

VERGLEICHENDE AERODYNAMISCHE UNTERSUCHUNG DER MIT HOHEM REAKTIONSGRAD ARBEITENDEN PROFIL- BZW. BLECHSCHAUFEL-LEITRADGITTER VON DAMPF- UND GASTURBINEN IN STRÖMUNGEN MIT UNTER- UND ÜBERSCHALLGESCHWINDIGKEIT

Von

I. ERDÓDY

Lehrstuhl für Energiewirtschaft, Technische Universität, Budapest

(Eingegangen am 22. Dezember, 1965)

Vorgelegt von Prof. Dr. L. HELLER

Die Leitschaufelgitter der letzten Stufen von Dampf- und Gasturbinen hoher Leistung werden immer häufiger aus gestanzten Blechschaufeln hergestellt, u. zw. im allgemeinen aus folgenden Gründen:

1. Es ist technologisch viel leichter, die 600 bis 1000 mm langen Schaufeln einfach aus Blech auf Form zu stanzen, anstatt sie zu fräsen oder im Präzisionsgußverfahren herzustellen.

2. Die Anwendung von Blechschaufeln ermöglicht eine starke Verminderung des Gewichtes des Niederdruckgehäuses. Dies ist ein großer Vorteil, weil die Schaufeln auch in geschweißter Ausführung sehr schwer sind. Ihr hohes Gewicht erschwert die Gründung noch zusätzlich.

3. Die Verwendung von Blechschaufeln setzt den Bedarf an legiertem Schaufelstahl herab.

Neben den angeführten Vorteilen müssen jedoch bei Verwendung von Blechschaufeln auch Nachteile in Kauf genommen werden:

1. Der Wirkungsgrad der Blech-Schaufelgitter erreicht erfahrungsgemäß in den meisten Fällen nicht denjenigen der Gitter aus Profilschaufeln, weil es schwieriger ist, das Blechprofil aerodynamisch so vollkommen auszubilden wie die Profilschaufeln.

2. Die Gitter aus Blechschaufel reagieren auf Abweichungen des Eintrittswinkels vom Nennwert weit empfindlicher als die Profilschaufelgitter. (Ihr Wirkungsgrad nimmt bei Plus- oder Minusabweichungen des Eintrittswinkels vom Nennwert rascher ab als der Wirkungsgrad von Gittern aus Profilschaufeln. Diese Wirkung tritt immer auf, wenn die Turbinenleistung vom Nennwert abweicht, und ist in den letzten Stufen besonders stark.)

Zur teilweisen Untersuchung der erwähnten Probleme hat der Verfasser am Lehrstuhl für Dampf- und Gasturbinen des Polytechnischen Kalinin-Institutes in Leningrad Versuche angestellt, deren Ergebnisse im folgenden erörtert werden sollen. (Die Untersuchung des Verhaltens der Schaufelgitter bei Strömungen unter Eintrittswinkeln, die vom Nennwert abweichen, war nicht das Ziel der vorliegenden Arbeit.)

Da die Strömungsgeschwindigkeiten in den letzten Stufen moderner Hochleistungs-Dampf- und Gasturbinen in der Nähe der Schallgeschwindigkeit gehalten werden müssen, weil sonst die noch zulässigen Maschinenabmessungen überschritten werden mußten, mußte auch die Forschung unter diesen Verhältnissen durchgeführt werden. Im Laboratorium des Institutes wurde ein Windkanal zur Untersuchung von Hochgeschwindigkeits-Stufengittern aufgebaut, in welchem die Untersuchungen bis zu Machzahlen von $M \cong 1,5$ durchgeführt werden konnten.

Technische Beschreibung des Windkanals

Die Versuchseinrichtung war ein offener aerodynamischer Kanal zur Untersuchung von Schaufelgittern (Abb. 1 und 2). Der Geschwindigkeitsbereich konnte während der Untersuchungen innerhalb eines Machzahlenbereichs von $M = 0,3 \dots 1,5$ verändert werden, was dem gegenwärtigen tech-

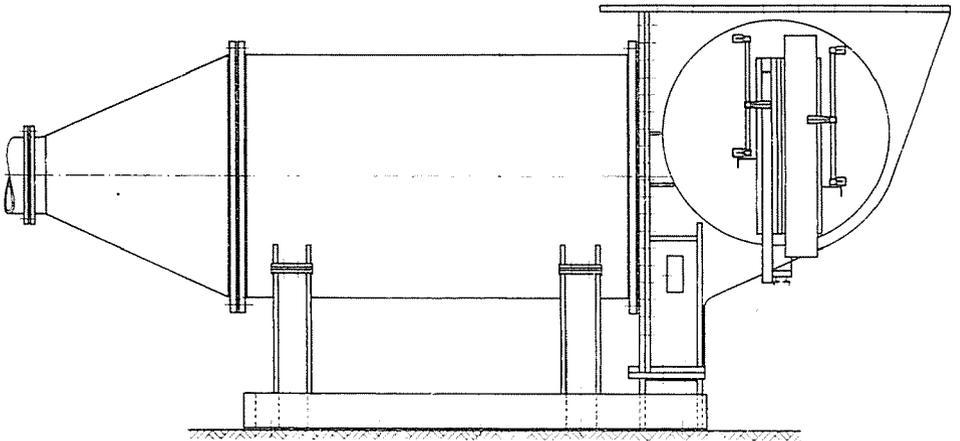


Abb. 1

nischen Niveau der Schaufelgitterversuche entspricht. Die Einrichtung arbeitete mit Überdruck, d. h. der Druck des Arbeitsmediums lag über dem atmosphärischen Druck. Sein Höchstwert schwankte zwischen 3 und 3,5 atü. Obwohl der Energiebedarf derartiger Windkanäle wesentlich höher ist als derjenige von Ejektorkanälen, die mit Saugzug betrieben werden, wurde diese Lösung gewählt, einerseits weil sich hierbei die aerodynamische Messungen hinter dem Schaufelgitter leichter durchführen lassen, andererseits weil die Drosselung an der Austrittseite des Kanals die Änderung der Reynoldsschen Zahlen innerhalb bestimmter Grenzen ermöglicht, was eine unerläßliche Voraussetzung für Schaufelgitterversuche darstellt.

Als Arbeitsmedium wurde Luft benutzt, die eine aus drei Verdichtern bestehende Anlage lieferte. Es bestand die Möglichkeit, die Verdichter in Reihen- oder Parallelschaltung zu betreiben. Die Verbindungsleitung zwischen Verdichteranlage und Windkanal hatte einen 15mal größeren Querschnitt als

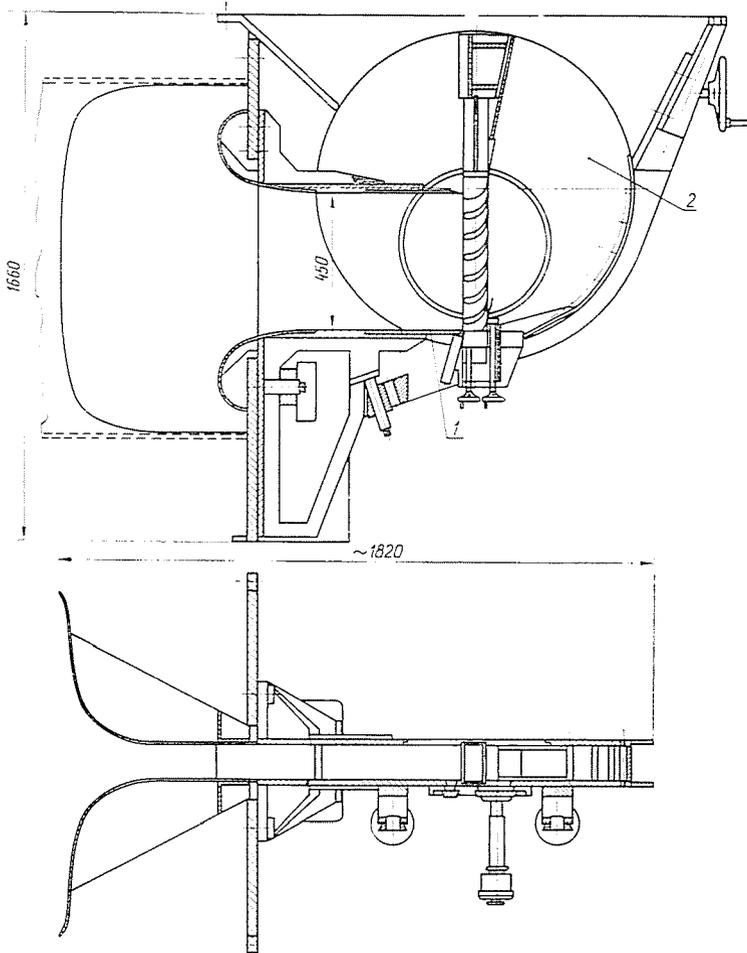


Abb. 2

der Strömungsquerschnitt im Arbeitsfeld des Windkanals. Unter derartigen Querschnittsverhältnissen entstehen einerseits niedrige Verluste in der Rohrleitung, andererseits wird eine zu starke Turbulenz im Arbeitsmittel vermieden.

Vor dem Meßfeld der Einrichtung wurde — wie gebräuchlich — ein zylindrischer Behälter von 1,5 m Durchmesser und 2 m Länge angeordnet (Abb. 1), in dem die zur Glättung und Entwirbelung der Strömung dienenden

Gleichrichtergitter und Siebe untergebracht waren. Das Arbeitsmedium trat in den Meßraum durch einen gut ausgebildeten Konfusor mit verstellbarem Querschnitt ein. Hinter dem Konfusor war zur Führung der Strömung ein Arbeitskanal von quadratischem Querschnitt mit maximal 500 mm Seitenhöhe angeordnet (s. Abb. 2). An das schräg abgeschnittene freie Ende dieses Kanals wurde die Eintrittseite des untersuchten Gitters angeschlossen. Die untere Platte des Arbeitskanals (1) war vertikal verstellbar ausgebildet, so daß bei Einstellung der Schaufelgitter unter verschiedenen Winkeln kein Spalt zwi-

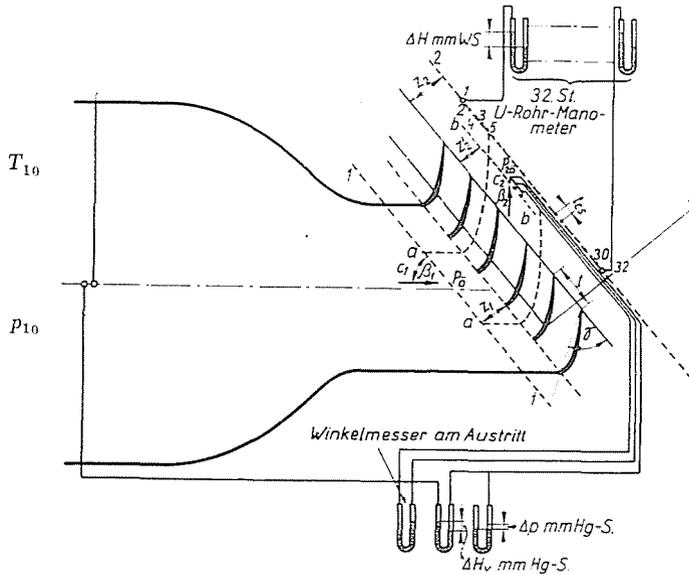


Abb. 3

schen Kanal und Gitter entstehen konnte. Die obere Platte des Kanals war fixiert. Die beiden Seitenplatten (2) waren verdrehbare Scheiben von je 1 m Durchmesser. In die Scheiben waren zur Aufnahme des Schaufelgitters diagonale Nuten eingefräst. Die Einstellung der Gitter unter verschiedenen Winkeln zur Strömungsrichtung geschah durch Verstellung dieser Scheiben. An den Scheiben befanden sich die zur Untersuchung der Strömung dienenden Meßinstrumente sowie die zur Bewegung derselben nötige Apparatur.

Der aus dem Schaufelgitter mit hoher Geschwindigkeit austretende Luftstrahl tritt in den Austrittsdiffusor des Kanals, der ihn verlangsamt und ins Freie leitet.

Zur Beschleunigung und Erleichterung der Versuchsarbeit wurde die Einrichtung mit Fernsteuerung versehen. Dies war auch deshalb nötig, weil der Betrieb des Kanals, insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten, sehr geräuschvoll war, was die Steuerung aus der Nähe unmöglich gemacht hätte.

Aus dem gleichen Grunde wurde die Einrichtung auch in einem gut verschließbaren Raum mit Schalldämmung untergebracht.

Die Messungen wurden folgendermaßen vorgenommen (Abb. 3): Vor dem Schaufelgitter wurden der Gesamtdruck p_{10} und die Bremstemperatur T_{10} , hinter dem Schaufelgitter der Gesamtdruck p_{20} , der statische Druck p_{st} sowie der Austrittswinkel β_2^3 der Strömung gemessen.

Die Resultate vieler Kontrollmessungen ermöglichten eine Vereinfachung der Messung insofern, als die Sondierung der Strömung vor dem Schaufelgitter wegfallen konnte. Es hat sich nämlich bei den Messungen herausgestellt, daß

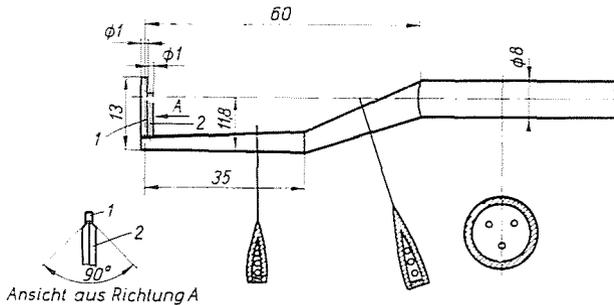


Abb. 4

a) die Strömung im Kanal vor dem Schaufelgitter ziemlich gleichmäßig war und bis zum Eintritt in den Kanal auch gleichmäßig blieb und daß

b) die Strömungsverluste im Zuleitkanal so niedrig waren, daß sie unter der Meßgenauigkeit blieben.

Solcherart konnte die zeitraubende Sondierung vor dem Schaufelgitter weggelassen werden. Statt dessen hat sich die Messung der Zustandsgrößen des Arbeitsmediums im großen Dämpfungsbehälter vor dem Meßfeld als hinreichend erwiesen. Hier wurde mit einem Pitotrohr der Gesamtdruck (p_{10}) sowie durch ein Thermopaar die Temperatur (T_{10}) des Arbeitsmediums gemessen.

Hinter dem Schaufelgitter wurde die Strömung mit einer parallel zur Austrittsfront des Gitters bewegten Sonde sondiert. Die Fühlöffnungen der Sonde bewegten sich im Abstand von 22 mm (senkrecht auf die Austrittsfläche des Gitters gemessen) parallel mit dem Gitter. Die Sonde war in eine Spezial-Koordiniereinrichtung eingebaut, die ihre Drehung um ihre Achse sowie ihre Auf- und Abwärtsbewegung an der Schaufelhöhe entlang ermöglichte. Die Koordiniereinrichtung selbst war an einer parallel zur Längsachse des Schaufelgitters geführten Platte befestigt. Die Platte war an einer der Seitenscheiben angebracht; sämtliche Bewegungen von Platte und Koordiniereinrichtung waren elektrisch ferngesteuert.

Die in den Koordinator eingebaute Sonde eignete sich zur Bestimmung des Gesamtdruckes und der Strömungsrichtung. Das Rohr zur Gesamtdruck-

messung (Abb. 4) war 20 mm lang und hatte einen Außendurchmesser von 1,0 mm und einen Innendurchmesser von 0,6 mm. Der Richtungsmesser bestand aus zwei miteinander verlöteten und in einem Winkel von 45° abgekanteten Röhrchen von 1 mm Außendurchmesser. Die drei Röhre waren aus Festigkeits- und Schwingungsbeständigkeitsgründen ihrer Länge nach zusammengelötet (Abb. 4).

Zur Messung der statischen Drücke vor und hinter dem Schaufelgitter wurden die Seitenwände des Meßfeldes angezapft. Der Durchmesser der Anzapfungen betrug 0,3 mm, ihr Abstand voneinander 7 mm (s. Abb. 3).

Zur Berechnung der Verluste des Schaufelgitters wurde bei Bearbeitung der Versuchsergebnisse die Formel

$$\xi_i = 1 - \eta_i = 1 - \frac{V_i^2}{c_i^2} = 1 - \frac{\left[1 - \frac{p_{st}}{p_{2\bar{\sigma}}} \frac{k-1}{k} \right]^i}{\left[1 - \frac{p_{st}}{p_{1\bar{\sigma}}} \frac{k-1}{k} \right]^i}$$

angewandt, in der V_i die Geschwindigkeit der reellen Strömung im Punkt (i) hinter dem Schaufelgitter,
 c_i die Geschwindigkeit der ideellen Strömung im Punkt (i) hinter dem Schaufelgitter,
 p_{st} den statischen Druck hinter dem Schaufelgitter,
 $p_{1\bar{\sigma}}$ und $p_{2\bar{\sigma}}$ die Gesamtdrücke der Strömung im ideellen und reellen Fall,
 i die Meßstelle

bedeuten.

Es zeigte sich, daß bestimmte Vereinfachungen der Rechnung bei der Auswertung der Meßresultate keine großen Abweichungen verursachen, dagegen erhebliche Zeiteinsparungen ermöglichten. Im einzelnen handelte es sich um folgende Vereinfachungen:

1) Statt p_{st} konnte der Wert $p_{st,k}$, d. h. der Mittelwert der statischen Drücke hinter dem Gitter genommen werden. Diese Auswertungsmethode verursacht bei Unterschallströmungen keinen Fehler, bei Überschallströmungen dagegen ist der Fehler verschwindend klein.

2) Anstatt des Druckes $p_{1\bar{\sigma}}$ wurde der Wert $p_{1\bar{\sigma},k}$, d. h. der zeitgemittelte Wert des Druckes p_1 , genommen. Diese Mittelung führte jedoch nur ganz selten zu einem vom Nennwert von $p_{1\bar{\sigma}}$ abweichenden Wert, da dieser Druckwert vom Druckregler der Verdichter während der Messungen richtig gehalten wurde.

Auf dieser Grundlage ging die Formel zur Berechnung der Verluste in folgende, einfachere Form über:

$$\xi_{st} = 1 - \frac{\left[1 - \frac{P_{stk} \frac{k-1}{k}}{P_{2i}} \right]}{\left[1 - \frac{P_{stk} \frac{k-1}{k}}{P_{1k}} \right]}$$

Aus den Meßresultaten konnten folgende Diagramme aufgetragen werden:

1) $p_{st} = p_{st}(X)$. (X ist die Koordinate der Sondenverstellung hinter dem Gitter in mm.) Der Mittelwert dieser Funktion wurde durch Planimetrierung bestimmt (p_{stk}).

2) $p_{2j} = p_{2j}(X)$. Die Funktion veranschaulicht die aerodynamische Spur der Schaufel sehr gut.

3) $\xi = \xi(X)$ ist die Verlustfunktion, deren gemittelter Wert die durchschnittlichen Verluste des Schaufelgitters ergeben (ξ_k %).

4) $\beta_2 = \beta_2(X)$. Diese Funktion beschreibt den Austrittswinkel der Strömung hinter dem Gitter. Sein gemittelter Wert (β_{2k}) ist der effektive Austrittswinkel des Schaufelgitters.

5) Aus den Mittelwerten der Kurven 3) und 4) konnte in Abhängigkeit von der Machzahl (M_{2j}) der Austrittsströmung ein Kurvenpaar ermittelt werden, das für das Verhalten des Schaufelgitters bei verschiedenen Geschwindigkeiten charakteristisch ist:

$$\xi_k = \xi_k(M_{2j})^* \quad \text{und} \quad \beta_{2k} = \beta_{2k}(M_{2j}).$$

Diese Kurven sind für die Beurteilung der Qualität des Schaufelgitters von großer Bedeutung. Sie können eigentlich als die Endresultate der Versuche betrachtet werden. Sie gestatten es, sämtliche Schlußfolgerungen auf die Qualität des Schaufelgitters zu ziehen.

Beschreibung der Versuchsergebnisse

Bei den Versuchen wurden eine sehr große Zahl und verschiedene Typen von Schaufelgittern geprüft. Die charakteristischen Eigenheiten lassen sich jedoch an drei kennzeichnenden Schaufelgittern — mit verschiedenen Ein- und Austrittswinkeln — nachweisen. Jede Gittertype hatte Schaufeln sowohl in Blech- als auch in Profilausführung. Die einzelnen Gitter wurden mit den Buchstaben B_j ; G_j ; D_j ; bzw. B_j ; G_j , D_j bezeichnet.

Für die Ausbildung der Blechprofile war die Überlegung maßgebend, daß sie einerseits bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten mit guten Wir-

* M_{2j} bedeutet die theoretische Relativgeschwindigkeit der aus dem Gitter austretenden Strömung, ausgedrückt durch die Machzahl.

Tabelle I

	B_t	G_t	D_t	B_t	G_t	D_t
b mm	111/51	104	133	195/79	105	134
t mm	28,0 32,6 37,3	62,7 71,7 82,5	78,0	22,6	41,7 55,0 65,5	42,4
β_1	86°34'	57°	57°	86°34'	57°	57°
Θ	75°14'	98°12'	111°	73°44'	97°40'	110°25'
\bar{f}	1,04 1,02 1,00	1,02 1,01 1,00	1,00	1,08	1,03 1,00 1,00	1,05
\bar{i}	0,549 0,640 0,732	0,604 0,691 0,794	0,587	0,286	0,390 0,524 0,625	0,316

kungsgraden arbeiten, daß es aber andererseits auch möglich sein sollte, sie aus Blech leicht und billig auszustanzen. Entsprechend wurden sie aus Kreisbögen und Geraden so aufgebaut, daß sich der Kanal zwischen zwei nebeneinander stehenden Schaufeln stetig verengt (die Strömung beschleunigt). Um die Strömungsverluste möglichst niedrig halten zu können ist es wichtig, den Profilen in den engsten Kanalquerschnitten (in der Mündung des Kanals) keine stärkere Krümmung mehr zu geben. Naturgemäß können von derart einfach konstruierten Schaufeln keine besonders guten Wirkungsgrade erwartet werden.

Die Konstruktion der gefrästen Profile war ebenfalls durch das Streben nach möglichst guten Wirkungsgraden bestimmt. Sie wurden unter Beachtung dieses Prinzips aus Strecken von Lemniskaten, hyperbolischen Spiralen, Parabeln dritten Grades, Kreisen und Geraden aufgebaut. Auf diese Weise wurde erreicht, daß sich der Kanal zwischen zwei benachbarten Schaufeln ohne Diffusorstrecken und wesentliche Krümmungen in der Mündung stetig verengt.

Einige Gitter der Profilschaufeln hatten drei relative Teilungen (die relative Teilung ist $\bar{i} = t/b$, wobei b die Sehnenlänge der Schaufel bedeutet), was sich nach den Ergebnissen der Optimierungsversuche als begründet erwiesen hat.

Die Kennwerte der einzelnen Schaufelgitter sind der Tabelle I zu entnehmen. In dieser bedeutet (s. Abb. 6)

b die Sehnenlänge der Schaufel,

t die Teilung,

β_1 den nominalen Eintrittswinkel des Schaufelgitters,

Θ den theoretischen Drehwinkel der Strömung im Gitter,

$\bar{f} = f/f'$ den Diffusorkoeffizienten des Schaufelkanals, wobei f den Austritts-, f' den engsten Querschnitt des Kanals (senkrecht zur Strömungsrichtung gemessen) bezeichnet,
 $\bar{t} = t/b$ die relative Teilung.

Ergebnisse der Versuche mit dem Schaufelgitter B_t

Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, wurde das Gitter bei drei verschiedenen Teilungen angeblasen (Abb. 5). Die kennzeichnendsten Resultate ergaben sich hierbei für das Gitter mit der Teilung $t_2 = 32,6$ mm; ($\bar{t}_2 = 0,640$) es lohnt sich daher, diese Resultate ausführlicher zu erörtern.

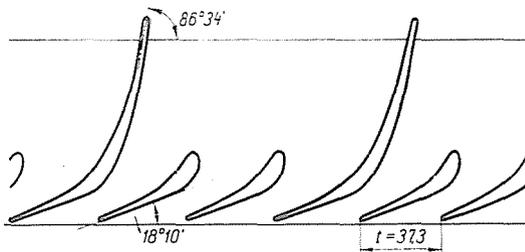


Abb. 5

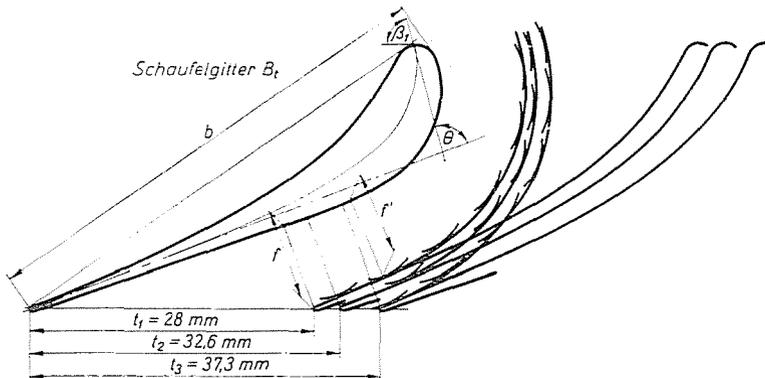


Abb. 6

Wie aus der Tabelle und der Zeichnung des Kanals (Abb. 6) ersichtlich, hat der durch zwei benachbarte Profile gebildete Kanal beim Austritt eine Strecke mit leichter Diffusorwirkung. Der Diffusorbeiwert \bar{f} beträgt 1,02. Trotzdem es sich um einen niedrigen Wert handelt, beeinflusst er dennoch den Gitterwirkungsgrad je nach den verschiedenen Anblasegeschwindigkeiten.

Wie aus Abb. 5 ersichtlich, wurden Gitter aus zwei verschiedenen Profilen zusammengestellt u. zw.

- a) um zu einer Gewichtsverminderung und
 b) um zu einer Verminderung der Reibungsflächen zu gelangen, die mutmaßlich eine Wirkungsgradverbesserung im Vergleich zu jenem erzielen läßt, bei dem das Gitter nur aus großen Schaufeln besteht.

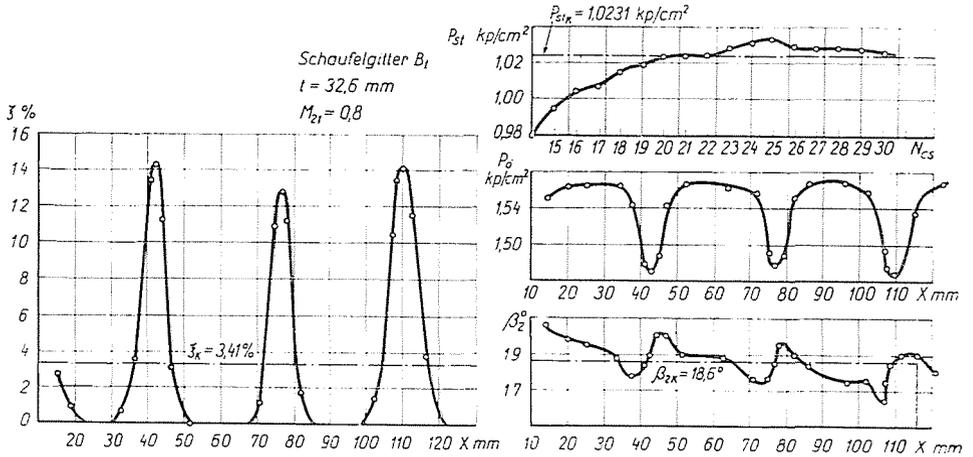


Abb. 7

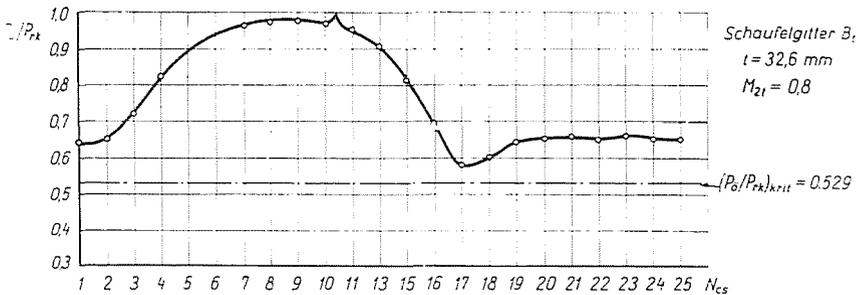


Abb. 8

Die Abbildungen 7, 8, 9 und 10 zeigen die Versuchsergebnisse für die Machzahlen $M_{2t} = 0,8$ und $M_{2t} = 1,15$, aus denen folgendes hervorgeht:

- 1) Während sich bei einem $M_{2t} = 0,8$ der statische Druck (p_{st}) am Gitteraustritt [$p_{st} = p_{st}(X)$] entlang nur unwesentlich ändert (der monotone Abfall der Kurve ist die Folge der Randwirkung wegen der Endlichkeit des Schaufelgitters, d. h. der Ejektorwirkung des Luftstrahls, der aus dem Gitter austritt), hört bei einem $M_{2t} = 1,15$ jede Regelmäßigkeit der Kurve auf. Diese Erscheinung läßt sich folgendermaßen erklären: In Überschallströmungen ist der Strömungsraum hinter dem Schaufelgitter von Druckwellen durchdrungen, die in der Umgebung der Bohrungen für die Messung des statischen

Druckes auf die Wand der Meßeinrichtung auffallen. Die in den Druckwellen sich manifestierenden Druckänderungen breiten sich in der Unterschallgrenzschicht ungeordnet bis zu den Meßbohrungen aus und ergeben das verzerrte Bild der Verteilung des statischen Druckes, wie es aus der Abbildung ersicht-

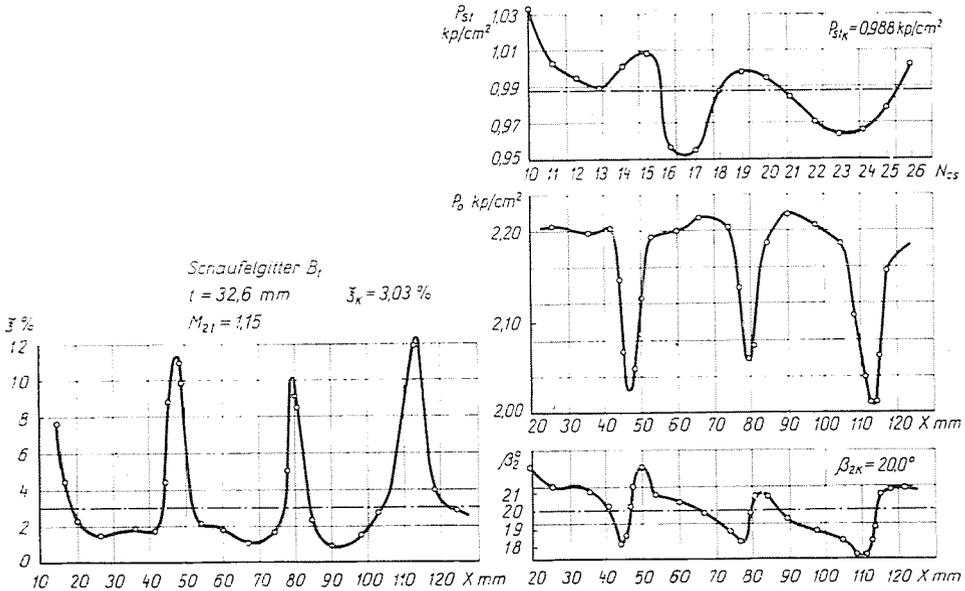


Abb. 9

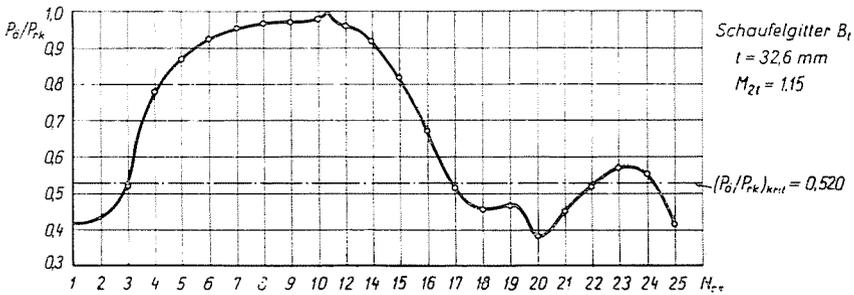


Abb. 10

lich ist. Die beschriebene Erscheinung konnte auch während der weiteren Versuche allgemein beobachtet werden [siehe die Kurven $p_{st} = p_{st}(X)$].

2) Gemäß Abb. 7 und 9 ändert sich der Gesamtdruck [$p_{t2} = p_{t2}(X)$] an der Austrittsfront entlang sowohl bei einem $M_{2t} = 0,8$ wie auch bei einem $M_{2t} = 1,15$ periodisch. Aus den Abbildungen geht auch hervor, daß sich die Abnahme des Gesamtdruckes hinter den Gitterschaufeln (in der aerodynamischen Spur hinter der Schaufel) bei höheren Machzahlen angenähert proportio-

nal erhöht. (Der Zahlenwert dieser Abnahme des Gesamtdruckes ist die Kenngröße des Schaufelgitterwirkungsgrades.)

3) Die Kurven der Änderung des Austrittswinkels $\beta_2 = \beta_2(X)$ verlaufen für beide Machzahlen periodisch, jedoch ist die Amplitude für die höhere Machzahl größer. Hierzu ist zu bemerken, daß eine so starke Änderung des Austrittswinkels der Strömung schwer vorstellbar ist und daß die Periodizität der Kurve eher der Unvollkommenheit des Winkelmeßinstrumentes zuzuschreiben ist. Da jedoch für das Schaufelgitter nicht die örtlichen Werte dieser Kurven, sondern nur deren gemittelte Werte — die durchschnittlichen (effektiven) Austrittswinkel (β_{2k}) — charakteristisch sind, kann von dem örtlichen Fehler abgesehen werden, und dies um so eher, als der Mittelwert infolge der regelmäßigen Periodizität der Kurve mit dem Wert des effektiven Austrittswinkels gut übereinstimmen wird. Somit kann der durch die Ausgleichung der Kurve mittels Planimetrierung erhaltene »mittlere Austrittswinkel« als der effektive Austrittswinkel des Schaufelgitters angesehen werden.

4) Die Kurven der örtlichen Verluste hinter dem Schaufelgitter $\xi = \xi(X)$ sind für die ähnlichen Kurven eines Schaufelgitters mit günstigem Wirkungsgrad ebenfalls kennzeichnend. An den Abbildungen läßt sich gut erkennen, daß bei einem $M_{2t} = 0,8$ im Kern der Strömung keine Verluste zu verzeichnen sind — bloß in der aerodynamischen Spur hinter der Schaufel —, während bei einem $M_{2t} = 1,15$ schon im Strömungskern Verluste auftreten (s. die Intervalle 60 bis 70 bzw. 90 bis 100 der Abb. 9). Diese Verluste rühren von den — bei Schallgeschwindigkeit immer entstehenden — Druckwellen her, auf deren Vorhandensein aus der Druckerhöhung zwischen Zapfungen der Schaufel (auf der Rückenseite des Profils am Austritt) Nr. 21 und 25 der Abb. 10 gefolgert werden kann, die vermutlich durch eine auf die Oberfläche des Schaufelgitters auftreffende intensive Druckwelle verursacht wurde. Der Druckanstieg in der Druckwelle verursacht, während er sich in der mit Unterschallgeschwindigkeit strömenden Grundzone der Grenzschicht ausbreitet, die soeben charakterisierte Druckverteilung (in Strömungsrichtung) oberhalb und unterhalb der Auftreffstelle.

Das Verhalten des Schaufelgitters charakterisieren die Kurven $\xi_k = \xi_k(M_{2t})$ und $\beta_{2k} = \beta_{2k}(M_{2t})$ am treffendsten. Derartige Kurven für die gegebenen Schaufelgitter sind in Abb. 11 aufgetragen.

Die dem niedrigsten Teilungsabstand ($t = 28$ mm) ($\bar{t} = 0,549$) zugehörige Kurve hat einen von den anderen stark abweichenden Verlauf. Diese Abweichung erklärt sich wie folgt: Aus Abb. 6 wird deutlich, daß der dieser Teilung zugehörige Schaufelkanal vor der Mündung eine Strecke mit ziemlich starker Diffusorwirkung aufweist (Diffusorkennzahl $\bar{f} = 1,044$).

In einem derartigen Schaufelkanal entsteht wie in den Lavaldüsen mit Gegendruck eine Unterexpansion, die unter der Einwirkung von Druckwellen aufhört. Die Druckwellen treffen auf die Schaufelflächen auf und trennen von

diesen die Grenzschicht ab, was eine Abtrennströmung verursacht, deren Verlustfaktor sehr hoch ist. Dieselbe Erscheinung spielt sich auch in dem gegebenen Schaufelkanal ab, wie dies auch aus der Druckkurve längs des Profils zu entnehmen ist (Abb. 12). Wie hieraus ersichtlich, entsteht in der Umgebung der Punkte Nr. 17 bis 20 bei der Machzahl 0,8 eine Eintiefung infolge

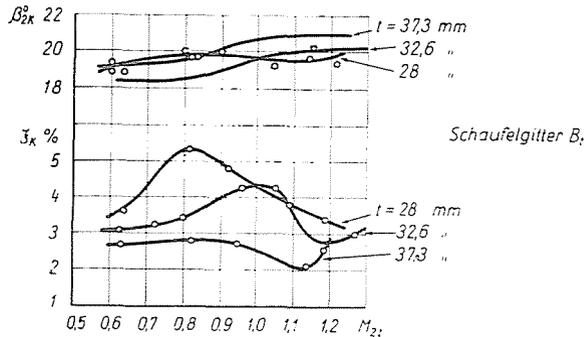


Abb. 11

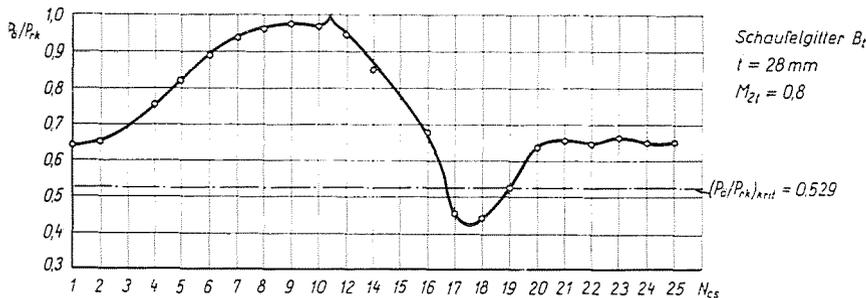


Abb. 12

der Diffusorwirkung. Diesem Tal folgt eine Strecke, die auf einen starken, wahrscheinlich durch eine starke einfallende Druckwelle verursachten Druckanstieg hinweist. Das Kurvental ist noch bei der Machzahl 1,1 erkennbar, jedoch weniger tief.

Die Verluste erreichen ihren Maximalwert ($\xi_{k\max} \cong 5,2\%$) bei einem $M_{2t} = 0,8$, um danach abzunehmen (Abb. 11), was zwei Gründe haben kann:

1) In Richtung der wachsenden Machschen Zahlen nimmt der Gegendruck ab, entsprechend vermindert sich aber allmählich der Unterschied zwischen Gegendruck und Druck der Überexpansion im Diffusorteil. Damit sinkt auch die Intensität der Druckwellen, die schließlich ganz verschwinden, sobald der Gegendruck mit dem Enddruck der Expansion im Kanal übereinstimmt.

2) In Richtung der wachsenden Machzahlen wird die Grenzschicht an jenen Oberflächenteilen der Schaufel, auf die die Druckwellen auftreffen, mit dem Anwachsen der Reynoldsschen Zahl turbulent, so daß sie an der Ober-

fläche fest anhaftet. Unter dieser Einwirkung werden die einfallenden Druckwellen immer weniger imstande sein, die Grenzschicht von der Oberfläche loszulösen. Wie aus Abb. 11 ersichtlich, strebt diese Besserung in Richtung nach den wachsenden Machschen bzw. Reynoldsschen Zahlen hin, d. h. nach der immer vollkommeneren Beendigung der Expansion in dem sich ausdehnenden Kanalteil hin monoton zu.

Die der nächstfolgenden Teilung ($t = 32,6$ mm) zugehörige Verlustkurve weicht in ihrem Verlauf von der vorangegangenen ($t = 28$ mm) einigermaßen ab. Der Grund hierfür ist aus Abb. 6 sofort ersichtlich. Der hier vorhandene Schaufelkanal ist nämlich kaum noch diffusorartig ausgebildet (Diffusorkoeffizient $\bar{f} = 1,02$). In den Fällen der Abb. 8 und 10 macht sich die Diffusorwirkung des Schaufelkanals noch fühlbar (Drucksenkung zwischen den Punkten Nr. 16 bis 20). Wegen dieses diffusorartigen Teiles verläuft die Kurve $\xi = \xi(M_{2t})$ noch verhältnismäßig hoch, d. h. die Verlustzahl des Gitters ist (mit 3–4%) noch groß (Höchstwert des Verlustes $\xi_{k\max} \approx 4,3\%$). In der Nähe von $M_{2t} = 1$ findet sich an der Kurve in Verbindung mit den Druckwellen im Diffusor ein steigender Ast. Die Stelle dieses Verlustmaximums ist gegenüber jener der vorangegangenen Teilung nach dem Bereich der höheren M_{2t} -Werte hin verschoben.

Beim Schaufelgitter mit der Teilung $t = 37,5$ ($\bar{i} = 0,732$) mm findet sich dieser Verlust nicht mehr, was sich daraus erklärt, daß der Kanal keinen diffusorartigen Teil hat (Abb. 6). Entsprechend sind die Verluste bei allen in Betracht kommenden Machzahlen mäßig (alle ξ_k -Werte unter 3%).

Wie aus Abb. 6 ersichtlich, ist der entstandene Schaufelkanal anfänglich stark konfusorartig verengt (Eintrittstrecke); gegen die Mündung hin nimmt die konfusorartige Verengung stark ab, die Strömung beschleunigt sich in diesem Teil nur sehr geringfügig. Überdies ist der Kanal (bzw. die Strömungslinien) im erwähnten Mündungsteil kaum noch gekrümmt. Stark reaktive Schaufelgitter mit derartiger Kanalausbildung haben erfahrungsgemäß niedrige Verluste, da weder die wegen der starken Verengung, noch die wegen der starken Krümmung der Strömungslinien stets unvermeidlichen Wellen- und sonstigen Verluste mit übertriebener Intensität auftreten.

Interessant ist noch die Änderung des Austrittswinkels in Abhängigkeit von der Machzahl: $\beta_{2k} = \beta_{2k}(M_{2t})$. Wie aus dem oberen Teil der Abb. 11 hervorgeht, wird der Austrittswinkel mit abnehmender Teilung im allgemeinen größer. Diese Tatsache wurde auch durch anderwärts gemachte Versuche bestätigt. Sie ist übrigens auch logisch, weil ein engerer Kanal die Strömung besser führt.

Wie ersichtlich, nimmt mit wachsender Machzahl auch der Zahlenwert des Austrittswinkels zu, was die Erfahrung gleichfalls allgemein bestätigt. Für die Machzahl $M_{2t} \approx 1$ erfährt der aus dem Schaufelgitter austretende Luftstrahl eine Expansions-Ablenkung, wie dies die Kurven für $t = 32,6$ und $37,3$ mm (Abb. 11) deutlich erkennen lassen. Eine kleine Abweichung zeigt

sich an der Kurve für die Teilung $t = 28$ mm, der ein Kanal mit starker Dif-
fuserstrecke zugehört. Hier erfahren die soeben geschilderten Gesetzmäßig-
keiten, die die Größe des Austrittswinkels infolge der im Kanal entstehenden
Wellenerscheinungen bestimmen, eine Modifikation, d. h. die Kurve hat nicht
mehr die gewohnte Form.

Ergebnisse der Versuche mit dem Schaufelgitter G_7

Das nächste untersuchte Gitter, bestehend aus Profilschaufeln der Type
 G_7 , wies bessere Wirkungsgrade auf, vermutlich deshalb, weil in ihm der
Winkel der Ablenkung der Strömung mit $\Theta = 98^\circ 12'$ kleiner war als im vori-
gen Falle.

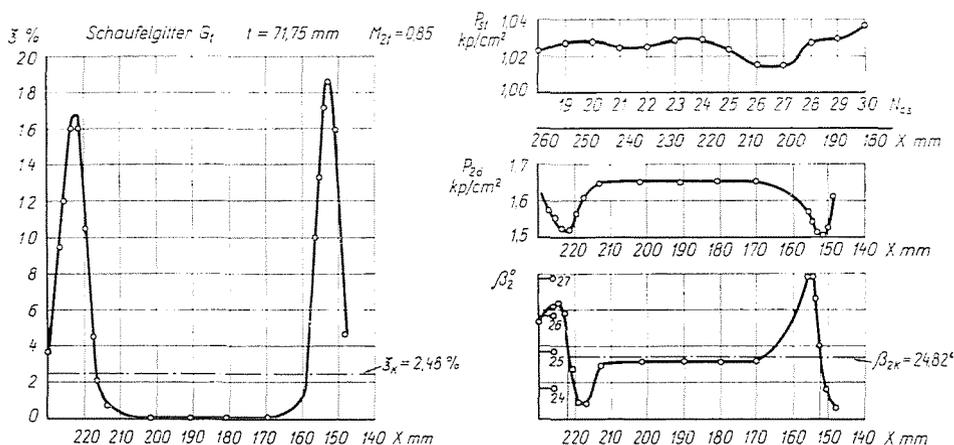


Abb. 13

Die der Teilung $t = 71,75$ mm ($\bar{t} = 0,691$) zugehörigen Meßkurven sind
regelmäßig und zeigen einen ähnlichen Verlauf wie diejenigen des Schaufel-
gitters B_7 . Wie aus den Abbildungen 13 und 14 für die Machzahlen $M_{2t} =$
 $= 0,85$ und $M_{2t} = 1,1$ erhellt, ergeben sich nach Überschreitung der Schall-
geschwindigkeit Verluste auch im Inneren des Kanals (Abb. 14), die als Folge
der entstandenen Druckwellen betrachtet werden können. Für $M_{2t} > 1$ ver-
lieren auch die Kurven $\beta_2 = \beta_2(X)$ und $p_{st} = p_{st}(X)$ die charakteristische,
regelmäßige Periodizität, die im Unterschallbereich herrschte, und werden im
allgemeinen unregelmäßig veränderlich.

Die Kurven $\xi_k = \xi_k(M_{2t})$ und $\beta_{2k} = \beta_{2k}(M_{2t})$ (Abb. 15) müssen zusam-
men mit der Zeichnung der Kanalform in Abb. 16 betrachtet werden. Aus dem
Vergleich der beiden Abbildungen ergeben sich folgende Feststellungen:

Bei der Teilung $t = 62,7$ mm ($\bar{t} = 0,604$) hat der Kanal noch eine kleine
Diffusorwirkung mit dem Koeffizienten $\bar{f} = 1,02$. Diese Tatsache läßt sich an

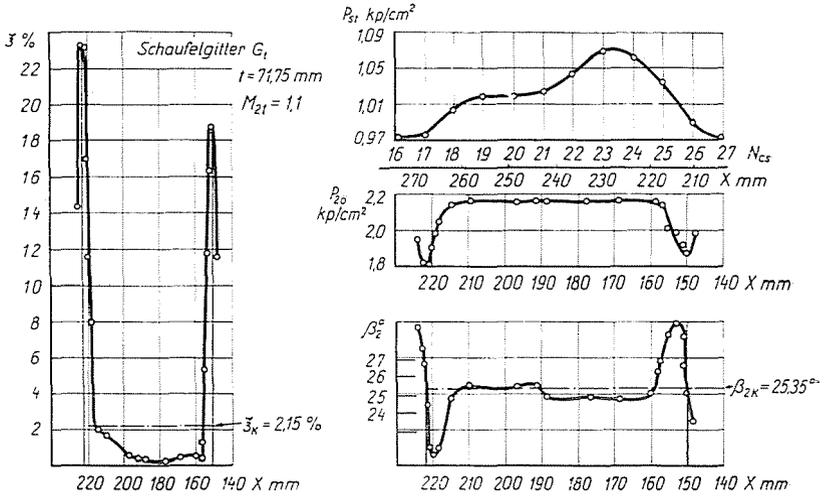


Abb. 14

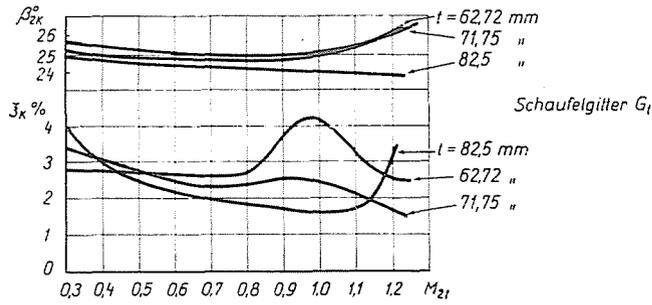


Abb. 15

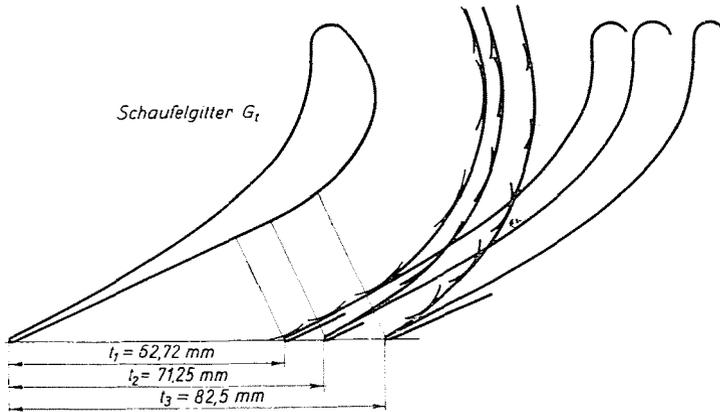


Abb. 16

der dem Gitter zugehörigen Kurve $\xi_k = \xi_k(M_{2t})$ gut erkennen, da sie mit $M_{2t} = 0,8$ beginnend, die für die Wellenerscheinungen charakteristische Spitze des Verlustzuwachses zeigt. (Hier ist $\xi_{k\max} = 4,2\%$.) Bei $M_{2t} = 1,1$ fällt die Verlustspitze der Kurve steil ab, da die Expansion infolge der Abnahme des Gegendruckes im Diffusor ein Ende nehmen kann.

Der Diffusorkoeffizient des Gitters mit der Teilung $t = 71,25$ mm beträgt nur $\bar{f} = 1,01$ und wie dies die Kurve $\xi_k = \xi_k(M_{2t})$ in Abb. 15 zeigt, findet sich im Bereich $M_{2t} \approx 1$ kein ausgeprägter Verlustzuwachs. (Die Verluste betragen entlang der ganzen Kurve ungefähr $2-3\%$.)

Da das Gitter mit der Teilung $t = 82,5$ mm ($\bar{t} = 0,794$) keine Diffusorstrecke besitzt ($\bar{f} = 1,00$), nehmen die Profilverluste in Funktion der Machzahl monoton ab. (Das Verlustminimum liegt bei $1,65\%$.) In der Nähe von $M_{2t} = 1,1$ beginnt die Kurve $\xi_k = \xi_k(M_{2t})$ zu steigen, was wahrscheinlich auf Wellenerscheinungen zurückzuführen ist, die an der Rückseite der Schaufel und im Schrägabschnitt auftreten.

Die Kurven $\beta_{2k} = \beta_{2k}(M_{2t})$ des Schaufelgitters haben den beschriebenen regelmäßigen Verlauf, d. h. die Werte von β_{2k} steigen mit wachsenden Machzahlen. Die der Teilung $t = 82,5$ mm zugehörige Kurve steigt auch bei Werten von $M_{2t} > 1$ nicht an, was mit den auftretenden Wellenerscheinungen sowie mit den in ihrem Gefolge entstehenden Grenzschichtablösungen zusammenhängen dürfte.

Das Gitter liefert im untersuchten Geschwindigkeitsintervall bei den beiden letzteren Teilungen sehr günstige Wirkungsgradwerte ($\xi_k = 2-2,5\%$). Die Erklärung hierfür ist darin zu suchen, daß der Schaufelkanal hinter dem Eintritt stark, weiter zur Mündung hin dagegen immer schwächer konfusorartig ausgebildet ist, ja in der Mündung sogar eine kleine Diffusorwirkung aufweist (Teilung $t = 71,75$ mm). Aus Abb. 16 erhellt ferner, daß Profil und Kanal im Bereich der Mündung kaum noch gekrümmt sind. Da also hier die Ungleichmäßigkeiten in der Geschwindigkeit, die infolge der Krümmung entstehen, kaum noch von Belang sind, entstehen keine lokalen Zonen mit Überschallgeschwindigkeit, die mit einer Druckwelle enden und beträchtliche Wellenverluste verursachen können. Letztere kann eine starke Verschlechterung des Gitterwirkungsgrades bewirken (s. das folgende Profil).

Ergebnisse der Versuche mit dem Schaufelgitter D_t

Das dritte charakteristische Gitter war der Reihe nach das mit D_t bezeichnete, welches durch eine starke Strahlableitung gekennzeichnet ist. Gitter für diese Aufgabe arbeiten im allgemeinen nicht mit gutem Wirkungsgrad, und zwar aus folgenden Gründen:

a) einerseits sind die Wandreibungsverluste in dem engen, langen Schaufelkanal hoch,

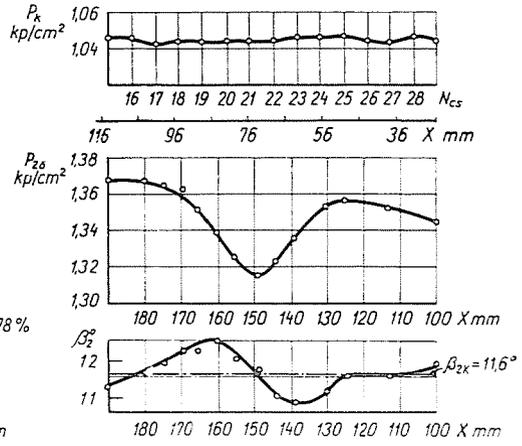
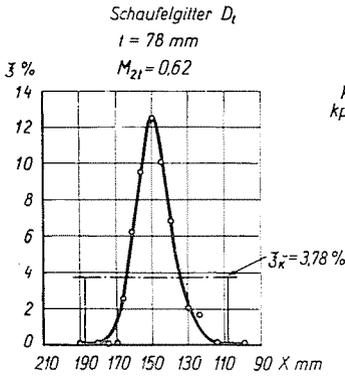


Abb. 17

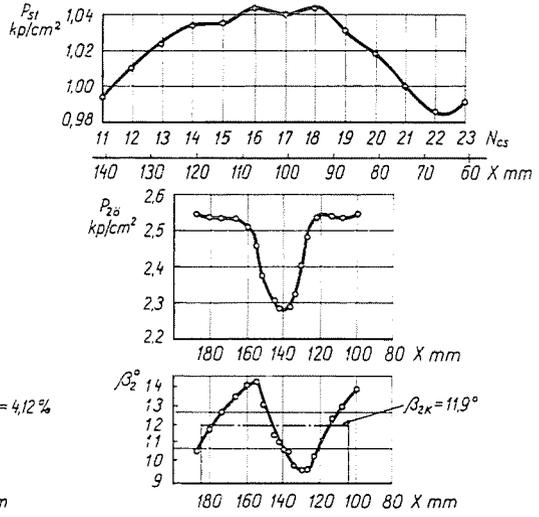
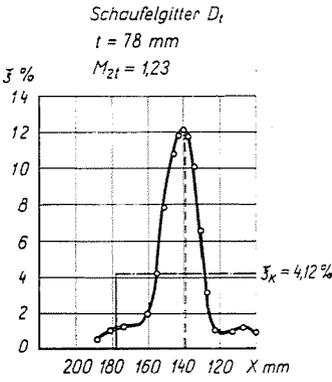


Abb. 18

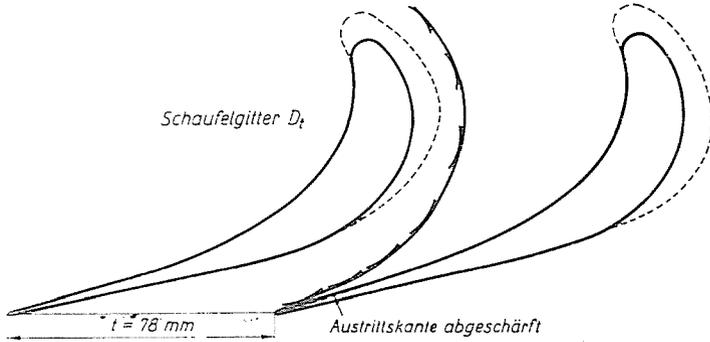


Abb. 19

b) andererseits gelingt es nicht, sie so auszugestalten, daß die Strömung in der Mündung ohne starke Krümmung verläuft, die bekanntlich zu lokalen Ungleichmäßigkeiten in der Geschwindigkeit und zur Bildung von Zonen mit Schallgeschwindigkeit führt und Verluste verursacht.

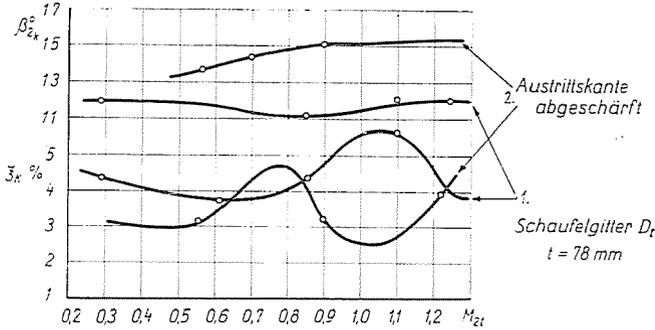


Abb. 20

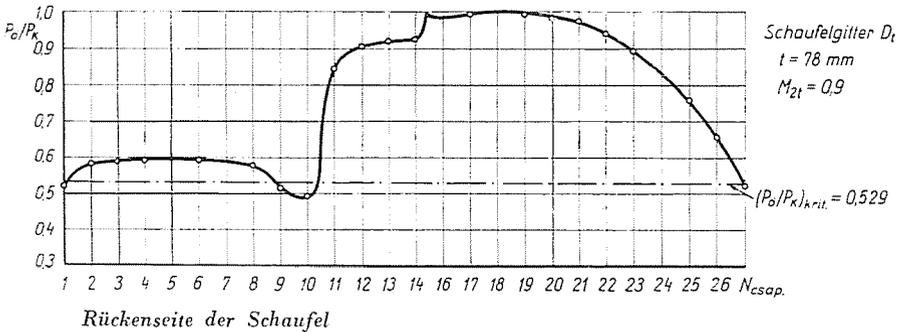


Abb. 21

Dieses Schaufelgitter wurde bloß für eine einzige Teilung untersucht ($t = 78$ mm; $\bar{i} = 0,587$). Der entstandene Schaufelkanal hatte hierbei keine diffusorartige Strecke. Der Ablenkungswinkel der in ihm entstandenen Strömung hatte mit $\Theta = 111^\circ$ einen sehr hohen Wert.

Gemäß Abb. 17 und 18 verlaufen die Meßkurven regelmäßig, doch treten bei Überschallströmungen schon im Kanal Verluste auf. Auch ist die Kurve p_{st} nicht mehr regelmäßig (Wirkung von Wellenerscheinungen).

Obwohl der Schaufelkanal nach Abb. 19 keine Strecke mit Konfusorwirkung hatte, zeigt die Abb. 20 (Kurve 1) im Intervall $M_{2t} = 0,85 - 1,2$ einen starken Verlustanstieg ($\xi_{kmax} = 5,7\%$). Der Grund hierfür konnte erst nach eingehender Prüfung der Druckverteilungskurven längs des Profils und nach Auftragung der Stromlinien geklärt werden. Aus Abb. 21 ist das Druckverteilungsbild längs des Profils bei der Austritts-Machzahl $M_{2t} = 0,9$ ersichtlich.

Obwohl die Geschwindigkeit und das Druckverhältnis an der Schaufeloberfläche im Austrittsquerschnitt ihre kritischen Werte noch nicht erreicht

haben, fällt das Druckverhältnis, wie aus der Abbildung erhellt, in der Umgebung der Punkte 9–10 (Mündung) unter das kritische; hier entstand also ein gut zu unterscheidender Schallgeschwindigkeitsbereich, der nach den Versuchsergebnissen immer mit namhaften Energieverlusten verbunden ist. Wie die Untersuchungen zeigten, ist die Schallgeschwindigkeitszone dadurch entstanden, daß die Krümmung der Strömungslinien in der Mündung zu groß war. Die Profilkonstruktion war also unrichtig.

Dasselbe Profil wurde auch in einer anderen Variante, d. h. mit abgeschärfter Austrittskante gemäß Abb. 19 untersucht, wobei der Kanal eine schwach diffusorartige Ausbildung hatte ($\bar{f} = 1,02$). Kurve 2 in Abb. 20 zeigt den Zusammenhang zwischen Verlusten und M_{2t} für diesen Fall. Der Kurvenverlauf zeigt, daß die Verdünnung der Austrittskante die Verluste im allgemeinen zwar vermindert hatte, daß aber die Kurve wegen der eingebrachten Diffusorwirkung trotzdem im Intervall von $M_{2t} = 0,6–0,9$ ($\xi_{k\max} = 4,7\%$) eine neue Spitze aufwies. Gleichzeitig veränderte sich die Eigenart der ganzen Kurve erheblich, obwohl es sich nur um eine unwesentliche Änderung an der Mündung handelte. Dies beweist, wie stark die Kanalmündung die Höhe der Gitterverluste beeinflusst.

Die Änderung des Austrittswinkels der Strömung in Abhängigkeit von der Machzahl $\beta_{2k} = \beta_{2k}(M_{2t})$ im (normalen) Falle 1 zeigt keine Abweichung von der gewohnten, d. h. der Wert von β_{2k} steigt mit wachsendem M_{2t} . Ist das Profil abgeschrägt, wächst der Austrittswinkel infolge der Änderung der Kanalform, der Verlauf der Kurve bleibt jedoch auch weiterhin regelmäßig.

Wie aus Abb. 20 ersichtlich, sind die Verluste bei diesem nicht ganz richtig konstruierten Gitter ziemlich erheblich (etwa 4–5%). Diese verhältnismäßig hohen Verluste erklären sich einerseits aus dem engen Kanal, in dem die Wandreibung viel Energie aufzehrt, andererseits aus der Tatsache, daß im Kanal bei Annäherung des kritischen Druckverhältnisses und der kritischen Geschwindigkeit infolge der Krümmung des Kanals und der Stromlinien noch vor Erreichen des kritischen Druckverhältnisses Zonen von Schallgeschwindigkeit entstehen, die in allen Fällen hohe Gitterverluste verursachen.

Die Verluste des Profils lassen sich durch dessen Neukonstruktion im Sinne des gestrichelten Linienzuges der Abb. 19 herabsetzen. Hierbei verflacht sich die Krümmung in der Mündung, und auch die Druckverteilung längs des Profils wird günstiger. (Der Wert des Druckgradienten längs des Schaufelrückens wird gleichfalls niedriger.)

Nach den Gittern mit Profilschaufeln wurden diejenigen mit Blechschaufeln mit den hier folgenden Ergebnissen untersucht.

Ergebnisse der Versuche mit dem Schaufelgitter B_1

Wie aus Abb. 22 ersichtlich, hatten die Gitterschaufeln verschiedene Sehnenlängen. Dies entspricht dem Streben nach Verminderung der Reibungsverluste und des Konstruktionsgewichtes. Ein Blick auf die Abbildung zeigt sofort, daß solche Gitter im Unterschallbereich aus zwei Gründen keinen guten Wirkungsgrad haben können:

- a) Die Reibungsverluste sind im langen und engen Schaufelkanal hoch.
- b) Der Mündungsteil hat eine Strecke mit starker Diffusorwirkung, weshalb bei niedrigen Geschwindigkeiten unbedingt Grenzschichtablösungen, im

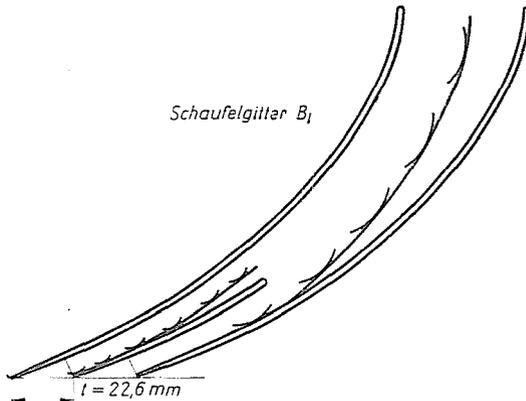


Abb. 22

Schallgeschwindigkeitsbereich dagegen starke Druckwellen entstehen. Die letzteren vermindern die im Diffusorteil aus der Überexpansion entstehenden hohen Überschallgeschwindigkeiten auf das normale, dem Druckverhältnis entsprechende Maß, wobei beträchtliche Wellenverluste auftreten.

Auch die Versuchsergebnisse scheinen diese Ansicht zu bestätigen (Abb. 23 und 24). Aus den Abbildungen geht klar hervor, daß im Kern des Schaufelkanals schon bei der Machzahl von $M_{2f} = 0,8$ ein gewisser Verlust zu verzeichnen ist, der auf die Gegenwart von Druckwellen folgern läßt. Bei $M_{2f} = 1,23$ beträgt der Verlust im Kern des Schaufelkanals schon ungefähr 1%, erreicht also schon einen beträchtlichen Wert. Weiterhin zeigt sich, daß die p_{st} -Kurve im Überschallbereich unregelmäßig wird, was auf die Gegenwart starker Druckwellen hinweist.

Auch der Verlauf der Kurve $\xi_k = \xi_k(M_{2f})$ gestaltet sich interessant (Abb. 25). Bei einem $M_{2f} = 0,8$ hat der Gitterverlust noch immer den exorbitant hohen Wert von 8%, der den infolge der unrichtigen diffusorartigen Ausbildung der Mündung schon bei niedrigen Geschwindigkeiten auftretenden Wellen- und sekundären Verlusten zuzuschreiben ist. Die Verluste vermindern sich mit wachsender Machzahl, was sich daraus erklärt, daß sich die Expansion

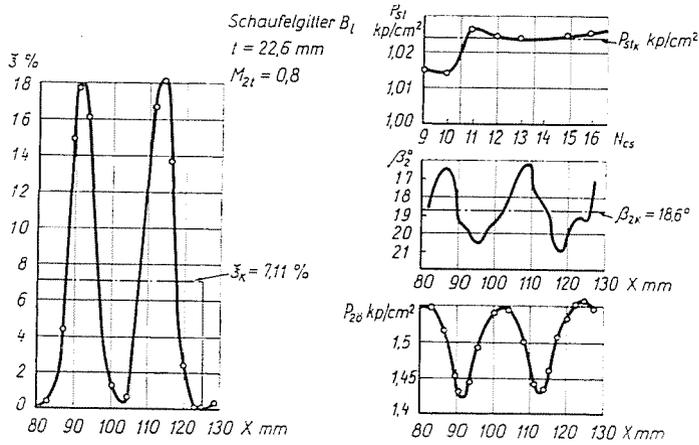


Abb. 23

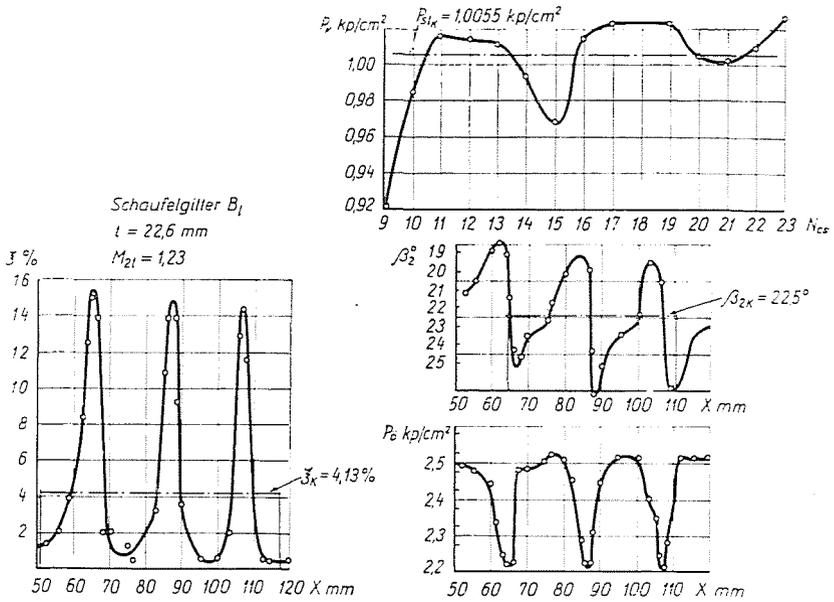


Abb. 24

im Diffusorteil der Mündung infolge der Abnahme des Druckverhältnisses voll entwickeln kann und starke Ablösungen nicht mehr entstehen. Außerdem steigt die Reynoldssche Zahl bei hohen Machzahlen ebenfalls beträchtlich an, was die Turbulenz der Grenzschicht zur Folge hat. Erfahrungsgemäß löst sich eine turbulente Grenzschicht selbst unter der Einwirkung von Druckwellen nicht immer von der Oberfläche ab. Damit hat man für die abnehmende Tendenz der Verluste bei wachsendem M_{2t} auch eine logische Erklärung. Die Haupt-

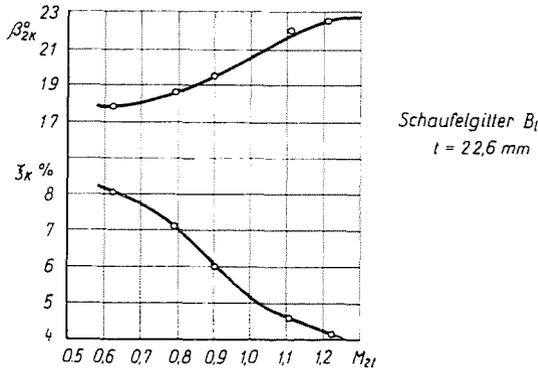


Abb. 25

rolle beim Entstehen der hohen Verluste des Schaufelgitters hatte, wie gesagt, die unrichtige Ausbildung der Schaufelkanalmündung.

Die Kurve $\beta_{2k} = \beta_{2k}(M_{2t})$ (Abb. 25) verläuft regelmäßig, d. h. der Austrittswinkel der Strömung steigt mit wachsender Machzahl ebenfalls monoton an.

Ergebnisse der Versuche mit dem Schaufelgitter G_1

Das Schaufelgitter mit den Schaufeln der Type G_1 wurde bei dreierlei Teilungen untersucht. Abbildung 26 zeigt die den verschiedenen Teilungen zugehörigen Schaufelkanäle. Die Diagramme der Messungen bezeugen, daß bei diesem Schaufelgitter keine hohen Verluste auftreten. Der Kurvenverlauf ist sehr günstig und entschieden regelmäßig (Abb. 27 und 28). Aus Abb. 29 sind die vereinten Kurven $\xi_k = \xi_k(M_{2t})$ für die drei Teilungsabstände ersichtlich. Der

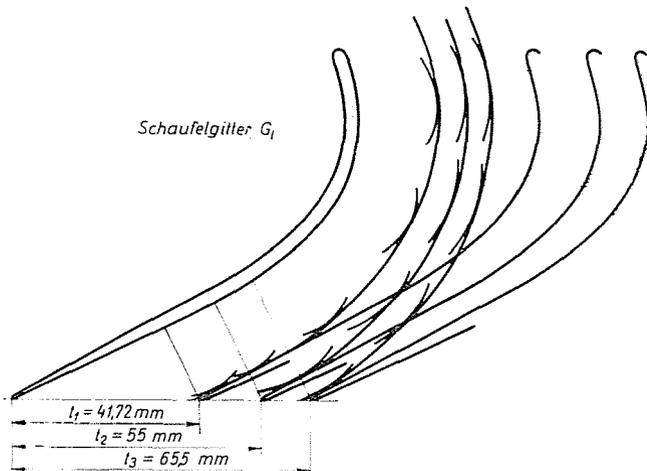


Abb. 26

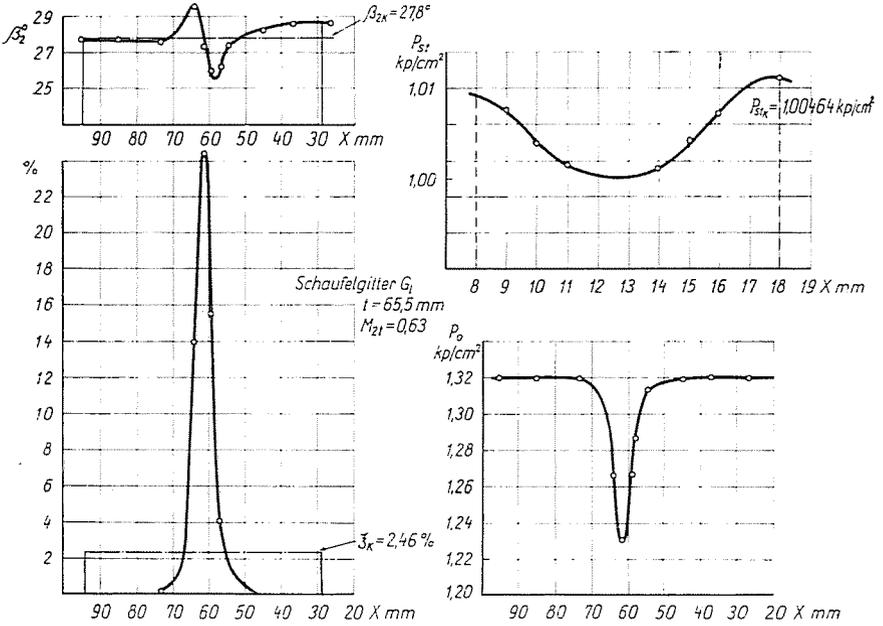


Abb. 27

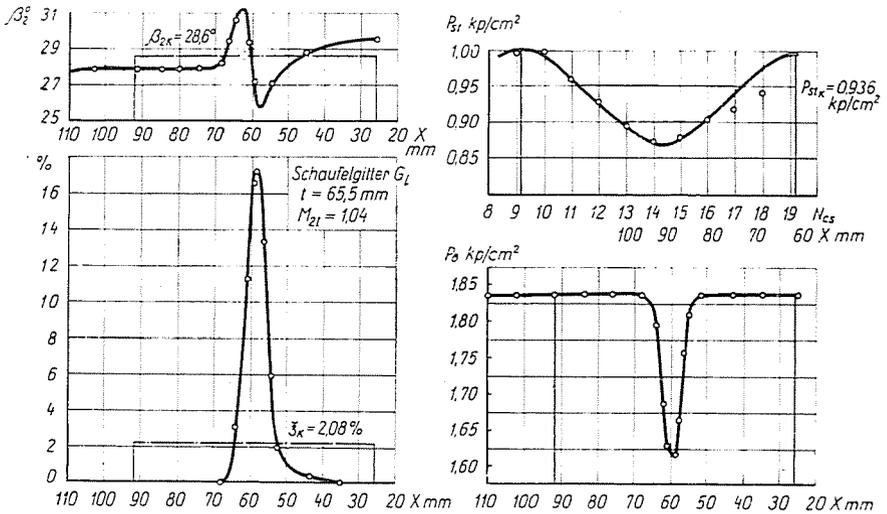


Abb. 28

Charakter des Kurvenverlaufs kann durch Vergleich der Abbildungen 26 und 29 erklärt werden.

Die der Teilung $t = 41,72 \text{ mm}$ ($\bar{t} = 0,39$) zugehörige $\xi_k = \xi_k(M_{2t})$ Kurve zeigt ab $M_{2t} = 0,9$ infolge der Diffusorwirkung des Kanals ($f = 1,03$) eine Steigung (Wellenverluste im Diffusor), während sie — nach Erreichen eines

Maximums (zwischen den Werten $M_{2t} = 0,9$ und $1,2$) — wieder fällt ($\xi_{k \max} = 3,4\%$). Mit Erweiterung der Teilung verschwindet die Diffusorstrecke des Kanals und damit auch der Verlustanstieg infolge der Druckwellen. Der Verlauf der Kurven $\xi_k = \xi_k(M_{2t})$ und $\beta_{2k} = \beta_{2k}(M_{2t})$ ist ganz regelmäßig. Sie verbleiben im Bereich sehr niedriger Verluste. So liegen z. B. die Verluste des

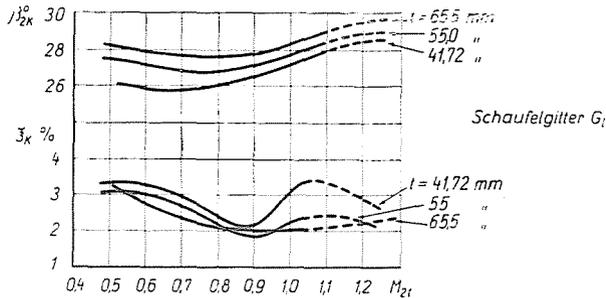


Abb. 29

Schaufelgitters mit der Teilung $t = 65,5$ mm ($\bar{t} = 0,524$) im ausgedehnten Geschwindigkeitsgebiet um die Schallgeschwindigkeit bei etwa 2% , was als sehr günstig bezeichnet werden kann.

Nach Abb. 26 ist die Verengung der entstandenen Schaufelkanäle sehr gleichmäßig, so daß die Strömung im Mündungsteil kaum noch gekrümmt ist. Damit sind der niedrige Druckwellenverlust und der gute Gitterwirkungsgrad naturgemäß eng verknüpft.

Ergebnisse der Versuche mit dem Schaufelgitter D_1

Zuletzt wurde das Profil D_1 geprüft. Sein Schaufelkanal (s. Abb. 30) ist sehr lang, er verengt sich anfangs stark, später weniger; im Mündungsteil bleibt der Querschnitt fast unverändert. Der Beiwert der Diffusorstrecke

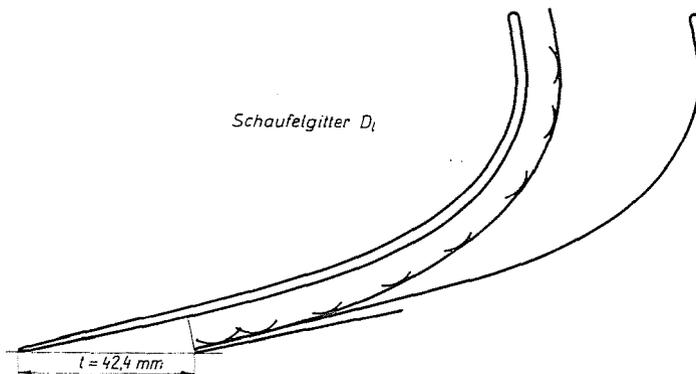


Abb. 30

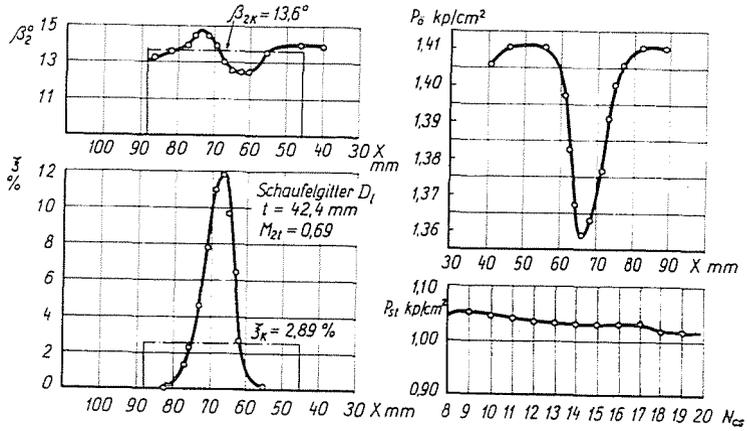


Abb. 31

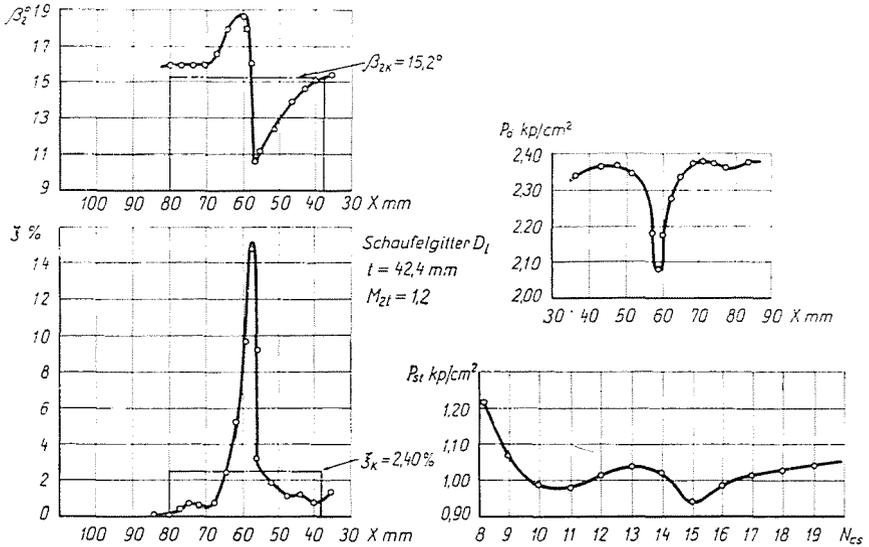


Abb. 32

beträgt $\bar{f} = 1,05$, ist also ziemlich hoch. Die Diagramme der Messung sind regelmäßig (Abb. 31 und 32). Die Versuche bei Überschallgeschwindigkeiten bezeugen ebenfalls das Vorhandensein von Verlusten (Wellenverluste).

Der Verlauf der Kurve $\xi_k = \xi_k(M_{2t})$ (Abb. 33) entspricht den ähnlichen Diagrammen von Kanälen mit Diffusormündung, d. h. es findet sich an ihr im Bereich $M_{2t} = 0,9 \sim 1,15$ ein auf Wellenerscheinungen hinweisendes Verlustmaximum ($\xi_{k \max} = 4,75\%$). Nach dem Maximum sinken die Verluste etwas ab, doch verbleibt die Kurve über den ganzen Deutungsbereich im Gebiet erheblicher Verluste. Wahrscheinlich sind sie dem langen, engen Schaufelkanal

und der Diffusorwirkung in der Mündung zuzuschreiben. Nach Ausschaltung der bestehenden diffusorartigen Kanalstrecke könnten die Verluste des Schau- felgitters vermutlich vermindert werden. Es bestand leider keine Möglichkeit, ausgedehnte Versuche in dieser Richtung anzustellen. Auf Grund des Gesagten scheint die Verantwortung für die mehr als angemessenen Verluste des Gitters

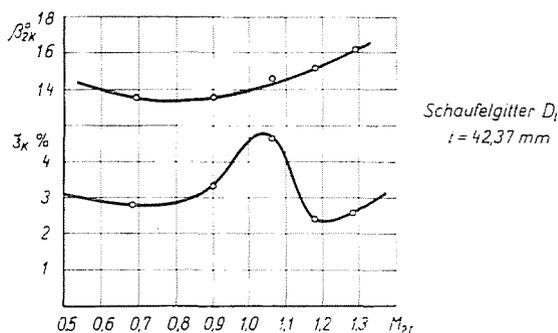


Abb. 33

bei der Diffusorstrecke des Kanals zu liegen; nach Erweiterung der Teilung würden sich die entstehenden Verluste vermindern.

Die Kurve $\beta_{2k} = \beta_{2k}(M_{2t})$ verläuft ganz regelmäßig, fällt bei den niedrigen Machzahlen von $M_{2t} = 0,6 \sim 0,8$ leicht ab, um danach wieder anzusteigen. Die Steigung der Kurve ist mit einem Anwachsen der Gitterverluste und mit der Ablenkung der Strömung infolge Expansion bei $M_{2t} > 1$ verknüpft.

Vergleich der Schaufelgitter aus Profil- und Blechschaufeln

Der Vergleich der bei der Messung der Profil- und Blechschaufelgitter erhaltenen Kurven $\xi_k = \xi_k(M_{2t})$ und $\beta_{2k} = \beta_{2k}(M_{2t})$ sowie der betreffenden Kanalfigurationen (Abb. 6, 16, 19, 22, 26, 30, sowie 11, 15, 20, 25, 29, 33) berechtigt zu der Feststellung, daß die Güte der Schaufelgitter (mit hohem Reaktionsgrad) hauptsächlich von zwei Faktoren abhängt:

1) von der richtigen, wenig verengten und gekrümmten Ausgestaltung des Mündungsteils und der — von der Eintrittsfront des Kanals her — an den Mündungsteil sich anschließenden Teile des Schaufelkanals;

2) von der Gestaltung des Schrägabschnitts des Kanals (unter Voraussetzung einer normalen Dicke der Austrittskante).

Fast zu genau derselben Schlußfolgerung gelangte auch KIRSANOW. Er hat nachgewiesen, daß bei Austrittsgeschwindigkeiten in der Nähe der Schallgeschwindigkeit (aber noch etwas unter dieser) die Form des Kopf- teiles der Schaufel, bzw. der Eintrittsteil der Kanäle die Wirksamkeit des Gitters nur in sehr kleinem Maße beeinflußt, wogegen sie maßgeblich von den Aus-

trittsteilen abhängt. Diese Feststellung gilt natürlich nur für Schaufelgitter hoher Reaktivität, also für solche, die ein hohes Wärmegefälle verarbeiten. In solchen ist nämlich die Eintrittsgeschwindigkeit im Vergleich zur Austrittsgeschwindigkeit sehr hoch ($c_{\text{au.}}/c_{\text{ein}}$ kann für diese Gitter selbst Werte von 4 bis 8 erreichen), die Strömungsverluste am Eintritt halten sich somit (wegen der hier bestehenden niedrigen Geschwindigkeit) noch in mäßigen Grenzen. Andererseits klingen die beim Eintritt entstandenen Grenzschichtablösungen und Wirbel in der stark beschleunigten Strömung im Kanal schnell ab. Anders gesagt, die Grenzschicht haftet in einem solchen Schaufelkanal sehr fest an der Oberfläche der Schaufel und wird mit dem Anwachsen der Strömungsgeschwindigkeit (mit dem Vorwärtsschreiten der Expansion) immer dünner. (Nach Ansicht einiger Forscher wird die Grenzschicht schon nach Zurücklegen von $\frac{2}{3}$ der Kanallänge turbulent, wodurch die Bedingungen des Verbleibens der Strömung an der Oberfläche verbessert werden.)

Bei näherer Betrachtung der Schaufelgitterzeichnungen fällt auf, daß die durch Profil- und Blechschaufel gebildeten Kanäle voneinander wesentlich nur in den Eintrittsteilen abweichen, ihre Mündungsteile und die and an diese in Strömungsrichtung auf- und abwärts anschließenden Teile zeigen keine übertriebenen formmäßigen Abweichungen. Ihre Formen können einander sogar völlig ähnlich sein, denn diese Teile der Schaufel werden fast immer mechanisch bearbeitet, so daß sie in beiden Fällen ähnliche Formen erhalten können.

Übt also der Eintrittsteil des durch die Schaufeln gebildeten Kanals bei hohem Reaktionsgrad auf die im Gitter entstandenen Verluste keinen großen Einfluß aus und sind jene Teile des Kanals, in denen sich die Strömung bereits auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigt hat, (in den sich also die eventuellen Verluste auf die Gesamtwirksamkeit des Gitters schwer auswirken könnten) in den beiden Fällen (Blech und Profil) einander fast ähnlich, oder lassen sie sich durch mechanische Formgebung der Schaufeln einander ähnlich machen, dann darf mit guter Annäherung ausgesagt werden, daß die zweierlei Gitter aerodynamisch annähernd gleichwertig gemacht werden können. In diesen Leitschaufelgittern mit hohem Reaktionsgrad sind nämlich in der Nähe der Schallgeschwindigkeit für alle Verluste allein der Mündungsteil und der Schrägabschnitt des Kanals verantwortlich. Diese Feststellung gilt aber nur für so hohe Geschwindigkeiten, bei denen die Reynoldssche Zahl keinen großen Einfluß auf das Entstehen der Gitterverluste hat ($Re \cong 10^6$), also bei Strömungen, deren Geschwindigkeit von derjenigen des Schalles nicht sehr verschieden ist. Die vom Verfasser durchgeführten Versuche scheinen diese Feststellung ebenfalls zu bekräftigen (Abb. 11, 15, 20, 25, 29, 33). Die Gültigkeit dieser Feststellungen auf andere Fälle ohne weiteres zu extrapolieren, wäre jedoch leichtsinnig, doch besteht offenbar die Möglichkeit, auf Grund ähnlicher Untersuchungen an Schaufelgittern niedriger Reaktivität die Stichhaltigkeit der Resultate vorliegender Arbeit zu kontrollieren.

Zusammenfassung

Es wird über die Resultate von Modellversuchen des Verfassers berichtet, die er an Gittermodellen in einem Hochgeschwindigkeits-Windkanal ($M \cong 1,5$) für Turbinenschaufelgitter durchgeführt hat. Die Versuche hatten das Ziel, zu bestimmen, ob sich für die Leitschaufelreihen von Dampf- und Gasturbinen hoher Leistung (200 bis 300 MW) — vom Gesichtspunkt der Profilverluste betrachtet —, aus Blech gestanzte oder Profilschaufeln besser eignen. Zu diesem Zweck wurde durch den Verfasser auf Versuchswege eine gewisse Zahl geeignet konstruierter und unter ähnlichen Verhältnissen betriebener Schaufelgitterpaare untersucht, die aus profilierten bzw. aus gestanzten Blechschaufeln bestanden. Die vorliegende Arbeit diskutiert die kennzeichnendsten der Versuchsergebnisse und faßt die allgemeinen Folgerungen aus ihnen zusammen.

Literatur

Кирсанов, В. А.: Об улучшении турбинных решеток профилей. Изв. АН СССР ОТН 1954. № 7.

Dr. István ERDŐDY, Budapest, XI., Sztoczek u. 2—4. Ungarn.