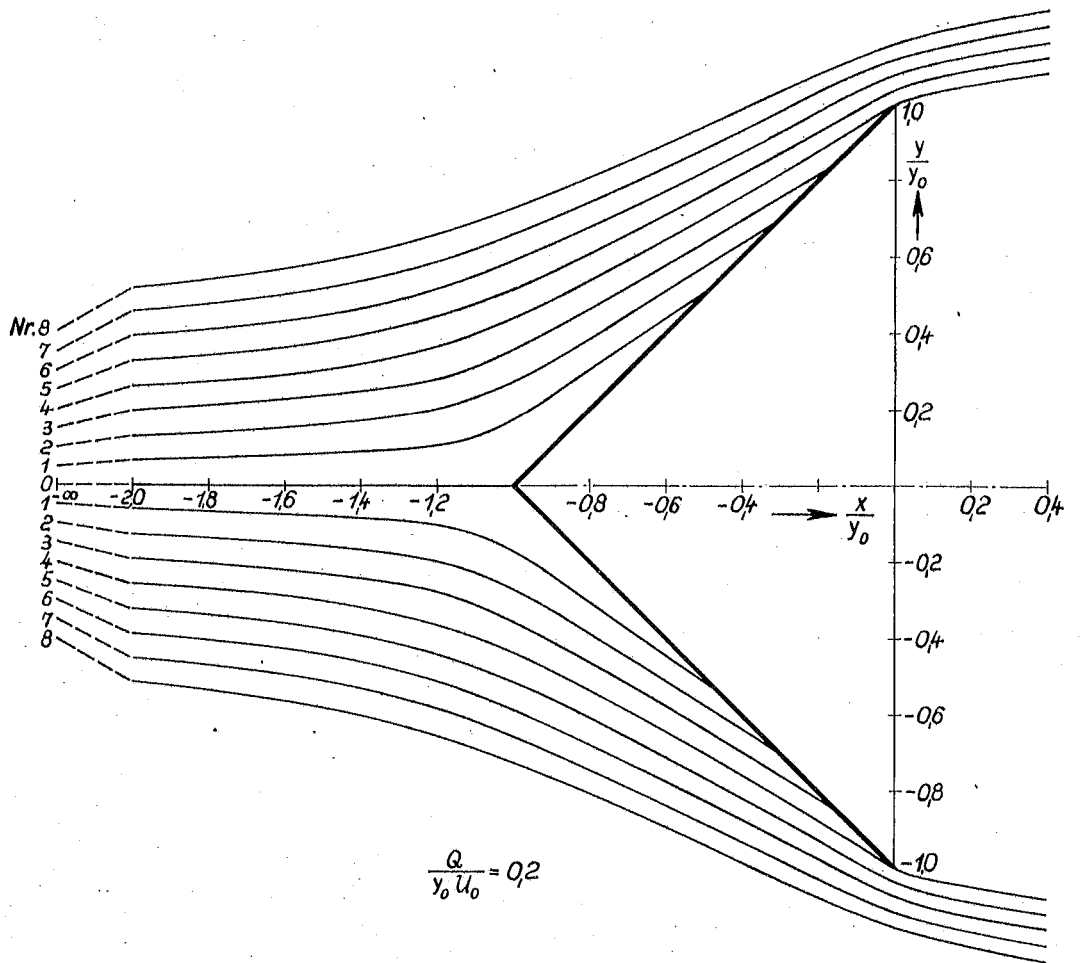


Abb.8. Ebener Winkelkühler. Stromlinienbild.

nur erreichen, wenn ausser den Quellen noch andere Singularitäten hinzugenommen werden. Eine solche Verfeinerung geht über das Vorhaben der vorliegenden Untersuchung hinaus und ist erst gerechtfertigt, wenn ausführliche Experimente vorliegen. Zudem treten die Abweichungen von der konstanten Quellbelegung nur bei sehr geringen Durchlässigkeiten wesentlich in Erscheinung.

3. Der rotationssymmetrische Kühler.

a. Der Kreisflächen- und Kreisringkühler. Ausser ebenen Kühlern wurden auch rotationssymmetrische nach einem entsprechenden Rechenverfahren behandelt. Die durch einen rotationssymmetrischen Kühlerblock bedingte Verdrängungsströmung wird durch eine dem Kühler entsprechende mit Quellen belegte Fläche dargestellt. Die Stromfunktion, die zu einer solchen Quellbelegung gehört, erhält man durch Summation der von den einzelnen Quellelementen gelieferten Beiträge, d.h. durch eine Integration über die Quellfläche. Dasselbe gilt für die von der Belegung induzierten Geschwindigkeiten. Die Integration über einen Kreisumfang (Quellring) ist bereits in [12] durchgeführt; Stromfunktion und Geschwindigkeitskomponenten sind dort tabuliert. Die noch verbleibende Integration über den Radius der Belegungsfläche wurde mit Hilfe dieser Tafeln graphisch vorgenommen.

Wir haben auch im räumlichen Fall nur Kühler mit gleichmässigem örtlichen Durchfluss behandelt, d.h. die örtliche

Quelldichte als konstant angenommen. In den Abb.9 und 10 sind für den senkrecht angeströmten Kreisflächenkühler in der üblichen Weise die Randstromlinien und für eine bestimmte Durchlässigkeit das Strömungsbild dargestellt. Die Druckverteilungen zeigen, dass auch beim räumlichen Kühler auf dem letzten Teil der Randstromlinien Druckabfall herrscht.

Wir haben ausserdem die Strömung um einen Kreisringkühler berechnet mit Hilfe eines mit Quellen belegten Kreisringes. In unserem Beispiel ist die Ringfläche gleich der Hälfte der zum äusseren Radius gehörenden Kreisfläche. Die Ergebnisse sind in Abb.11 wiedergegeben.

b. Der Kühler in der Form eines Kreiskegels und eines Kreiskegelstumpfes. Wie im ebenen Fall sind auch für die rotations-symmetrische Strömung schräg angeströmte Kühlerformen berechnet worden. Die einfachsten Anordnungen dieser Art sind der Kreiskegel und der Kegelstumpf. Für den Oeffnungswinkel wählten wir 90° . Die Ergebnisse zeigen die Abb.12,13 und 14. In beiden Fällen haben wir die bereits erwähnte Schwierigkeit, dass die Belegungsfläche für den mittleren Durchfluss Null nicht mehr Stromfläche ist (vgl. Abschnitt II, 2,b) Abb.12 zeigt, dass für den räumlichen Fall die Abweichung der Stromfläche von der Belegungsfläche bei den üblichen Durchlässigkeiten vernachlässigbar klein ist (die gestrichelte Linie in Abb.12 gibt die Stromfläche für den Durchfluss Null an). Es zeigt sich wieder, dass bei schräg angeströmten Kühlern auf einem wesentlich längeren Stück der Randstromfläche Druckabfall herrscht als bei senkrecht angeströmten Kühlern.

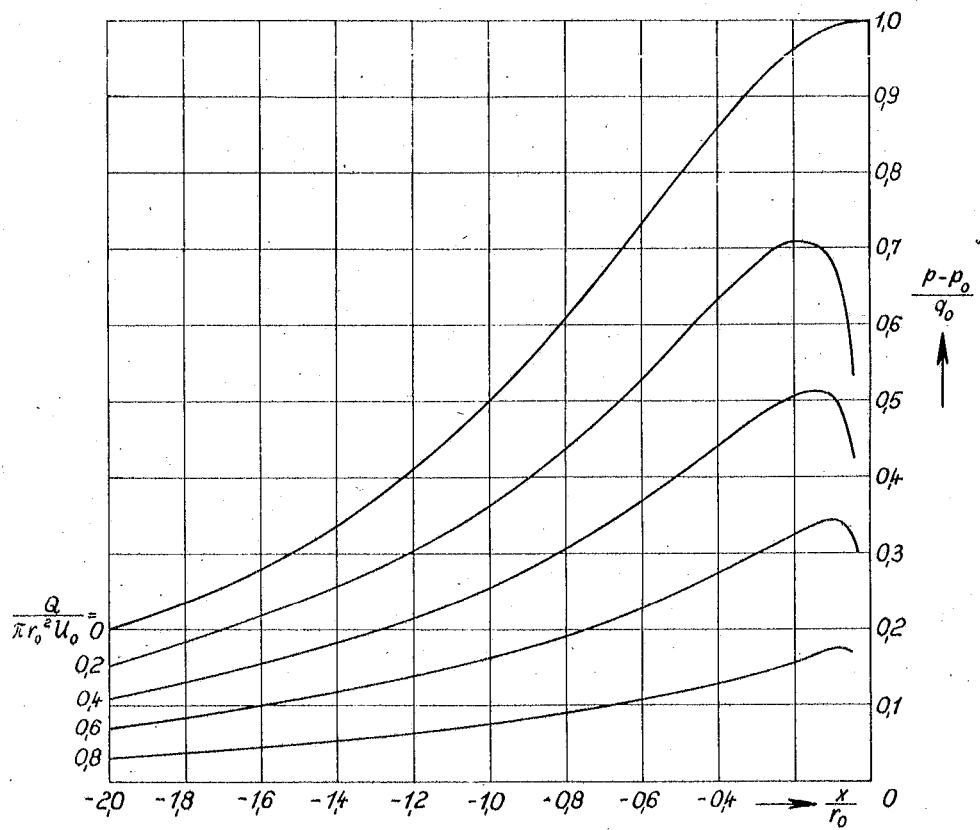
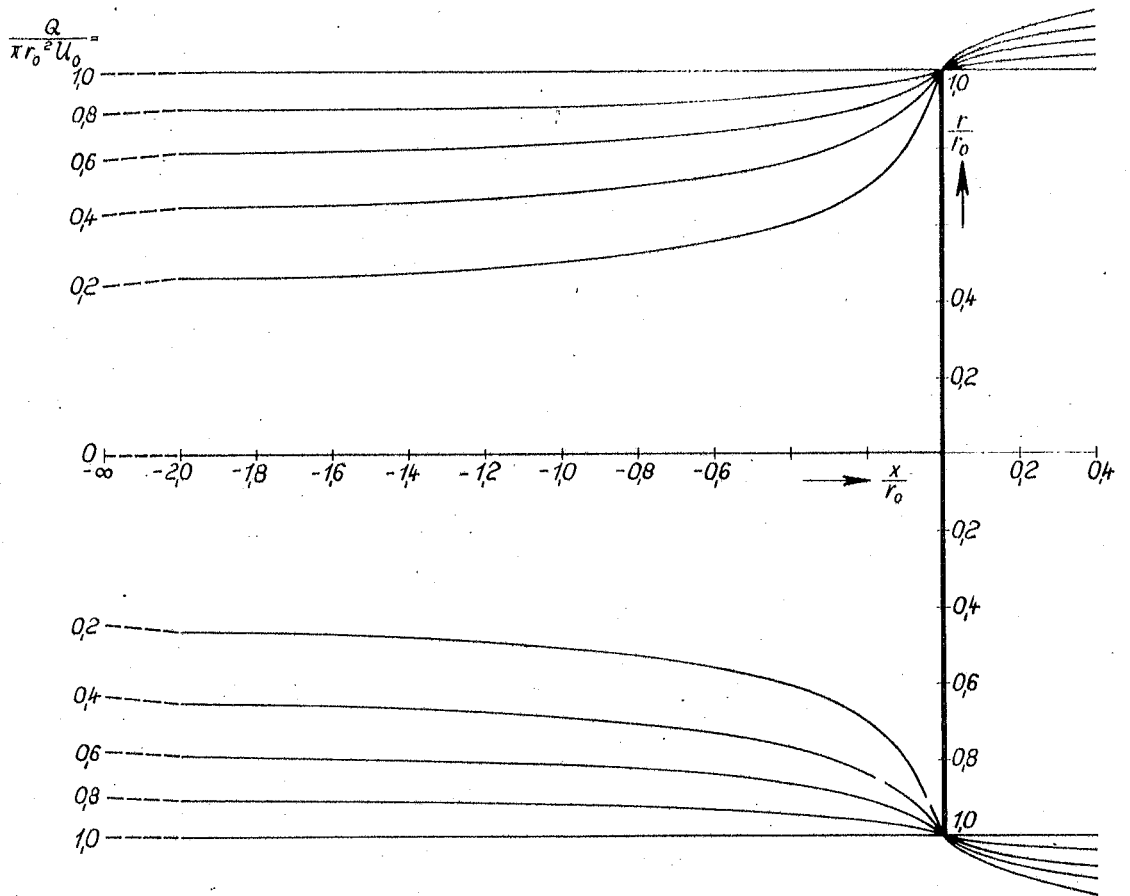


Abb.9. Kreisflächenkühler. Randstromflächen bei verschiedenen Durchlässigkeiten.

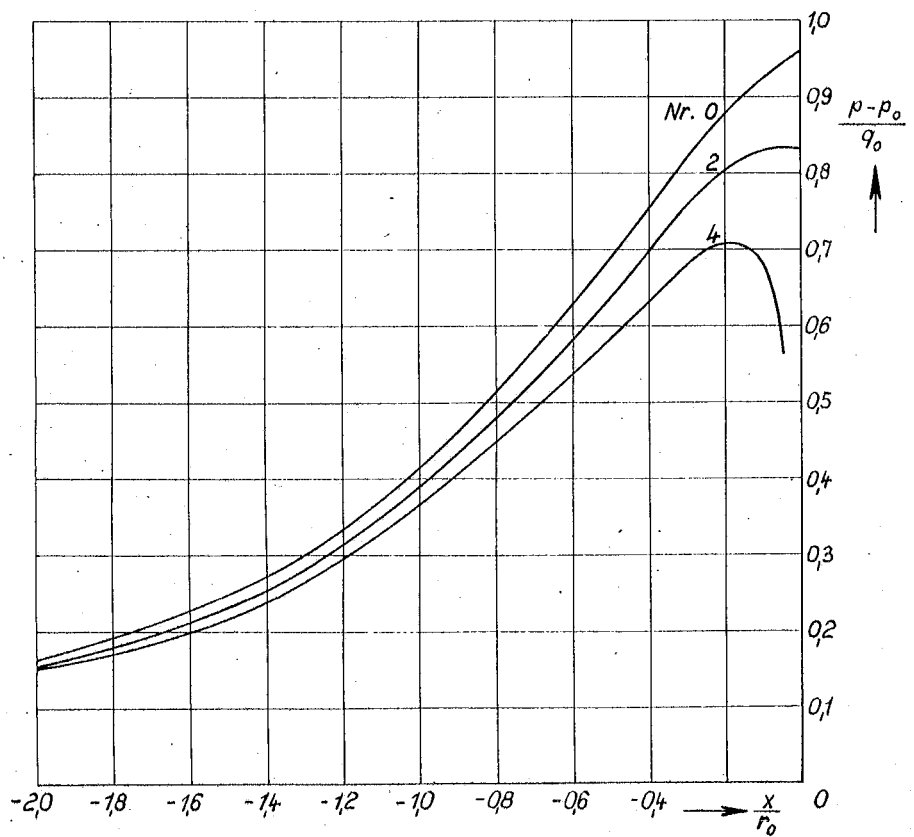
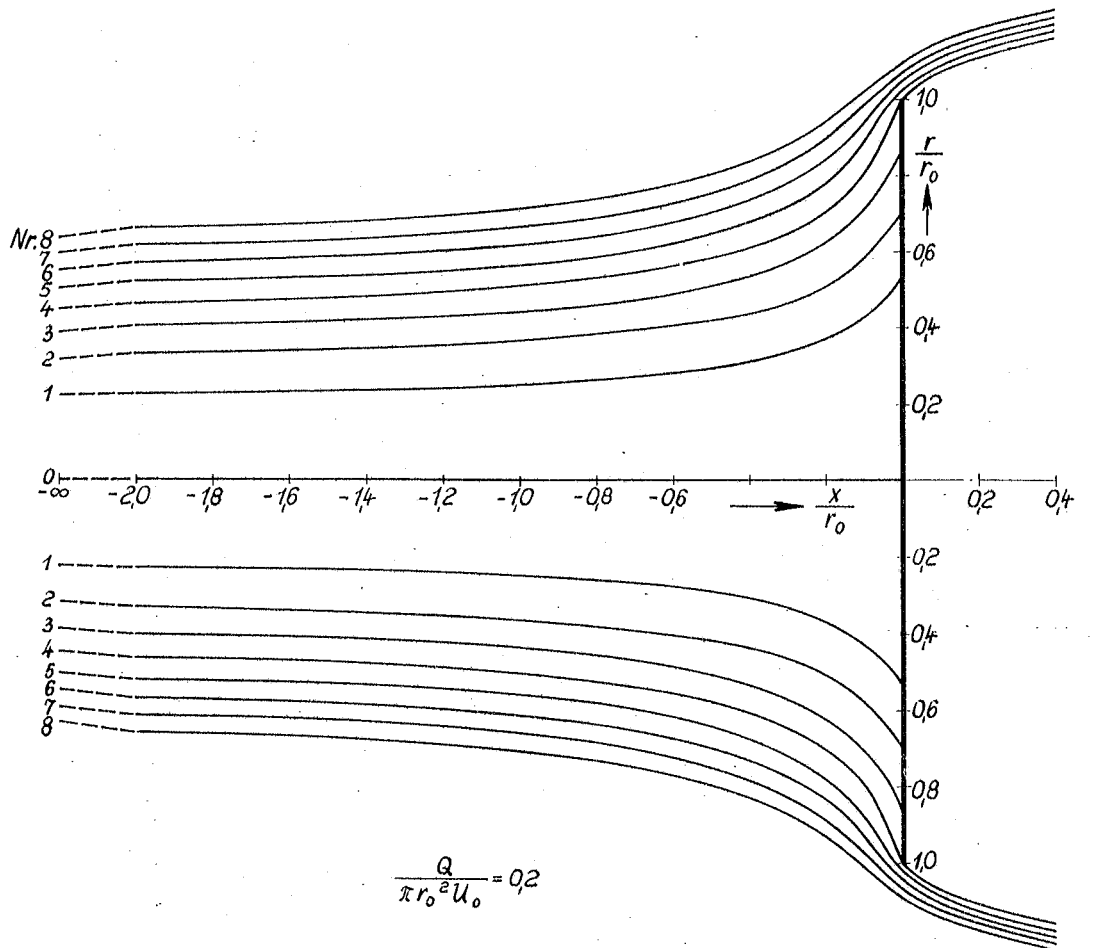


Abb. 10. Kreisflächenkühler. Stromlinienbild.

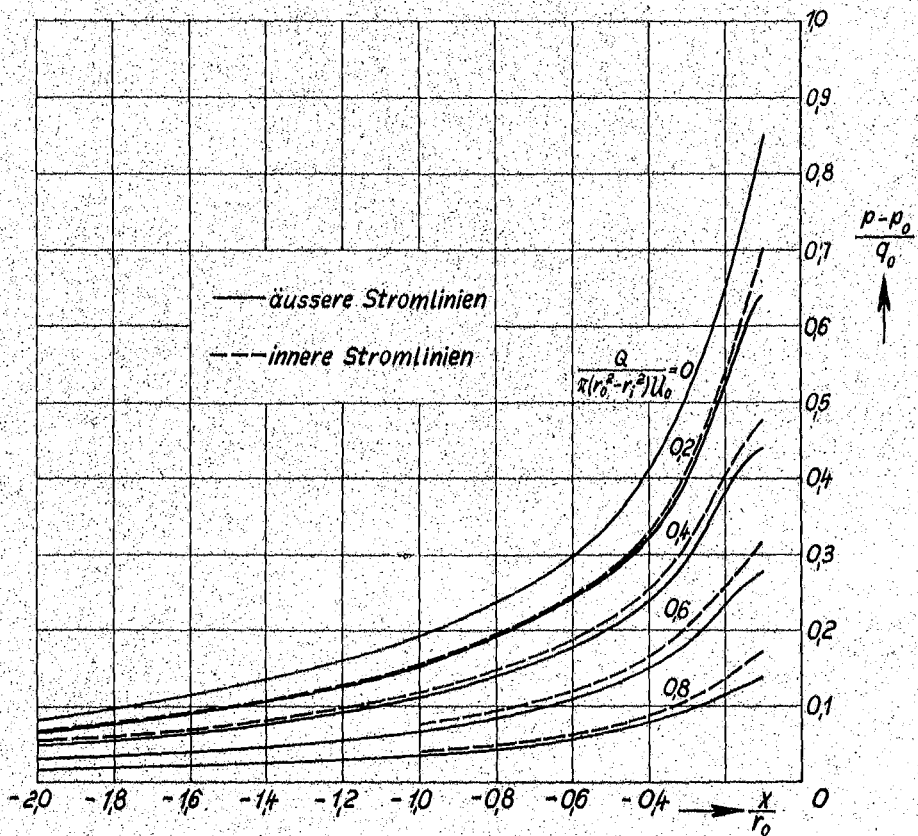
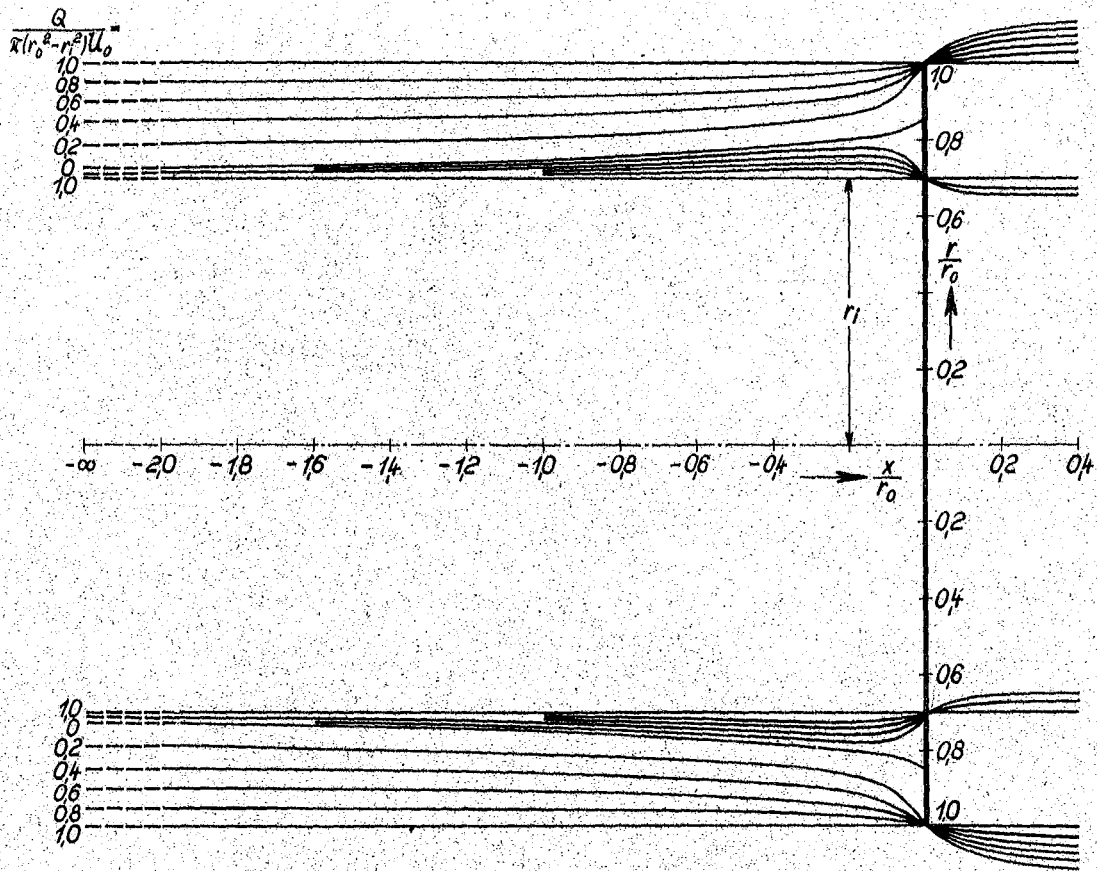


Abb.11. Kreisringkühler. Randstromflächen bei verschiedenen Durchlässigkeiten.

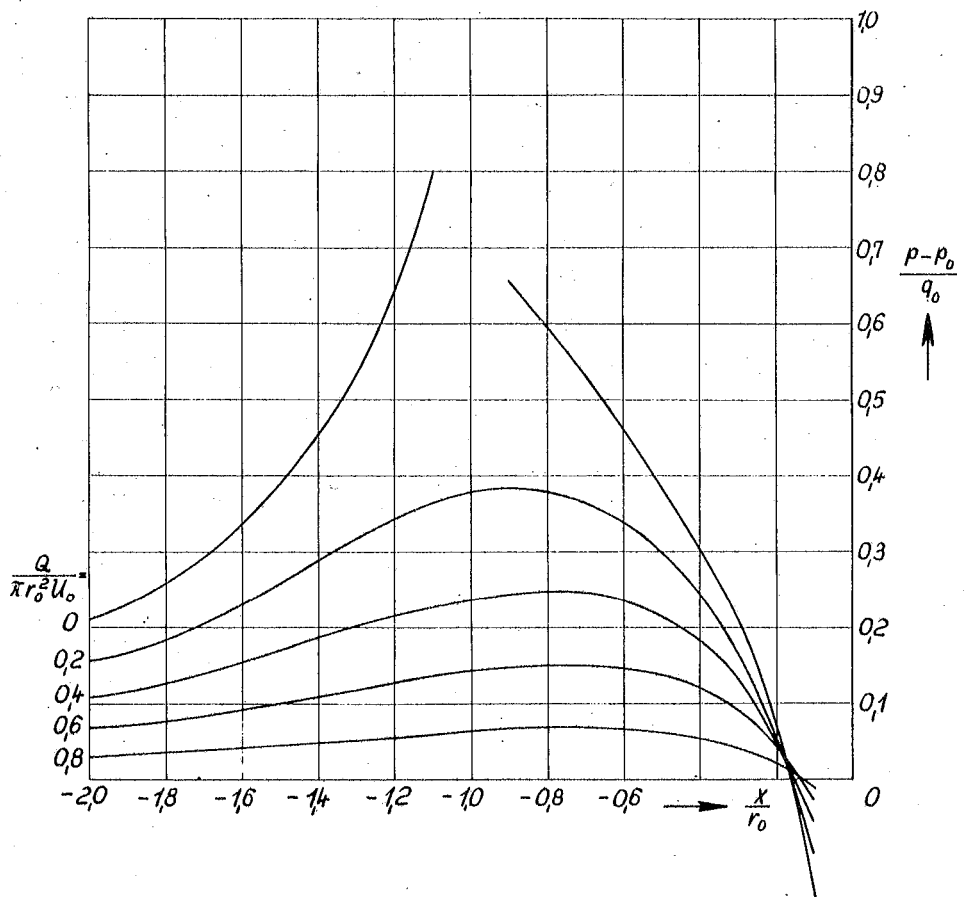
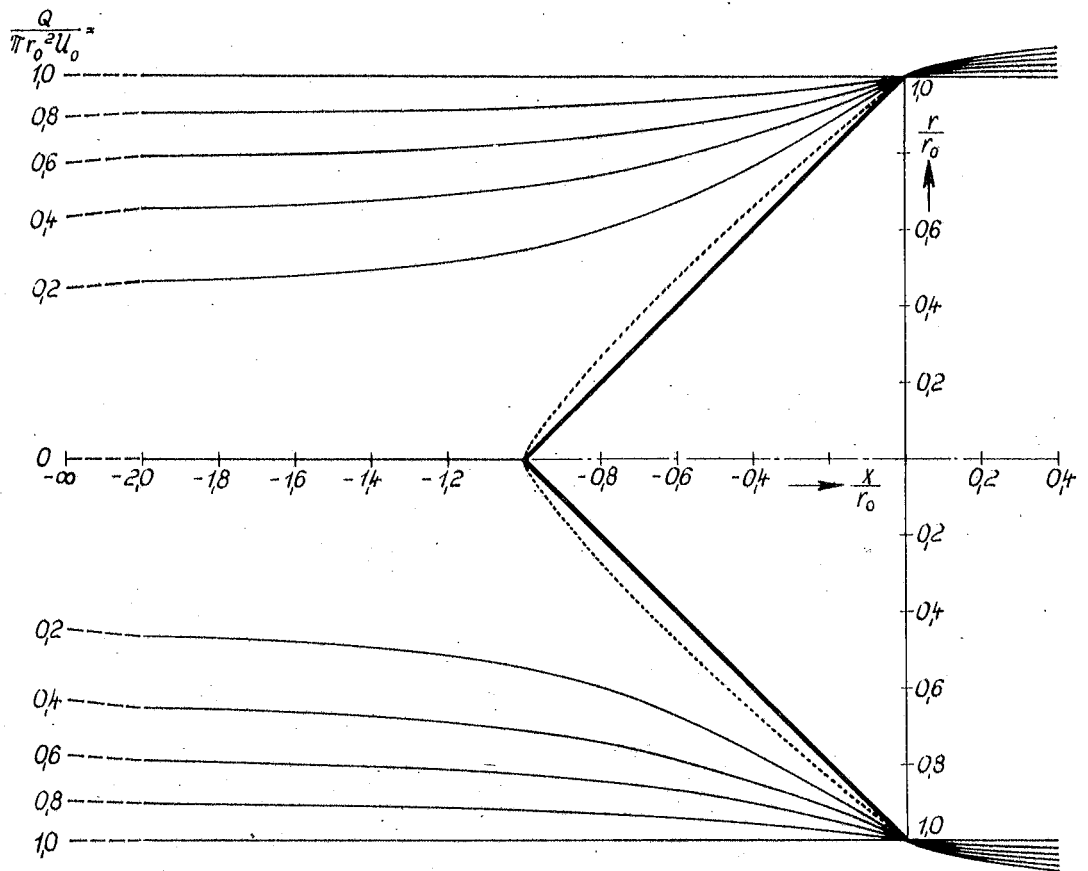


Abb. 12. Kreiskegelkühler. Randstromflächen bei verschiedenen Durchlässigkeiten.

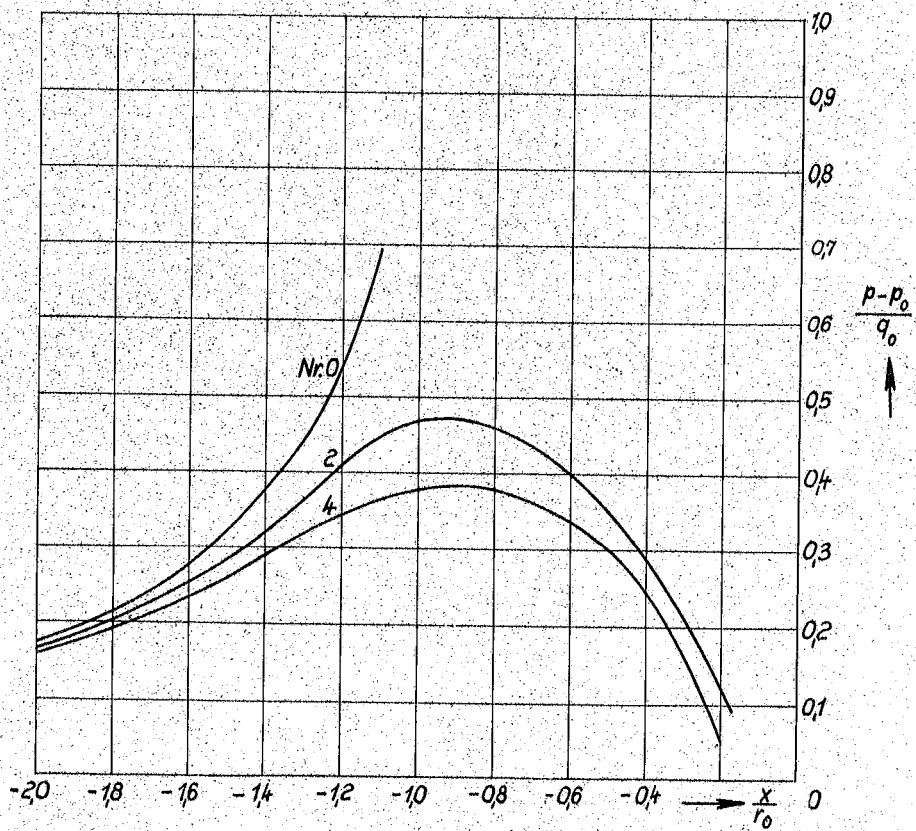
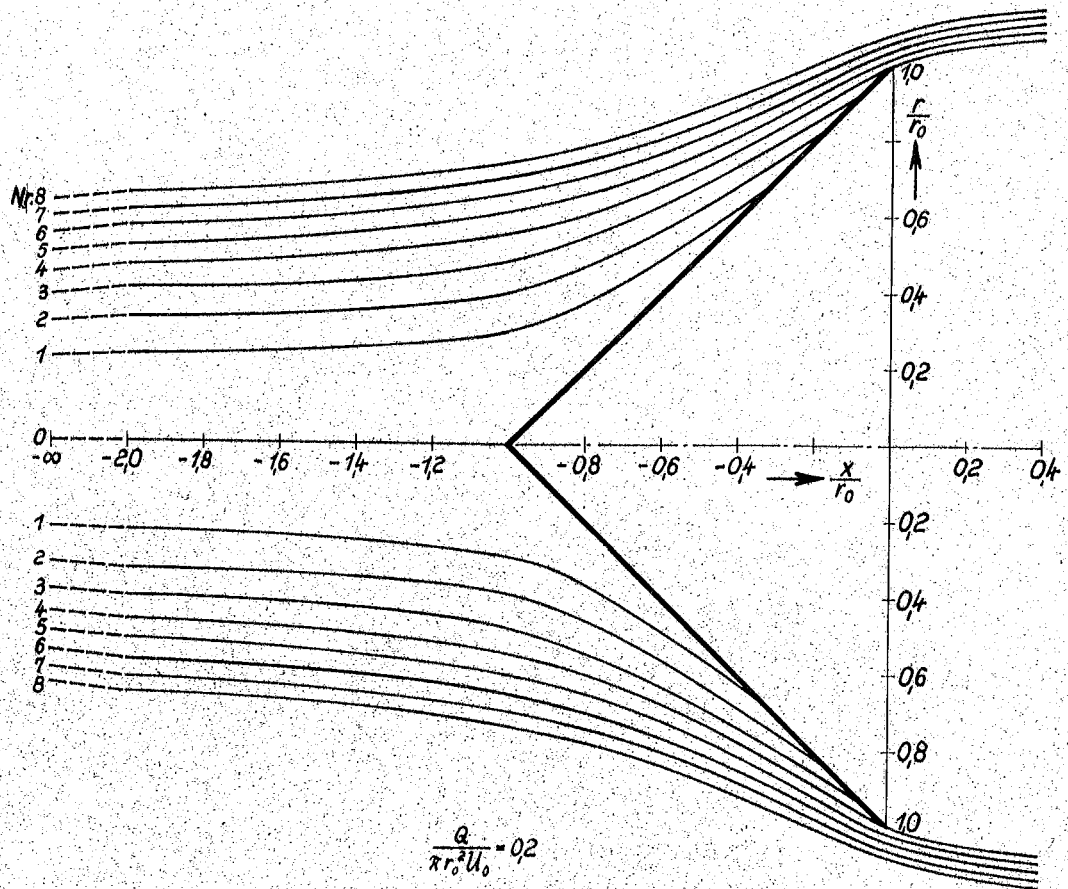


Abb. 13. Kreiskegelkühler. Stromlinienbild.

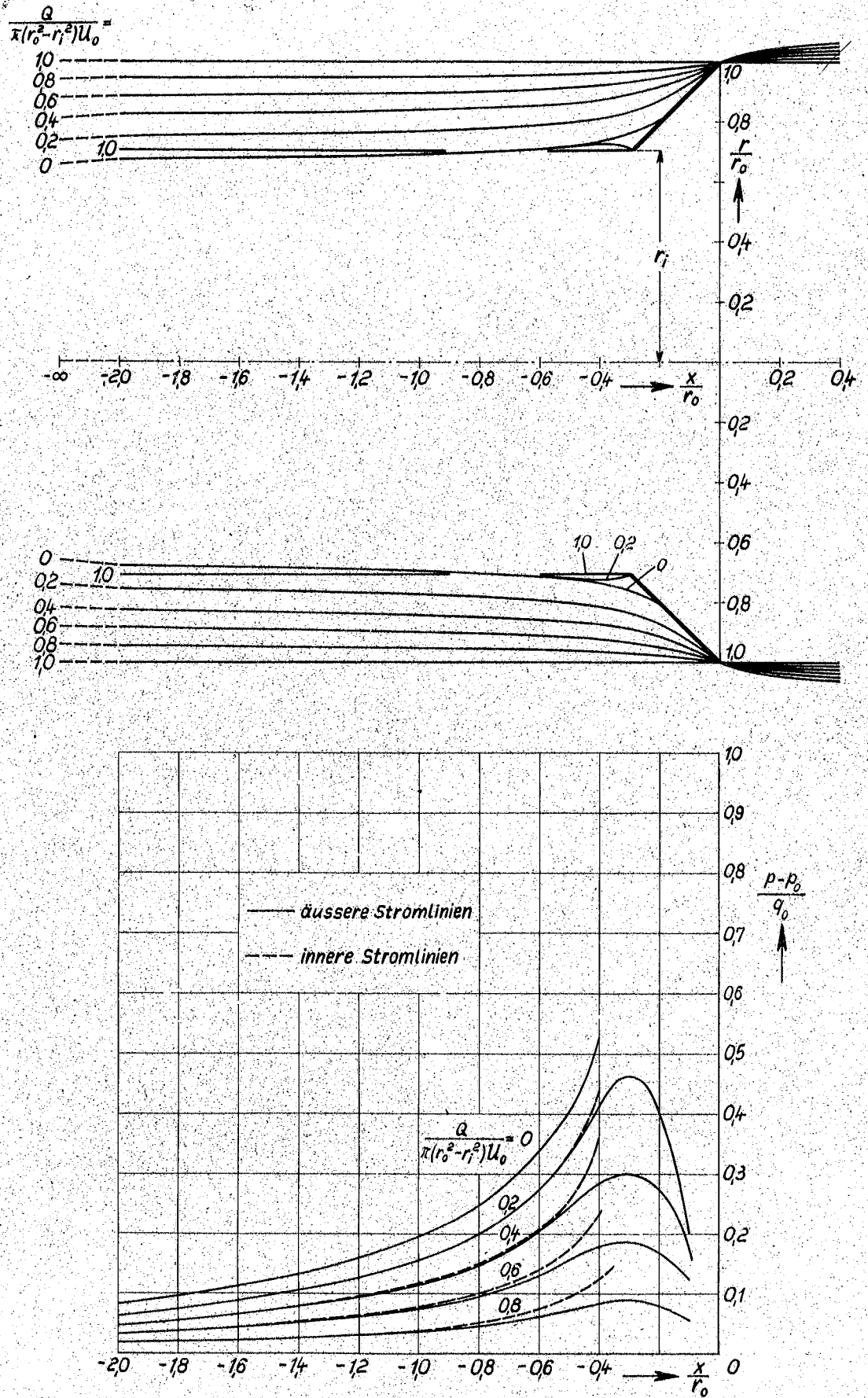


Abb. 14. Kreiskegelstumpfkühler. Randstromflächen bei verschiedenen Durchlässigkeiten.

III. Folgerungen für die praktische Anwendung und offene Fragen.

Wir fassen die gemachten Vorschläge in einer Entwurfsregel³⁾ zusammen:

1. Die Gestaltung des vorderen Teiles vom Innenraum einer Kühlerverkleidung sei allein von der Durchlässigkeit des Kühlerblockes abhängig. Die Wand des Innenraumes vor dem Kühler ist so zu formen wie die Randstromlinie des frei umströmten Kühlerblockes.
2. Die Verkleidung regele die Durchflussänderung derart, dass bei allen Flugzuständen die gleiche absolute Luftmenge aufgefangen wird. Ein (etwa im Schnellflug) hinzukommender Druckanstieg werde in die freie Strömung verlegt. Die Gestaltung der Aussenseite der Verkleidung richte sich nach der Durchflussmenge und nicht nach den Eigenschaften des Kühlerblockes. Die Aussenseite ist zweckmässig für den Flugzustand mit kleinstem Durchfluss zu entwerfen.

In dieser Regel wird die Verzögerung der Strömung, welche der Kühlerblock selbst hervorruft, wesentlich von der Verzögerung oder Beschleunigung, welche die Verkleidung bewirkt, getrennt. Es wird vorgeschlagen, nur den Anteil des Druckanstiegs vor dem Kühler, für welchen dieser selbst verantwortlich ist, im Innenraum der Verkleidung stattfinden zu lassen. In Abb. 15 ist die vorgeschlagene Art des Kühlereinbaues am Beispiel eines Bauchkühlers schematisch dargestellt. Die Wand des Rumpfes und die Stromlinie a entsprechen den Randstromlinien des frei umströmten Kühlers A (Durchlässigkeit 0,4).

³⁾ Diese Entwurfsregel ist hier sicherlich nicht zum ersten Male vorgeschlagen; sie soll nur in verschiedener Hinsicht präzisiert und erläutert werden.

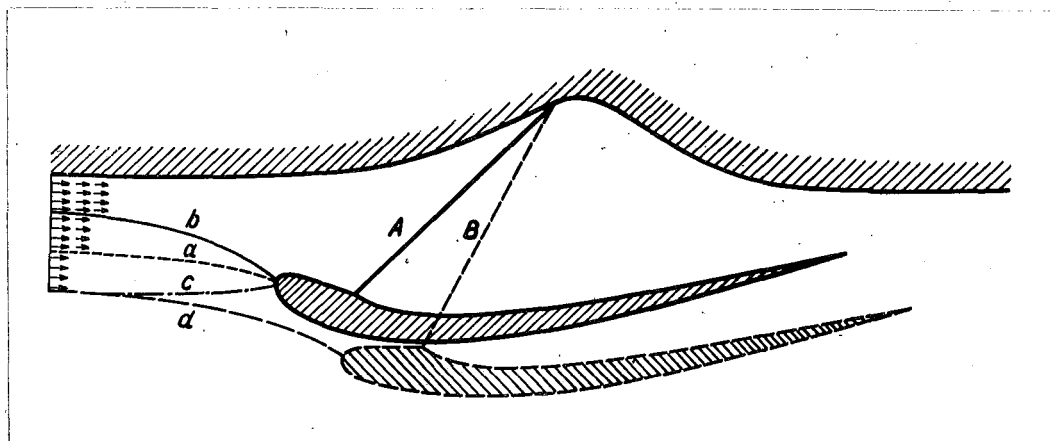


Abb.15: Schematische Darstellung des vorgeschlagenen Kühler-einbaues für den Fall eines Bauchkühlers.

Wir haben also im Innenraum vor dem Kühler einen Einlaufdiffusor im Sinne von P.R u d e n [4], welcher dadurch definiert ist, dass die Einlauföffnung des Fanggerätes ungefähr im umgekehrten Verhältnis der (durch den Kühler hervorgerufenen) Strömungsverzögerung kleiner gemacht wird als der innere Querschnitt (Projektion des Kühlers auf eine zur Anströmrichtung senkrechte Ebene).

Soll nun z.B. im Schnellflug nur ein geringerer Teil der ankommenden Luft aufgefangen werden, damit die absolute Durchflussgeschwindigkeit nicht erhöht wird, so geschieht das mit Hilfe einer Zirkulation um die Verkleidung etwa durch eine nach innen ausgeschlagene Klappe, wie in der Zeichnung dargestellt ist. (Der Drehpunkt und die Normalstellung sind nicht mitgezeichnet). Die ankommende Stromlinie möge dann die Form b haben, d.h. dieser zusätzliche Druckanstieg findet nicht im Inneren der Verkleidung statt. Für diesen Anteil des Druckanstiegs erhält man also einen Fangdiffusor im Sinne von P. R u d e n [4]. Es kommt jedoch nun ein Umstand hinzu, welcher die

Brauchbarkeit einer solchen Anordnung stark gefährden kann: Die ankommende Grenzschicht an der Rumpfwand wird diesem Druckanstieg ausgesetzt. Ein entsprechender Fall liegt beim Einbau eines Ringkühlers oder bei einem Sternmotor vor, wo sich die im allgemeinen aus der Verkleidung herausragende Nabe in einem solchen Druckanstieggebiet befindet. Die vorliegenden Messungen (man vgl. [13] und [14]) zeigen, dass man unter solchen Verhältnissen mit einer Strömungsablösung rechnen muss, was zu grossen zusätzlichen Verlusten führt. Nach einem Vorschlag von A. W e i s e (vgl. [15]) kann man sich bei Bauchkühlern dadurch helfen, dass man durch einen Schlitz in der Rumpfwand kurz vor der Einlauföffnung die ankommende Grenzschicht absaugt. Man kann jedoch auch nach einem Vorschlag von A. B e t z daran denken, in einem solchen Falle durch einen Spalt zwischen Rumpfwand und Kühler einen "Grenzschichtüberlauf" zu schaffen. Danach würde man nicht eine Randstromlinie des frei umströmten Kühlers zur Wand machen, sondern eine Stromlinie, welche am Kühler vorbeigeht. In Abb. 3 sind die Druckverteilungen auf solchen Stromlinien mit eingetragen. Der Druckabfall bei Annäherung an den Kühler ist auf solchen Stromlinien besonders ausgeprägt, sodass man vermuten kann, dass der Unterdruck zur Beschleunigung der Grenzschicht in manchen Fällen bereits genügt. Bei Ringkühlern und Sternmotoren kann die ^{neuerdings} von R. R a n s h o r n vorgeschlagene Doppelhaube eine grundlegende Abhilfe schaffen, da bei dieser die Propellernabe nicht aus der Verkleidung herauszu-
ragen braucht.

Bei Start und Steigflug muss im allgemeinen ein grösserer Teil der ankommenden Luft erfasst werden, d.h. die Stromlinie vor dem Kühler hat die Form c, was durch einen (nicht gezeichneten) Ausschlag einer Klappe nach aussen erreicht werden kann. Ein solcher Klappenausschlag ^{Klappen} wird jedoch ^{möglicherweise} wegen des im Innenraum hinter dem Kühler entstehenden Diffusors einen beträchtlichen Widerstandszuwachs bedingen, wie z.B. in [16] gezeigt wurde. Man kann diese Verlustursache vermeiden, wenn man in diesem Falle grundsätzlich von der aufgestellten Entwurfsregel abgeht: Man schwenkt den Kühler nach einem (zunächst aus konstruktiven Gründen gemachten) ^{der} Vorschlag ~~von Messerschmitt A.G.~~ etwa in der Weise, wie in Abb. 15 in den gestrichelten Linien dargestellt ist (Stellung B des Kühlers). Dadurch kann erreicht werden, dass der Innenraum der Verkleidung vor dem Kühlerblock einen nahezu konstant bleibenden Querschnittsverlauf erhält. Die durch den Kühlerblock selbst hervorgerufene Strömungsverzögerung geschieht also auch vor der Verkleidung (Stromlinie d). Im Innenraum hinter dem Kühler ergibt sich nun kein Diffusor mehr, sodass für die gesamte Anordnung keine wesentlichen Strömungsverluste durch Ablösung zu erwarten sind.

Die Vorteile des vorgeschlagenen Kühlereinbaues seien noch an einem Beispiel gezeigt, wobei gleichzeitig auf eine Variation der Entwurfsregel eingegangen werden soll. Abb. 16 zeigt den Einbau des Kühlers in der Form eines Kreiskegels mit der Grundfläche F_K und einer (allerdings recht kleinen) Durchlässigkeit $Q/F_K U_0 = 0,2$. Die Randstromlinie des freifahrenden

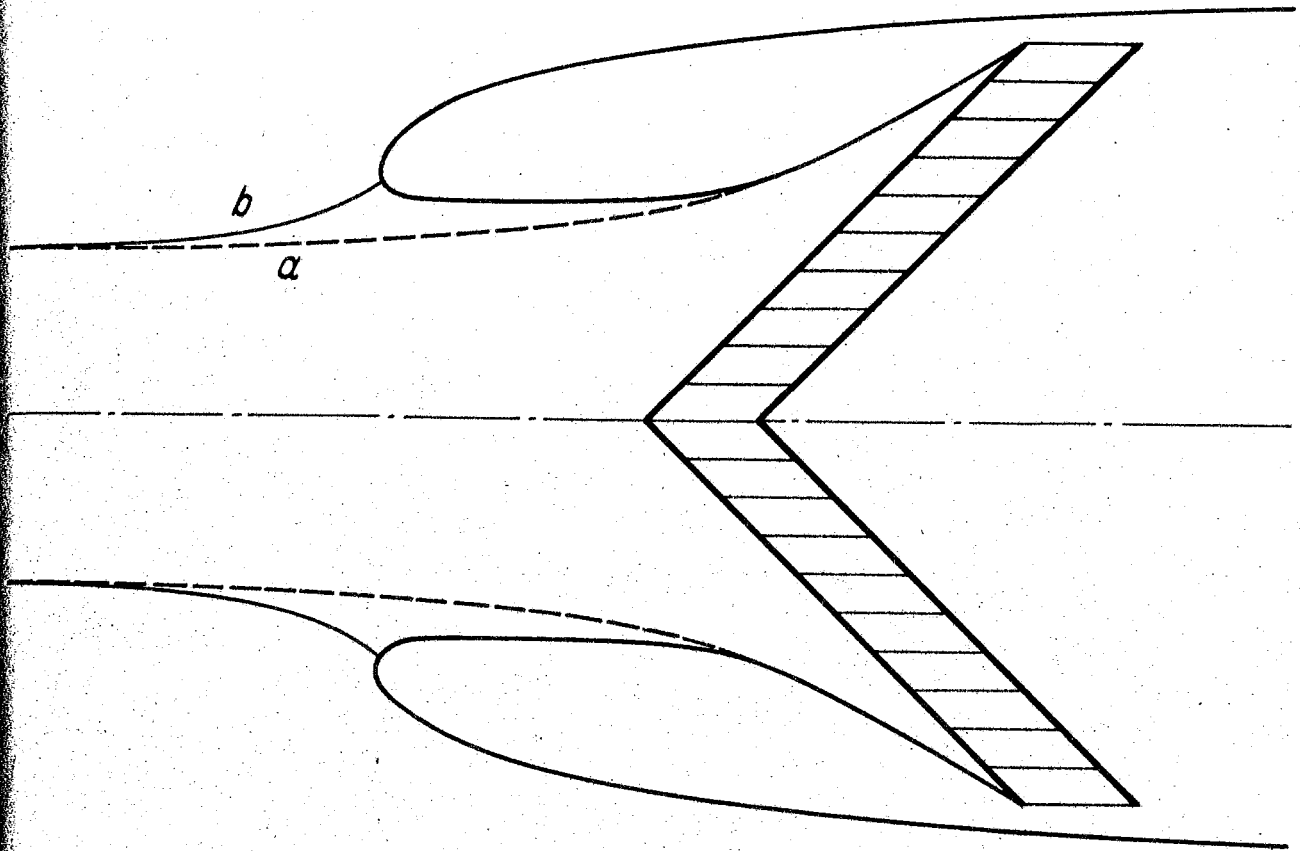


Abb. 16: Schematische Skizze vom Einbau eines Kreiskegelkühlers.

Kühlers hat dann die Form a. Die eingezeichnete Verkleidung weicht im vorderen Teil des Innenraumes von der Stromlinie a ab und zwar in dem Gebiet, wo auf der Randstromlinie Druckanstieg herrscht, während die Verkleidung in dem Gebiet mit Druckabfall mit der Randstromlinie übereinstimmt. Die ankommende Stromlinie hat dann die Form b, und auf der Innenseite der Verkleidung herrscht kein Druckanstieg mehr, sodass damit auch ein Teil des Vorstaues vom Kühler in den Aussenraum verlegt ist.

Die eingezeichnete Verkleidung ist die in [14] vermessene Verkleidung 3, welche bei allen Betriebszuständen eine einwandfreie Umströmung ergab, bei geringen Uebergeschwindigkeiten im Schnellflug. Der angegebene Kühlerbau erscheint daher brauchbar. Die Stirnfläche der gesamten Anordnung ergibt sich dabei zu $1,26 F_K$ (F_K = Kühlerstirnfläche). Würde man jedoch einen Fangdiffusor mit zylindrischen Innenwänden vom Querschnitt F_K bauen, so erhielte man mit Verkleidung 3 eine Stirnfläche der Grösse $3,78 F_K$, also das Dreifache wie bei dem gezeichneten Einbau.

Die bei der Entwurfsregel benötigten Randstromlinien sind im Abschnitt II für verschiedene Kühlerformen angegeben. Es seien im Folgenden noch einige Vergleiche zwischen den einzelnen Formen vorgenommen. Abb. 17 zeigt die Randstromlinie für einen Kreisflächenkühler der Durchlässigkeit $Q/\pi r_o^2 U_o = 0,2$ und zum Vergleich diejenige, welche man erhält, wenn die entsprechende ebene Strömung unter Beibehaltung der Querschnittflächen ($y/y_o = (r/r_o)^2$) ins Rotationssymmetrische übertragen wird. Es ergeben sich beträchtliche Abweichungen, sodass das letztere Verfahren ungeeignet erscheint. Weiterhin ist in Abb. 17 der Kreisflächenkühler mit dem behandelten Kreiskegelkühler verglichen, wobei besonders der Unterschied in der Grösse des Druckanstieges und in der Länge des Gebietes mit Druckabfall deutlich bemerkbar wird. Entsprechende Unterschiede zeigen sich auch im ebenen Fall zwischen dem senkrecht und dem schräg angeströmten Kühler. Man kann daher vermuten, dass besonders bei schrägen Kühlern der vorgeschlagene

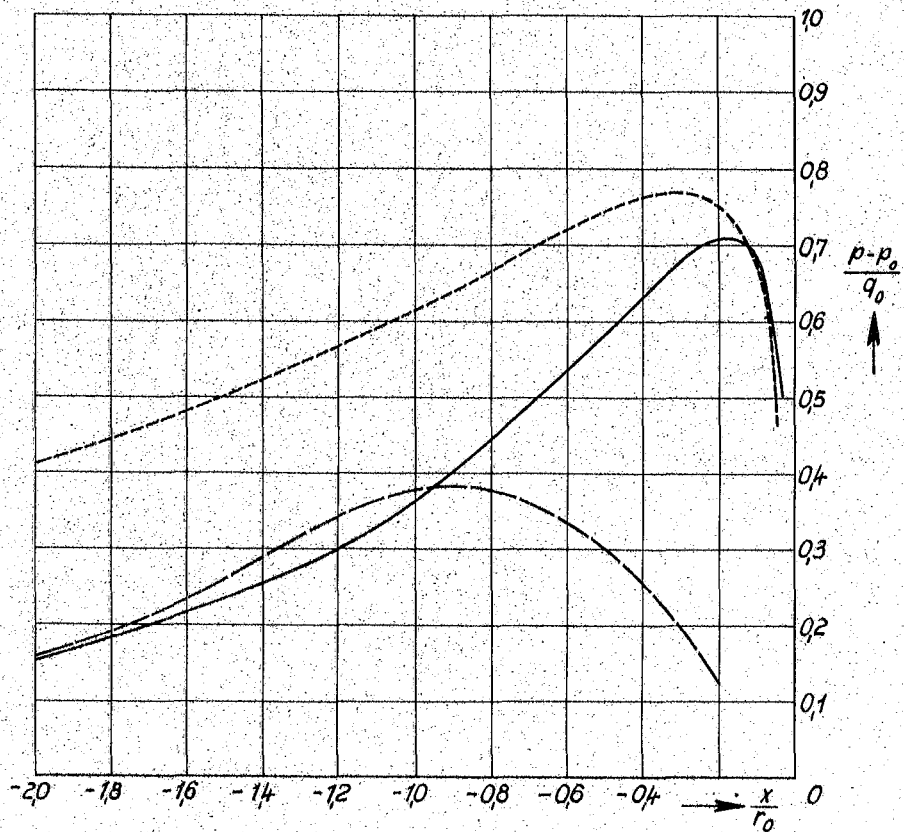
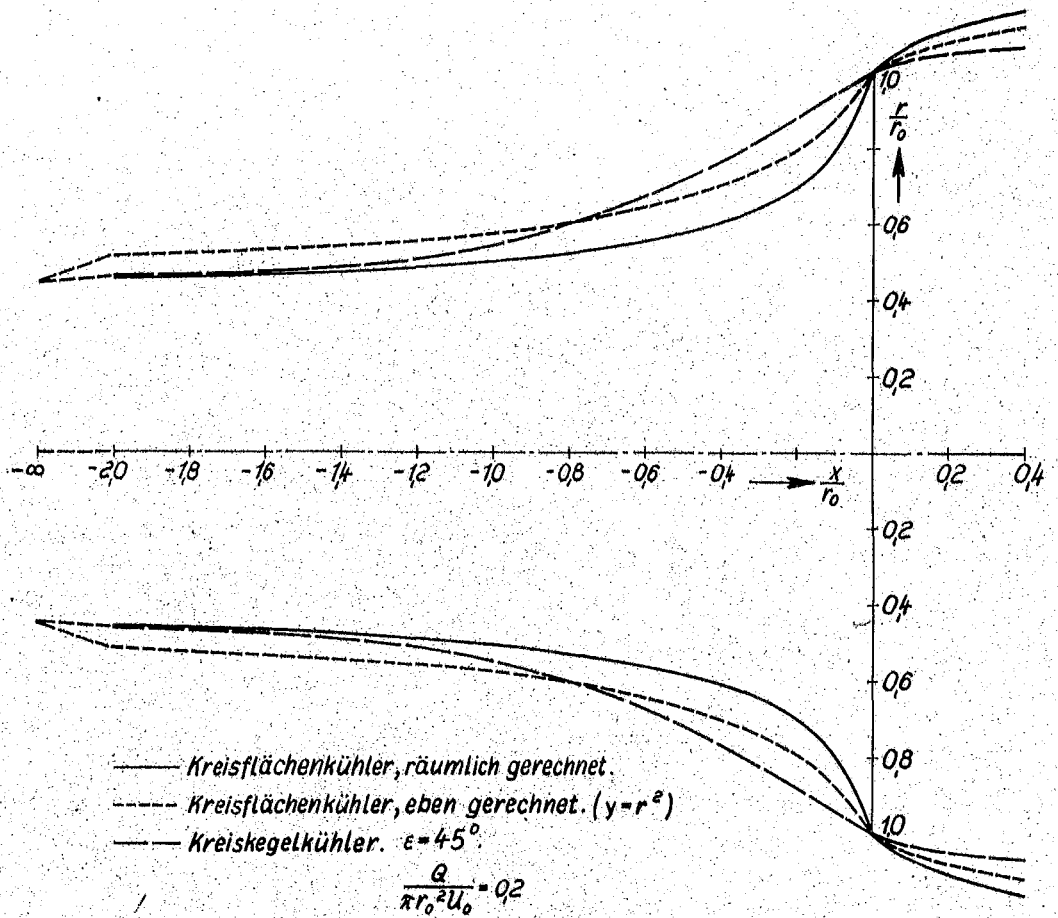


Abb.17. Vergleich zwischen gerade und schräg, eben und räumlich gerechnetem Kühler.

Einlaufdiffusor ohne nennenswerte Ablöseerscheinungen verwirklicht sein wird.

Ein gemeinsames Merkmal der Randstromlinien bei allen Kühlerformen ist, dass sie vor dem Kühler keinen Wendepunkt haben. Die Geschwindigkeit am Kühler hat daher nicht an der ganzen Kühlerfläche dieselbe Richtung; insbesondere werden die äusseren Kühlerlemente schräg angeblasen, auch wenn der Kühlerblock senkrecht zur Anströmung steht. Diese Tatsache ist von wesentlicher Bedeutung und zieht verschiedene noch nicht beantwortete Fragen nach sich. Die Grösse der Schräganblasung kann man aus den gezeichneten Stromlinienbildern näherungsweise ablesen. Für einige Beispiele ist die sich aus der Rechnung ergebende Grösse und Richtung der Geschwindigkeit am einzelnen Kühlerelement in Abb. 18 aufgetragen. Man erkennt beim ebenen wie beim rotationssymmetrischen senkrecht angeströmten Kühler, dass die örtliche Schräganblasung mit dem Abstand von der Kühlermitte zunimmt, während z.B. bei dem im Ganzen schräg gestellten ebenen Kühler der örtliche Anblasewinkel über einen grossen Teil des Kühlerblockes verhältnismässig konstant ist. Einwandfreie Auskünfte über die in diesem Zusammenhang sehr wichtigen Vorgänge am einzelnen Kühlerelement können wir erst durch eingehende Experimente erhalten, wobei ausser der Richtung der Kanäle auch die spezielle Formgebung des Kühlerelementes wie z.B. die Gestaltung der Einlaufkanten eine ausschlaggebende Rolle spielen wird. Die experimentellen Untersuchungen sind zunächst eine Angelegenheit des reinen Blockversuchs. Sie können jedoch auch dahin erweitert werden, die gesamte vorgetragene Theorie von der Gestaltung des Innenraumes hinter demselben nachzuprüfen und klarzustellen. Insbesondere wird

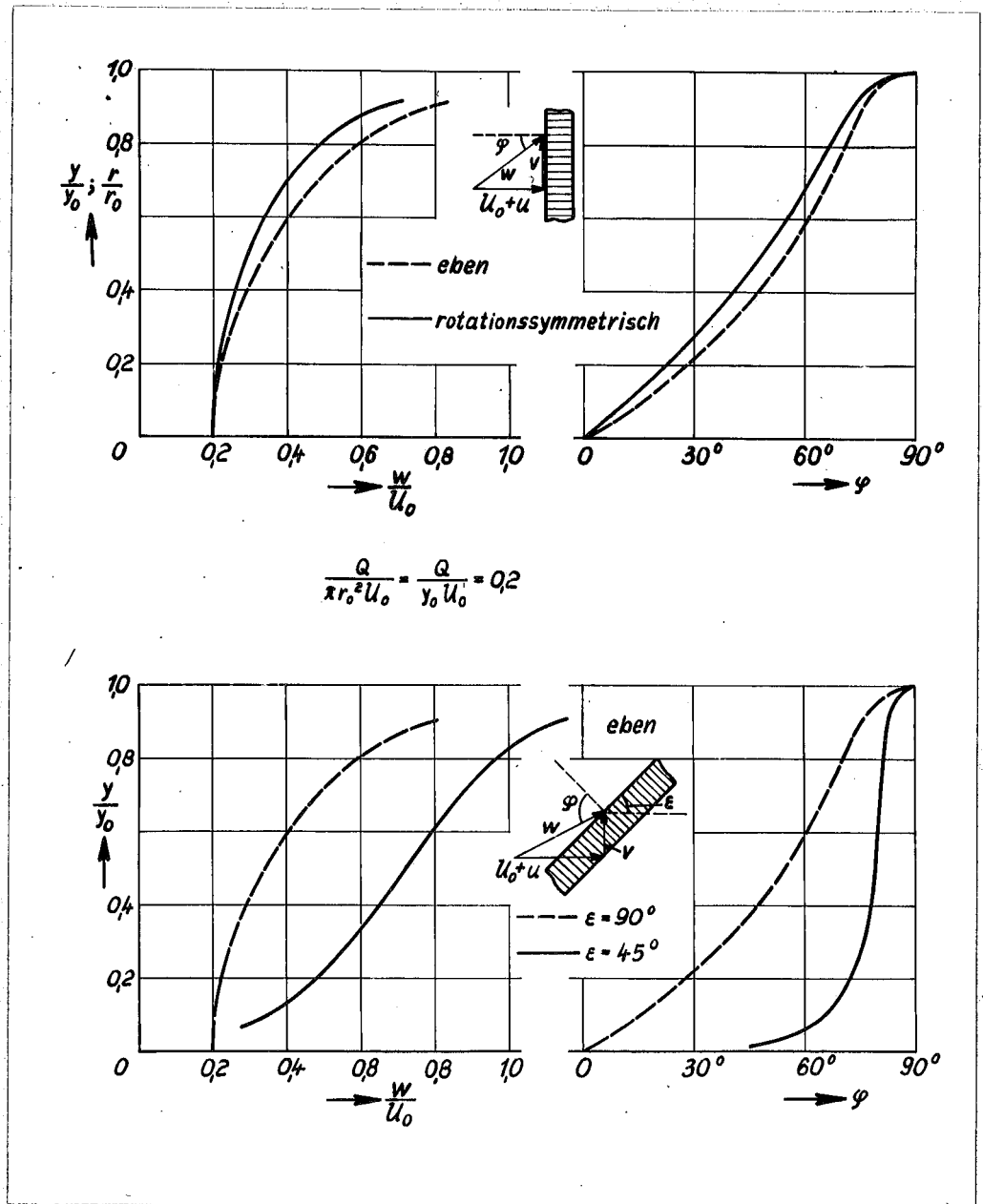


Abb. 18: Grösse und Richtung der Geschwindigkeiten vor dem Kühler.

sich dabei zeigen, ob die im vorliegenden Bericht gemachten Voraussetzungen, wie z.B. die einer über die Kühlerfläche gleichmässigen Durchlässigkeit, in Wirklichkeit erfüllt sind, und - falls dies nicht oder nur näherungsweise der Fall ist -

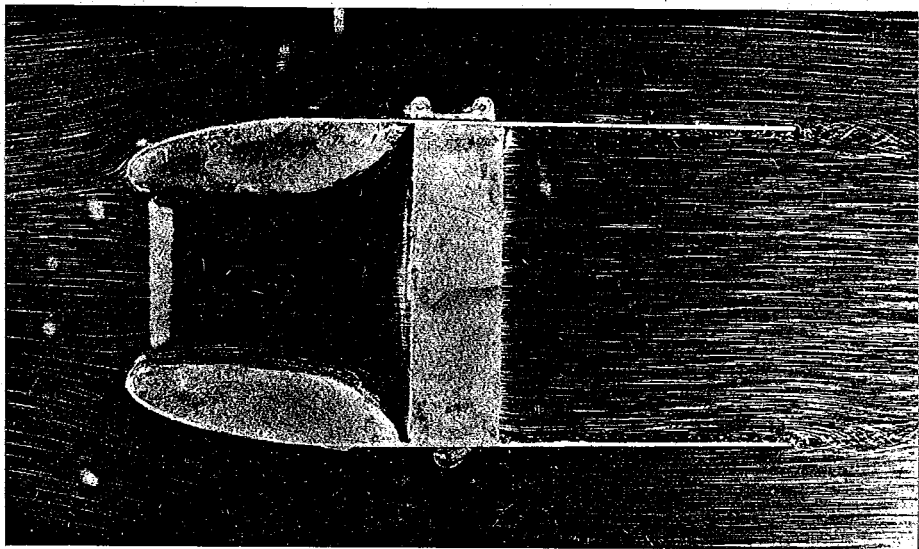
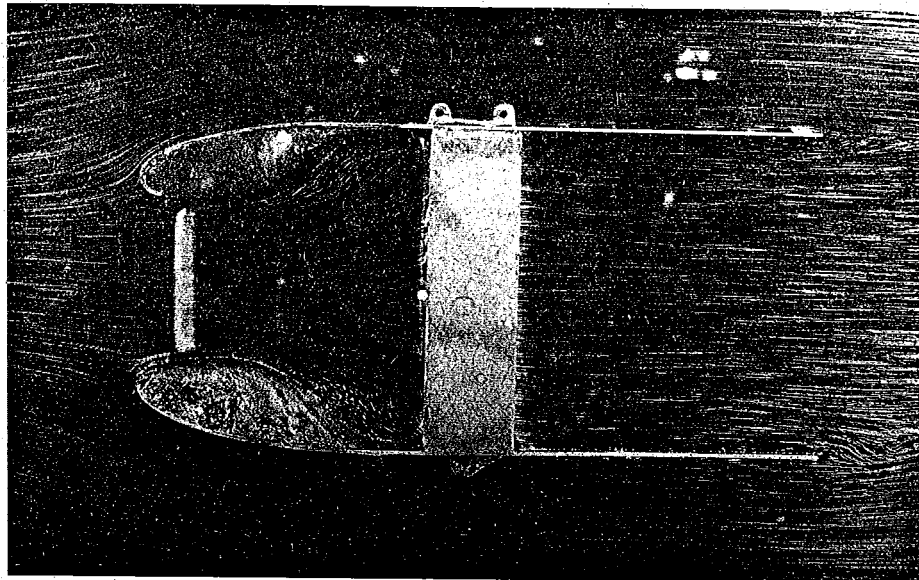


Abb. 19: Strömungsaufnahmen vom Einbau eines ebenen Kühlers nach [5]; oben: alter Einlauf; unter: neuer Einlauf.

wie stark sich Abweichungen von der beim Entwurf zu Grunde gelegten Durchlässigkeit bemerkbar machen.

Die vorliegenden Messungen geben noch keine erschöpfende Auskunft. Aus den bereits erwähnten Messungen von I. F a u s t und Y. N i s i m u r a [5] geht jedoch hervor, dass der Einfluss

der Schräganblasung nicht sehr erheblich ist und die vorgeschlagene Entwurfsregel nicht grundlegend gefährdet. Es seien dazu zwei von den japanischen Strömungsaufnahmen wiedergegeben (Abb. 19), welche eine Innenwand mit Wendepunkt und eine solche ohne Wendepunkt zeigen ⁴⁾. Es geht daraus eindeutig die Ueberlegenheit der letzteren hervor. Für einen eingebauten zur Anströmung senkrechten Kühler mit neuer Form der Innenwand sind in [5] ausserdem Geschwindigkeitsmessungen am Kühler angegeben, wobei sich zeigt, dass die Geschwindigkeitsverteilung über den Kühlerquerschnitt völlig gleichmässig ist.

Man kann schliesslich vermuten, dass die durch die örtliche Schräganströmung hinzukommenden Verluste nicht so stark ins Gewicht fallen gegenüber den Vorteilen, die man erwarten kann, wenn es gelingt, dass im Innenraum vor dem Kühler keine Strömungsverluste auftreten und der Durchfluss über den Kühlerquerschnitt gleichmässig ist, da bekanntlich ein schlechter Diffusorwirkungsgrad bei der üblichen Einbauweise den inneren Widerstand der Kühlanlage beträchtlich heraufsetzt.

IV. Zusammenfassung. Im vorliegenden Bericht wird die Strömung vor einem in eine Verkleidung eingebauten Kühlerblock behandelt. Insbesondere wird die Frage untersucht, ob man die

⁴⁾ Die Form der Verkleidungsnase am Einlauf ist dabei nicht sehr zweckmässig, wodurch eine kleine Störung der Einlaufströmung entsteht, welche jedoch für unseren Zweck ohne Bedeutung ist.

10/100 Name Kühler
Wände des Innenraumes so formen kann, dass eine Ablösung der Strömung vermieden wird. Zur Lösung wird die Tatsache herangezogen, dass bereits der unverkleidete Kühler infolge seiner Verdrängungsströmung einen seiner gegebenen Durchlässigkeit entsprechenden Vorstau hervorruft. Die Randstromfläche, welche durch die äussere Begrenzung des freifahrenden Kühlers hindurchgeht und sich bei Annäherung an den Kühler erweitert, wird als zweckmässige Form der Wand auch vor einem eingebauten Kühler vorgeschlagen. Sie ist nur von der gegebenen Durchlässigkeit des Kühlerblockes selbst abhängig und nicht von dem jeweiligen Betriebszustand des am Flugzeug eingebauten Kühlers. ✓

Da es sich nur um das Strömungsgebiet vor dem Kühler handeln soll, ist ein Ersatz der Kühlerströmung durch die einer Quellbelegung auf der Kühlerfläche hinreichend genau. Mit Hilfe dieses Verfahrens werden für eine Reihe von ebenen und rotations-symmetrischen Kühlerformen, die Randstromfläche und der Druckverlauf auf derselben für verschiedene Durchlässigkeiten berechnet. [Die Erscheinungen bei senkrecht und bei schräg angeströmten Kühlern werden miteinander verglichen.] Im allgemeinen ergibt sich ein verhältnismässig steiler Wandverlauf vor dem Kühler, wobei in den meisten Fällen auf dem letzten steilsten Stück dieser Wand kein Druckanstieg, sondern Druckabfall stattfindet. [Besonders günstig in dieser Hinsicht sind die Verhältnisse bei schräg eingebauten Kühlern.] ✓^m

Der Bericht umfasst nur theoretische Ergebnisse. Diese und die vorgeschlagene Entwurfsregel konnten z.T. durch japanische Messungen [5] bestätigt werden. Es wird jedoch auf die Notwendigkeit von weiteren eingehenden Experimenten hingewiesen.

V. Schrifttum.

- [1] D. Küchemann: Der Einfluss einer Verkleidung auf die Achsialkräfte an Kühlern und Luftschrauben. Erscheint demnächst in d. Technischen Berichten.
- [2] P. Ruden: Windkanalmessungen an einem rotationssymmetrischen Fangdiffusor. FB 1427/1 (1941).
- [3] D. Küchemann u. J. Weber: Ueber ringförmige Triebwerksverkleidungen. Theorie und Messungen. Erscheint demnächst als LGL-Bericht.
- [4] P. Ruden: Ebene symmetrische Fangdiffusoren. FB 1209 (1940).
- [5] T. Hara und Y. Nisimura: Ueber die Kühlerverkleidung. The Journal of the Soc. of Aeron. Sci. of Nippon 6, 1116 (1939).
- [6] J. E. Dickmann: Schiffskörpersog, Wellenwiderstand eines Propellers und Wechselwirkung mit Schiffswellen. Ing. Arch. 9, 452 (1938).
- [7] J. Böhm: Strömungsvorgänge an einem Düsenkühler. Erscheint demnächst als Göttinger Dissertation.
- [8] I. Faust: Durchlässigkeit schräg angeblasener Kühler. Tech. Ber. 8, 106 (1941).
- [9] O. Flachsbart: Widerstand von Seidengazefiltern, Runddraht- und Blechstreifensieben mit quadratischen Maschen. Erg. d. AVA, IV. Liefg. S. 112; München u. Berlin 1932.

- [10] W. Linke: Windkanalmessungen an Kühlerverkleidungen. Abh. Aerodyn. Inst. Aachen Heft 15.
- [11] A. Weise: Diskussionsbemerkung zu einem Vortrag von W. Linke und W. Friedrichs. LGL-Tagungsbericht 075/007, S. 10 (1937).
- [12] D. Küchemann: Tafeln für die Stromfunktion und die Geschwindigkeitskomponenten von Quellring und Wirbelring. Jahrb. d. dtsh. Luftfahrtfg. 1940, I 547.
- [13] P. Ruden: Windkanalmessungen an ebenen symmetrischen Fangdiffusoren. FB 1325 (1940).
- [14] D. Küchemann u. J. Weber: Ueber die Strömung an ringförmigen Verkleidungen. IV. Mitteilung: Windkanalmessungen an Einlaufgeräten. FB 1236/4 (1941).
- [15] G. Book: Probleme des Flugzeugbaues in der Gegenwart. Luftwissen 9, 6 (1942).
- [16] D. Küchemann u. J. Weber: Ueber die Strömung an ringförmigen Verkleidungen. V. Mitteilung: Experimentelle Untersuchungen an Ringprofilen endlicher Tiefe. FB 1236/5 (1942).