

## Aerodynamische Düsenkühlung des flüssigkeitsgekühlten Flugmotors mit Blockkühlung

Von Dr. Ing. W. SCHLUPP, Berlin-Nikolassee.

In einem Abriss der Probleme und Entwicklungsmöglichkeiten der aerodynamischen Düsenkühlung mit Blockkühlern, insbesondere für die Abführung der Zylinderverlustwärme des Flugmotors, werden die grundsätzlichen Fragen dieses Arbeitsgebietes: Bewertung und Auswahl aerodynamischer Blockkühlbauarten — Gesetzmäßigkeiten des Druckverlustkoeffizienten des Düsenkühlers — Vortriebs effekt des Düsenkühlers als Wärme-Strahlpropeller — Resultierender Kühlungs-koeffizient bzw. Kühlungs-vortrieb — hinsichtlich der erreichbaren Grenzwerte und in ihren Beziehungen zu den bekannten bzw. neu herausgestellten Kennwerten des Kühlereinbaues behandelt, in Form von allgemein verständlichen Kennwerten abgeleitet und für die in Deutschland eingeführte Blockkühlbauart zahlenmäßig ausgerechnet, sowie durch Betrachtungen zur Gestaltungs- und Regelungsfrage des Kühlereinbaues ergänzt. Ferner wird eine Darstellung des Zustandsverlaufes der Kühlluft im Entropiediagramm erläutert, sowie ein graphisches Auswertungsverfahren der Strömungs- und Widerstandsverhältnisse des Düsenkühlers im T—S Diagramm angegeben.

### Formelzeichen

#### I. Einführung

II. Bewertung und Auswahl von Blockkühlbauarten für aerodynamische Kühleinrichtungen

III. Grundsätzliche Zusammenhänge zwischen Kühlwiderstand, Kühlergröße und den Kühlungskennwerten

1. Kühlgeschwindigkeit und Kühlerstirnfläche
2. Kühlwiderstand infolge Druckverlustes des Blockkühlers
3. Kühlungs-Vortriebs effekt aus der Rückgewinnung der Zylinderverlustwärme im Heißluftprozess des Kühlluftstromes. Der Kühler als Abwärme-Strahlpropeller
4. Der Düsenkühler mit kleinstmöglichem Durchflußgrad als Ziel des Kühlerentwurfes

IV. Kennwerte und Beiwerte des Kühlereinbaues

V. Auswertung und Darstellung der Kennwerte des Kühlwiderstands

1. Allgemeiner Fall des eingebauten Blockkühlers
2. Kühlereinbau ohne Düse
3. Graphisches Auswertungs- und Darstellungsverfahren im I-S-Diagramm
4. Abgrenzung der Widerstands- und Vortriebsbereiche von Einbaukühlern
5. Kennwerte des resultierenden Kühlwiderstands von Einbaukühlern (Düsenkühlern)
6. Näherungslösung für den resultierenden Kühlwiderstand
7. Grenzwert der Vortriebsleistung eines Düsenkühlers als Wärme-Strahlpropellers

VI. Zahlenmäßige Auswertung der Kühlwiderstands-Kennwerte von Düsenkühlern für Flughöhen von 0 bis 15 km

VII. Gestaltung des Kühlereinbaues

Zusammenfassung

Schrifttum

# Aerodynamische Düsenkühlung des flüssigkeitsgekühlten Flugmotors mit Blockkühlung

## Formelzeichen

$Q/N$	Zylinderverlustwärme (Kühlflüssigkeitswärme) des Motors kcal/PSH
$c_z$	Zylinderverlustwärmeanteil in vH. der Brennstoffwärme
$G_k$	Gewicht des Blockkühlers mit Wasserinhalt (kg)
$G$	durch den Blockkühler strömende Luftmenge kg/s
$F_k$	Stirnfläche des Blockkühlers (m <sup>2</sup> )
$F_a$	Austrittsquerschnitt der Düse (m <sup>2</sup> )
$v_a$	Fluggeschwindigkeit bzw. Anströmgeschwindigkeit des Düsenkühlers (m/s)
$v$	Kühlluftgeschwindigkeit im Luftkanal unmittelbar vor dem Blockkühler (m/s) Abb. 4
$v_a$	Austrittsgeschwindigkeit aus der Düse eines eingebauten Kühlers (m/s) Abb. 4
$\eta_{aa}$	Durchflußgrad des eingebauten Kühlers
$\Delta t$	Temperaturzunahme des Kühlluftstromes im Blockkühler (°C)
$t_k$	mittlere Temperatur des Kühlwassers im Kühler (°C)
$t(T)$	Lufttemperatur beim Eintritt in den Blockkühler (°C) (°K) Abb. 4
$t(T_0)$	Lufttemperatur des ungestörten Luftstromes (der Umgebung) in °C (°K) (Abb. 4)
$\eta_{th}$	Erwärmungsgrad des Kühlluftstromes; Kennwert für die Wärmeabgabe des Blockkühlers (Abb. 4)
$c_{nk}$	Druckverlustbeiwert des unbeheizt durchströmten Blockkühlers; Kennwert für den Druckverlust des Blockkühlers (Gl. 1)
$c_{nk}$	Druckverlustbeiwert des beheizten Blockkühlers (Gl. 2)
$C_1$	Temperaturerhöhung-Beiwert für den Druckverlustkennwert des Blockkühlers (Gl. 2)
$\Delta t$	Temperaturerhöhung des Kühlluftstromes durch Flugtau-Verdichtung vor dem bzw. im Kühler (°C)
$\eta_Q$	thermischer Wirkungsgrad des Heißluftprozesses im eingebauten Kühler (Gl. 27)
$\eta$	Wirkungsgrad eines idealen Strahlpropellers (Gl. 27, 28)
$c_{wQ}$	Kennwert zur Beurteilung einer Blockkühlerbauart für aerodynamische Zwecke (Gl. 3, 6)
$C_{wQ}$	Kennwert für den resultierenden Kühlwiderstand der aerodynamischen Kühlung mit Blockkühler (Gl. 10 a)
$\Delta p_k$	Druckverlust des Blockkühlers, Gl. 11 (kg/m <sup>2</sup> )
$\Delta p_d$	Druckverlust des Diffusors, bzw. der Verdichtungsströmung vor dem Blockkühler, Gl. 10, 11 (kg/m <sup>2</sup> )
$\Delta p_{Da}$	Druckverlust im Düsenkanal hinter dem Kühler einschließlich Düsenverlust (Gl. 10, 11), kg/m <sup>2</sup>
$\Delta p_{Da}$	Druckgefälle der Düse des Düsenkühlers, Gl. 11 (kg/m <sup>2</sup> )
$\Delta p$	Gesamtdruckgefälle des Düsenkühlers Gl. 11, 12 (kg/m <sup>2</sup> )
$c_{wd}$	Druckverlustbeiwert der Verdichtungsströmung (Gl. 11)
$c_{wDa}$	Druckverlustbeiwert der Düsenströmung (Gl. 11)
$\Sigma_c$	Gesamtdruckverlustbeiwert des Düsenkühlers
$\alpha_p$	Verhältnis von zusätzlichem Propeller- und Verdichtungs-Staudruck zum Flugstaudruck (Gl. 10)

$a_{Da}$	Beiwert des Unterdruckes in der Düsenmündung (Gl. 10)
$W_k$	Kühlungswiderstand bzw. Vortrieb des eingebauten Blockkühlers, Gl. 16 (kg)
$c_w$	Widerstandsbeiwert des resultierenden Kühlungswiderstandes auf die Kühlerstirnfläche bezogen (Gl. 22)
$F_s$	schädliche Fläche des Kühlungswiderstandes eines Blockkühlers (m <sup>2</sup> , Gl. 24)
$\sigma$	Verlustleistungsanteil des Kühlungswiderstandes eines Blockkühlers (Gl. 23)
$x_{v_{max}}$	Grenzwert des Vortriebsleistungsanteils eines Düsenkühlers als Strahlpropeller
$N_{v_{max}}$	Grenzwert der Vortriebsleistung eines Düsenkühlers als Strahlpropeller (PS)

## I. Einleitung

Die Entwicklung von Hochleistungsflugzeugen mit großer Motorleistung stellt dem Ingenieur auch hinsichtlich der Abführung der Zylinderverlustwärme des Flugmotors neue umfangreiche Aufgaben. Die Bedeutung, welche diesen Kühlungs-Hilfseinrichtungen zukommt, ergibt sich einerseits aus der Höhe der in denselben umgesetzten Wärmeenergiemengen, andererseits aus dem Flugwiderstand, welchen ein Kühler bei ungünstigem Entwurf und Einbau hervorruft [13].

Die Größe der beim Flugmotor nach Otto und nach Diesel anfallenden Verlustwärmemengen wird durch die Angaben der folgenden Zahlentafel gekennzeichnet:

### Wärmebilanz des Flugmotors

	Otto-Motor	Diesel-Motor (Junkers)
Nutzleistung ( $\eta_e$ )	27—30 vH.	35—40 vH.
Zylinderverlustwärme ( $\zeta_z$ )	10—15 vH.	15 vH.
Ölwärme	1—2,5 vH.	1—2 vH.
Abgasenergie	40—45 vH.	40 vH.
Restverluste	10—12 vH.	5—10 vH.

Die Zylinderverlustwärme des flüssigkeitsgekühlten Motors wird im Wassermantel der Zylinder an einen Kreislauf geführten flüssigen Wärmeträger übertragen, und in einem im selben Kreislauf angeordneten, einem Luftstrom ausgesetzten Kühler an die Umgebungsluft durch den Flugwind abgeführt. Die Vorzüge der Flüssigkeitskühlung der Zylinder gegenüber der unmittelbaren Luftkühlung bestehen in der Hauptsache darin, daß die wesentlich höhere Wärmeübergangszahl und insbesondere die hohe Verdampfungswärme des flüssigen Wärmeträgers den Zylinder vor plötzlichen und örtlichen Überhitzungen ausgezeichnet zu schützen vermag. Zudem ist bei Flüssigkeitskühlung der eigentliche Luftkühler in seiner Größe, Formgebung und Anordnung nicht an die Gestalt des Flugmotors gebunden, so daß damit eine gewisse Freiheit hinsichtlich der günstigsten Ausbildung der Kühlflächen und ihrer Anordnung gegeben ist. Ferner kann der flüssigkeitsgekühlte Motor in der Gondel bzw. im Rumpf geschlossen eingebaut werden, was eine größere Freiheit und günstigere Möglichkeiten für die Anordnung des Triebwerks ergibt. Die Nachteile des flüssigkeitsgekühlten Flugmotors gegenüber dem luftgekühlten liegen im Vorhandensein eines Flüssigkeitskreislaufes mit Kühler und Hilfseinrichtungen, sowie des etwa 0,06 kg/PS betragenden Mehrgewichtes des flugklaren Triebwerkes; ein weiterer Nachteil der Flüssigkeitskühlung besteht in der höheren Zylinderverlustwärme  $Q/N$  und in der geringeren Temperaturspanne zwischen Kühlfläche und Luft (in Boden-

nähe 85/30° C). Diesen Nachteilen wird durch Verwendung der Heißkühlung in Form der Glykolkühlung (125 bis 140°) und der Druckwasserkühlung (100 bis 120°) begegnet.

Die Zylinderverlustwärme der flüssigkeitsgekühlten Motoren beträgt bei Wasserkühlung (85°) etwa  $\zeta_z = 15$  vH., bei Druckwasserkühlung (100 bis 120°) etwa 13 vH. und bei Glykolkühlung (125 bis 140°) etwa 11 vH. der Brennstoffwärme. Auf die Motorleistung bezogen ergeben sich hieraus für Wasserkühlung:  $Q/N = 350$  kcal/PSH, für Druckwasserkühlung:  $Q/N = 260$  bis 300 kcal/PSH, für Glykolkühlung:  $Q/N = 230$  bis 250 kcal/PSH. Im Kühler eines flüssigkeitsgekühlten Motors muß also sekundlich eine Energiemenge in Form von Wärme an den Flugwind abgeführt werden, die etwa 40 bis 55 vH. der Motorleistung entspricht.

Die Aufgabe des Motorkühlers besteht darin, diese Zylinderverlustwärmemengen mit einem Mindestaufwand an Gewicht und aerodynamischem Widerstand an die Atmosphäre abzuführen. Hinsichtlich der Lösung dieser Aufgabe können grundsätzlich zwei Gruppen von aerodynamischen Kühlungseinrichtungen unterschieden werden: Kühlungseinrichtungen unter Verwendung aerodynamisch gegebener Oberflächen der Zelle als Kühlflächen (Flächenkühlung, Hautkühlung\*), und Kühlungseinrichtungen mit Anordnung zusätzlicher, auf engem-Raum-in-einem-Block-zusammengefaßter, Kühlflächen und -körper (Blockkühler). In diesem Beitrag wird die aerodynamische Kühlung mit Blockkühlern behandelt. Die Auswahl und Gestaltung einer solchen wird durch folgende Fragegebiete beherrscht:

- A. Auswahl einer für aerodynamische Kühlung günstigen Blockkühlerbauart;
- B. Auswahl der Abmessungen des Blockkühlers bzw. der Kühlungsgeschwindigkeit mit Rücksicht auf Kühlungswiderstand sowie Gewicht und Raumbedarf des Blockkühlers;
- C. Gestaltung des Kühlereinbaues an der Zelle mit Rücksicht auf die Strömungs- und Widerstandsverhältnisse sowie auf die Regelung der Motorkühlung.

**II. Bewertung und Auswahl von Blockkühlerbauarten für aerodynamische Kühlungseinrichtungen**

Die Grundlage für die Bewertung und Beurteilung der Blockkühlerbauarten bilden die Ergebnisse von Untersuchungen der Strömungsverluste und der Wärmeabgabe von Kühlerblöcken in einem Strömungskanal (Abb. 1). Bei diesen Untersuchungen [1], [2], [3]<sup>1)</sup> werden der Druckverlust  $\Delta p$  des Kühlerblocks und die Wärmeabgabe  $Q$  desselben in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit  $v$  im Strömungskanal gemessen und in Form eines Druckverlust-Kennwertes  $c_{wQ}$  für den unbeheizten Kühlerblock:  $c_{wQ} = \frac{\Delta p}{\rho/2 \cdot v^2}$  eines Lufterwärmungs-Kennwertes

$$\eta_{th} = (t_2 - t) / (t_2 - t) = Q / F \cdot \gamma \cdot v \cdot c_p \cdot (t_2 - t) \quad (1)$$

sowie eines Temperatureinfluß-Beiwertes  $C$  für den Druckverlustkennwert  $c_{wQ}$  entsprechend der Beziehung:

$$c_{wQ}' = c_{wQ} \cdot (1 + C \cdot \eta_{th} \cdot (t_2 - t) / T) \quad (2)$$

dargestellt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen an Kühlerblöcken liefern in erster Linie die notwendigen Unterlagen für die Bemessung des Blockkühlers, Gl. 11. Darüber hinaus liefern die Kennwerte  $c_{wQ}$ ,  $\eta_{th}$  die Handhabe für die Bewertung der Blockkühlerbauarten hinsichtlich ihrer Eignung für aerodynamische Zwecke. Eine eindeutige Beurteilung dieser Art läßt sich an Hand eines, auf der Beziehung zwischen Wärmeabgabe

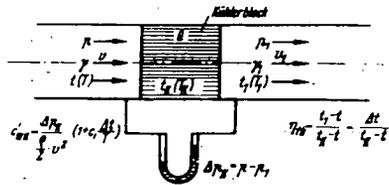


Abb. 1 Untersuchung von Blockkühlern im Strömungskanal.

und Widerstand beruhenden, dimensionslosen Kennwertes  $c_{wQ}$  durchführen [4]:

$$c_{wQ} = \frac{W_k (t_2 - t) \cdot g \cdot c_p}{Q_{sec} \cdot v} = \frac{1 - v_a/v_o}{\eta_{th} \cdot \eta_{as}} \quad (3)$$

Der Kennwert  $c_{wQ}$  bildet den, das Kühlerblocksystem charakterisierenden Proportionalitätsfaktor in der Kühlerwiderstandsgleichung des im Flugzeug eingebauten Blockkühlers:

$$W_k = \frac{G}{g} \cdot v_o (1 - v_a/v_o) = \frac{Q \cdot v}{3600 \cdot g \cdot c_p (t_2 - t)} \cdot \frac{(1 - v_a/v_o)}{\eta_{th} \cdot \eta_{as}} \quad (4)$$

Für den Vergleich der Kühlerbauarten untereinander ist eine Betrachtung der-Druckverlust-Widerstandsverhältnisse des Kühlerblocks ausreichend, da der Einfluß des Kühlerfortriebs infolge Lufterwärmung (vergl. Abschnitt III) von der Kühlerbauart nahezu unabhängig ist. Es kann daher bei diesem Vergleich die für den Druckverlust - Kühlungs - Widerstand geltende Beziehung [4]:

$$\frac{v_a}{v_o} = \sqrt{1 - \frac{\Delta p}{q_o}} = \sqrt{1 - c_{wQ} \cdot \eta_{as}^2} \quad (5)$$

herangezogen werden. Somit ergibt sich als Bewertungsgröße für den Blockkühler der Kennwert:

$$c_{wQ} = \frac{1 - \sqrt{1 - c_{wQ}' \cdot \eta_{as}^2}}{\eta_{th} \cdot \eta_{as}} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{c_{wQ}' \cdot \eta_{as}}{\eta_{th}} \quad (6)$$

Der Vergleich der neuzeitlichen deutschen Kühlerblockbauarten für Wasserkühlung hinsichtlich ihres Kühlleistungsbeiwertes  $c_{wQ}$  [2], [3] lehrt, daß der Wasserröhren-Kühler mit ausgedehnter Verrippung, Bauart SKF RR 240, von 175 mm Tiefe, Abb. 2, als zur Zeit günstigste Blockkühler-Bauart bezeichnet werden kann, da dieselbe in bezug auf alle drei für die aerodynamische Eignung maßgebenden Faktoren (Kühlleistungsbeiwert  $c_{wQ}$ , Gewicht und Bautiefe) den an-

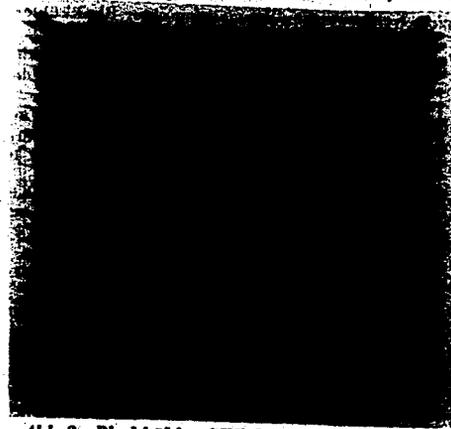


Abb. 2 Blockkühler SKF-RR 240/175 mm tief

<sup>1)</sup> S. Schrifttum.

<sup>2)</sup> Vergl. Ringbuch III A 23.

deren Bauarten teils gleichwertig, teils überlegen ist. Diese Kühlerbauart der Süddeutschen Kühlerfabrik (und ihr entsprechende Bauarten in der Ausführung anderer Firmen) findet z. Z. in Deutschland für Wasserkühlung fast ausschließlich Verwendung.

Abb. 3 enthält die Beiwerte  $c_{wkt}$  und  $\eta_{KA}$  dieser Kühlerbauart in Form einer dimensionslosen Auswertung der AIA-Meßergebnisse [2] in Abhängigkeit von der Reynoldsen Zahl  $Re = \frac{v \cdot l}{\nu}$ . Die Auftragung als Funktion

der Re-Kennzahl ermöglicht die Ablesung der gesuchten Beiwerte  $c_{wkt}$  und  $\eta_{KA}$  für beliebige klimatische und höhenklimatische Flugverhältnisse.

Für die Beiwerte  $c_{wkt}$  und  $\eta_{KA}$  dieser günstigsten Kühlerbauart können folgende Näherungsgleichungen angegeben werden:

$$c_{wkt} = 61 \cdot Re^{-0.2} = 86,5 \left(\frac{v}{v_0}\right)^{0.2} \quad (7)$$

$$C_1 = 1,26 \quad (7a)$$

$$\eta_{KA} = 7,4 \cdot Re^{-0.2} = 10,46 \cdot \left(\frac{v}{v_0}\right)^{0.2} \quad (8)$$

Das Gewicht dieser Kühlerbauart mit Wasserkasten ohne Wasserinhalt kann mit:

$$G_K = 200 \text{ bis } 220 \cdot F_K \text{ in kg} \quad (9)$$

angegeben werden. (Der niedrigere Beiwert gilt für kleinere-Kühler.)

Die in Entwicklung befindlichen neuesten Kühlerbauarten in Leichtmetallausführung (deren Vorteile in der Vermeidung von Kupfer und Zinn, sowie in einem um 30 bis 50 vH. geringeren Gewicht zu suchen sind) weisen in Anpassung an die genannte SKF-Bauart dieselbe Kühleriefe (175 mm) auf. Die Kennwerte ( $c_{wkt}$ ,  $\eta_{KA}$ ,  $C_1$ ) des bisher besten Leichtmetallkühlers stimmen mit denjenigen des SKF-Kühlers (Abb. 3) nahezu überein.

### III. Grundsätzliche Zusammenhänge zwischen Kühlwiderstand, Kühlergröße und den Kühlkennwerten

#### 1. Kühlgeschwindigkeit und Kühlerstirnfläche

Neben der Auswahl und Ausbildung einer hochwertigen Blockkühlerbauart erscheint die Frage der zweckmäßigsten Auslegung des Blockkühlers hinsichtlich der zu wählenden Kühlluftgeschwindigkeit  $v$  (Abb. 1 und 4) (bzw. bei gegebener Fluggeschwindigkeit des Durchflußgrades  $\eta_{ae} = \left(\frac{v}{v_0}\right)$  und damit der Größe der Kühlerblockstirnfläche  $F_K$  von entscheidender Bedeutung für die Größe des Kühlerwiderstandsverlustes.

Aus der Beziehung (1) folgt, daß bei gegebener Kühlerbauart ( $\eta_{KA}$ ), festliegender Kühlluftgeschwindigkeit  $Q = N(Q/N)$  und unverändertem Temperaturgefälle ( $t_k - t$ ) die zusammengehörigen bzw. erforderlichen Kühlerstirn-

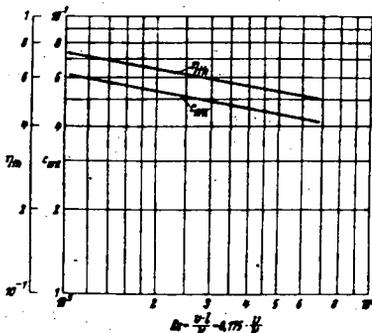


Abb. 3 Kennwerte des Blockkühlers SKF-RR 240/175

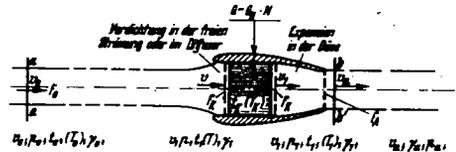


Abb. 4. Druck- und Strömungsverhältnisse des Düsenkühlers

fläche  $F_K$  und Kühlluftgeschwindigkeit  $v$  etwa umgekehrt verhältig sein müssen.

#### 2. Kühlwiderstand infolge Druckverlustes des Blockkühlers

Der Kühlwiderstand, der sich aus dem Druckverlust des Kühlluftstromes im Blockkühler ergibt, berechnet sich (vergl. Abb. 4) nach Impulssatz und Energiegleichung entsprechend Gl. (4) bzw. (4a):

$$W_K = \frac{1}{8600 \cdot g \cdot c_p} \frac{N \cdot Q/N}{(t_k - t)} \cdot v \cdot c_{wK} \quad (4a)$$

Der Kühlwiderstand infolge Druckverlustes im Kühlerblock ist demnach der Kühlgeschwindigkeit  $v$  und dem Kennwert

$$\frac{1 - \sqrt{1 - c_{wkt} \cdot \eta_{ae}^2}}{\eta_{ae} \cdot \eta_{KA}} \text{ verhältig.}$$

#### 3. Kühlungs-Vortriebsseffekt aus der Rückgewinnung der Zylinderverlustwärme im Heißluftprozess des Kühlluftstromes — Der Kühler als Abwärme-Strahlpropeller

Der Einfluß der Kühllufterwärmung im Blockkühler äußert sich in zweifacher Hinsicht: a) der Druckverlustbeiwert des Blockkühlers  $c_{wkt}$  ist bei geheiztem Kühlerblock etwas höher als bei kaltem Kühler (vergl. Gl. 2); b) der Kühlluftstrom durch den geheizten Blockkühler macht einen Heißluftprozess durch, der eine Erhöhung der Austrittsenergie und Austrittsgeschwindigkeit  $v_a$  des Kühlluftstromes, also einen Vortriebsseffekt durch Umsetzung eines Teiles ( $\eta_Q \cdot Q$ ) der Zylinderverlustwärme  $Q$  in Strömungsenergie hervorbringt und damit den Druckverlust-Kühlwiderstand herabsetzt [12]. Der Kühler wirkt also als Strahlpropeller, wobei als Energiequelle die Zylinderverlustwärme des Flugmotors dient. Da der thermische Wirkungsgrad des idealisierten Heißluftprozesses ( $\eta_Q$ ) vom Verdichtungsverhältnis ( $p_0/p$ ) in bekannter Weise abhängig ist, wächst der Vortriebsseffekt mit zunehmendem Druck vor dem Blockkühler, also mit abnehmendem Durchflußgrad  $\eta_{ae}$ , d. h. mit abnehmender Kühlluftgeschwindigkeit  $v$ . Im aerodynamischen Kühler treten demnach zwei Vorgänge energetisch verschiedenen Ursprungs auf: der durch Reibungserscheinungen verursachte Vorgang eines Energieverlustes des Kühlluftstromes, welcher zu einem Kühlwiderstandseffekt führt, und der durch Umwandlung eines Bruchteils der Zylinderverlustwärme in Strömungsenergie bedingte Energiezuwachs der Kühlluftströmung, der einen Kühlungs-Vortriebsseffekt hervorbringt.

#### 4. Der Düsenkühler mit kleinstmöglichem Durchflußgrad als Ziel des Kühlerentwurfes

Für den resultierenden Widerstand des aerodynamischen Blockkühlers ist es hierbei wesentlich, daß der Widerstands- und der Vortriebsseffekt durch Veränderung des Durchflußgrades  $\eta_{ae}$  im für den aerodynamischen Vortrieb gleichen Sinne beeinflusst werden: Vortriebsseffekt und Widerstandseffekt ändern sich beide mit abnehmendem Durchflußgrad im gleichen, günstigen Sinne. Die Bedingungen für niedrigen Kühlwiderstands-Anteil, bzw. für resultierenden Vortrieb sind: Kühler mit niedriger Kühlluftgeschwindigkeit

keit  $\sigma$  (großer Kühlerstirnfläche  $F_k$ ) oder (und) Flugzeugmuster mit hoher Fluggeschwindigkeit.

Zur Erzielung eines niedrigen Druckverlust-Widerstandseffektes und zugleich eines höheren Heißluft-Vortriebseffektes muß daher der Blockkühler in einen Kanal eingebaut werden, dessen Durchflußgrad  $\eta_{ae}$  durch Bemessung bzw. Einstellung des Austrittsquerschnittes (Düse) des Kühlluftkanals hinter dem Blockkühler auf den vom Standpunkt des Gesamtentwurfes geringstmöglichen Wert herabgesetzt wird.

Da die Wahl einer geringen Kühlungsgeschwindigkeit bzw. eines niedrigen Durchflußgrades zu einem Blockkühler mit großer Stirnfläche führt, und eine Vergrößerung des Kühlers (Gewicht! — Raumbedarf! — Einbauschwierigkeiten — Beeinflussungswiderstand) für Hochleistungsflugzeuge ebenfalls schwerwiegende Nachteile nach sich zieht, muß für jedes hochwertige Flugzeugmuster eine Auswahlberechnung der Düsenkühleranlage durchgeführt werden, welche ein Abwägen der beiden Einflüsse (Kühlungswiderstand — Kühlergröße und Kühlergewicht) gegeneinander ermöglicht.

**IV. Kennwerte und Beiwerte des Kühlereinbaues**

Das Gesamtgefälle  $\Delta p$  eines aus dem Flug und Propellerstau gespeisten Kühlerkanals setzt sich zusammen aus dem Flugstaudruck  $q_a$ , dem Propellerstaudruck vor dem Kühler: ( $q_p = a_p \cdot q_a$ ) und dem Unterdruckgefälle der Düsenmündung  $q_{Da} = a_{Da} [q_a (1 + a_p)]$

$$\Delta p = q_a [1 + a_p + a_{Da} (1 + a_p)] \quad (10)$$

Aus dem Gesamtdruckgefälle  $\Delta p$  des Kühlereinbaues müssen der Blockkühlerdruckverlust:  $\Delta p_K = c_{WK} \cdot \frac{\rho}{2} v^3$  sowie die Strömungsverluste im Kühlerkanal:

der Diffusorverlust des Kühlluftstromes:  $\Delta p_d = c_d \cdot \frac{\rho}{2} v^3$  und der Düsenverlust:

$$\Delta p_{Da} = c_{Da} \frac{\rho}{2} v^3 = (1 - \varphi) \cdot \frac{\rho}{2} v_a^3$$

sowie der Geschwindigkeitsdruck des Kühlluftstromes bestritten werden:

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} v^3 (1 + c_d + c_{WK} + c_{Da}) + \delta p_{Da} \quad (11)$$

Das bis zum statischen Druck in der Düsenmündung verbleibende Restgefälle ist das Düsendruckgefälle ( $\delta p_{Da}$ ). Die Abhängigkeit zwischen Kühlluftdurchfluß ( $v$ ), Flugstaudruck  $q_a$ , Durchflußgrad, Düsengefälle  $\delta p_{Da}$  und den Kennwerten ( $a_p$ ;  $a_{Da}$  und Verlustbeiwerten ( $c_d$ ;  $c_{WK}$ ;  $c_{Da}$ ) des Kühlereinbaues wird durch die Beziehungen (12) (13) und (14) dargestellt:

$$\Delta p = q_a [1 + a_p + a_{Da} (1 + a_p)] = \frac{\rho}{2} v^3 (1 + c_d + c_{WK} + c_{Da}) + \delta p_{Da} \quad (12)$$

$$\eta_{ae} = \sqrt{\frac{1 + a_p + a_{Da} (1 + a_p) - \delta p_{Da} / q_a}{\gamma / \gamma (1 + c_d + c_{WK} + c_{Da})}} \quad (13)$$

$$a_{Da} = \frac{1/\gamma_a \cdot \eta_{ae}^2 (1 + c_d + c_{WK} + c_{Da}) + \delta p_{Da} / q_a - (1 + a_p)}{(1 + a_p)} \quad (14)$$

Die Größen  $a_{Da}$ ;  $a_p$  und  $(1 + \Sigma c)$  sind maßgebende Kennwerte des Kühlereinbaues.

Die Verlustbeiwerte des Kühlereinbaues können wie folgt eingesetzt werden:

$$c_d = 0,08 + 0,06 \frac{1 - \eta_{ae}^2}{\eta_{ae}^2} \quad (\text{gute Diffusor- anordnungen})$$

$$c_{Da} = (1 - \varphi) \left( \frac{v_a^2}{v^2} \cdot \frac{\gamma_a}{\gamma} \right) \quad \text{mit } \varphi = 0,975 \text{ für aerodynamisch glatte Düsenmündung}$$

$$c_{WK} = \text{Kühlerblockwiderstandsbeiwert (vgl. Abb. 8. und Gl. (8))}$$

Der Propellerstaubeiwert  $a_p$  kann mit  $\sim 0,08$  für Schnellflug und mit 0,12 bis 0,20 für den Steigflug angenommen werden.

Der Düsenmündungsbeiwert  $a_{Da}$  einer tangential zur äußeren Strömung auslaufenden Düsenmündung beträgt für verlustarmen Kühlluftstrom 0 bis 0,05. Durch eine an der Düsenmündung ausschlagende Spreizklappe werden Beiwerte  $a_{Da}$  bis zu 0,40 bei Spreizklappenwinkeln bis 40° erreicht.

Im Schnellflug und Reiseflug ist zur Erzielung eines niedrigen Kühlungswiderstandes der Durchflußgrad  $\eta_{ae}$  niedrig, die Spreizklappe in 0-Lage ( $a_{Da} = 0$ ;  $p_a = p_e$ ; Abb. 4). Im Steigflug kann durch Ausschlag der Regelklappen der Düsenmündungsquerschnitt vergrößert ( $\delta p_{Da}$ ), verringert und ein Unterdruckgefälle  $a_{Da} > 0$  in der Düsenmündung erzeugt werden ( $a_{Da} = 0$  bis 0,35). Damit kann entsprechend Gl. (12) trotz wesentlich verringerter Bahngeschwindigkeit ( $v_a^2$ ;  $q_a^2$ ) im Steigflug ( $q_a^2 = 0,30$  bis  $0,36 \cdot q_a^2$ ) durch Erhöhung von  $a_{Da}$  und Herabsetzung von  $\delta p_{Da}$  der gewünschte Durchfluß ( $v$ ) aufrechterhalten und ein wesentlich höherer Durchflußgrad erzielt werden.

**V. Auswertung und Darstellung der Kennwerte des Kühlungswiderstandes**

**1. Allgemeiner Fall des eingebauten Blockkühlers**

Die Auswertung des in Abschnitt III, 2, 3 erläuterten Widerstands- und Vortriebseffektes der Kühlluftströmung durch den Blockkühler erfolgt zusammenfassend aus dem Impulsatz Gl. (4), wobei die Düsenaustrittsgeschwindigkeit  $v_a$  mit den Druckverlustbeiwerten und Kennwerten und den Luftzustandswerten ( $T_0$ ,  $p_0$ ,  $\gamma_0$ ) des Kühlereinbaues aus der thermodynamischen Beziehung (15) berechnet wird:

$$v_a = \varphi \sqrt{\eta_{ae}^2 \left(\frac{\gamma}{\gamma_0}\right)^2 + \left[1 - \frac{p_a}{p - (\delta p_K + \delta p_d)}\right]^{\frac{k-1}{k}}} \frac{427 \cdot c_p \cdot (T_0 + \delta t + \delta \delta)}{v_0 / 2 g} \quad (15)$$

mit:  $p = p_0 [1 + A \cdot v_0^2 (1 - \eta_{ae}^2) / 2 g \cdot T_0 \cdot c_p]^{\frac{k}{k-1}}$  (16a)

$$\delta t \approx \frac{v_0^2 (1 - \eta_{ae}^2)}{2000} \quad (15b)$$

$$T = T_0 + \delta t \quad (15c)$$

$$\Delta p' = \Delta p_K + \Delta p_d = (c_d + c_{WK}) \frac{\rho}{2} v^3 \quad (15d)$$

$$\gamma = \frac{p}{29,3 \cdot T} \approx \gamma'; \quad \gamma_0 = \frac{p - \Delta p}{29,3 (T + \delta t)} \quad (15e)$$

Der resultierende Kühlungswiderstand ergibt sich damit zu:

$$W_k = \frac{N \cdot (Q/N) \cdot v}{2000 \cdot g \cdot c_p \cdot (t_k - t)} \quad (16)$$

$$\left[ 1 - \varphi \sqrt{\eta_{ae}^2 \left(\frac{\gamma}{\gamma_0}\right)^2 + \left[1 - \frac{p_a}{p - \Delta p'}\right]^{\frac{k-1}{k}}} \frac{427 \cdot c_p \cdot (T_0 + \delta t + \delta \delta)}{v_0 / 2 g} \right] \frac{1}{\eta_{ae} \cdot \eta_{ka}} \quad (16a)$$

Der Klammersausdruck der Gl. (16a) bildet den dimensionslosen Kennwert  $C_{WQ}$  für den resultierenden Kühlungswiderstand des Kühlereinbaues:

$$C_{WQ} = \left[ 1 - \varphi \sqrt{\eta_{ae}^2 \left(\frac{\gamma}{\gamma_0}\right)^2 + \left[1 - \frac{p_a}{p - \Delta p'}\right]^{\frac{k-1}{k}}} \frac{427 \cdot c_p \cdot (T_0 + \delta t + \delta \delta)}{v_0 / 2 g} \right] \frac{1}{\eta_{ae} \cdot \eta_{ka}} \quad (16a)$$

Die Bemessung des Düsenmündungsquerschnittes  $F_a$  (Abb. 4) erfolgt entsprechend Gl. (17):

$$F_a = \frac{F_k \cdot \eta_{ae} \cdot 1/\gamma_a}{v_a / v_0} \quad (17)$$

mit ( $v_a/v_0$ ) aus Gl. (15).



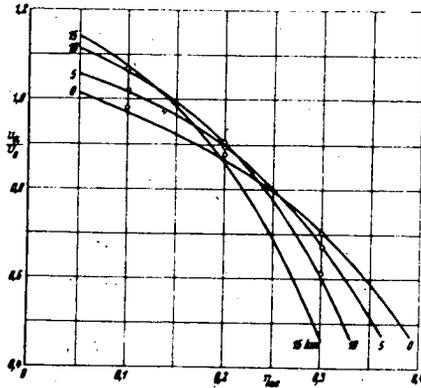


Abb. 7 Geschwindigkeitsverhältnis  $v_a/v_0$  für den Düsenkühler mit Wasserkühlung ( $85^\circ C$ )

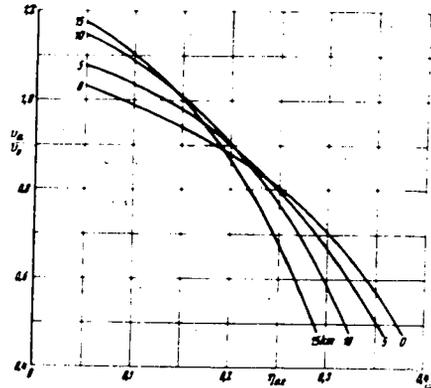


Abb. 8 Geschwindigkeitsverhältnis  $v_a/v_0$  für Düsenkühler mit Druckwasserkühlung ( $105^\circ C$ )

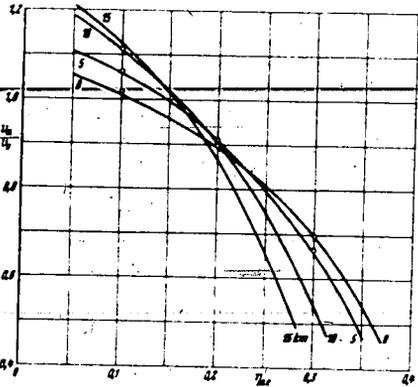


Abb. 9 Geschwindigkeitsverhältnis  $v_a/v_0$  für den Düsenkühler mit Druckwasserkühlung ( $125^\circ C$ )

hältnis  $v_a/v_0$  und für den Kennwert  $C_{wQ}$  des resultierenden Kühlungswiderstandes eines Kühler einbaus ebenfalls empfehlenswert. Diese Näherungsgleichung (vergl. [4]) lautet für  $C_{wQ}$ :

$$C_{wQ} = \frac{1 - \varphi \sqrt{1 - (c_{wk} + c_d) \cdot \eta_{ae}^2 + [1 - \tau_{ae}^2 (1 + c_{wk} + c_d)] \frac{\Delta t}{T}}}{\tau_{th} \cdot \eta_{ae}} \quad (25)$$

Die angenäherte Grenzbedingung für die Widerstandsfreiheit eines Düsenkühler-Einbaus lautet entsprechend:

$$\eta_{ae} = \frac{W_k = 0}{\sqrt{T \left[ c_{wk} + (1 + c_{wk} + c_d) \frac{\Delta t}{T} \right]}} \quad (26)$$

Die aus der Näherungsgleichung (25) gewonnenen Ergebnisse sind bei der zahlenmäßigen Auswertung des Abschnittes VI den Ergebnissen der genauen Gl. (16 a) gegenübergestellt; wie der Vergleich zeigte, sind die Abweichungen entweder verschwindend gering, oder sie bleiben in den für technische Berechnungen zulässigen Grenzen. (Vergl. in Abb. 7 und 9 die Übereinstimmung der Einzelpunkte [Näherungslösung] mit den ausgezogenen Kurven.)

**7. Grenzwert der Vortriebsleistung eines Düsenkühlers als Wärme-Strahlpropeller**

Der Einfluß des Heißluftprozesses des Kühlluftstromes im Düsenkühler wird bei der Ermittlung des resultierenden Kühlungswiderstandes nach den Beziehungen (15), (16 a) und (25) in vollem Maße berücksichtigt. Die Auswertung dieser Beziehungen ist in Abschnitt VI durchgeführt und zeigt, daß die Vortriebsleistung des Düsenkühlers als Wärmestrahpropeller bei Durchflußgraden unter 0,08 bis 0,15 (je nach Flughöhe) größer ist, als der Druckverlust-Widerstand, so daß ein resultierender Kühlungsvortrieb verbleibt. Für die Frage der weiteren Entwicklungsfähigkeit des Düsenkühlers als Wärmestrahpropeller ist die Bestimmung des bestenfalls erzielbaren Grenzwertes der Vortriebsleistung und dessen Abhängigkeit von den maßgebenden Größen von Interesse. Dieser Grenzwert ergibt sich aus der Energiegleichung im Zusammenhang mit dem ersten Hauptsatz der Wärmelehre bei Berücksichtigung des Wirkungsgrades  $\eta$  eines Strahlpropellers zu:

$$N_{Vmax} = \frac{1}{632} \cdot N \cdot Q/N \cdot \eta_Q \cdot \eta \quad (27)$$

Für den Idealprozess der Kühlluft mit adiabatischer Verdichtung und Expansion, sowie Wärmezufuhr unter gleichem Druck ( $\Delta p_k \rightarrow 0$ ) beträgt der thermische Wirkungsgrad:

$$\eta_Q = 1 - \left( \frac{p_a}{p_0 + q_0 (1 - \tau_{ae}^2)} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{v_0^2 (1 - \tau_{ae}^2)}{2000 T} \quad (28)$$

somit

$$N_{Vmax} = N \cdot (Q/N) \frac{v_0^2 (1 - \tau_{ae}^2)}{632 \cdot 2000 \cdot (T_0 + \frac{v_0^2}{2000})} \cdot \frac{2 v_0}{(v_a + v_0)} \quad (29)$$

und als Anteil der Motorleistung:

$$x_{Vmax} = \frac{Q/N}{632 \cdot 2000} \frac{v_0^2 (1 - \tau_{ae}^2)}{(T_0 + \frac{v_0^2}{2000})} \cdot \frac{2 v_0}{(v_a + v_0)} \quad (30)$$

Der Grenzwert des erzielbaren Vortriebsleistungsanteils ist verhältig der im Kühler je Leistungseinheit abgeführten Verlustwärme, annähernd verhältig dem Quadrat der Fluggeschwindigkeit und umgekehrt verhältig der absoluten Lufttemperatur im Verdichtungsendzustand. Der Grenzwert erreicht also im Schnellflug ( $v_0^2$ ) und im Höhenflug ( $1/T_0$ ) die höchsten Werte.

Für den Wasserkühler werden in Bodennähe und im Höhenflug folgende Werte von  $\eta_Q$  und  $x_{Vmax}$  erreicht:

- Wasserkühler,  $Q/N = 300 \text{ kcal/PSH}$ ,  $\eta_{ae} \rightarrow 0$
- Bodennähe,  $v_0 = 100 \text{ m/s}$ ;  $\eta_Q = 1,7 \text{ vH}$ ;  $x_{Vmax} = 1,0 \text{ vH}$
- $v_0 = 200 \text{ m/s}$ ;  $\eta_Q = 6,4 \text{ vH}$ ;  $x_{Vmax} = 8,7 \text{ vH}$
- Höhenflug,  $v_0 = 150 \text{ m/s}$ ;  $\eta_Q = 4,9 \text{ vH}$ ;  $x_{Vmax} = 2,8 \text{ vH}$
- $v_0 = 250 \text{ m/s}$ ;  $\eta_Q = 12,5 \text{ vH}$ ;  $x_{Vmax} = 7,0 \text{ vH}$

Für die erreichbaren Durchflußgrade  $\eta_{ae} = 0,15$  bis 0,3 ist der Vortriebsanteil des Düsenkühlers etwa 10 bis 15 vH. kleiner als diese Grenzwerte.

**VI. Zahlmäßige Auswertung der Kühlungs-widerstands-Kennwerte von Düsenkühlern für Flughöhen von 0 bis 15 km**

Die Auswertung ist für Wasserkühlung (85 bis 125°) am Blockkühler SKF RR 240/175 für Durchflußgrade  $\eta_{ae} = 0,05$  bis  $\eta_{ae}$  für Flughöhen von 0—15 km durchgeführt. Für die Fluggeschwindigkeit sind die Schnellflug-Verhältnisse eines neuzeitlichen Verkehrsflugzeuges (Abb. 6) zugrunde gelegt (100 bis 150 m/s).

Die Strömungsverlustbeiwerte des Kühlereinbaues sind mit  $c_d = 0,05 \cdot (1 - \eta_{ae}^2)/\eta_{ae}^2$ , d. h. 5 vH. des Verdichtungsfallendes für den Diffusorverlust und mit  $\varphi = 0,975$  angesetzt; sie entsprechen den mit gutem Kühler-einbau erzielbaren Verhältnissen. Die Ergebnisse der Auswertungen sind in einer Reihe von Schaubildern zusammengefaßt.

In Abb. 7, 8 und 9 ist die für alle weiteren Auswertungen maßgebende Größe  $v_{a0}/v_0$  in Abhängigkeit vom Durchflußgrad für Wasserkühlung (85°, 105°, 125° C) für vier verschiedene Flughöhen (0—5—10—15 km) aufgetragen. Die Auswertungsergebnisse für die Kennwerte  $C_{w0}$  sind in den Abb. 10, 11 und 12 zusammengefaßt. Der resultierende Kühlungs-widerstand des Düsenkühlers kann, wie aus den Abb. 1 bis 12 hervorgeht, durch Verringerung des Durchflußgrades (Vergrößerung der Kühleroberfläche entsprechend Abb. 14 und 15) beliebig niedrig — ja sogar negativ — gehalten werden. Bei der Auswahl der günstigsten Kühlergröße ( $F_1$ ) bzw. des günstigsten Durchflußgrades  $\eta_{ae}$  müssen jedoch sowohl die durch Abb. 10 bis 12 gegebene Abhängigkeit des Kennwertes  $C_{w0}$  vom Durchflußgrad, als auch die aerodynamischen Nebenverluste und das Kühlergewicht beachtet werden. Die günstigste Düsenkühleranlage wird daher stets eine Kompromißlösung darstellen.

Die Auflösung der Grenzbedingung für Kühlungs-widerstand  $W_k = 0$  ist in Abb. 13 für Wasser- und Glykolkühlung veranschaulicht. Bei Wasserkühlung wird Kühlungsvortrieb bei Durchflußgraden unterhalb  $\eta_{ae} = 0,07$  bis  $0,095$  in Bodennähe und bei  $\eta_{ae} = 0,145$  bis  $0,155$  in 10 km Höhe erzielt. Die entsprechenden Werte für Heißkühlung (125° C) betragen 0,12 und 0,16. Der Grenzwert des Durchflußgrades steigt mit der Flug-

\*) Auf die aerodynamischen Nebenverluste und Beeinflussungswiderstände wurde in dieser auf den Kühlungs-widerstand zugeschnittenen Untersuchung nicht näher eingegangen, da dieselben in hohem Maße von aerodynamischen Größen und gestaltungstechnischen Gegebenheiten des Flugzeugmusters und der jeweiligen Kühleranordnung abhängig sind (verg! [4] und [7]).

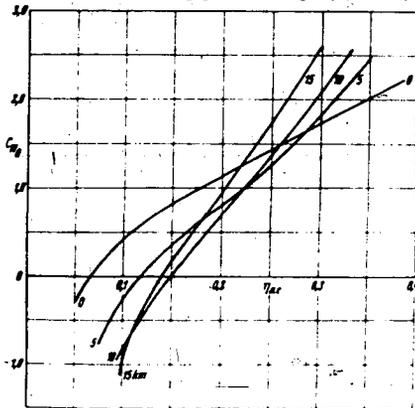


Abb. 10 Kennwert  $C_{w0}$  für den Düsenkühler mit Wasserkühlung (85° C)

höhe bis 11 km an und fällt mit weiter zunehmender Flughöhe wieder ab.

Die Auswertungsergebnisse für den Kennwert  $C_{w0} = f(\eta_{ae})$ , Abb. 10 bis 12, besitzen für alle Düsenkühler mit SKF RR 240/175 Blockkühler (oder gleichwertigem Kühler) und verlustarmem Diffusor und Düse allgemeine Gültigkeit, da der Einfluß der Fluggeschwindigkeit auf den Kennwert  $C_{w0}$  (extreme Abweichungen ausgenommen) vernachlässigbar gering ist. Der Kennwert  $C_{w0}$  erreicht bei Druckwasserkühlung für  $\eta_{ae} = 0,2$  in 0 und 15 km den Wert 1,0 in 5 und 10 km den Wert 0,75; für  $\eta_{ae} = 0,25$  ist  $C_{w0}$  in allen Flughöhen zwischen 0 und 10 km gleich 1,3 bis 1,4; für  $\eta_{ae} = 0,3$  ist  $C_{w0}$  in 0 km am kleinsten (1,75), in 5 km — 1,85; in 10 km — 2,25 und in 15 km — 2,6.

Die Auswertung der Kennwerte  $F_1/N$  und  $x$  kann auf Grund der Beziehungen (23) und (24) für jeden besonderen Fall aus dem Kennwert  $C_{w0}$  vorgenommen werden.

**VII. Gestaltung des Kühlereinbaues**

Von einem hochwertigen Einbau eines Blockkühlers am aerodynamischen Flugkörper (Rumpf, Gondel, Flügel) wird verlangt, daß er keine Störung der Haupt-

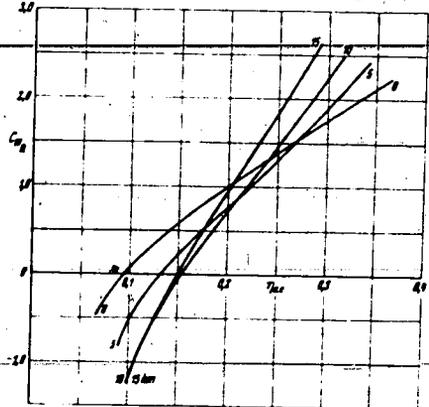


Abb. 11 Kennwert  $C_{w0}$  für den Düsenkühler mit Druckwasserkühlung (105° C)

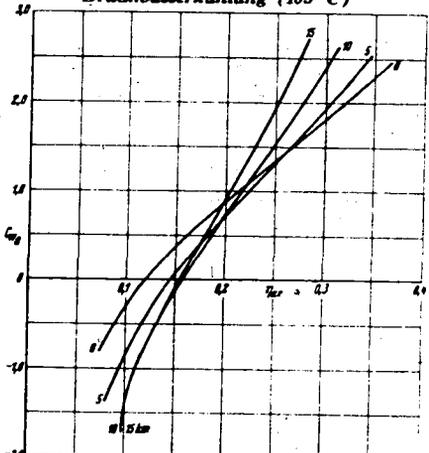
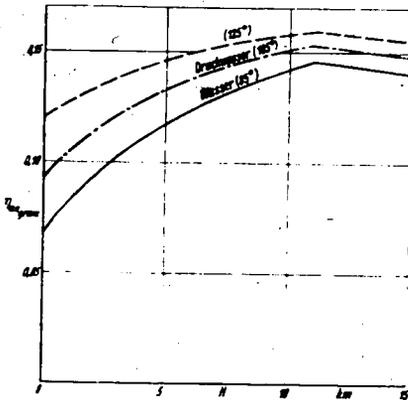


Abb. 12 Kennwert  $C_{w0}$  für den Düsenkühler mit Druckwasserkühlung (125° C)

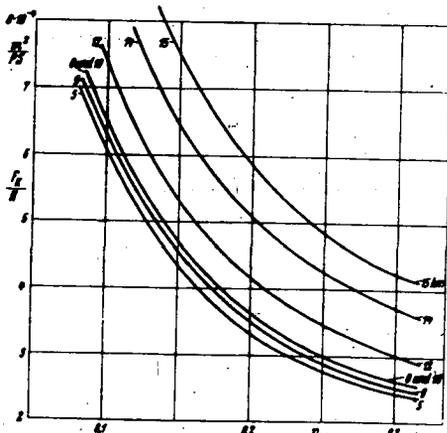
Abb. 13. Grenz-Durchflußgrade für  $W_k = 0$ .

strömung um die aerodynamischen Körper hervorruft, daß Beeinflussungswiderstände und zusätzliche Reibungsflächen vermieden, bzw. auf das geringstmögliche Maß beschränkt bleiben, und daß die Strömungsverluste im Kühlerkanal (Diffusorverlust, Düsenverlust) in zulässigen Grenzen bleiben.

**Kühlereinarbeitung.** Verlustbringende Störungen der Hauptströmung durch den Kühleereinbau und den abgezweigten Kühlluftstrom können entstehen: a) durch vorspringenden Einbau des Kühlers und Kühlluftkanals, b) durch Ablösungserscheinungen und Verwirbelung bei der Verzweigung des Kühlluftstromes vor dem Kühler und beim Zusammenfluß des Kühlluftstromes mit der Hauptströmung hinter dem Kühler, c) durch ausgeschlagene Spreizklappen im Düsenaustrittsquerschnitt.

Die Richtlinien für den Kühleereinbau lassen sich wie folgt kurz zusammenfassen:

1. Der Blockkühler soll möglichst versenkt in Rumpf, Gondel- oder Flügel eingebaut sein, keine eckigen Umrisse haben und eine Kühlerstirnfläche mit großem Breitenverhältnis aufweisen (zwecks Erzielung einer geringen Dicke des Kühlluftstromes senkrecht zur Wand des aerodynamischen Körpers).

Abb. 14. Kühlflächenbedarf  $F_k/N$  für Wasserkühlung ( $85^\circ\text{C}$ ) und  $\nu_{00}$  mit  $\phi_0$  und  $Q/N$  aus Abb. 6

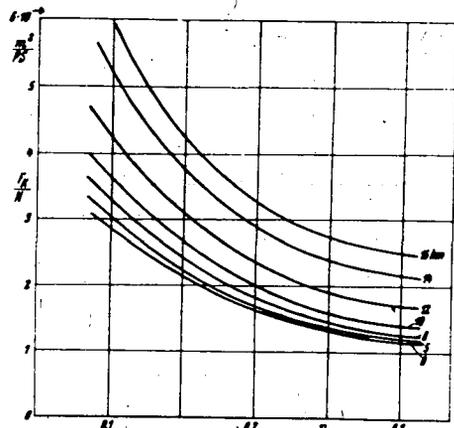
2. Da der Zusammenfluß der Hauptströmung mit der Kühlluftströmung aus der Kühlerdüse immer eine Ablösungserscheinung auslösen kann, soll der Kühler, insbesondere dessen Düse, an Stellen mit geringer Ablösungsgefahr angeordnet sein (Unterseite des Rumpfes, der Gondel; Druckseite des Flügels).
3. Beim Rumpf- oder Gondelbau sollte der Kühler so weit wie möglich nach vorne angeordnet sein, damit der Zusammenfluß des Kühlluftstromes mit der Außenströmung vor dem Hauptspant erfolgt. — Kühleranordnungen, welche diesen Richtlinien weitgehend entsprechen, sind: Der Ringkühler vor dem Motor ([4] S. 24 und 56, [6] S. 45), der Tragflügelkühler ([4] S. 55 und [7]) und der Brustkühler beim V-Motor.

**Kühlerkanal.** Zur Vermeidung größerer Nebenverluste im Kühlerkanal muß der Diffusor mit kleinem Erweiterungswinkel ausgeführt werden, zur Vermeidung zusätzlicher Reibungsflächen nicht zu lang sein und einen Teil der Flugstauverdichtung der freien Strömung überlassen. Der Eintrittsquerschnitt des Diffusors  $F_e$  muß für den Steigflug ( $\alpha_0$ ) ausreichend bemessen sein ( $F_e > v \cdot F_k / v_0$ ). Die Düsenmündung muß frei von allen Störungen auslösenden Strömungshindernissen sein.

**Regelung.** Die kühlfluftseitige Regelung des Düsenkühlers soll zur Vermeidung von Druck- und Widerstandsverlusten im Schnellflug als Düsenregelung, nicht als Drosselregelung ausgeführt werden. Die Spreizklappenregelung im Düsenaustrittsquerschnitt ermöglicht bei zweckmäßiger Anordnung der Drehachse der Spreizklappen eine gleichzeitige Veränderung des Düsenmündungsquerschnittes (Beeinflussung von  $\delta p_{Da}$ ) und des Düsenmündungsdruckes (Beeinflussung von  $\alpha_{Da}$ ). Die Spreizklappe ist daher das gegebene Regelorgan für einen Düsenkühler mit knapp bemessenem Blockkühler. Bei reichlich bemessenem Blockkühler ist eine Düse mit Schiebewand ([4], Abb. 20) vorzuziehen, da hierbei ein zusätzlicher Widerstand der Regeleinrichtung einschließlich Beeinflussungswiderstand vermieden wird.

### Zusammenfassung

Die Untersuchung der grundsätzlichen Fragen der Düsenkühlung mit Blockkühlern führt zunächst zur Definition eines Kennwertes, der einen Maßstab für die Eignung der Kühlerbauart für aerodynamische Zwecke

Abb. 15. Kühlflächenbedarf  $F_k/N$  für Druckwasserkühlung ( $125^\circ\text{C}$ ) und  $\nu_{00}$  mit  $\phi_0$  und  $Q/N$  aus Abb. 6

liefert. Ferner wird gezeigt, daß sowohl der Widerstandseffekt als auch der Vortriebsseffekt eines Düsenkühlers durch Verminderung des Durchflußgrades  $n_{d_2}$  in einem für den aerodynamischen Vortrieb günstigen Sinne beeinflusst werden, so daß Düsenkühler mit höherer Fluggeschwindigkeit und größerer Kühlerstirnfläche günstigeren Kühlwiderstand bzw. Vortrieb erzielen und der Düsenkühler mit kleinst möglichem Durchflußgrad das Ziel darstellt. Unter Verwendung von Beiwerten für den Diffusor und Düsenverlust werden genauere und angenäherte Beziehungen für den resultierenden Kühlwiderstand bzw. -vortrieb und für die Grenzwerte des Durchflußgrades angegeben und zahlenmäßig ausgewertet, wobei die Ergebnisse in Form der allgemein verwendbaren Kennwerte  $v_a/v_0$  und  $C_{w0}$  in Abhängigkeit vom Durchflußgrad für verschiedene Flughöhen dargestellt sind. Die Ergebnisse der Auswertung zeigen, daß bei Kühlmitteltemperaturen von 105 bis 125° C Kühlertrieb bei Durchflußgraden unter 0,15 zu erwarten ist. Die Frage der Gestaltung eines verlustarmen Kühlereinbaues wird grundsätzlich erörtert und hierbei auf den Ringkühler als günstige Einbauf orm hingewiesen. Auf Grund eines Darstellungsverfahrens des Kühlluftprozesses im Entropiediagramm wird ein anschauliches und einfaches graphisches Auswertungsverfahren für den Düsenkühler angegeben.

#### Schrifttum

- [1] Lorenz, Wärmeabgabe und Widerstand von Kühlerelementen. AIA 1933.
- [2] Linke, Friedrichs, Untersuchung über die Güte neuer Kühlerelemente. FB 458/1/2.
- [3] Linke, Entwicklung und Vergleich neuer Kühlerelemente. FB 967/1/2.
- [4] Schlupp, Theorie, Gestaltung und Entwurf des Düsenkühlers. FB 880.
- [5] Sabel, Leichtmetall Motorenkühler, Bauart DVL. FB 1101.
- [6] LGL, Tagungsheft, Kühlungstagung: III 1937.
- [7] Sabel, Untersuchungen an einem an der Flügeldruckseite eingebauten Blockkühler. FB 1047.
- [8] Linke, Friedrichs, Systematische Messungen an Düsenkühlern. FB 786/1/2.
- [9] Sabel, Die Bemessung von Motorenkühlern im Höhenflug. FB 783/1/2.
- [10] Weinig, Der Düsenkühler unter idealisierenden Annahmen. FB 7 0/1/2.
- [11] Göthert, Der Luftwiderstand von Flugzeugkühlern. FB 839/2.
- [12] Meredith, ARC. R. & M. 1683.
- [13] Weldon Worth Cooling Problems of Aircraft Engines. SAE Journal 1937.
- [14] Weise, Energieumsetzung im Kühler. Hauptvers. LGL. 1937, Gesammelte Vorträge der Hauptversammlung 1937 der Lilienthal-Gesellschaft für Luftfahrtforschung, S. 269.

Abgeschlossen am 1. April 1940