

Dejč, M. E.  
Filippov, G. A.  
Lazarev, L. Ja.

## **BERECHNUNG UND PROFILIERUNG DER GITTER VON AXIALTURBINEN**

**§ 12. Profilierung der Laufgitter bei schallnahen und Überschall-Geschwindigkeiten. Profilierung der Gitter nach der Potentialwirbel-Methode.**

**§ 14. Effiziente Formen der Passagen von Gleichdruck-Laufgittern mit geringen Schaufelhöhen.**

Deutsche Vollübersetzung aus:

Dejč, M. E.; Filippov, G. A.; Lazarev, L. Ja.: Atlas profilej rešetok osevyh turbin.

Moskva: Mašinstroenie, 1965, S. 19 – 22, 24 - 26.

Russ.: Глава 2. Расчет и профилирование решеток. § 12. Профилирование рабочих решеток для околосвуковых и сверхзвуковых скоростей. Профилирование решеток методом «вихря». § 14. Рациональные формы каналов активных решеток с малыми высотами лопаток.  
Glava 2. Rasčet i profilirovanie rešetok. § 12. Profilirovanie rabočich rešetok dlja okolozvukovyh i sverchzvukovyh skorostej. § 14. Racional'nye formy kanalov aktivnyh rabočich rešetok s malymi vysotami lopatok.

## Inhaltsverzeichnis (S. 3):

	S. im russ. Original	Stelle in der Übersetzung Ü/634
Vorwort	4	—
1. Teil.		
Profilierungsmethoden und aerodynamische Eigenschaften der Gitter		
1. Kapitel. Allgemeines	7	4
§ 1. Klassifikation der Gitter	7	4
§ 2. Bezeichnung der Größen, Geometrie und Betriebswerte der Gitter	7	7
§ 3. Experimentelle Bestimmungsmethode der aerodynamischen Gittereigenschaften	8	11
§ 4. Allgemeine Tabelle der Turbinengitterprofile	10	15
§ 5. Gitterprofil-Senkrechte	10	16
§ 6. Festigkeitswerte der Profile	11	—
		Ü/635
2. Kapitel. Berechnung und Profilierung der Gitter	13	—
§ 7. Wahl des Gittertyps und seine wichtigsten Eigenschaften	13	—
§ 8. Berechnung der Potentialströmungen und Methoden der Gitterprofilierung bei Unterschallgeschwindigkeiten	13	—
§ 9. Aproximative Verfahren zum Bau von Unterschallgittern. Schleifenlinien-Methode	14	—
§ 10. Profilierung der Leitgitter für schallnahe Geschwindigkeiten	16	—
§ 11. Profilierung der Überschall-Leitgitter	18	—
§ 12. Profilierung der Laufgitter bei schallnahen und Überschall-Geschwindigkeiten. Profilierung der Gitter nach der Potentialwirbel-Methode	19	4
§ 13. Profilierung der Leitgitter mit geringen relativen Schaufelhöhen	22	—
§ 14. Effiziente Formen der Kanäle von Gleichdruck-Laufgittern mit geringen Schaufelhöhen	24	12
§ 15. Profilierung der Leit- und Laufgitter für Stufen mit geringen Relationen $u/c_a$	26	—
§ 16. Profilierung der Leitgitter von Regelstufen	26	—
§ 17. Besonderheiten der Planung und Berechnung der Gitterquerschnitte mit großer Fächerung	27	—
		Ü/636
3. Kapitel. Berechnung der aerodynamischen Gittereigenschaften. Einfluß mancher geometrischer Werte auf die aerodynamischen Gittereigenschaften	28	3
§ 18. Reibungsverluste in den Gittern. Berechnung der Grenzschicht	28	3
§ 19. Einfluß der Dicke und Form der Austrittskante auf die Gitterleistung. Berechnung der Kantenverluste	29	8
§ 20. Profilverluste in den Gittern	31	12
§ 21. Strömungsaustrittswinkel bei Unterschall- und Überschall-Geschwindigkeiten	31	13
§ 22. Durchflußmengen der Turbinengitter	32	—

§ 23. Einfluß der relativen Höhe auf den Wirkungsgrad der Gitter. Berechnung der Endverluste	33	16
§ 24. Wahl des optimalen Gitterabstands und des Profileinstellwinkels	33	20
§ 25. Berücksichtigung des Einflusses der Überdeckung auf die Endverluste in Leit- und Laufgittern bei variablem Eintrittswinkel	34	21
§ 26. Einfluß der Fächerung auf die Verteilung der Verluste über die Höhe der Kreisgitter. Berücksichtigung der Schaufelneigung und - krümmung in radialer Ebene	34	—
§ 27. Einfluß der Gehäuse- bzw. Deckbandneigung (Überdeckung des Strömungsabschnitts) auf die Leistung der Leit- und Laufgitter	35	24
§ 28. Einfluß von Rauigkeit und technischer Defekte auf die Gitterleistung	36	—
		Ü/643
4. Kapitel. Einfluß der Betriebswerte auf die Gitterleistung	38	3
§ 29. Strömungseintrittswinkel in die Leit- und Laufgitter. Berechnung der Verluste bei unberechenbaren Eintrittswinkeln	38	3
§ 30. Einfluß der Reynolds-Zahl und Komprimierbarkeit (Zahl M) auf die Eigenschaften von Turbinengittern	39	6
§ 31. Einfluß der Strömungsturbulenz auf die Profil- und Gesamtverluste in den Leit- und Laufgittern	40	10
§ 32. Unregelmäßigkeit der Geschwindigkeitsfelder in Turbinengittern. Berücksichtigung des Unregelmäßigkeitseinflusses auf die Verluste in den Gittern	40	12
		Ü/645
5. Kapitel. Berechnung der Stufen von Dampf- und Gasturbinen nach statischen Untersuchungswerten	42	2
§ 33. Methode der Wärmeberechnung der Stufen unter Heranziehung der aerodynamischen Werte des Atlas	42	2
§ 34. Rechenbeispiele für Turbinenstufen	42	5
2. Teil. Profile. Aerodynamische und Festigkeitswerte der Gitter		
Blätter 1 - 52	44 - 95	—
Literatur	96	Ü/634 S. 20 Ü/635 S. 16 Ü/636 S. 29 Ü/643 S. 15 Ü 645 S. 6

## § 12. Profilierung der Laufgitter bei schallnahen und Überschall-Geschwindigkeiten. Profilierung der Gitter nach der Potentialwirbel-Methode

Bei Überschallgeschwindigkeiten beim Eintritt in die aktiven Gitter kommt es zu Eintrittsstößen, die mit dem Umströmen der Profileintrittskanten zusammenhängen. Die Form der Eintrittsstöße und ihre Stellung zu den Kanten hängt von der Mach-Zahl  $M$  am Eintritt, der Kantenform und den Schaufelpassagen ab. Die Form der Profilein- und -austrittsabschnitte und die Kanalform müssen sicherstellen:

- a) minimale Wellenverluste in den Verdichtungsstößen am Eintritt und Austritt
- b) kontinuierliche Strömung mit minimalen Reibungsverlusten in den Schaufelteilungen.

In den meisten Fällen kommt es bei Überschallgeschwindigkeiten im Gittereintritt in der Schaufelkammer zu einem Strömungsabriß und zu einem komplexen System von schiefen Stößen, die sich gegenseitig von den Kanalwänden und der Abrißzonen-grenze aus beeinflussen.

Bei geringen Überschallgeschwindigkeiten  $M_1 < 1,3$  ähneln die Eintrittsstöße in ihrer Form Geraden. Da die Verluste in einem geraden Stoß bei solchen Geschwindigkeiten nur gering sind, werden die Gitter der Gruppe B nach der Methode des „geraden Stoßes“ profiliert. In derartigen Gittern sind die Profilein- und -austrittskanten spitz oder geradlinig gestaltet, die Schaufelkammern verengen sich gleichmäßig [3, 11]. Die krummlinigen Rückenabschnitte und die konkaven Oberflächen sind unregelmäßig gekrümmt, wobei die Form des krummlinigen Teils nach der Kanalform untersucht wird (§ 8)<sup>1</sup>.

Die Profilierung von Gleichdruck-Gittern für  $M > 1,3$  erfolgt nach verschiedenen Methoden, die sich unterscheiden in der Anordnung der Strömung an den Eintrittskanten, der Kanalform und der Profilrückenform im Schrägabschnitt am Gitteraustritt.

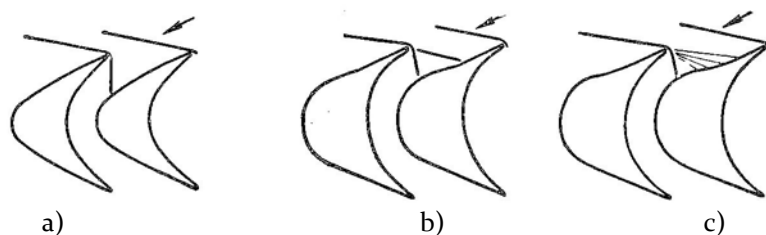


Abb. 19. Struktur der Strömung vor dem Gitter bei Überschallgeschwindigkeiten

Die Eintrittsabschnitte des Profilrückens von Überschallgittern können folgendes sicherstellen: 1) konstante Geschwindigkeit im Eintrittstoß (gerader Rücken am Ein-

<sup>1</sup> In dem nicht wiedergegebenen § 8 werden die Berechnung der Potentialströmungen und Methoden der Gitterprofilierung bei Unterschallgeschwindigkeiten behandelt (Anm.d.Übers.).

tritt) (Abb. 19a); 2) stufenweise abgebremste Strömung im Stoßsystem (konturierter Rücken am Eintritt) (Abb. 19b); 3) gleichmäßiges Abbremsen längs der konkaven Wand am Gittereintritt (Abb. 19c).

Die Schaufelteilung kann als eine Ausdehnungshilfe angesehen werden (minimaler Querschnitt liegt innerhalb), und dann wird die Geschwindigkeit anfänglich abgebremst, bei geringen Geschwindigkeiten kommt es zur Umkehrung, und danach beschleunigt sie sich im Ausdehnungsabschnitt und im Schrägabschnitt. Hat der Strömungskanal einen konstanten Querschnitt, dann kommt es zu einer Strömungsabbremmung (wegen der Reibung) bis zum Austrittsquerschnitt, und zu einer Beschleunigung kommt es nur im Schrägabschnitt. Der Austrittsabschnitt des Profilirückens im Schrägabschnitt muß gerade oder konkav sein (mit darauffolgendem Übergang in den geradlinigen Abschnitt). Der konkave Profilirücken kann nach dem Charakteristikenverfahren berechnet werden. Bei allen Profilierungsverfahren werden die Ein- und Austrittskanten keilförmig oder zugespitzt ausgelegt.

Die Strömung kann in Überschallgittern gemischt oder völlig im Überschall sein. Nur im letzteren Fall ist eine approximative theoretische Lösung der direkten oder inversen Aufgabe möglich.

Nachstehend wird ein Verfahren zur Konstruktion von Gleichdruck-Überschallgittern bei völliger Überschallströmung in den Schaufelkammern behandelt.

Die Potentialwirbel-Methode bzw. die Methode der „völligen Überschallströmung“ wurde unabhängig voneinander von M. F. Žukov (1950) und von Boxer und Sterret [49] (1952) sowie später von Oswatitsch [52, 53] (1956) dargestellt. Die Methode geht aus von einer rationellen Zusammenstellung der Potentialumlaufströmung ( $\lambda R = \text{const}$ ) und den entsprechenden Rektifikationsströmungen (Abb. 20).

Zur Konstruktion eines Gitters wird eine gleichmäßige Strömungsgeschwindigkeit am Eintritt vorgegeben. Desweiteren eine Strömungsführung, die eine hyperbolische Geschwindigkeitsverteilung im Kanalmitteleil erreicht. Die Konstruktion einer solchen Strömungsführung wird gewährleistet durch entsprechende Profilierung der Übergangsbögen. Die Strömung mit der hyperbolischen Geschwindigkeitsverteilung wird auf den vorgegebenen Winkel im Kanal umgelenkt, dessen Erzeugende die konzentrischen Kreislinien sind. Die Übergangsbögen am Eintritt überführen die Wirbelverteilung der Geschwindigkeiten in eine gleichmäßige Strömung hinter dem Gitter.

Die Konstruktion der Übergangsbögen erfolgt nach dem Charakteristikenverfahren.

Untersuchen wir die Konstruktion eines Gitters im Falle unendlich feiner Schaufeleintrittskanten. Bei vorgegebener Machzahl am Eintritt  $M_1$  muß die Strömung im Übergangsbereich der konkaven Oberfläche bis auf die gewählte Machzahl  $M_{\text{gew}}$  abgebremst und im Übergangsbereich des Rückens bis auf  $M_c$  beschleunigt werden. Wir bezeichnen mit  $\delta$  den Ablenkungswinkel der Überschallströmung bei seiner Ausdehnung von  $M = 1$  bis zum vorgegebenen  $M$ . Dann ist  $\delta'_1$  der Ablenkungswinkel bei Ausdehnung von  $M = 1$  bis  $M'_1$  (Abb. 20);  $\delta_c$  von  $M = 1$  bis  $M_c$  und  $\delta_{\text{gew}}$  von  $M = 1$  bis  $M_{\text{gew}}$ .

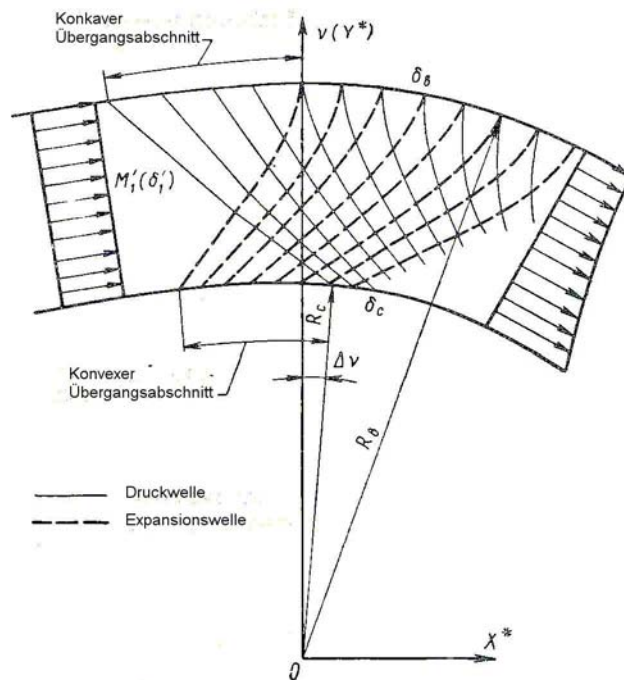


Abb. 20. Rekonstruktionsbild einer gleichmäßigen Überschallströmung vor dem Gitter mit Wirbelstrom innerhalb des Kanals

In der Kompressionszone im Übergangsabschnitt der konkaven Oberfläche nimmt der Ablenkungswinkel um den Wert  $\delta_c - \delta_{gew}$  ab. Beide Übergangsbereiche müssen die Strömung auf den gleichen Winkel umlenken. Folglich ist

$$\left. \begin{aligned} \delta'_1 - \delta_{gew} + \Delta v &= \delta_c - \delta'_1 \\ \Delta v &= \delta_{gew} + \delta_c - 2\delta'_1 \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

mit  $\Delta v$  Verschiebungswinkel der Übergangsabschnitte des Rückens und der konkaven Oberfläche (Abb. 20).

Die Verfasser von [49] haben die Koordinaten der Übergangsbereiche für verschiedene Geschwindigkeiten und Ein- und -austrittswinkel algebraisch berechnet (Tab. 5). Die Koordinaten der Übergangsbereiche sind hier im kartesischen Koordinatensystem ( $X^*$ ;  $Y^*$ ) angegeben. Wir ziehen die Tabelle heran und können für die gewählten Werte von  $\delta'_1$  ( $M'_1$ );  $\delta_{gew}$  und  $\delta_c$  die Bögen im orthogonalen Koordinatensystem konstruieren. Da der konkave Bogen bei  $v = 0$  beginnt und der konvexe bei  $v_c = \Delta v$ , muß man ihn nach Konstruktion des konvexen Übergangsbereichs um den Winkel  $\Delta v$  in Uhrzeigerrichtung um das Zentrum  $o$  verschieben. Die Radien der Kreisbögen der Schaufelkammer bei vorgegebenen Werten von  $\delta_{gew}$  und  $\delta_c$  sind ebenfalls in Tab. 5 enthalten ( $R_c^* = Y^*$  bei  $v = 0$ ).

Profil- und Schaufelpassagenform werden bestimmt durch die Machzahl  $M_1$  am Eintritt, durch den Strömungsumlenkwinkel im Gitter  $\theta = (\beta_1 + \beta_2)$  und durch die gewählten Werte  $\delta_{gew}$  ( $M_{gew}$ ) und  $\delta_c$  ( $M_c$ ) auf der konkaven Oberfläche und dem



Rücken. Bei einem symmetrischen Profil (Abb. 21)<sup>1</sup> ist der Umlenkwinkel  $2\beta_1$ . In diesem Fall haben konvexe Oberfläche und Rücken eine Länge, die durch die Winkel  $\theta - 2(\delta'_1 - \delta_{gew})$  und  $\theta - 2(\delta_c - \delta'_1)$  bestimmt werden. Die Übergangsbereiche am Rücken werden mit den Kanten durch gerade Abschnitte verbunden, die zusammen mit den Übergangsabschnitten der konkaven Oberfläche eine unendlich feine Kante bilden. Praktisch sind solche Kanten nicht realisierbar. Diese Schwierigkeit kann man überwinden, wenn man die Ein- und Austrittskanten keilförmig gestaltet mit recht kleinem Keilwinkel, damit der Stoß am Eintritt in die Schaufelteilung an der Profilverdickerte anliegt.

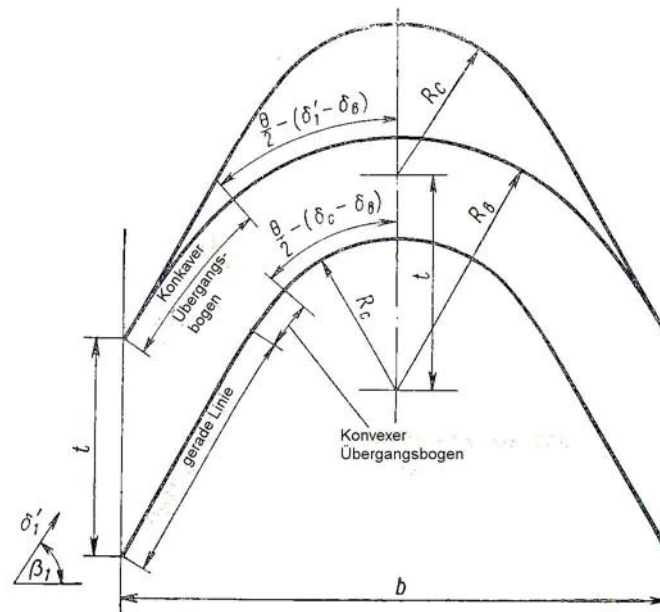


Abb. 21. Bezeichnungen von Gittern, konstruiert nach der Potentialwirbel-Methode

Wenn die Axialkomponente der Geschwindigkeit am Eintritt im Überschall bleibt (Abb. 22a), bildet sich von der konkaven Seite her ein Keil und parallel zur auflaufenden Strömung ein Rücken. Dann hat der an der Eintrittskante von der konkaven Seite her entstehende Verdichtungsstoß keinen Einfluß auf die Strömung außerhalb des Kanals. Um diesen Stoß zu dämpfen, läßt man den Profilirücken an der Stoßauflaufstelle brechen. Die Geschwindigkeit hinter dem Stoß  $M'_1$  kann man leicht rechnerisch bestimmen, da der Winkel des Keils  $\gamma$  und  $M_1$  bekannt sind. Von den Punkten A und B aus beginnen die Übergangsbereiche zur konkaven Seite und zum Rücken. Der Strömungsdrehwinkel im Kanal ist  $2(\beta_1 + \gamma)$ .

<sup>1</sup> Hier bezeichnen  $\beta_1$  und  $\beta_2$  die Winkel zwischen den Geschwindigkeitsvektoren  $w_1$  und  $w_2$  und dem Vektor der Axialkomponente der Geschwindigkeiten.



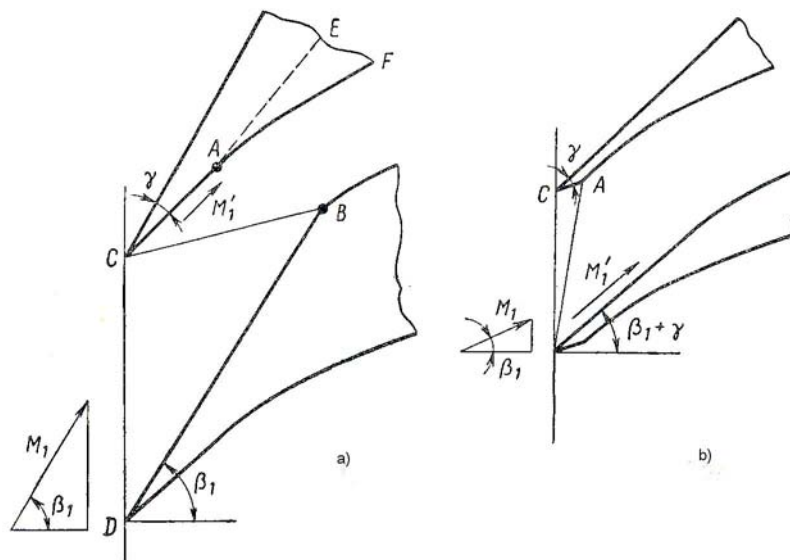


Abb. 22. Schematische Darstellung der Eintrittskanten:

a) bei Unterschall-; b) bei axialer Überschallgeschwindigkeit am Gittereintritt.

Wenn die Axialkomponente der relativen Geschwindigkeit am Gittereintritt im Überschallbereich liegt, dann wird der Eintrittskeil so ausgelegt, daß der Verdichtungsstoß vom Rücken her ausgeht, die Linie  $AC$  (Abb. 22b) verläuft parallel zum Geschwindigkeitsvektor  $M_1$ . Der Verdichtungsstoß wird im Punkt  $A$  gedämpft, in der sich hier bildenden Unterdruckwelle. Der Strömungsdrehwinkel im Kanal ist:  $2(\beta_1 + \gamma)$ . Die Schaufelkammer und Übergangsbereiche werden bei Keilkanten ( $\gamma \neq 0$ ) nach der Geschwindigkeit  $M'_1$  hinter dem Verdichtungsstoß berechnet.

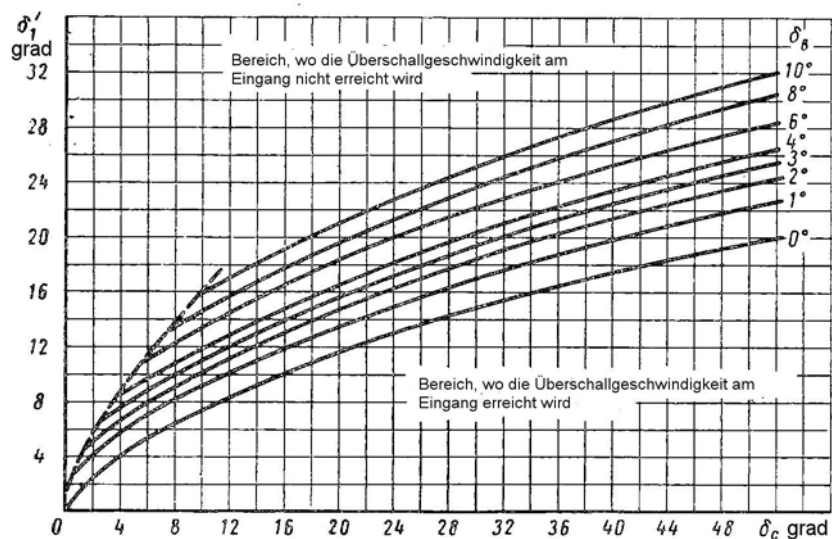


Abb. 23. Zur Bestimmung des Auftretens von Überschallströmung am Gittereintritt

Bei der Berechnung der Gitter nach dem besagten Verfahren muß man sich unbedingt davon überzeugen, daß bei den gewählten Werten von  $M_{gew}$  ( $\delta_{gew}$ ) und  $M_c$  ( $\delta_c$ ) Überschallströmung am Eintritt in die Schaufelkammern vorliegt. Diese Aufgabe wird mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung gelöst. Bemerkt sei, daß der größte Wert von  $M_c$  unter Berücksichtigung der Strömungslinienverluste und -kurve bestimmt wird, indem kritische Durchströmung, d.h. maximale Massenstromdichte im engsten Querschnitt angenommen wird.

In Abb. 23 sind die Abhängigkeitskurven der maximalen Winkel  $\delta'_1$  von  $\delta_c$  für ein gewisses Werteintervall  $\delta_{gew}$  angegeben. Die Kurven in Abb. 23 liefern die Grenzwerte der Zahlen  $M'_1$  ( $\delta'_1$ ) am Eintritt in Abhängigkeit von den Zahlen  $M_{gew}$  ( $\delta_{gew}$ ) und  $M_c$  ( $\delta_c$ ), wobei die entsprechenden Linien  $\delta_{gew} = \text{const}$  das Diagramm in zwei Bereiche teilen; über den Kurven liegt der Bereich, in dem die Überschallgeschwindigkeiten am Eintritt nicht auftreten können.

Die experimentellen Untersuchungen zeigten, daß nach der Potentialwirbel-Methode profilierte Gitter mäßige Energieprofilverluste ( $\zeta_{prof} = 12 - 13 \%$ ) und Energiegesamtverluste ( $\zeta_{sum} = 20$  bei  $b/l = 0,5$ ) bei  $M_{zt} = 1,6 - 1,7$  besitzen.

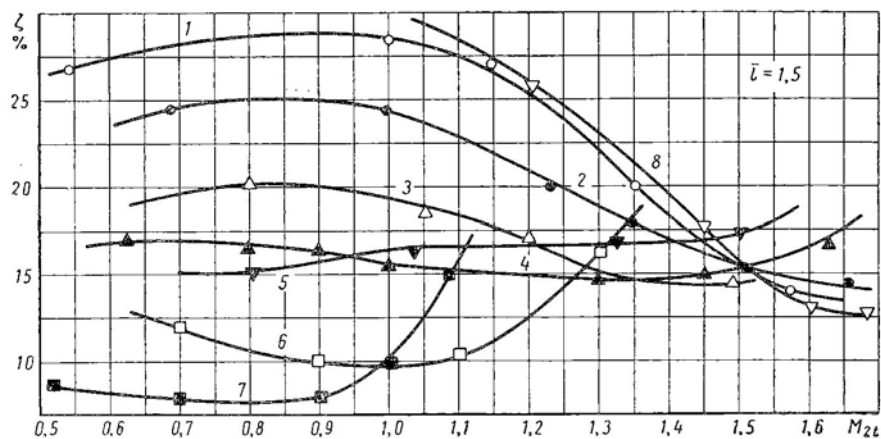


Abb. 24. Vergleich der Verluste in Überschallgittern:

1, 2, 3, 4) Gitter mit konvergent-divergenten Kanälen; 5) mit konstantem Kanalquerschnitt; 6) - P-2617B; 7) P-3025B; ( $M_{zt}$  -Machzahl hinter dem Gitter für den theoretischen Prozeß)

Auf die Gitterleistung wirkt besonders die Kanalform, wie die Versuche beweisen. Ein Vergleich der Verluste in Überschallgittern, gebaut nach verschiedenen Methoden, ist in Abb. 24 wiedergegeben. Hier sind die Eigenschaften von Überschallgittern mit unterschiedlich gestalteten Kanälen sowie mit und ohne stufenweise Abbremsung am Eintritt dargestellt. Die stufenweise Abbremsung bringt einen merklichen Vorteil bei  $M_{zt} \geq 1,5 - 1,6$ . In Gittern mit Kanälen konstanten Querschnitts sind die Verluste bei schallnahen und Überschallgeschwindigkeiten niedriger als in Gittern mit konvergent-divergenten Kanälen. Letztere zeichnen sich jedoch bei  $M_{zt} \geq 1,4 - 1,5$  durch minimale Verluste aus. Optimaler Grad der Kanalverengung am Eintritt und der Verbreiterung

am Austritt (Relationen  $\frac{a_1}{a_m}$  und  $\frac{a_2}{a_m}$  hängen von den Mach-Zahlen  $M_{1t}$  und  $M_{2t}$  ab) und der Umlenkung im Gitter. Für das Intervall der Mach-Zahlen  $M_{1t} = 1,5 - 2,0$  liegen diese Relationen innerhalb von  $\frac{a_1}{a_m} = 1,1 - 1,2$  und  $\frac{a_2}{a_m} = 1,15 - 1,25$  [3]. Die geometrischen und aerodynamischen Eigenschaften von Gleichdruckgittern bei schallnahen und Überschallgeschwindigkeiten sind in den Blättern 33 - 37 und 43 - 45 angegeben.

## § 14. Effiziente Formen der Kanäle von Gleichdruck-Laufgittern mit geringen Schaufelhöhen

Wie die Versuchsergebnisse zeigten [51; 1], erreichen die Verluste aufgrund der Sekundärströmungen in gekrümmten Kanälen und in Gittern mit geringer Höhe bei kontinuierliche verzögerter Strömung nicht das Minimum, wenn der Umlenkwinkel im Kanal groß ist und die statischen Drücke am Ein- und Austritt nahe beieinander liegen (Gleichdruckgitter).

Der Aufbau der zunächst verzögerten, dann beschleunigten Strömung in den Schaufelpassagen von Gleichdruckgittern mit großen Umlenkwinkeln  $\Delta\beta > (115 - 120^\circ)$  führt zu einem starken Rückgang der Endverluste

$$[\Delta\beta = 180^\circ - (\beta_1 + \beta_2)].$$

Es gibt verschiedenen Konstruktionsmethoden für Gitterprofile, die dieser Forderung entsprechen. Die wirtschaftlichste besteht darin, die vorhandenen Profile der Gleichdruck-Gitter durch einfache Veränderungen ihrer Form auf geringe Höhen anzupassen. Durch eine solche Vorgehensweise kann man die in der Turbinenbauindustrie meistverbreitetsten Profile erhalten, indem man Modifikationen an den Ausgangsprofilen für kleine Höhen vornimmt.

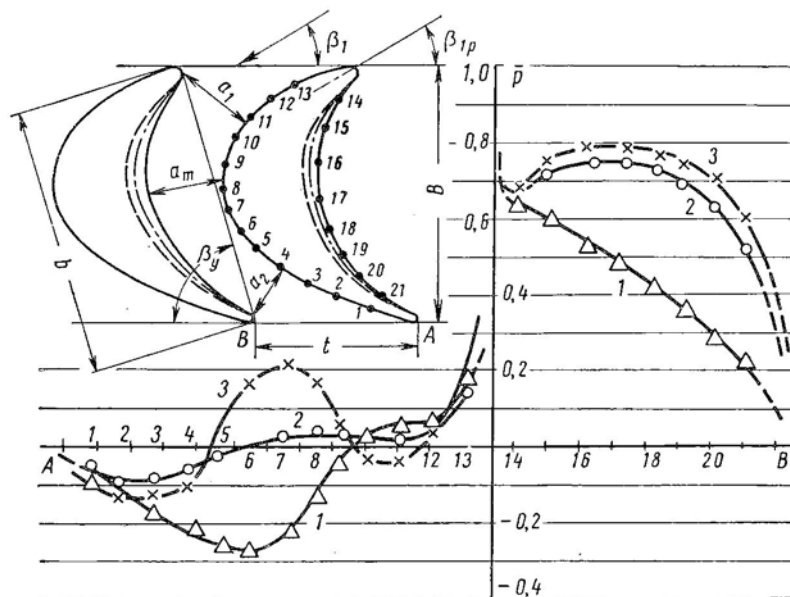


Abb. 31. Profildruckverteilung mit unterschiedlicher Diffusorform am Eintritt:

1)  $\bar{a}_m = 0,98$ ; 2)  $\bar{a}_m = 1,08$ ; 3)  $\bar{a}_m = 1,23$  ( $\beta = 25^\circ$ ;  $M = 0,6$ ).

Neue Profile, gerade für kleine Höhen bestimmt, wurden dadurch geschaffen, indem die konkaven Oberflächen so plan gemacht wurden, daß die Schaufelpassage breiter und enger wird, wobei der Profilirücken unverändert blieb. In Ab. 31 sind zwei Profile dargestellt: das ursprüngliche Profil (P-3021A) und das mit divergentem Abschnitt am

Eintritt (P-3021A<sub>k</sub>). Hier die wichtigsten charakteristischen Kanalabmessungen: Breite am Eintritt  $a_1$ , Breite des Kanalmittelteils  $a_m$  und Breite des Einschnürungsquerschnitts am Austritt  $a_2$ .

Die Gitter der ursprünglichen Profile haben die Relationen  $\bar{a}_m < 1$  und  $\bar{a}_1 > 1$ . Die Gitter (der Gruppe A<sub>k</sub>) mit divergenten Kanälen am Eintritt haben die Relationen  $\bar{a}_m > 1$  und  $\bar{a}_1 > 1$ .

Es sei noch darauf hingewiesen, daß eine Veränderung von Schaufelteilung und Staffelungswinkel zu einer Veränderung der charakteristischen Kanalquerschnitte und ihrer Relationen  $\bar{a}_m$  und  $\bar{a}_1$  führt. Bei bestimmten Werten von  $\bar{t}$  und  $\beta_1$  bilden die ursprünglichen Profile der Gruppe A ebenfalls divergent-konvergente Kanäle. Dabei ist die optimale Verzögerung am Eintritt in der Regel allerdings nicht gewährleistet, und die Strömungsaustrittswinkel verändern sich stark, was zu einer starken Zunahme der Verluste in den Gittern führt.

Bei der Konstruktion von Gleichdruckgittern mit geringer Höhe ist zur Lösung der inversen Aufgabe in der Regel die ursprüngliche Druckverteilung auf dem Profil zu wählen; sie gewährleistet minimale Endverluste. Es läßt sich nachweisen, daß der ursprüngliche Geschwindigkeitsverlauf von den wichtigsten geometrischen Gitterwerten und dabei hauptsächlich von der relativen Höhe abhängt. Da die Aufgabe sehr komplex ist, was mit detaillierten Berechnungen der Endverluste und der Bestimmung des optimalen Geschwindigkeitsverlaufs zusammenhängt, wurden Versuchsdaten herangezogen.

In Abb. 31 sind die Druckkurven für verschiedenartig geformte Kanäle des Gitters P-3021A bei relativer Höhe  $\bar{t} = 1,17$  angegeben. Es sei bemerkt, daß sich die Druckkurven je nach Zunahme der Verzögerung am Eintritt stark verändern: in einem sich kontinuierlich verengenden Kanal ist die Strömung längs des Rückens beschleunigt bis zu den Punkten 6-5, und vom Punkt 5 bis zur Austrittskante liegt der Bereich der verzögerten Strömung vor. Über den gesamten Verlauf der konkaven Oberfläche ist die Strömung beschleunigt. In Kanälen mit breiter werdendem Eintritt ist die Strömung längs des Rückeneintrittsbereichs (Punkte 12-10) ebenfalls beschleunigt.

In dem sich verbreiternden Kanalabschnitt bleibt der Druck längs des Rückens (Punkte 10-7) bei der Relation  $\bar{a}_m = 1,08$  praktisch konstant, nach Punkt 7 aber fällt er ab bis zu den Punkten 3-2.

Infolgedessen verkürzt sich der Abschnitt mit verzögerter Strömung im Schrägschnitt auf dem Profilrücken (Minimaldruckpunkt verschiebt sich stark zur Strömung hin). Bei einer Schaufelhöhe des Profilvergitters P-3021A liegt die angenommene Verzögerung ( $\bar{a}_m = 1,08$ ) nahe bei der optimalen, die Gesamtverluste im Gitter sind in diesem Falle minimal.

Eine weitere Zunahme der Verzögerung am Eintritt  $\bar{a}_m = 1,23$  führt zum Erscheinen einer Verzögerung auf dem Profilrücken (Punkte 9-7) mit darauffolgender heftiger Strömungsbeschleunigung. Die Verluste im Gitter nehmen zu.

Durch Auswertung der Druckkurven kann man somit die Gründe ermitteln, die dazu führen, daß die Endverluste in Gittern mit divergent-konvergenten-Kanälen abnehmen. Es sind deren drei:

- erstens kommt es bei geringeren mittleren Geschwindigkeiten zu einer Umlenkung der Strömung in der Schaufelkammer. Folglich nehmen Querschnittsdruckgefälle und Übertrittsintensität von der konkaven zur konvexen Oberfläche an den Stirnwänden zu;
- zweitens wird die Strömung im Rückenaustrittsbereich, wo die Sekundärströmungen intensiviert werden, beschleunigt, die Längsdruckgefälle nehmen zu;
- drittens wird der Ausdehnungsbereich des Bereichs verzögerter Strömung auf dem Rücken im Schrägschnitt kleiner, da der Minimaldruckpunkt stromauf verschoben wird.

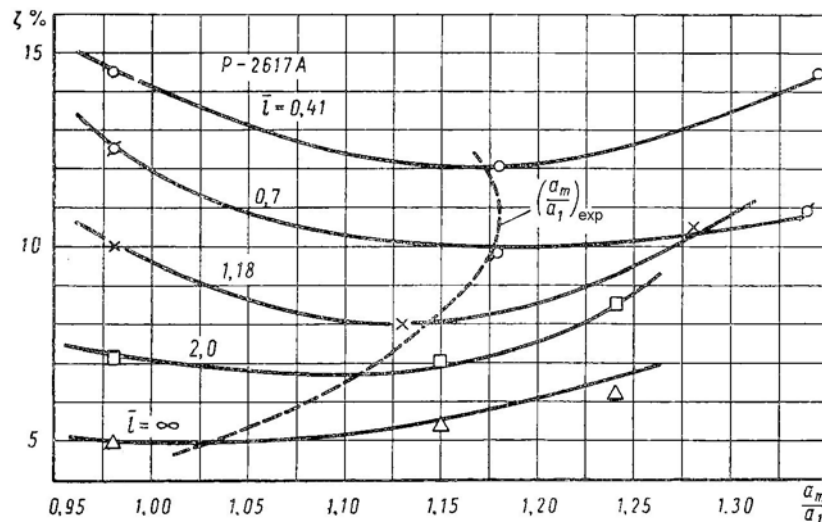


Abb. 32. Einfluß der Relation  $\bar{a}_m$  und Höhe  $\bar{l}$  auf den Verlustfaktor im Gitter P-2617A ( $\beta = 23^\circ$ ;  $M = 0,6$ )

Die in Abb. 32 enthaltenen Daten belegen, daß bei einem Gitter, das auf die bekannten Arbeitsbedingungen ( $M$ ,  $Re$ ,  $\Delta\beta$ ) berechnet ist und eine bestimmte Geometrie besitzt, die optimale Verzögerung vorliegt. (Der Wert  $(\bar{a}_m)_{exp}$  hängt hauptsächlich von der Gitterhöhe ab.) Mit abnehmender Höhe nimmt der den geringsten Verlusten entsprechende Wert  $\bar{a}_m$  zu und erreicht sein Maximum bei  $\bar{l} = 0,6$ . In Gittern mit geringerer Höhe nimmt die optimale Verzögerung ab, und bei sehr geringen Höhen ( $\bar{l} < 0,2$ ) ist es angebracht, die Kanäle konvergent zu gestalten.

Der Einfluß des Umlenkwinkels im Gitter auf den optimalen Wert von  $\bar{a}_m$  kann man nach den Kurven in Abb. 33 einschätzen. Für den größten Umlenkwinkel, den das Gitter R-2314A<sub>K</sub> liefert, beträgt die optimale Verzögerung etwa  $\bar{a}_m \approx 1,22$ , und für das Gitter R-3525A<sub>K</sub>  $\bar{a}_m \approx 1,22$  bei relativer Höhe  $\bar{l} = 1,18$ . Die Gitter R-2617A<sub>K</sub> und R-3021A<sub>K</sub>

nehmen gewissermaßen eine Zwischenstellung ein. Die Abhängigkeit der Verluste vom Abstand ist bei allen untersuchten Gittern recht steil, wobei der optimale Abstand mit zunehmender Profilkrümmung (Umlenkwinkel) merklich größer wird.

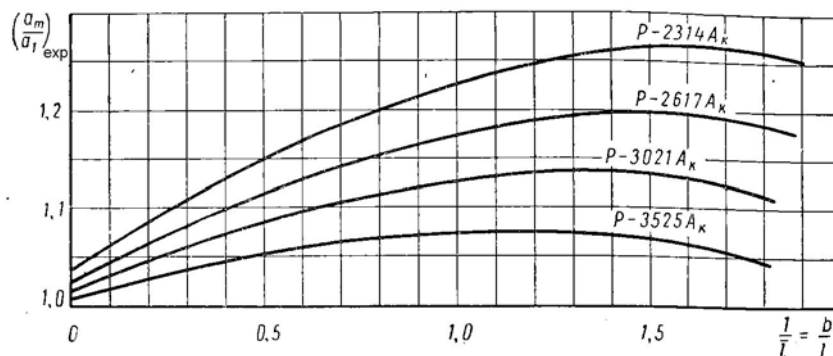


Abb. 33. Einfluß des Umlenkwinkels im Gitter auf die optimale Verzögerung  $(\bar{a}_m)_{\text{exp}}$

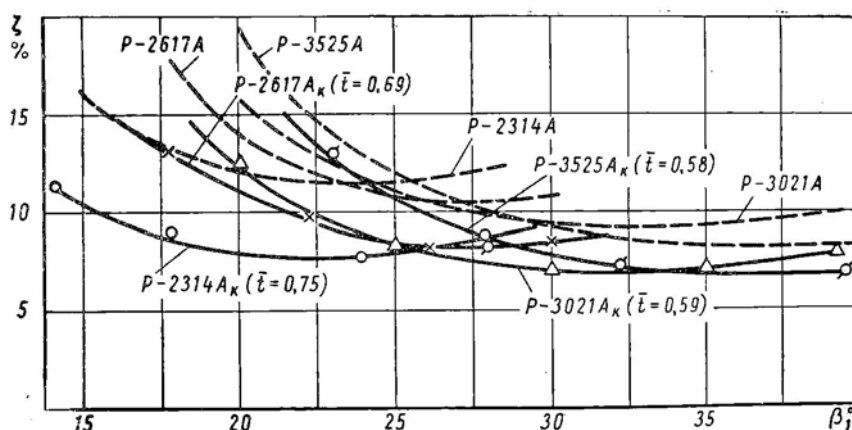


Abb. 34. Einfluß des Eintrittswinkels auf die Verluste in Gittern, berechnet nach verschiedenen Umlenkwinkeln ( $M = 0,6 - 0,7$ )

Die Untersuchung von Gittern der Gruppe  $A_k$  bei variablen Eintrittswinkeln zeigt, daß in einem ausreichend großen Veränderungsbereich  $\Delta\beta_1 \approx (10 - 15^\circ)$  die Verluste in den Gittern stark variieren, wie auch bei den Gittern der Gruppe A. verglichen mit der Gruppe A, werden die optimalen Eintrittswinkel bei Gittern der neuen Gruppe kleiner, was sich dadurch erklären läßt, daß der Eintrittswinkel des Profils aufgrund des Plan-drehens der konkaven Oberfläche kleiner wird (siehe Abb. 34).

Gleichzeitig belegen die Darstellungen in Abb. 34, daß die maximalen Vorzüge der Gitter der Gruppe A bei geringen Höhen bei den am stärksten gekrümmten Profilen P-3214A - P-3021A vorliegen. Die Differenz der Verlustfaktoren sinkt mit zunehmendem Strömungseintrittswinkel auch bei den Gittern P-3523A, und ist bei  $\beta_1 > 35^\circ$  minimal.

Dieses Ergebnis bestätigt noch einmal, wie zweckmäßig es ist, solche Gitter bei großen Umlenkwinkeln einzusetzen.

Die Kompressibilität hat keinen großen Einfluß auf die Verluste in Gittern bis  $M \approx 1$ . Diese im Versuch gewonnene Erkenntnis diene als Grundlage zu überprüfen, ob es möglich sei, aktive Gitter der Gruppe B – bei schallnahen Geschwindigkeiten ( $0,9 < M < 1,3$ ) – mit divergent-konvergenten Kanälen herzustellen. Der Vergleich der beiden Gittertypen B und  $B_k$  zeigt, daß sich divergent-konvergenten Eintrittsabschnitte der Kanäle auch bei geringen schallnahen Geschwindigkeiten am Eintritt günstig auf die Verluste auswirken.

Die Eigenschaften der Gitter  $A_k$  und  $B_k$  sind auf den Blättern 25 – 30 angegeben.

## Literatur

- [1] Алексеева, Р. Н.; Ляховицкий, И. Д.; Ржезников, Ю. В.: Методика испытания относительно коротких турбинных лопаток и их профилирование. – Теплоэнергетика. Москва, 1956, № 6.  
Alekseeva, R. N.; Ljachovickij, I. D.; Ržeznikov, Ju. V.: Metodika ispytanija odnositel'no korotkich turbinných lopatok i ich profilirovanija. – In: Теплоэнергетика. Москва, (1956) Nr 6, S. 54 – 57.  
<Prüfmethode für relativ kurze Turbinenschaufeln und ihre Profilierung; russ.>  
<89: ZZ 187>
- [3] Губарев, А. В.: Исследование рабочих решеток турбин при сверхзвуковых скоростях. – Известия вузов. Авиационная техника. Москва, 1962, № 2.  
Gubarev, A. V.: Issledovanie rabočich rešetok turbin pri sverchzvukovyh skorostjach. – In: Izvestija vuzov. Aviacionnaja tehnika. Moskva, (1962) Nr 2, S. 102 – 112.  
<Untersuchung der Turbinenlaufgitter bei Überschallgeschwindigkeiten; russ.>  
<89: ZZ 21/AVIA>
- [11] Дейч, М. Е.; Губарев, А. В.: Исследование рабочих решеток при больших скоростях. – Теплоэнергетика. Москва, 1958, № 12.  
Dejč, M. E.; Gubarev, A. V.: Issledovanie rabočich rešetok pri bol'šich skorostjach. – In: Теплоэнергетика. Moskva, (1958) Nr 12, S. 56 – 62.  
<Untersuchung von Laufgittern bei hohen Geschwindigkeiten; russ.>  
<89: ZZ 187>



- [49] Boxer, Emanuel; Sterrett, James R.; Wlodarski, John  
Application of supersonic vortex-flow theory to the design of supersonic impulse compressor- or turbine-blade sections.  
National advisory committee for aeronautics. Research memorandum. London, (1952), NACA RM L52Bo6, 72 S.  
<http://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc59156/m1/1/>
- [52] Oswatitsch, Klaus: Über die Strömung in einem Schaufelgitter. – In: Allgemeine Wärmetechnik. 6 (1955) Nr 1, S. 9 – 11.  
<93: 2Za 1908 >
- [51] Nippert, Hans  
Über den Strömungsverlust in gekrümmten Kanälen.  
Berlin: VDI-Verlag, 1929, 67 S.  
(Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens. 320)  
<93: XIX/825.4-320>
- [53] Oswatitsch, Klaus (Stockholm): Potentialwirbel-Gitter für Überschallgeschwindigkeiten. (Zum 70. Geburtstag von Prof. Dr. A. Betz). – In: Zeitschrift für Flugwissenschaften. Braunschweig, 4 (1956) Nr 1/2, S. 53 – 57.  
<93: 2Za 971>

---

Stuttgart, den 21. März 2012

Übersetzt von  
Ottmar Pertschi  
(Dipl.-Übersetzer)