

ICAS Paper No. 68-12

HEISSGAS-REZIRKULATIONSMESSUNGEN AN VIER WIND-
KANALMODELLEN EINER EINFACHEN VTOL-KONFIGURATION

by

Rudolf Jenny
Eidgenössische Technische Hochschule
Zürich, Switzerland

**The Sixth Congress
of the
International Council of the
Aeronautical Sciences**

DEUTSCHES MUSEUM, MÜNCHEN, GERMANY / SEPTEMBER 9-13, 1968

Preis: DM 2.00

13

1952

THE FIRST CONFERENCE
OF THE
INTERNATIONAL COUNCIL OF THE
AGRICULTURAL SCIENCES

1952

HEISSGAS-REZIRKULATIONSMESSUNGEN AN VIER VERSCHIEDEN GROSSEN MODELLEN EINER EINFACHEN VTOL-KONFIGURATION

Rudolf Jenny Dr.ing.
Versuchs- & Forschungsanlagen,
Eidg. Flugzeugwerk Emmen, Schweiz.

Uebersicht

Bei strahlgestützten Senkrechtstartern ist die Untersuchung des Rezirkulationsverhaltens ein wichtiges Problem, welches bis heute überhaupt nur durch Modellversuche gelöst werden konnte.

Die Versuchstechnik, die bei solchen Studien verwendet werden soll, ist weitgehend bekannt, jedoch bleiben noch immer eine Anzahl Fragen offen, welche angesichts der Bedeutung solcher Versuche unsere volle Aufmerksamkeit verdienen.

Die vorliegende Arbeit berichtet über Messungen an einer einfachen VTOL-Konfiguration, welche den Einfluss der Windkanalgrösse und der Strahltemperatur auf die Rezirkulation zum Gegenstand hat. Die Art und Weise, wie diese Versuche geplant und durchgeführt wurden, geht auf eine Serie von Messungen zurück, bei der die Transition eines Senkrechtstartermodells im Windkanal untersucht wurde.

Die durchgeführte Untersuchung zeitigte folgende Ergebnisse:

Die Grösse des Modells im Verhältnis zum Windkanal kann einen störenden Einfluss auf die Messgenauigkeit haben, indem bei einem zu grossen Modell der Windkanal das Strömungsfeld nicht richtig simulieren kann. Bei grossen Modellen muss daher das Staudruckverhältnis q_A/q_∞ begrenzt werden, so dass der Bodenstrahl immer deutlich innerhalb des Windkanals zu liegen kommt. Unterlagen über die zulässigen Strahldurchmesser werden mitgeteilt.

Die Höhe der Austrittstemperatur der simulierten Triebwerkstrahlen hat nicht nur einen Einfluss auf das Fernfeld der Rezirkulation, sondern auch auf das Nahfeld. Hohe Strahltemperaturen bewirken eine stärkere Vermischung des Strahles mit der kalten Umgebung, so dass neben der Mischtemperatur auch der Staudruck im Strahl schneller abfällt als beim kalten Strahl. In vielen Fällen dürften daher die mit kleinen Temperaturen durchgeführten Versuche zu eher pessimistischen Resultaten führen.

Einleitung

Mit der Entwicklung leistungsfähiger Strahltriebwerke ist prinzipiell die Voraussetzung eines strahlgestützten Startens und Landens von VTOL-Flugzeugen geschaffen. Leider sind diesem Prinzip einige grundlegende Schwierigkeiten eigen, nämlich die meist unerwünschten Sekundäreffekte der Strahlen wie:

- induzierte aerodynamische Auftriebsverluste
- Heissgasrezirkulation
- Bodenerosion

Diese Nebenwirkungen der Triebwerkstrahlen können für eine Projektstudie von solcher Bedeutung sein, dass bereits in einem sehr frühen Stadium möglichst genaue quantitative Unterlagen darüber notwendig sind. Da die Grösse dieser Effekte stark von der Anordnung der Triebwerke und der Form des Flugzeuges (Tragflächen, Triebwerkeinläufe etc.) abhängen, müssen diese Unterlagen heute noch für jede neue Projektkonfiguration neu geschaffen werden. Es drängt sich daher auf, diese Effekte an kleinen Modellen im Windkanal zu untersuchen.

Nachfolgend wollen wir uns mit der Problematik solcher Windkanalversuche befassen und uns auf die Durchführung von Rezirkulationsmessungen beschränken.

Wir wissen aus der klassischen Modellversuchstechnik, dass Modellversuche überhaupt möglich sind, weil gewisse Strömungsvorgänge nicht von den Dimensionen der um- oder durchströmten Körper abhängen und weil sich für verschieden grosse Modelle physikalisch ähnliche Effekte (z.B. Kräfte) ergeben. Es zeigte sich, dass die Modelldimensionen oder eine der am Vorgang beteiligten Grössen nicht beliebig verändert werden dürfen, ohne dass sich der Charakter der Strömung ändert. Man denke nur an die Reynoldsche Zahl oder die Machzahl. Glücklicherweise dürfen für grosse, relativ scharf abgegrenzte Bereiche dieser Zahlen die Strömungen als ähnlich angesehen werden. Die praktische Konsequenz davon ist, dass nicht alle Kennzahlen gleichzeitig in Modell und Ausführung gleich zu sein brauchen. Diese Freiheit ist erst Voraussetzung

für brauchbare Modellversuche mit erträglichem Aufwand. Bei Versuchen mit strahlgestützten Senkrechtstartern gelten natürlich diese Modellgesetze für die üblichen Untersuchungen weiter. Durch die Anwesenheit der heissen, turbulenten Gasstrahlen der Hubtriebwerke werden die Verhältnisse insofern komplizierter, als zur richtigen Simulation der Strömungsfelder noch diejenige der Temperaturfelder hinzukommt.

In England, wo schon früh Heissgas-rezirkulationsmessungen an Modellen durchgeführt wurden, haben die interessierten Firmen zusammen mit dem National Gas-turbine Establishment (NGTE) Untersuchungen prinzipieller Art über die wichtigen Modellgesetze durchgeführt (2). Trotz dieser grundlegenden Arbeiten scheint die Frage, ob für solche Versuche die Strahltemperaturen in der richtigen Höhe simuliert werden müssen, oder ob Temperaturen von 200 bis 300°C genügen, noch nicht ganz entschieden. Ein Teil der vorliegenden Arbeit befasst sich ebenfalls mit dieser Frage und versucht, einen neuen Aspekt aufzuzeigen.

Bei konventionellen Modellversuchen wissen wir weiter, welchen Einfluss die Grösse des Windkanals auf die Resultate hat. Dank weitgehender Kenntnis der Strömungsmechanismen können in diesem klassischen Fall Korrekturen für die Uebertragung auf die Grossausführung berechnet werden. Dieses Verständnis der Vorgänge bei Rezirkulationsversuchen fehlt uns heute noch, so dass dem Versuchingenieur noch immer alle Richtlinien für die Auswahl der für seinen Kanal zulässigen Modellgrösse fehlen. Durch die vorliegende Arbeit soll versucht werden, einige Anhaltspunkte darüber zu erhalten.

Problemstellung

Nachdem verschiedene Projekte von Senkrechtstartern bereits in das Stadium der Flugerprobung getreten sind, besitzt man nun die Möglichkeit, ältere Windkanalmessungen mit Flugmessungen zu vergleichen. Damit konnten einige äusserst wertvolle Erfahrungen gesammelt werden, so dass man heute zu wissen glaubt, wie Rezirkulationsmessungen durchgeführt werden müssen. Diese immer noch sehr beschränkte Erfahrung ändert jedoch nichts an der Tatsache, dass unsere Kenntnisse über die tatsächlichen Vorgänge noch sehr unvollkommen sind. Dies zeigt sich auch darin, dass bis heute noch kein brauchbares mathematisches Modell besteht, um Rezirkulationen für noch so einfache Konfigurationen zu berechnen. Ein Projektteam wird daher noch längere Zeit ausschliesslich auf die Durchführung von Windkanalversuchen angewiesen sein. Dies scheint uns weitere

Anstrengungen zu rechtfertigen, um die Versuchstechnik zu vervollkommen.

Wir wollen aus dem Katalog der mehr oder weniger gelösten Fragen zwei herausgreifen. Es sind dies:

- Untersuchung über die zulässige Modellgrösse für einen gegebenen Windkanal.
- Einfluss der Strahltemperaturen auf die Rezirkulation.

Diese Effekte sollen an einer möglichst einfachen Versuchseinrichtung untersucht werden. Es war naheliegend, dazu die einfachste VTOL-Konfiguration, nämlich die eines isolierten, senkrecht auf den Boden ausblasenden Triebwerkes zu verwenden. Da beide Probleme auf der Impulswirkung des Strahles beruhen, scheint diese Konfiguration den wichtigsten Anforderungen zu genügen. Sie hat zudem den Vorteil, dass die sogenannten "Aufströmungen", die bei mehrstrahligen Konfigurationen oft für die Rezirkulation ausschlaggebend sind, nicht existieren. Dadurch treten die gesuchten Effekte deutlich hervor.

Als weiteren, nicht zu unterschätzenden Vorteil dieser Konfiguration sind die einfachen, leicht überblickbaren Strömungsverhältnisse anzusehen.

Dagegen bedeutet die sehr kleine Rezirkulation dieser Anordnung einen messtechnischen Nachteil, den wir dadurch etwas zu korrigieren suchten, dass wir uns auf den kleinen Bodenabstand $h/D_A = 1,25$ festlegten.

Der Vorgang des Startens oder Landens kann in zwei Phasen unterteilt werden. Die erste beginnt mit dem Einschalten der Motoren und endet bei einer noch kleinen Vorwärtsgeschwindigkeit, etwa charakterisiert durch das Staudruckverhältnis q_A/q_∞ von 10'000. Rezirkulationsmessungen werden in dieser Phase meist an ruhenden Modellen ohne Anblasung durchgeführt.

Die zweite Phase umfasst die höheren Fluggeschwindigkeiten und muss an bewegten Modellen oder im Windkanal untersucht werden.

Während sich die englischen Messungen im allgemeinen eher auf die erste Phase beziehen, entsprechen die Messungen, die hier durchgeführt wurden, der Problemstellung der zweiten Phase.

Die Frage, welchen der beiden Techniken, Bewegen des Modells oder Anblasen im Windkanal der Vorzug zu geben ist, soll hier nicht erörtert werden. Die weiter unten beschriebenen Messungen wurden ausschliesslich in Windkanälen und mit ruhendem Boden durchgeführt. Wir glauben nicht, dass der feststehende Boden die Resultate der vorliegenden Studie wesentlich beeinflusst.

Einfluss der Modellgrösse. Um die Wirkung verschieden grosser Strahldurchmesser auf

die Rezirkulation zu untersuchen, wurden vier verschieden grosse Triebwerkmodelle, deren Grössen sich wie 1:2:3:4 verhielten, angefertigt. Die Untersuchung wurde in zwei Windkanälen verschiedener Grösse durchgeführt. Dadurch ergaben sich folgende Verhältnisse von halber Kanalbreite zu Strahldurchmesser $B/2D_A$:

D_A (mm)	20	40	60	80
Kanal 2,4x1,7m	60	30	20	15
Kanal 7x5m	58	44

Einfluss der Strahltemperatur. Die Auswirkung verschieden hoher Strahltemperaturen auf die Rezirkulation sollte an derselben Konfiguration, jedoch nur mit einem Strahldurchmesser D_A und an einem Beispiel des Staudruckverhältnisses q_A/q_∞ untersucht werden. Die zur Aufheizung der Luft zur Verfügung stehende Brennkammer erlaubte Strahltemperaturen zwischen 200°C und 1000°C zu simulieren. Die Strahlgeschwindigkeit entsprach einem Staudruck von $q_A = P-p = 450\text{kp/m}^2 = \text{konstant}$.

Versuchseinrichtung

Die ausgewählte einfache VTOL-Konfiguration bestand im wesentlichen aus einem einzelnen simulierten Triebwerk. Figur 1 zeigt im Schnitt den Aufbau des Modells. Durch ein senkrechtes Rohr wurde Druckluft durch eine Düse mit einem Kontraktionsverhältnis von $\kappa = 1,28$ ausgeblasen. Eine vorgeschaltete Triebwerksbrennkammer erlaubte, die Lufttemperatur in weiten Grenzen zu verändern. Die triebwerkartige Verschalung, welche die Aussenkontur des Triebwerkes etwas nachbilden sollte, bestand aus Keramik und bildete am oberen Ende den Einlauf zu unserem Modelltriebwerk. Durch diesen Einlauf konnte mit Hilfe eines zur Ausblasleitung konzentrisch angeordneten Absaugrohres Luft abgesaugt und damit die Senkewirkung des Triebwerkes simuliert werden. Einige der Versuche waren mit zum Teil sehr hohen Temperaturen geplant, so dass die der Brennkammer nachgeschalteten Elemente aus zunderfreiem Material gefertigt werden mussten. Durch doppelwandige Ausführung des inneren Zuleitungsrohres wurde eine zu starke Abkühlung der Luft vor dem Austreten aus der Düse verhindert. Dank dieser Isolation ergab sich auch ein relativ "völliges" Temperaturprofil.

Der Boden wurde aus 2mm dicken Schwarzblechtafeln zusammengesetzt. Die Blechplatten ruhten auf Abkantprofilen etwa 30cm hoch über dem eigentlichen Kanalboden. Durch diese Bauweise wurde eine wirksame Kühlung der heissen Regionen des Bodens durch die Kanalluft erreicht. Ebenso verringerte sich dadurch die Versperrung des Windkanals auf ein Minimum.

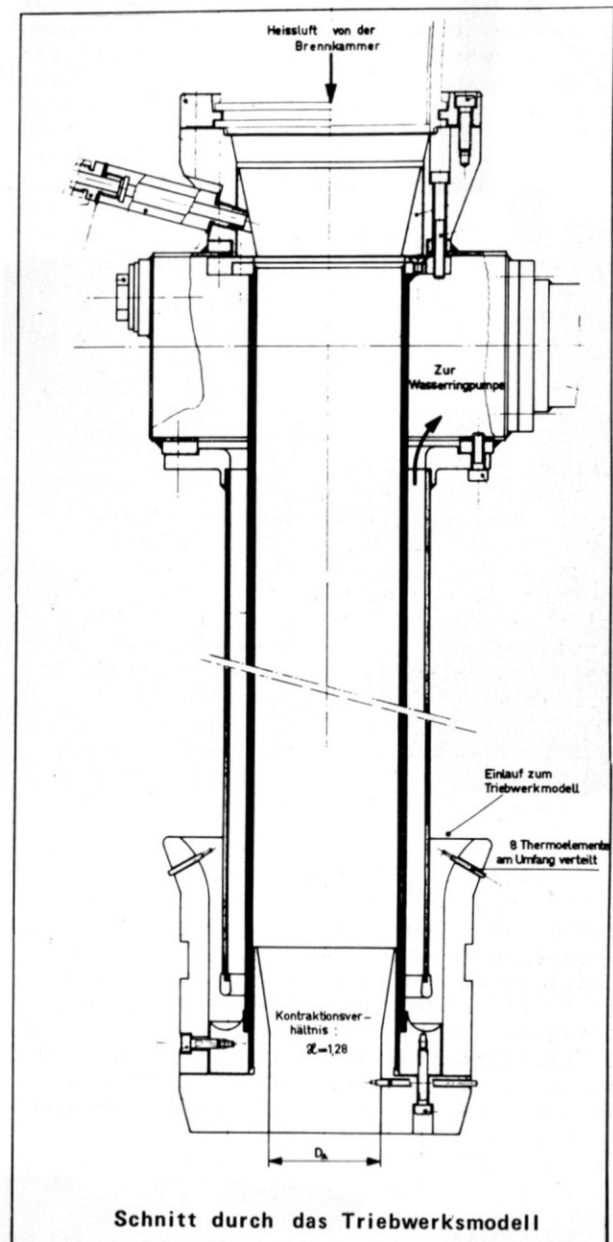
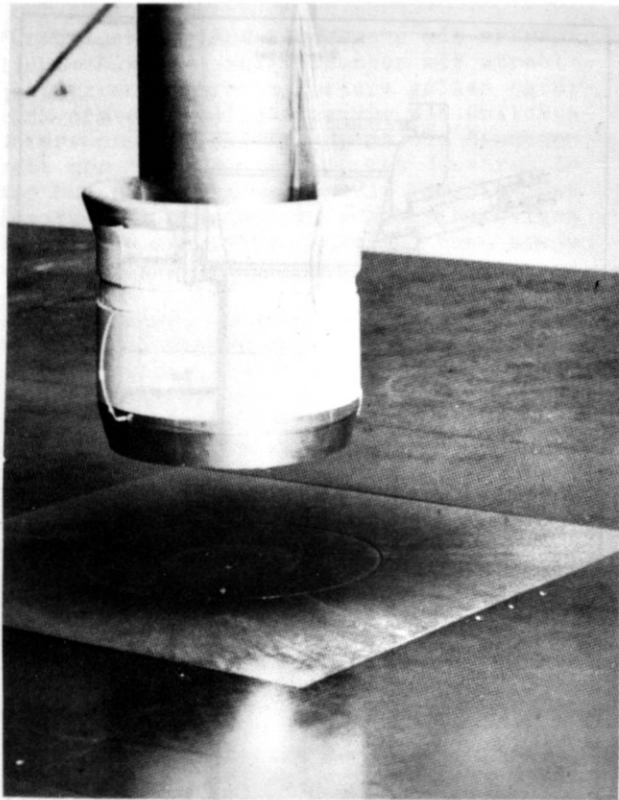


FIG. 1

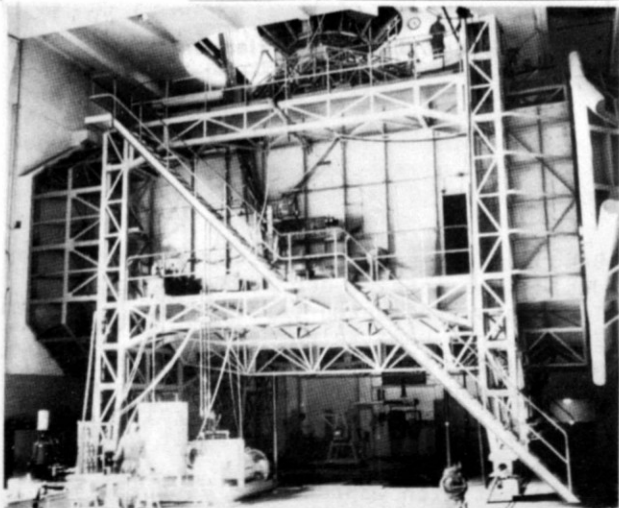
Besondere Massnahmen sollten ein Verwerfen des Bodens infolge der teilweise grossen Temperaturgradienten verhindern. Zu diesem Zweck wurde unmittelbar unter der Düse eine Platte aus rostfreiem Stahl mit den Abmessungen $40 \times 40\text{cm}$ in den Boden eingesetzt. Sie wurde nur lose aufgelegt und war mit einem umlaufenden Spalt von ca. $0,5\text{mm}$ versehen.

Es hat sich während der Versuche mit den hohen Temperaturen gezeigt, dass eine weitere Unterteilung dieser Platte notwendig war, um die durch Wärmespannungen verursachten Deformationen in Grenzen zu halten. Im Zentrum der innersten Platte, d.h. senk-



ANSICHT DES MODELLTRIEBWERKES
FIG.2

recht unter der Achse der Düse, befanden sich die Totaldruck- und Temperaturmessstellen, welche das Messen der Strahlparameter erlaubten. Diese einfache Messanordnung war dank des kleinen Bodenabstandes möglich, da die Messeinrichtung noch sicher im Kern des Strahles lag. Zur genauen Messung des Totaldruckes musste darauf

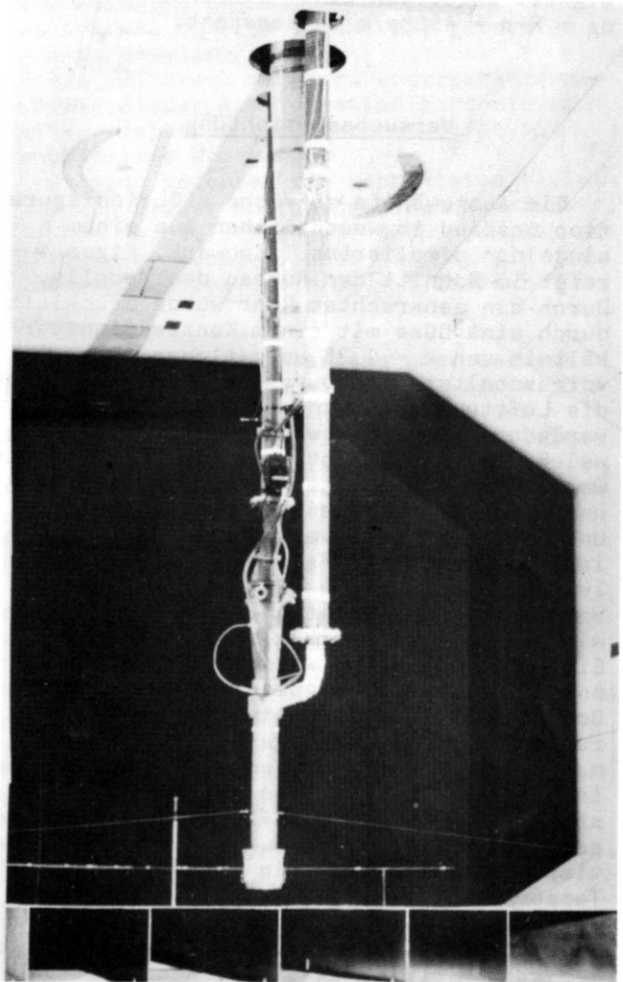


ANSICHT DES 7x5m WINDKANALS
FIG.3

geachtet werden, dass die Sonde genau in den Staupunkt zu liegen kam. Zu diesem Zweck wurden um diese Messtelle vier weitere Druckmesstellen auf einem Kreis angeordnet, welche ein aerodynamisches Zentrieren auf den Strahl ermöglichten.

Die Temperatur der abgesaugten Luft wurde an acht am Umfang der Einlaufklappe verteilten Thermoelementen gemessen. Der Einfachheit halber wurden nicht die Temperaturen der einzelnen Messtellen, sondern deren arithmetisches Mittel als Rezirkulation bezeichnet und in den Diagrammen aufgetragen.

Bei der Wahl der Thermoelemente wurde besonders darauf geachtet, dass sie möglichst trägheitsfrei der Temperatur der Absaugluft folgten. Dies wurde erreicht durch die Wahl sehr dünner, nicht verdrehter 0,1mm Konstantan-Nickel Elemente, die möglichst ohne "Perle" am Ende verschweisst wurden. Mit Hilfe derselben Art von Thermoelementen wurde auch die Umgebungs- bzw.

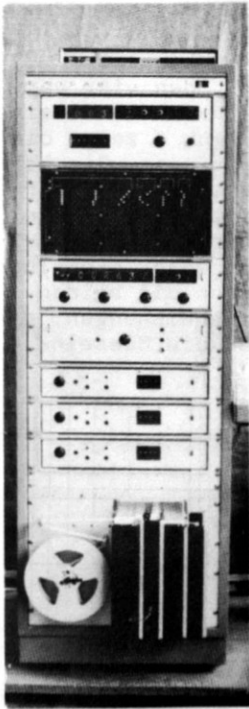


VERSUCHSEINRICHTUNG IM
7x5m WINDKANAL EINGEBAUT
FIG.4

Kanaltemperatur gemessen. Besonders hier hat es sich als äusserst wichtig gezeigt, dass die Thermoelemente eine kleine Zeitkonstante aufwiesen, so dass auch bei den kleinen Strömungsgeschwindigkeiten im Windkanal die Umgebungstemperatur praktisch verzögerungsfrei gemessen werden konnte.

Die Messung der abgesaugten und der ausgeblasenen Luftmengen wurde mit Hilfe zweier identischer Messtrecken, welche in den entsprechenden Leitungssystemen eingebaut waren, in einfacher Weise vorgenommen und in Übereinstimmung gebracht.

Wir haben die ganze Versuchsserie mit einem Massenverhältnis $\dot{m}_A/\dot{m}_E = 1$ durchgeführt, wobei \dot{m}_A die in die Brennkammer eintretende Luftmenge bedeutet. Damit haben wir uns möglichst genau an die in Wirklichkeit herrschenden Verhältnisse gehalten, obschon früher durchgeführte Messungen gezeigt haben, dass eine Abweichung von $\pm 50\%$ keinen wesentlichen Einfluss auf die Rezirkulation hat.



DATENERFASSUNGSSYSTEM
VIDAR 5202 D-DAS
MIT INTEGRIERENDEM
DIGITALVOLTMESSER
FIG.5

Die Messungen wurden in den beiden Unterschall-Windkanälen des Flugzeugwerkes Emmen durchgeführt. Der kleine Windkanal besitzt einen geschlossenen Kreislauf, aber eine offene Messtrecke mit einem Querschnitt von $2,4 \times 1,75\text{m}$. Der grosse Kanal von $7 \times 5\text{m}$ (siehe Fig.3), in welchem Geschwindigkeiten bis zu 80m/sec . möglich sind, wurde für diese Versuche mit der geschlossenen Messtrecke verwendet. Figur 4 zeigt die Versuchseinrichtung im grossen Windkanal eingebaut.

Die Temperaturen wurden mit einer digitalen Datenerfassungsanlage gemessen. Von den 100 zur Verfügung stehenden Messtellen

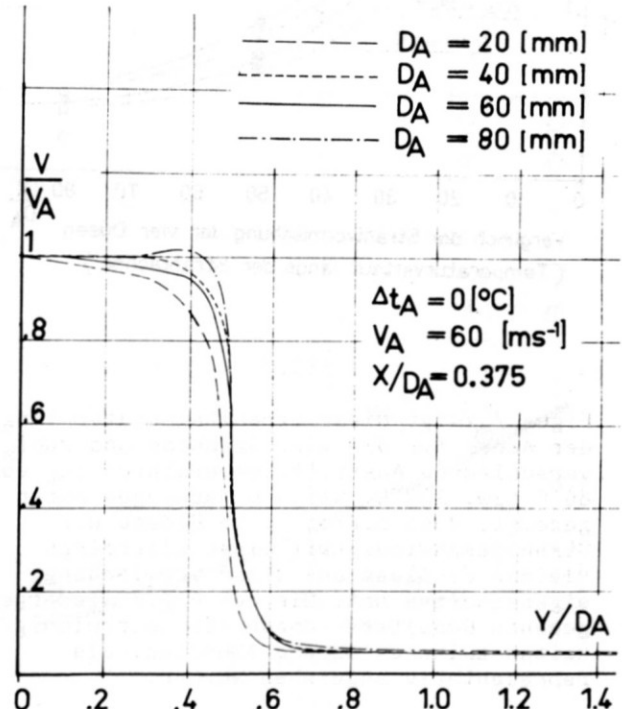
wurden für die Versuche nur deren 15 verwendet. Figur 5 zeigt die Datenerfassungsanlage im heutigen Ausbauzustand. Die Bildung des zeitlichen Mittelwertes der anstehenden Messsignale erfolgt im Integrationsvoltmeter. Die beliebig einstellbare Integrationszeit erlaubt die Anpassung der Messeinrichtung an den Frequenzgehalt des Messsignals.

Dank des äusserst empfindlichen Voltmeters und der gut definierten zeitlichen Mittelwertbildung durch Integration der Messsignale kann eine gute Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit erreicht werden.

Vorversuche

Im Hinblick auf den Vergleich der Rezirkulationsmessungen an den vier verschiedenen grossen Modellen wurden in einem Vorversuch die Vermischungseigenschaften der vier Strahlen untersucht.

Es schien uns für unsere Belange weniger von Bedeutung, dass die Geschwindigkeitsprofile und damit die Vermischungseigenschaften genau mit den theoretischen oder jenen eines bestimmten Triebwerkes übereinstimmen, als dass sie vielmehr unter sich streng ähnliche Verhältnisse aufwiesen.



Geschwindigkeitsprofile am Austritt aus den
vier Modelltriebwerken
Fig. 6

Diese Untersuchung wurde am Freistrahler der vier Düsen in ruhender Luft durchgeführt. Figur 6 zeigt im Falle kalter Ausblasung das Geschwindigkeitsprofil in kurzem Abstand vor der Düse $x/D_A = 0,37$.

Die vier Geschwindigkeitsprofile zeigen nur geringfügige Abweichungen, welche wahrscheinlich vom verschiedenen grossen Anteil der Grenzschicht an den vier Strahlen herrühren. Durch eine etwas höhere Kontraktion κ hätten diese Unterschiede noch weiter verkleinert werden können. Somit konnten gleiche Vermischungseigenschaften aller vier Düsen erwartet werden. Um dies nachzuweisen, wurde der Luftstrahl aufgeheizt und der Temperaturabfall in der Strahlachse gemessen.

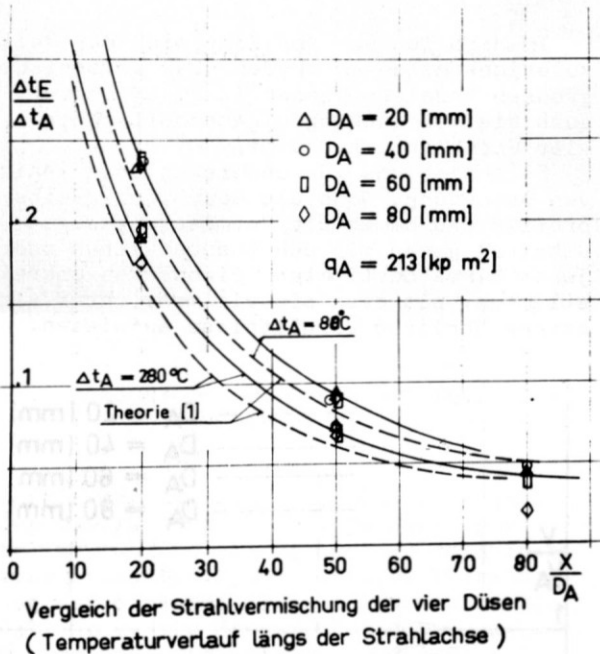


FIG. 7

Figur 7 zeigt diese Strahltemperatur längs der Achse für die vier Strahlen und zwei verschiedene Austrittstemperaturen Δt_A von 80°C bzw. 280°C . Weitere Messungen haben gezeigt, dass die absolute Grösse der Strahlgeschwindigkeit einen allerdings kleinen Einfluss auf diese Vermischungseigenschaften hat. Die auf Fig. 7 wiedergegebenen Resultate können für Geschwindigkeiten zwischen 30 und 120 m/sec. als repräsentativ angesehen werden.

Hingegen erkennt man bereits aus diesem Resultat, dass die Höhe der Strahltemperatur am Austritt einen Einfluss auf die Maximaltemperatur in einem Schnitt x/D_A ausübt. Diese Eigenschaft heisser Strahlen ist bekannt. Eine halb empirische Theorie, welche den Temperaturverlauf im einfachen Rundstrahl zu berechnen erlaubt, kann z.B. bei ABRAMOVICH (1) nachgelesen werden. Die

in Fig. 7 gestrichelt eingetragenen Kurven geben den Temperaturverlauf wieder, wie er nach dieser Theorie berechnet wurde.

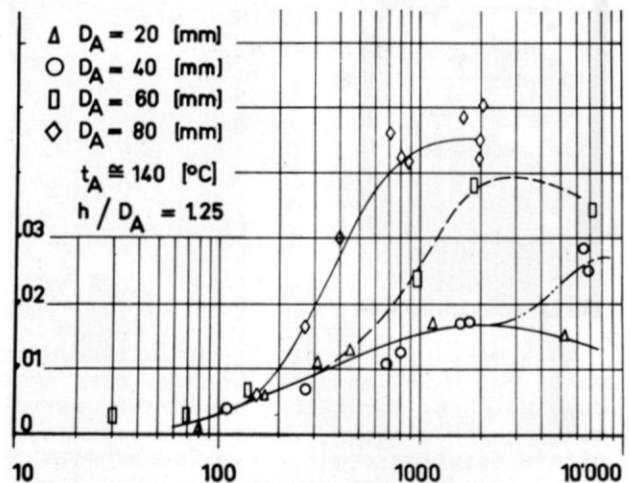
Dieses Ergebnis scheint uns von Bedeutung. Wir werden später nochmals auf dieses Resultat zurückkommen.

Wir schliessen aus den Ergebnissen dieser Voruntersuchung, dass die vier Modelltriebwerke bei gleichen Strahltemperaturen mit genügender Genauigkeit geometrisch ähnliche Freistrahler mit gleichen Vermischungseigenschaften ergeben. Damit ist Gewähr geboten, dass Unterschiede in der Rezirkulation bei der Messung des Kanaleinflusses aus den Grössenverhältnissen herrühren müssen und nicht in den Strahlen selbst begründet sein können.

Resultate

Einfluss der Grösse des Windkanales.

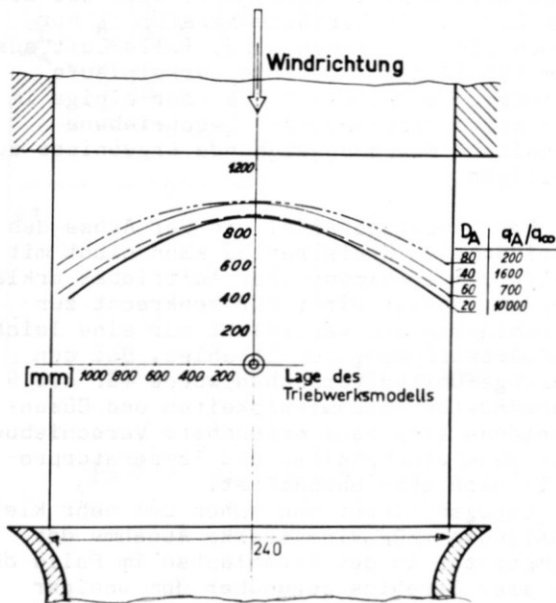
Die ersten Messungen mit den vier verschieden grossen Modellen wurden im kleinen Windkanal durchgeführt. Figur 8 zeigt die dabei erhaltenen Rezirkulationen. Die beiden kleineren Modelle (Strahldurchmesser $D_A = 20\text{mm}$ bzw. 40mm) ergaben im grössten Teil des Bereichs der untersuchten Staudruckverhältnisse q_A/q_∞ ungefähr dieselben Ergebnisse. Hingegen zeigten die beiden grösseren Modelle starke Abweichungen, die sich in keiner Weise durch die Messein-



Einfluss des Staudruckverhältnisses q_A/q_∞

FIG. 8

richtung erklären liessen. Die Vermutung lag nahe, dass es sich um den Einfluss des für diese Fälle zu kleinen Windkanals handeln musste. Eine Nachprüfung der äusseren Grenze des Bodenstrahles bekräftigte diese Vermutung. Man konnte feststellen, dass für jene Staudruckverhältnisse q_A/q_∞ , bei denen das Auseinanderklaffen der Resultate beginnt, die Bodenstrahlgrenze (Wirbellinie) bis in die Kanaldüse vorgewandert ist und seitlich schon weit vor dem Modelltriebwerk aus dem Bereich des Windkanalstrahles heraustritt. Das dadurch stark gefälschte Strömungsfeld scheint die Vermischung der Triebwerksluft mit der Umgebung merklich zu beeinflussen. Figur 9 zeigt die ungefähre Lage dieser Grenzen.



Vorderste zulässige Lage der Wirbellinie

FIG. 9

Es wurden daher weitere Versuche geplant, bei denen die beiden grossen Modelle im grossen Windkanal untersucht werden sollten. Figur 10 gibt die dabei erhaltenen Resultate wieder. Die gemessenen Rezirkulationen stimmen nun sehr gut mit den an den beiden kleinen Modellen im kleinen Windkanal erhaltenen überein.

Man kann versuchen, aus diesen Ergebnissen auf die für einen bestimmten Windkanal zulässigen Strahldurchmesser zu schliessen. Es wird deutlich, dass D_A vom Bereich der zu untersuchenden Staudruckverhältnisse q_A/q_∞ abhängig ist. Figur 11 zeigt die aus den Messungen im kleinen Kanal mit den Düsen 80, 60 und 40mm ermittelten Grenzen. Das kleinste Modelltriebwerk ist im untersuchten Bereich nicht kritisch, wie aufgrund der Bodenstrahl-ausbreitung angenommen werden darf.

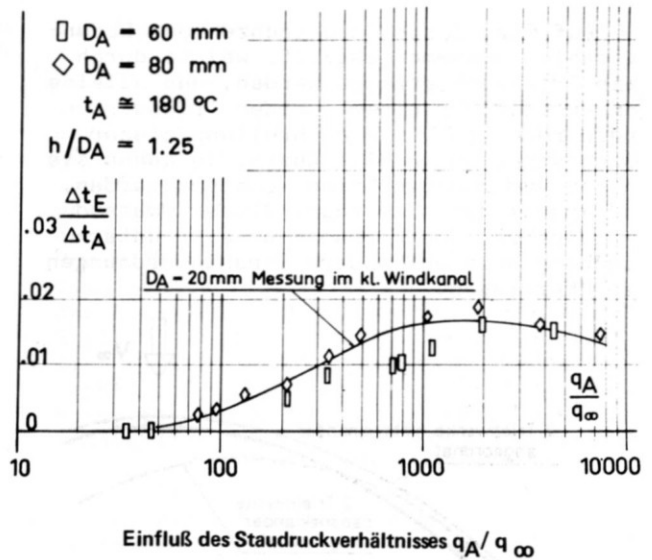
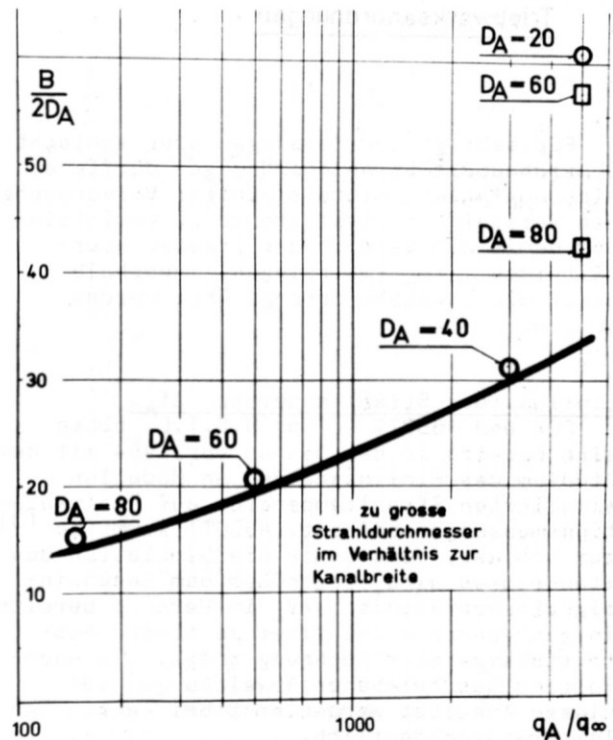


FIG. 10

Dieses Ergebnis wurde am Beispiel eines einzelnen, frei aufgestellten Modelltriebwerkes gewonnen und muss daher mit Vorsicht auf andere Strahlanordnungen übertragen werden. COLIN (4) hat Strömungsbilder von Bodenstrahlen für verschiedene einfache Strahlanordnungen veröffentlicht.



Abhängigkeit der zulässigen Windkanalbreite vom Staudruckverhältnis

FIG. 11

Auf Fig.12 sind die Grenzen des Bodenstrahles zusammengestellt, welche durch ein Triebwerk erzeugt werden, das alleine neben oder vor einem zweiten Triebwerk angeordnet ist. Die Ausbreitung dieser Bodenstrahlen in Richtungen, in denen sie nicht vom zweiten Strahl gestört werden, unterscheidet sich kaum. Dieser Umstand erlaubt es, das Ergebnis unserer Untersuchung auch auf andere Strahlanordnungen zu übertragen.

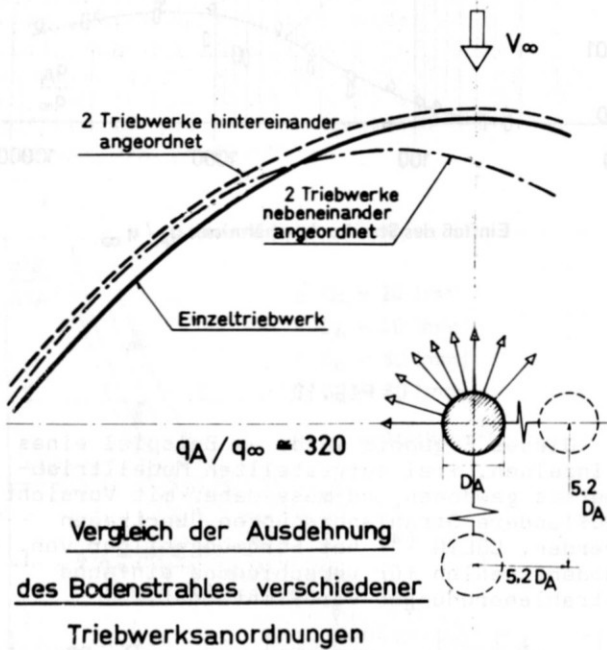


FIG.12

Für sehr genaue Messungen oder schlecht überschaubare Strahlanordnungen dürfte es sich empfehlen, mittels einiger Vorversuche den Verlauf der Strahlgrenze zu ermitteln und damit den Bereich der Staudruckverhältnisse q_A/q_∞ festzulegen, innerhalb derer die Versuche durchgeführt werden sollen.

Einfluss der Strahltemperatur Δt_A .

COX und ABBOTT (2) am N.G.T.E. haben sich bereits in den Jahren vor 1964 mit dem Studium des Einflusses der an Modellen simulierten Strahltemperatur auf Rezirkulationsmessungen befasst. ABBOTT kommt in (3) zum Schluss, dass schon die Simulation des Staudruckes q_A/q_∞ gegenüber dem Geschwindigkeitsverhältnis V_A/V_∞ im Versuch bereits in genügender Weise einer zu tiefen Austrittstemperatur Rechnung trägt. Die nachfolgend beschriebenen Abweichungen von diesem Resultat werden erst bei sehr hohen Temperaturen deutlich.

Dagegen sind in Ref. (2) Resultate beschrieben, welche an einem unbewegten Bodenstrahl gewonnen wurden und zeigen, dass die Reichweite eines solchen Strahles (Reichweite = Abstand vom Bodenstau- punkt

bis zum Abheben des Strahles vom Boden) sich ungefähr gleich gut in Funktion von

$$\left(\frac{V_A^2}{\beta g t_A D_A}\right) \frac{T_U}{T_A} \quad \text{oder} \quad \frac{V_A^2}{\beta g t_A D_A}$$

darstellen lässt. Diese beiden Parameter wurden aus einer einfachen Analyse des auf den Bodenstrahl wirkenden archimedischen Auftriebes ermittelt. Verschiedentlich wurde nun der gesamte Einfluss der Strahltemperatur auf die Rezirkulationsmessungen diesem archimedischen Auftrieb zugeschrieben. Weiter wurde gefolgert, dass aus diesem Grunde die Strahltemperatur t_A nur einen Einfluss haben wird, falls Luft aus dem Fernfeld in die Triebwerkeinläufe gelangt. Nun scheinen uns aber einige im Abschnitt "Vorversuche" beschriebene Resultate davon abweichende Ergebnisse zu zeitigen.

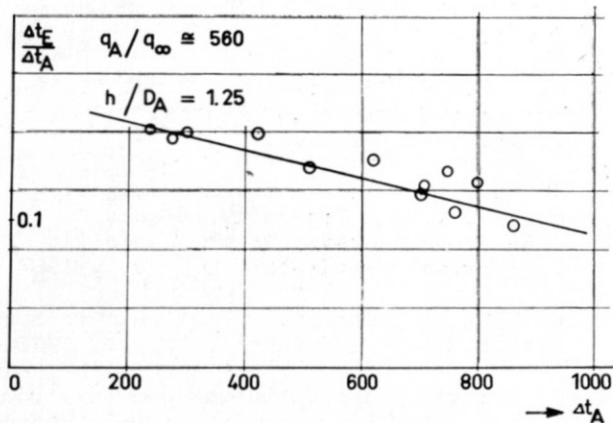
Der Temperaturabfall in der Achse des horizontalen Freistrahles kann nicht mit Hilfe des archimedischen Auftriebes erklärt werden. Dieser wirkt nur senkrecht zur Strahlachse und verursacht nur eine leichte Aufwärtskrümmung des Strahles. Bei den durchgeführten Versuchen wurde für die verwendeten Geschwindigkeiten und Düsenabstände eine kaum erkennbare Verschiebung der Geschwindigkeits- und Temperaturprofile nach oben beobachtet.

Dagegen findet man schon bei sehr kleinen Abständen x/D_A eine starke Abnahme der Temperatur in der Strahlachse im Falle des heißen Strahles gegenüber dem weniger heißen. Man muss daraus schliessen, dass die höhere Strahltemperatur die Vermischungseigenschaften des Rundstrahles verändert hat. Die auf Fig. 7 eingezeichneten theoretischen Kurven wurden für die beiden Strahltemperaturen $t_A = 80^\circ$ bzw. 280°C mit Hilfe der halb empirischen Theorie nach ABRAMOVICH berechnet. Obschon die theoretischen und experimentellen Kurven etwas verschoben sind, beschreibt die Theorie das Phänomen im untersuchten Fall zufriedenstellend. Dieselbe Theorie erlaubt den Abfall des Staudruckes längs der Strahlachse in Funktion der Strahltemperatur zu berechnen. Auch hier ergeben sich grosse Unterschiede für verschieden hohe Temperaturen. Beim Freistrahle ist daher nicht nur das Temperaturfeld, sondern auch das Strömungsfeld selber temperaturabhängig.

Dieses Ergebnis legte die Vermutung nahe, dass auch im Falle eines am Boden umgelenkten Freistrahles derselbe Mechanismus wirksam ist. Um dies nachzuweisen, wurde das Modelltriebwerk mit variablen, z.T. sehr hohen Temperaturen betrieben. Für diese Versuche wurde ein konstanter Staudruck von 450kp/m^2 verwendet. Die

Windkanalgeschwindigkeit wurde relativ hoch gewählt, so dass sich ein Staudruckverhältnis q_A/q_∞ von 560 ergab. Damit sollte erreicht werden, dass die gesamte Vermischung möglichst nahe dem Triebwerk vor sich geht. Das durch den archimedischen Auftrieb erzeugte Druckfeld ist in diesem Fall vernachlässigbar klein im Verhältnis zu den durch die Anströmung erzeugten Druckfeldern.

Figur 13 zeigt die aus diesen Versuchen erhaltenen Resultate. Man erkennt deutlich die Abnahme der Rezirkulation um ca. 30% im Falle einer Strahltemperatur von 800°C gegenüber 200°C.



Einfluss der Strahltemperatur Δt_A

FIG. 13

Es konnte damit nachgewiesen werden, dass die Höhe der Strahltemperatur die Rezirkulation auch bei VTOL-Konfigurationen beeinflusst, bei denen die Wirkung des archimedischen Auftriebes vernachlässigt werden darf. Man muss annehmen, dass auch bei Konfigurationen, bei denen die Rezirkulation durch starke "Aufströme" bestimmt wird, die richtige Simulation der Austrittstemperatur angestrebt werden sollte. Nur dadurch könnte gewährleistet werden, dass sowohl das Strömungsfeld als auch das Temperaturfeld genau richtig nachgebildet werden.

Es sind noch weitere Versuche an anderen VTOL-Konfigurationen notwendig, um mit Sicherheit sagen zu können, wie gross die zu erwartenden Fehler sind. Die von uns untersuchte VTOL-Konfiguration zeigt für Temperaturen zwischen 200°C und 1000°C Abweichungen von 30%, was bei den heutigen Anforderungen an solche Rezirkulationsmessungen nicht schwerwiegend ist.

Der Versuchsingenieur sollte sich dieses Effektes jedoch bewusst sein, so dass er von Fall zu Fall entscheiden kann, ob es für seine Versuche wichtig ist, die Höhe

der Strahltemperatur richtig zu simulieren.

Die Schwierigkeiten, welche sich für den Bau solcher Rezirkulationsmodelle ergeben, sind erheblich, und es wäre daher wünschenswert, durch geeignete Korrekturen anderer Versuchsparameter Strahlen zu erzeugen, welche sowohl die Reichweite als auch den Temperaturabfall längs einer Stromlinie ungefähr richtig simulieren. Dies könnte z.B. erreicht werden, indem der Strahldurchmesser D_A nicht genau modellähnlich ausgeführt würde und indem zusätzlich eine kleine Korrektur im Staudruckverhältnis q_A/q_∞ vorgenommen würde. Weitere Messungen werden zeigen müssen, ob diese Kunstgriffe zusammen mit Strahltemperaturen zwischen 200° und 300°C genügend genaue Resultate liefern, oder ob allen Schwierigkeiten zum Trotz die korrekten Strahltemperaturen der Grossausführung simuliert werden müssen.

Schlussfolgerung

1. Bei der Durchführung von Rezirkulationsmessungen im Windkanal muss darauf geachtet werden, dass die Strömungsverhältnisse nicht infolge eines zu grossen Modelles (Triebwerkdurchmessers) gefälscht werden. Es empfiehlt sich für jeden Fall die Ausbreitung des Bodenstrahles anhand der mitgeteilten Ergebnisse abzuschätzen oder bei komplizierteren Konfigurationen direkt aus einem Vorversuch zu bestimmen.

2. Das Einhalten der richtigen Strahltemperatur wäre wünschenswert. Die angestellten Ueberlegungen deuten darauf hin, dass nur in diesem Falle sowohl das Strömungsfeld als auch das Temperaturfeld richtig simuliert werden. Da eine der Ursachen in der geänderten Strahlvermischung zu suchen ist, gilt dies nicht nur für das Feld weit weg vom Triebwerk sondern auch schon in einem Abstand von wenigen Strahldurchmessern.

Weitere Untersuchungen müssen durchgeführt werden, um die praktische Bedeutung der richtigen Einhaltung der Strahltemperatur bei Modellversuchen abzuklären.

Nachwort

Der Verfasser möchte Herrn Chefingenieur H. Kamber, Leiter der Forschungsabteilung des Flugzeugwerkes Emmen für die vielen wertvollen Ratschläge und Hinweise bei der Planung und Durchführung der Versuche herzlich danken. Sein Dank gebührt weiter den Mitarbeitern am Institut, die einen Teil der Messungen durchgeführt haben.

Formelzeichen

- q Staudruck bzw. P-p
- P Totaldruck
- p Statischer Druck
- D Durchmesser
- B Breite des Windkanals
- g Erdbeschleunigung
- h Bodenabstand
- \dot{m} Sekundlicher Massendurchsatz
- x Abstand vom Strahlaustritt in Achsrichtung
- T Absolute Temperatur
- Δt Temperaturdifferenz $t-t_u$ ($^{\circ}C$)
- V Strömungsgeschwindigkeit
Fluggeschwindigkeit
- β Ausdehnungskoeffizient von Luft
- k Kontraktionsverhältnis

Indizes

- A Austritt aus dem Triebwerk
- E Eintritt ins Triebwerk
- U Umgebung
- ∞ Zustand im Unendlichen

Schrifttum

1. G.N. Abramovich, "The Theorie of Turbulent Jets," The M.I.T. Press. Cambridge, Massachusetts.
2. M. Cox and W.A. Abbott, "Studies of the Flow Fields Created by Singel Vertical Jets Directed Downwards Upon a Horizontal Surface," N.G.T.E. M. 390.
3. W.A. Abbott, "Studies of Flow Fields Created by Vertical and Inclined Jets when Stationary or Moving over a Horizontal Surface," N.G.T.E. Memorandum 391.
4. P.E. Colin, "Powered Lift Model Testing for Ground Proximity Effects," T.C.E.A. TN 14, 1963.
5. Rahim Lavi, "Parametric Investigation of VTOL Ground Proximity Effects," AIAA 3rd Propulsion Joint Specialist Conference, Washington, D.C. July 1967.
6. K. Liem, "Strömungsvorgänge beim freien Hubstrahler," Luftfahrttechnik 8, 1962.
7. H. Hertel, "Wandströmungen und Aufströme aus der Umlenkung von Freistrahlguppen," Fortschr.-Ber.VDI-Z. Reihe 12 Nr. 11.
8. H. Schrader, "Trocknung feuchter Oberflächen mittels Warmluftstrahlen," VDI-Forschungsheft 484, 1961.