

Theoretische und experimentelle Untersuchungen an Tandem-Pumpengittern starker Umlenkung

Von
Dipl.-Ing. *Hideo Ohashi*
aus Tokyo (Japan)

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Hochschule
Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig zur Erlangung des
Grades eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte Dissertation

Eingereicht am: 5. Juni 1958

Mündliche Prüfung am: 12. August 1958

Berichter: Prof. Dr. phil. *H. Schlichting*

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. *H. Petermann*

Vorwort

Diese Arbeit entstand auf Anregung von Herrn Professor Dr. phil. *H. Schlichting*, Leiter des Institutes für Strömungsmechanik der Technischen Hochschule Braunschweig. Ich möchte Herrn Professor *Schlichting* für sein stetiges Interesse und für seine fachliche Betreuung und Förderung dieser Forschungsarbeit danken.

Zu Dank verpflichtet bin ich auch dem Deutschen Akademischen Austauschdienst in Bonn, durch dessen Vermittlung und Unterstützung ich die Arbeitsmöglichkeit bei Herrn Professor *Schlichting* erhielt.

Mein Dank gilt weiterhin Herrn Dr.-Ing. *K. Gersten* für die Beratung und Hilfsbereitschaft bei der Durchführung der Arbeit.

Nicht zuletzt möchte ich allen denen danken, die mich bei der Bearbeitung dieser Aufgabe in Büro, Werkstatt und am Versuchsstand durch Anregung und bereitwillige Mitarbeit unterstützten.

Theoretische und experimentelle Untersuchungen an Tandem-Pumpengittern starker Umlenkung*

Von Hideo Ohashi

1. Einleitung und Aufgabenstellung. Beim Entwurf eines Axialverdichters kann manchmal der Fall eintreten, daß die Umlenkung in einer Schaufelreihe so groß sein muß, daß ein einreihiges Gitter diese starke Umlenkung nur mit sehr großen Verlusten verwirklichen kann, z. B. beim Nachleitrad eines Hochdruckaxialverdichters oder beim Leitrad eines Überschallaxialverdichters. In

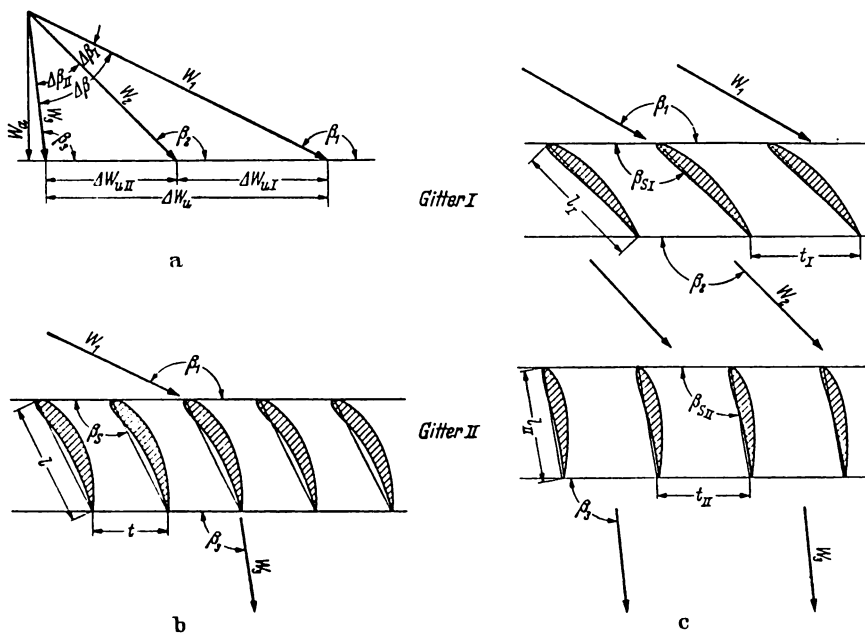


Abb. 1. Bezeichnungen am Schaufelgitter.
 a) Geschwindigkeitsdreieck; b) Anordnung als einreihiges Gitter; c) Anordnung als Tandem-Pumpengitter.

solchen Fällen kann man bekanntlich statt einer Schaufelreihe ein aus zwei Schaufelreihen bestehendes Tandem-Pumpengitter benutzen. Durch diese Aufteilung der gesamten Umlenkung auf die beiden Gitter wird die Belastung der einzelnen Gitter etwa halbiert, und dadurch können die Verluste trotz des komplizierteren Strömungsvorganges erheblich vermindert werden (vgl. Abb. 1). Bei der Anwendung des Tandem-Pumpengitters ist es jedoch bis heute üblich gewesen, das Tandem-Gittersystem einfach als zwei selbständige Gitter zu betrachten und die Ergebnisse für Einzelschaufelgitter auf die beiden Gitter einzeln anzuwenden ohne Berücksichtigung der gegenseitigen Interferenz. Diese vereinfachte Behandlung kann bei gewissen Tandem-Anordnungen zu großen

* Gekürzte Fassung der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Hochschule Braunschweig genehmigten gleichnamigen Dissertation. Bericht: Prof. Dr. H. Schlichting; Mitbericht: Prof. Dr. H. Petermann. Die Untersuchungen wurden im Institut für Strömungsmechanik der Technischen Hochschule Braunschweig unter der Leitung von Prof. Dr. H. Schlichting durchgeführt und durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft und ein Stipendium des Verfassers vom Deutschen Akademischen Austauschdienst ermöglicht. — Bei der Abfassung dieser gekürzten Fassung hat Herr Dr.-Ing. K. Gersten mitgewirkt.

Abweichungen von der wirklichen Strömung führen. Außerdem muß man dabei auf die Möglichkeit verzichten, durch Ausnutzen des Interferenzeinflusses eventuell sogar geringere Verluste zu erreichen als ohne Interferenz.

Die vorliegende Arbeit soll die Frage beantworten, mit welcher Anordnung ein Tandem-Pumpengitter eine gegebene Umlenkung mit geringstem Verlust verwirklichen kann, und zwar unter Berücksichtigung der gegenseitigen Interferenz. Eine bestimmte Tandem-Gitteranordnung läßt sich durch acht geometrische Parameter kennzeichnen, nämlich durch die Profilformen, die Schaufelwinkel und die Teilungsverhältnisse der beiden Gitter und durch den Abstand und die Versetzung zwischen den beiden Gittern.

Um eine optimale Tandem-Gitteranordnung für ein gegebenes Geschwindigkeitsdreieck zu bestimmen, muß man zunächst den Einfluß der acht Parameter auf die Verluste einzeln untersuchen und danach die zur optimalen Anordnung gehörenden acht Parameter auswählen.

Die Untersuchungen sind hierbei zweckmäßig in die beiden folgenden Teile aufzuspalten: a) Untersuchungen über die optimalen Tandem-Gitteranordnungen mit unendlich großem Abstand zwischen den beiden Gittern (Änderung der sechs Parameter für die Geometrie der beiden Gitter), b) Untersuchungen über die Änderung der Gittereigenschaften mit dem Abstand und der Versetzung bei festen Anordnungen der beiden Gitter (Änderung der zwei Parameter für die gegenseitige Stellung der beiden Gitter).

Der erste Teil wird hierbei auf Grund der schon vorhandenen systematischen Ergebnisse für ebene Schaufelgitter mit Profilen NACA 0010, 4410 und 8410 behandelt¹. Es ergeben sich daraus die optimalen Tandem-Gitteranordnungen für ein beliebig gegebenes Geschwindigkeitsdreieck ohne Berücksichtigung der gegenseitigen Interferenz.

Im zweiten Teil, der sich mit der aerodynamischen Interferenz zwischen den beiden Gittern befaßt, werden die Strömungserscheinungen an Tandem-Pumpengittern bei verschiedenen Stellungen der beiden Gitter zueinander auf experimentellem und theoretischem Weg untersucht. Auf Grund der Ergebnisse der beiden Teile kann das in der Praxis vorliegende Entwurfsproblem eines optimalen Tandem-Pumpengitters in einfacher Weise gelöst werden.

Ergänzend wird der Interferenzeinfluß der Dellen vom ersten Gitter auf die Verluste des zweiten Gitters, welcher in Tandem-Pumpengittern sehr ausgeprägt ist, jedoch mit der Potentialtheorie nicht erfaßt werden kann, in vereinfachter Weise experimentell untersucht.

Über den Interferenzeinfluß des Tandem-Schaufelgitters liegen bereits einige experimentelle und theoretische Arbeiten vor. Experimentell hat *K. Fickert*² ein Pumpengitter aus Spaltflügeln untersucht, und zwar mit verschiedener Spaltgeometrie. *H. Marcinowski*³ hat ein Tandem-Pumpengitter mit verschiedenen Abständen und Versetzungen gemessen und einige charakteristische Eigenschaften des Tandem-Pumpengitters herausgestellt. Außerdem hat *H. E. Sheets*⁴ ein Pumpengitter aus Spaltflügeln in einem einstufigen Axialverdichter verwandt und damit einen hohen Wirkungsgrad und eine große Förderhöhe erreicht.

Den rein potentialtheoretischen Interferenzeinfluß haben *W. E. Spraglin*⁵ und *S. Abe*⁶ mit Hilfe der konformen Abbildung sowie *S. Müftüoğlu*⁷ mit der Singularitätenmethode untersucht. Natürlich kann dabei der in der wirklichen Strömung sehr stark auftretende Reibungseinfluß nicht mit erfaßt werden.

2. Bezeichnungen (vgl. Abb. 1, 11, 20 und 26). Es sollen bedeuten

l	die Schaufeltiefe,
t	die Gitterteilung,
d_{max}	die maximale Schaufeldicke,
$z = x + iy$	die komplexe Koordinate (x in Richtung Schaufelsehne, y senkrecht dazu),
r und s	krummlinige, orthogonale Koordinaten senkrecht und längs der Skelettlinie,

¹ *L. Speidel* und *N. Scholz*, Untersuchungen über die Strömungsverluste in ebenen Schaufelgittern, VDI-Forschungsheft 464 (1957).

² *K. Fickert*, Forsch. Ing.-Wesen. 16 (1949/50) S. 141.

³ *H. Marcinowski*, Messungen an axialen Schaufelgittern für verzögerte Strömung, Bericht Nr. VL 13105, J. M. Voith (1946). Vgl. auch „Das Versuchswesen der Maschinenfabrik J. M. Voith“ S. 24 (1949).

⁴ *H. E. Sheets*, Transactions ASME, 78 (1956) S. 1683.

⁵ *W. E. Spraglin*, Flow through cascades in tandem, NACA TN 2393 (1951).

⁶ *S. Abe*, On the mutual interference of neighbouring two cascades composed of hydrofoil or aerofoil profiles. Reports of the Institute of High Speed Mechanics, Tôhoku Univ., Vol. 7 (1956).

⁷ *S. Müftüoğlu*, Strömungsuntersuchungen an Tandem-Schaufelgittern, Jahrbuch 1957 der WGL., S. 208—229.

y ,	die Ordinaten der Skelettlinie,
r_K	die Dickenordinaten der Schaufelkontur,
a	den Abstand zwischen der Hinterkante des ersten Gitters und der Vorderkante des zweiten Gitters, senkrecht zur Gitterfront,
h	die Versetzung der Vorderkante des zweiten Gitters von der Bahnlinie der Nachlaufdelle des ersten Gitters, parallel zur Gitterfront,
z_0	die komplexe Koordinate des zweiten Nullpunktes bezüglich des ersten Koordinatensystems,
b_0 und h_0	die Versetzung der Nullpunkte der beiden Koordinatensysteme senkrecht und parallel zur Gitterfront,
β_s	den Schaufelwinkel,
β_1 und β_3	den Zu- und Abströmwinkel,
β_2	den Zwischenströmwinkel,
$\Delta\beta$	die Umlenkung,
λ	den Staffelungswinkel,
B	die charakteristische Breite einer Delle,
W_1 und W_3	die Geschwindigkeit weit vor und weit hinter dem Tandem-Pumpengitter,
W_2	die Geschwindigkeit zwischen den beiden Gittern bei sehr großem Abstand,
W_∞	die Grundströmungsgeschwindigkeit (vektorielle Mittelgeschwindigkeit von Zu- und Abströmung des einzelnen Gitters),
U_T und V_T	die Geschwindigkeitskomponenten der Translationsströmung,
u und v	die Geschwindigkeitskomponenten der durch Singularitäten induzierten Strömungsgeschwindigkeit,
$\bar{w} = u - i v$	die komplexe induzierte Strömungsgeschwindigkeit,
W_A, W_V und W_Z	die Strömungsgeschwindigkeit in Meßebeine A, V und Z ,
g	den Gesamtdruck,
p	den statischen Druck,
Q	die Quellstärke,
Γ	die Zirkulation,
q	die Quellbelegung,
γ	die Wirbelbelegung,
$\zeta_V = \Delta g / \frac{\rho}{2} W_\infty^2$	den Verlustbeiwert,
$Re = W l / \nu$	die <i>Reynoldszahl</i> ,
ζ_V	den Energieverlustbeiwert [Definition nach Gleichung (6.1)],
$K = F / F_0$	die Überdeckungsziffer (vgl. Abb. 26).

Als Indizes sollen in folgender Bedeutung benutzt werden:

*	zur optimalen Tandem-Gitteranordnung gehörig,
0	zur Strömung ohne gegenseitige Interferenz gehörig,
$j = I$ und II	zum ersten und zweiten Gitter gehörig,
u, a	für Werte in Richtung parallel bzw. senkrecht zur Gitterfront,
q	für Quellbelegung,
γ	für Wirbelbelegung,
K	für Werte auf der Schaufelkontur,
S	für Werte auf der Skelettlinie,
E	für Werte der Einzelschaufel,
G	für Werte des Einzelgitters,
R	für Werte des Restgitters, d. h. für Werte aller übrigen Schaufeln des Einzelgitters außer der betrachteten Einzelschaufel,
J	für Werte von der anderen Schaufelreihe.

3. Optimale Gitteranordnungen des Tandem-Pumpengitters ohne Berücksichtigung der gegenseitigen Interferenz. Gesucht sind die optimalen Tandem-Gitteranordnungen, die ein gegebenes Geschwindigkeitsdreieck mit geringstem Verlust verwirklichen, wobei der Abstand zwischen den beiden Gittern als unendlich groß angesehen wird und infolgedessen die aerodynamische Interferenz nicht in Betracht gezogen ist.

Zur Bestimmung der optimalen Tandem-Gitteranordnungen tritt zunächst die Frage auf, wie die gesamte Umlenkung auf die beiden Gitter verteilt werden soll, um den geringsten Gesamt-

verlust zu erreichen. Die Aufteilung der Umlenkung wird hierbei durch das Belastungsverhältnis $\Delta W_{uI}/\Delta W_u$ gekennzeichnet (vgl. Abb. 2).

Wenn das Belastungsverhältnis einmal festgelegt wird, reduziert sich das Problem, die optimale Tandem-Gitteranordnung zu bestimmen, im wesentlichen darauf, zwei optimale einreihige Gitteranordnungen zu bestimmen, wobei die Umlenkung $\Delta\beta_I = \beta_I - \beta_2$ in Gitter I, die Umlenkung $\Delta\beta_{II} = \beta_2 - \beta_3$ in Gitter II einzeln verwirklicht werden soll.

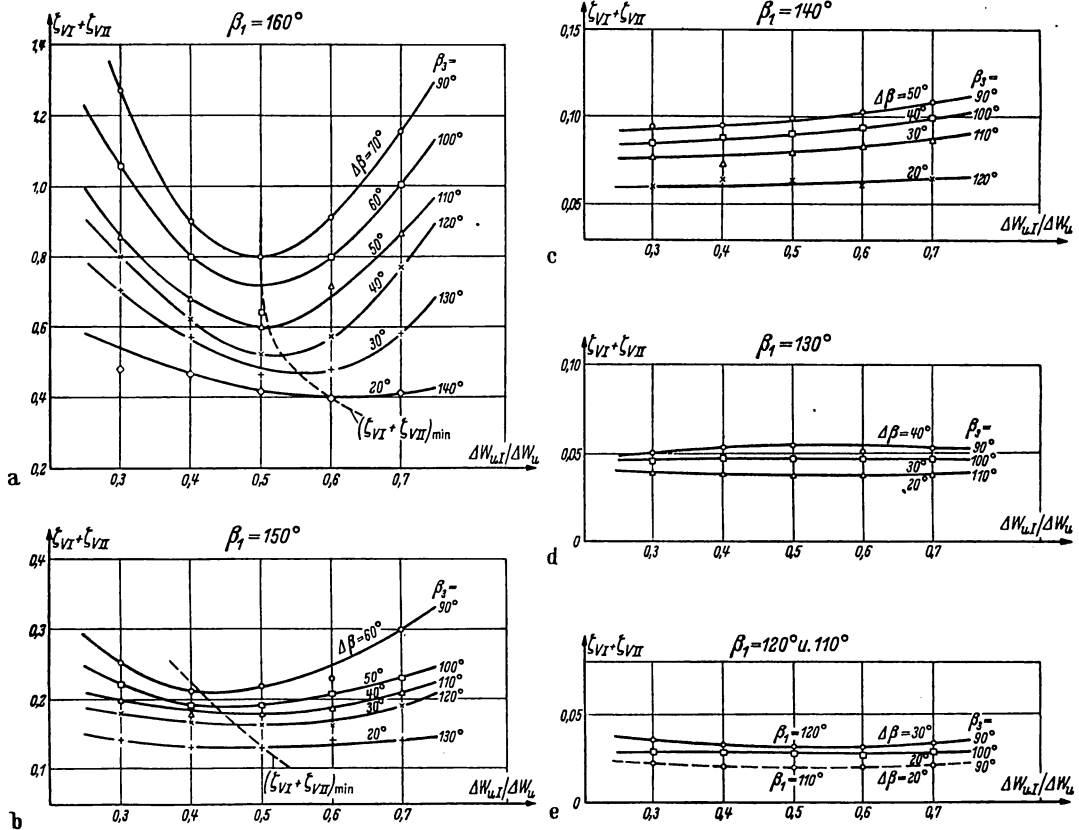


Abb. 2. Änderung der Gesamtverlustbeiwerte des Tandem-Pumpengitters mit dem Belastungsverhältnis bei festen Zu- und Abström winkeln (ohne Berücksichtigung der gegenseitigen Interferenz). Benutzte Profile: NACA 0010, 4410 und 8410.

— Gesamtverlustbeiwerte $\zeta_{vI} + \zeta_{vII}$;
 - - - - - Optimales Belastungsverhältnis beim Minimalverlust.

Das Problem, für ein gegebenes Geschwindigkeitsdreieck eine optimale einreihige Gitteranordnung zu ermitteln, ist bereits verschiedentlich behandelt worden^{1, 2, 3}. Um das optimale Belastungsverhältnis $(\Delta W_{uI}/\Delta W_u)^*$ zu bestimmen, bei dem das Tandem-Pumpengitter das gegebene Geschwindigkeitsdreieck mit dem geringsten Verlust verwirklichen kann, wurden hierbei zunächst zwei für sich allein optimale einreihige Gitteranordnungen bei verschiedenem Belastungsverhältnis bei festem Zu- und Abströmwinkel ermittelt. Die zu den optimalen Gitteranordnungen gehörenden Gesamtverlustbeiwerte $\zeta_{vI} + \zeta_{vII}$ wurden dann in Abb. 2a bis 2e über dem Belastungsverhältnis $\Delta W_{uI}/\Delta W_u$ aufgetragen. Hierbei liegen die Ergebnisse der ebenen Schaufelgitter von Profilen NACA 0010, 4410 und 8410 zugrunde, die im Institut für Strömungsmechanik der Technischen Hochschule Braunschweig in systematischer Weise rechnerisch gewonnen wurden⁴.

¹ L. J. Herrig, J. C. Emery and J. R. Erwin, Systematic two-dimensional cascade tests of NACA 65-Series compressor blades at low speeds. NACA TN 3916 (1957).

² A. R. Howell, The present basis of axial flow compressor design, ARC R & M 2095 (1942).

³ B. Eckert, Axialkompressoren und Radialkompressoren. Berlin/Göttingen/Heidelberg 1953.

⁴ Siehe Fußnote 1 von Seite 202.

Bei größeren Zuström winkeln, z. B. bei $\beta_1 = 160^\circ$ in Abb. 2a, ändert sich der Gesamtverlustbeiwert stark mit dem Belastungsverhältnis, und das optimale Belastungsverhältnis (Minimalverlust) ist dabei deutlich erkennbar, während bei kleineren Zuström winkeln, $\beta_1 < 140^\circ$, sich der Gesamtverlustbeiwert praktisch kaum mit dem Belastungsverhältnis ändert. Deshalb hat die richtige Wahl des Belastungsverhältnisses nur bei größeren Zuström winkeln $\beta_1 > 140^\circ$ Bedeutung. Die weiteren Ergebnisse sind in Abb. 3 bis 8 in einer Form wiedergegeben, wie man sie unmittelbar für die Auswahl der optimalen Tandem-Gitteranordnungen verwenden kann. Abb. 3 dient der Auswahl für das optimale Belastungsverhältnis und für die Schaufelprofile der beiden Gitter beim

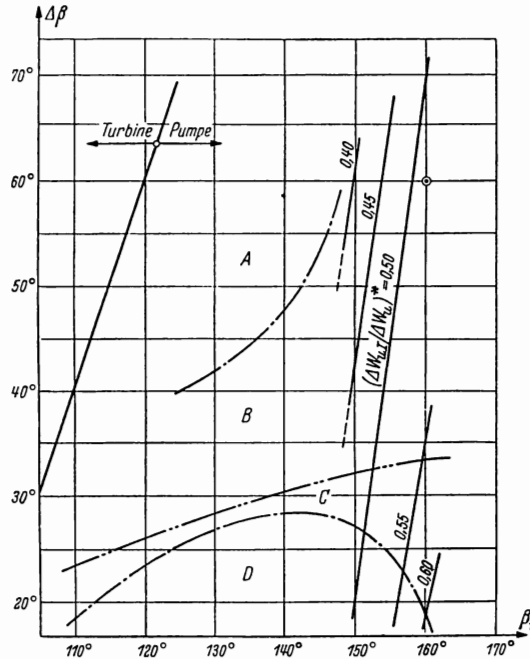


Abb. 3. Auswahldiagramm für die Schaufelprofile des Gitters I und II und für das optimale Belastungsverhältnis.

— — — — — Optimales Belastungsverhältnis $(\Delta W_{uI}/\Delta W_{uI})^*$;
 - - - - - Abgrenzung der Schaufelprofile.

Bereich	A	B	C	D
Profil des Gitters I	NACA 8410	NACA 4410	NACA 4410	NACA 0010
Profil des Gitters II	NACA 8410	NACA 8410	NACA 4410	NACA 4410

○ — Anwendungsbeispiel nach Abb. 9.

Minimalverlust für ein beliebig gegebenes Geschwindigkeitsdreieck, wobei sich das optimale Belastungsverhältnis von den Linien konstanter Belastungsverhältnisse ablesen läßt. Linien konstanter optimaler Belastungsverhältnisse sind nur in dem Bereich mit größerem Zuström winkel eingetragen. In dem übrigen Bereich spielt das Belastungsverhältnis für den Gesamtverlustbeiwert fast keine Rolle. Für eine günstige Aufteilung der gesamten Umlenkung scheint in diesem Bereich das Belastungsverhältnis von $(\Delta W_{uI}/\Delta W_{uI})^* = 0,5$ am besten zu sein.

In Abb. 4 bzw. Abb. 5 sind die zu den optimalen Anordnungen gehörenden Teilungsverhältnisse des ersten bzw. des zweiten Gitters für ein beliebig gegebenes Geschwindigkeitsdreieck angegeben. Abb. 6 bzw. Abb. 7 dient ferner der Bestimmung der Schaufelwinkel des ersten bzw. des zweiten Gitters für die optimalen Tandem-Gitteranordnungen. Der Schaufelwinkel wird hierbei mittelbar aus den Winkelüberreibungen der beiden Gitter $\Delta\beta_{S_I}$ und $\Delta\beta_{S_{II}}$, die von den beiden Diagrammen direkt abzulesen sind, bestimmt mit Hilfe der Beziehungen

$$\beta_{S_I}^* = \frac{1}{2}(\beta_1 + \beta_3) + \Delta\beta_{S_I} \quad \text{für Gitter I}$$

und

$$\beta_{S_{II}}^* = \beta_3 + \Delta\beta_{S_{II}} \quad \text{für Gitter II.}$$

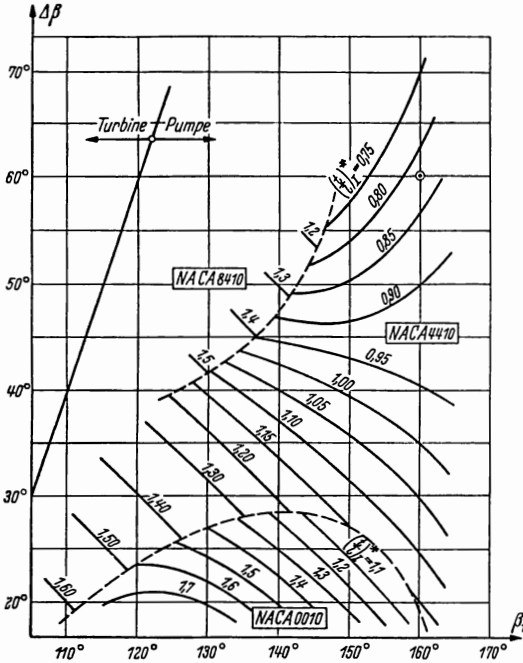


Abb. 4. Auswahl diagramm für das Teilungsverhältnis des Gitters I, $(t/l)_I^*$, bei der optimalen Tandem-Gitteranordnung.
 — Teilungsverhältnis des Gitters I;
 - - - - - Abgrenzung des Schaufelprofils.

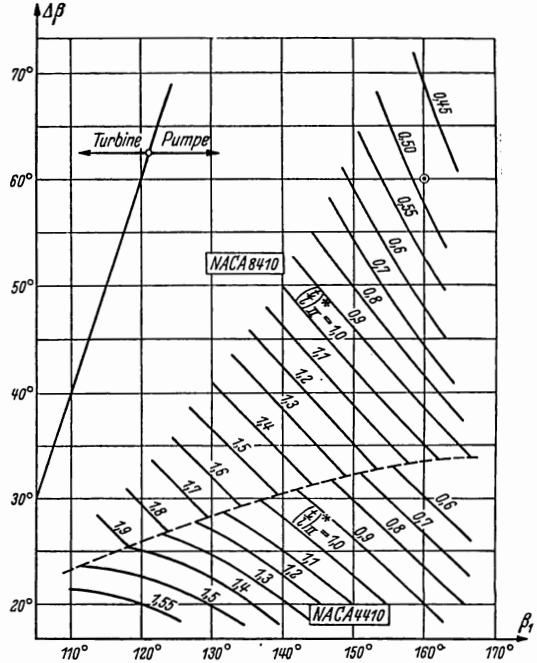


Abb. 5. Auswahl diagramm für das Teilungsverhältnis des Gitters II, $(t/l)_{II}^*$, bei der optimalen Tandem-Gitteranordnung.
 — Teilungsverhältnis des Gitters II;
 - - - - - Abgrenzung des Schaufelprofils.

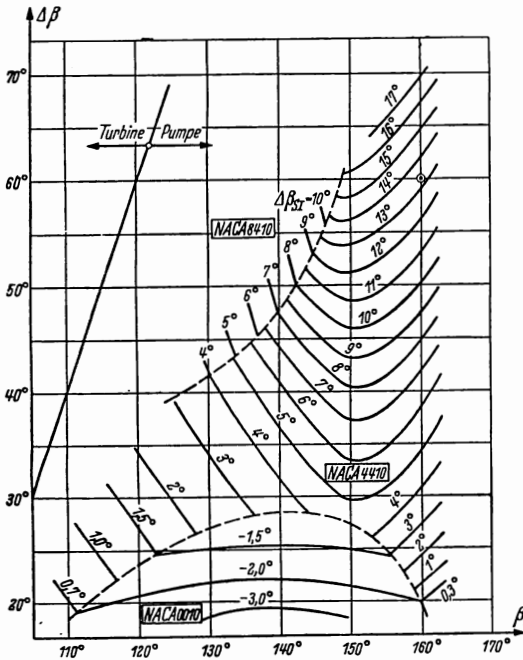


Abb. 6. Auswahl diagramm für den Schaufelwinkel des Gitters I, $\beta_{S I}^*$, bei der optimalen Tandem-Gitteranordnung.

$$\beta_{S I}^* = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} + \Delta\beta_{S I} = \beta_1 - \frac{\Delta\beta}{2} + \Delta\beta_{S I}$$

— Winkelübertriebung $\Delta\beta_{S I}$;
 - - - - - Abgrenzung des Schaufelprofils.

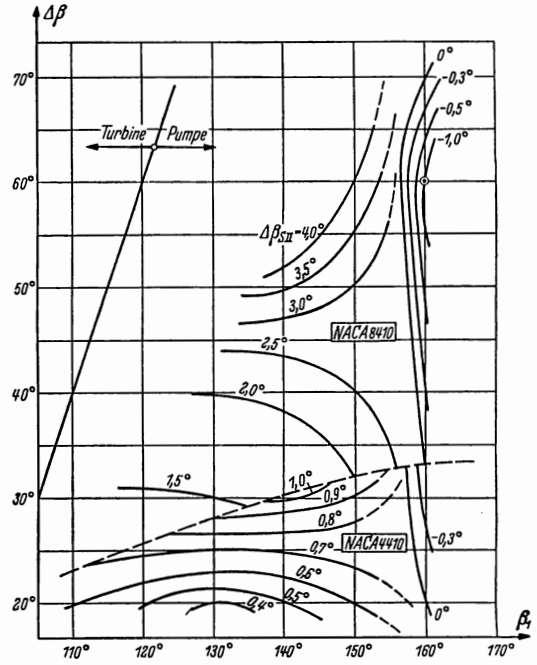


Abb. 7. Auswahl diagramm für den Schaufelwinkel des Gitters II, $\beta_{S II}^*$, bei der optimalen Tandem-Gitteranordnung.

$$\beta_{S II}^* = \beta_2 + \Delta\beta_{S II}$$

— Winkelübertriebung $\Delta\beta_{S II}$;
 - - - - - Abgrenzung des Schaufelprofils.

Abb. 8 zeigt Linien konstanter Gesamtverlustbeiwerte des Tandem-Pumpengitters beim Minimalverlust, wobei als Reynoldszahl $Re = W_3 l/\nu = 5 \cdot 10^5$ angenommen wurde. In Bereichen, in denen die Schaufelbelastung nicht allzu groß ist, kann man statt des Tandem-Pumpengitters auch ein gewöhnliches einreihiges Gitter benutzen. Die strichpunktierten Linien in Abb. 8 zeigen zusätzlich auch die Verlustbeiwerte des einreihigen Gitters beim Minimalverlust. Aus dem Vergleich der beiden Kurvenscharen läßt sich weiter eine gestrichelte Abgrenzungslinie eintragen. Oberhalb dieser Linie hat ein Tandem-Pumpengitter einen geringeren Verlustbeiwert als ein entsprechendes einreihiges Gitter, während unterhalb dieser Linie ein einreihiges Gitter günstiger ist. Aus dem

Verlauf der Abgrenzungslinie erkennt man, daß der Bereich, in dem das Tandem-Pumpengitter hinsichtlich der Verluste günstiger ist als das einreihige Gitter, wider Erwarten groß ist und auch Fälle geringer Umlenkung

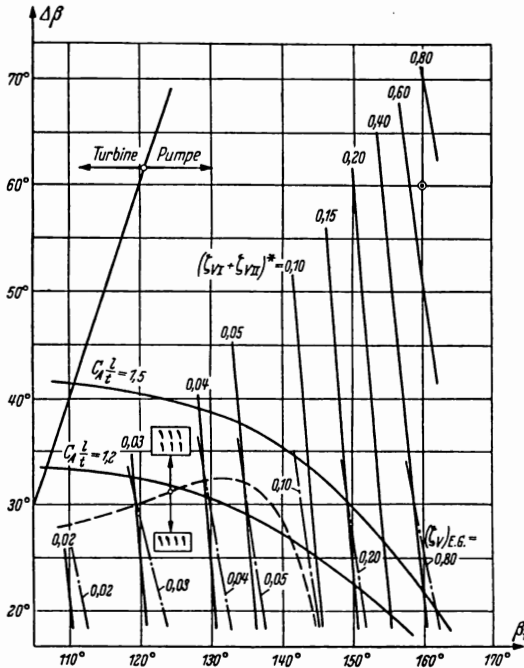


Abb. 8. Verlustbeiwerte des Tandem-Pumpengitters beim Minimalverlust und Vergleich mit einreihigem Gitter.

- Verlustbeiwerte als Tandem-Pumpengitter $(\zeta_{V, I} + \zeta_{V, II})^*$;
- - - Verlustbeiwerte als einreihiges Gitter $(\zeta_V)_{E. G.}$;
- - - - Abgrenzung der günstigeren Gitteranordnung, oberhalb der Kurve Tandem-Pumpengitter, unterhalb der Kurve einreihiges Pumpengitter günstiger.

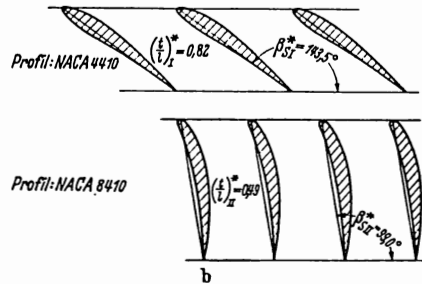
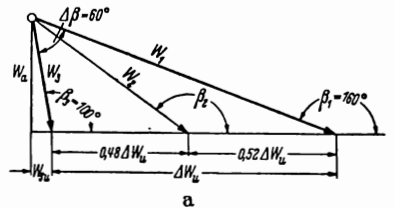


Abb. 9. Anwendungsbeispiel für eine optimale Tandem-Gitteranordnung ohne Berücksichtigung der gegenseitigen Interferenz. — a) Gegebenes Geschwindigkeitsdreieck; $\beta_1 = 160^\circ$ und $\beta_2 = 100^\circ$. b) Gesuchte Gitteranordnung mit Hilfe von Abb. 3 bis 8, zugehöriger Gesamtverlustbeiwert

$$(\zeta_{V, I} + \zeta_{V, II})^* = 0,70.$$

mit einschließt, so daß das Tandem-Pumpengitter in Wirklichkeit einen sehr großen Anwendungsbereich besitzt. In Abb. 8 sind noch zwei weitere Begrenzungslinien eingetragen, die den Formeln

$$c_A \frac{l}{t} = \frac{2 \Delta W_u}{W_\infty} = 1,2 \text{ bzw. } 1,5 \tag{3.1}$$

entsprechen, wobei c_A den auf die Grundgeschwindigkeit W_∞ bezogenen Auftriebsbeiwert der Gitterschaukel bedeutet. Herkömmlicherweise wird die obere Begrenzungslinie $c_A l/t = 1,5$ als die Belastungsgrenze eines einreihigen Gitters angesehen^{1, 2}. Wie man sieht, umschließt diese Linie auch noch einen breiten Bereich, bei dem das Tandem-Pumpengitter schon günstigere Werte liefert. Nach den hier gewonnenen Ergebnissen würde sich die Kurve $c_A l/t = 1,2$ als Belastungsgrenze besser eignen. Oberhalb dieser Grenze ist es jedenfalls empfehlenswert, das Tandem-Pumpengitter zu verwenden, um damit die Möglichkeit der Verbesserung des Wirkungsgrades auszunutzen.

Abb. 9 stellt ein Anwendungsbeispiel für eine große Umlenkung von $\Delta\beta = 60^\circ$ mit Hilfe der hier angegebenen Auswahldiagramme dar.

¹ B. Eckert, Axialkompressoren und Radialkompressoren. Berlin/Göttingen/Heidelberg 1953.
² Siehe Fußnoten 1 und 2 von Seite 204.

Solche Untersuchungen über Tandem-Pumpengitter starker Umlenkung kann man auch mit den Gitterergebnissen anderer Profilerien durchführen. Es ist zu vermuten, daß die vorliegenden Ergebnisse weitgehend unabhängig von der untersuchten Profilerie sind und ziemlich allgemeine Eigenschaften des Tandem-Pumpengitters wiedergeben.

4. Experimentelle Untersuchungen über den Interferenzeinfluß des Tandem-Pumpengitters bei verschiedenen relativen Stellungen der beiden Gitter. Um die Änderung der Gittereigenschaften des Tandem-Pumpengitters, nämlich die Änderung der Umlenkung, der Verluste und der Druckverteilung, bei festen Anordnungen der beiden Gitter experimentell klarzustellen, wurden Windkanalmessungen im kleinen Gitterwindkanal des Institutes durchgeführt. Abb. 10 stellt die Meßstrecke des Kanales dar. Die beiden Gitter bestehen aus je 11 Schaufeln von Profilen NACA 8410 (8% Wölbung bei 40% Wölbungsrücklage und 10% Maximaldicke). Die Schaufeln haben eine Profiltiefe von $l = 60$ mm und eine Schaufelhöhe von 300 mm. Sie wurden aus Stahl hergestellt und besitzen bei der verwendeten Anblasegeschwindigkeit hydraulisch glatte Oberfläche. Ferner sind zwei der Schaufeln in ihrem Mittelschnitt mit insgesamt 26 Druckmeßstellen versehen, von denen je 13 auf einer Schaufelseite angeordnet sind.

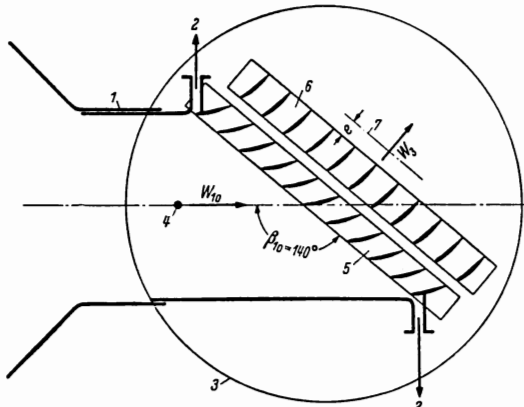


Abb. 10. Einbau des Tandem-Pumpengitters im Versuchstand. 1 Verstellbarer Boden des Zuströmkanals; 2 Absaugung zum Gebläse; 3 Drehscheibe; 4 Wandbohrung zur Messung des statischen Drucks p_s ; 5 Erster Schaufelträger für Gitter I aus 11 NACA 8410 Schaufeln; 6 Zweiter Schaufelträger für Gitter II aus 11 NACA 8410 Schaufeln, parallel und senkrecht zur Gitterfront verstellbar; 7 Meßebene für die Nachlaufmessungen, Meßabstand $e = 30$ mm (0,5 l).

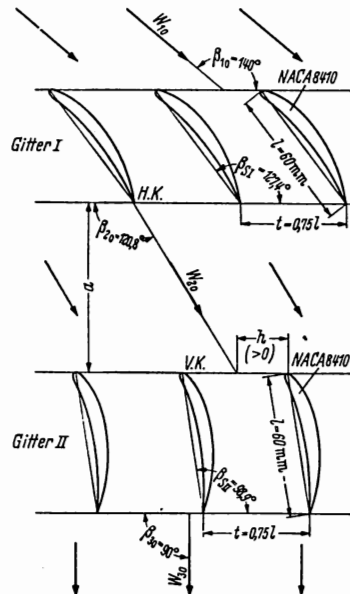


Abb. 11. Gemessene Gitteranordnung des Tandem-Pumpengitters. Bei unendlich großem Abstand $a/l = \infty$ ermöglicht die Anordnung einen Abströmwinkel $\beta_{30} = 90^\circ$ beim Zuströmwinkel $\beta_{10} = 140^\circ$ mit einem Belastungsverhältnis $(\Delta W_{u1}/\Delta W_u) = 0,5$. (Fußzeiger 0 entspricht dem Fall ohne Interferenz.) Bei den Messungen sind nur der Abstand a und die Versetzung h variiert worden.

Die Gitteranordnungen beider Gitter sind hierbei so bestimmt, daß die beiden Gitter bei unendlich großem Abstand, nämlich ohne Interferenz, ein gegebenes Geschwindigkeitsdreieck von $\beta_{10} = 140^\circ$ und $\beta_{30} = 90^\circ$ verwirklichen (vgl. Abb. 11). Für die Aufteilung der gesamten Umlenkung wird als optimales Belastungsverhältnis $(\Delta W_{u1}/\Delta W_u)^* = 0,5$ auf Grund der Ergebnisse in Abb. 3 ausgewählt. Infolgedessen soll das erste Gitter die Umlenkung $\Delta\beta_{I10} = 19,2^\circ$ bei Zuströmwinkel $\beta_{10} = 140^\circ$, das zweite Gitter die Umlenkung $\Delta\beta_{II0} = 30,8^\circ$ bei Zuströmwinkel $\beta_{30} = 120,8^\circ$ als Einzelgitter ermöglichen. In Hinblick auf die praktischen Anwendungen wurde für beide Gitter die gleiche Teilung, und zwar $t/l = 0,75$ gewählt. Von den Voruntersuchungen sind die zum Verwirklichen der gegebenen Umlenkung als Einzelgitter erforderlichen Schaufelwinkel und die zugehörigen Verlustbeiwerte ohne Interferenz bestimmt worden. Die gemessene Tandem-Gitteranordnung ist in Abb. 11 dargestellt.

Zur Festlegung der gegenseitigen Stellung der beiden Gitter dienen hierbei zwei Parameter, und zwar der Abstand a und die Versetzung h . Der Abstand ist die Spaltweite zwischen den beiden Gittern und wurde bei den Messungen auf $a/l = 0,15; 0,30; 0,50$ und $0,80$ eingestellt. Die Versetzung h wird hierbei nach der geometrischen Lage zwischen der Delle der ersten Schaufel und der Vorderkante der zweiten Schaufel festgelegt. Wenn die Delle von der Hinterkante der Schaufel I, deren Bahnlinie näherungsweise als eine gerade Linie mit Abströmwinkel $120,8^\circ$

($= \beta_{20}$) angenommen sei, direkt die Vorderkante der Schaufel II trifft, beträgt die Versetzung unabhängig vom Abstand immer $h = 0$. Die weitere Versetzung wird nach der Verschiebung der Schaufel II in Richtung der Saugseite gegenüber der Versetzung $h = 0$ angegeben und hat dabei positives Vorzeichen. Die Messungen sind bei Versetzungen von $h/t = 0; 0,2; 0,4; 0,6$ und $0,8$ durchgeführt worden. Im übrigen stimmt die Versetzung $h/t = 1,0$ wieder mit der Versetzung $h/t = 0$ überein.

Die Schaufeln der beiden Gitter befinden sich jeweils in einem Schaufelträger. Der erste Schaufelträger ist mit der Drehscheibe des Kanales fest verbunden, während der zweite Schaufelträger, im Abstand und in der Versetzung verstellbar, auf dem ersten Schaufelträger aufgeschraubt wird. Vor dem Eintritt ins Tandem-Pumpengitter wird am oberen und unteren Kanalende die Wandgrenzschicht der Zuströmung durch Schlitz abgesaugt. Es wurden Nachlaufmessungen in einer Entfernung von 50% der Schaufeltiefe im Mittelschnitt hinter dem Gitter II und Druckverteilungsmessungen längs der Schaufelkontur der beiden Gitter durchgeführt. Die Nachlaufmessungen dienen der Bestimmung des Abströmwinkels β_3 und der Verlustbeiwerte der beiden Gitter $\zeta_{V, I}$ und $\zeta_{V, II}$, die sich hierbei nach den Formeln ermitteln lassen:

$$\zeta_{V, I} = \frac{\Delta g_I}{\frac{\rho}{2} W_a^2} = \frac{1}{t} \int_0^t \frac{g_1 - g_2(y)}{\frac{\rho}{2} W_a^2} dy, \quad (4.1)$$

$$\zeta_{V, II} = \frac{\Delta g_{II}}{\frac{\rho}{2} W_a^2} = \frac{1}{t} \int_0^t \frac{g_2(y) - g_3(y)}{\frac{\rho}{2} W_a^2} dy. \quad (4.2)$$

Bei Versetzung $h/t = 0,4$ und $0,6$ kann man bei der Nachlaufmessung hinter dem Gitter II deutlich zwei getrennte Dellen von den beiden Gittern beobachten. In diesem Fall kann man ohne weiteres die Verlustbeiwerte der beiden Gitter getrennt ermitteln. Bei Versetzung $h/t = 0,2$ und $0,8$ überlagern sich die beiden Dellen an ihren Rändern. Aber es ist dabei auch möglich, diese Dellen mit ausreichender Genauigkeit voneinander zu trennen und die Verlustbeiwerte der beiden Gitter einzeln zu ermitteln, da die Form der Dellen an ihrem Rand aus den anderen Messungen genügend genau geschätzt werden kann, und der zusammenfallende Verlust von den beiden Gittern,

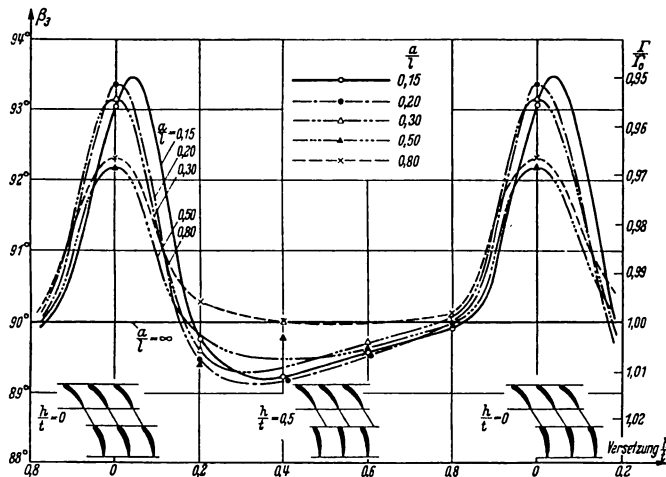


Abb. 12. Änderung des Abströmwinkels β_3 und des Gesamtzirkulationsverhältnisses Γ/Γ_0 mit der Versetzung bei verschiedenen Abständen.

$\Delta g_I + \Delta g_{II}$, in die einzelnen Anteile aufgespalten werden kann. Dagegen können die beiden Dellen bei Versetzung $h/t = 0$ vollkommen zusammen und man kann daraus nur den Gesamtverlust erhalten. Nach den Meßergebnissen ändert sich der Verlust des Gitters I beinahe sinusförmig mit der Versetzung. Deshalb ist es nicht schwierig, von den bereits ermittelten Ergebnissen bei Versetzung $h/t = 0,2; 0,4; 0,6$ und $0,8$ den Verlust des Gitters I bei Versetzung $h/t = 0$ zu

interpolieren. Der Verlust des Gitters II bei Versetzung $h/t = 0$ ist hierbei als der Restteil des Gesamtverlustes zu verstehen.

Bei allen Messungen des Tandem-Pumpengitters betrug der Staudruck vor dem Gitter I 200 mm WS, entsprechend einer Austrittsgeschwindigkeit des Gitters I von $W_2 = 43 \text{ m/s}$ und

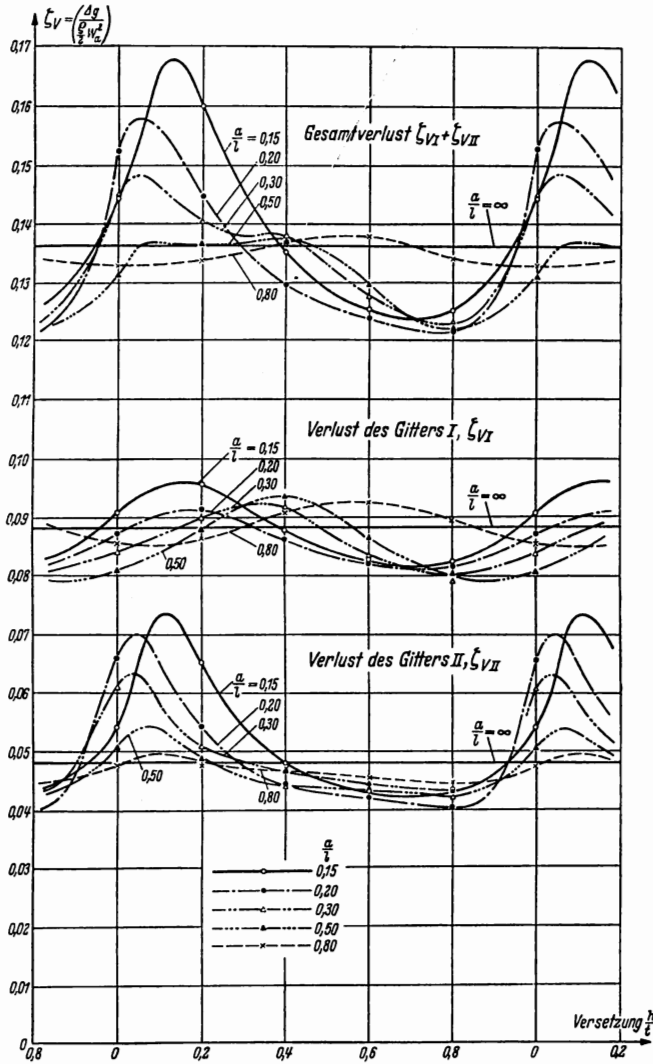


Abb. 13. Verlustbeiwerte des Tandem-Pumpengitters bei verschiedenen Abständen in Abhängigkeit von der Versetzung.

$$Re_I = W_2 \cdot l / \nu = 1,7 \cdot 10^6;$$

$$Re_{II} = W_3 \cdot l / \nu = 1,5 \cdot 10^6.$$

des Gitters II von $W_3 = 37 \text{ m/s}$. Die auf die Austrittsgeschwindigkeit bezogene Reynolds-Zahl beträgt daher

$$Re_I = \frac{W_2 \cdot l}{\nu} = 1,7 \cdot 10^6 \quad \text{für Gitter I,}$$

$$Re_{II} = \frac{W_3 \cdot l}{\nu} = 1,5 \cdot 10^6 \quad \text{für Gitter II.}$$

Auf Grund der Nachlaufmessungen hinter dem Gitter II zeigt Abb. 12 die Änderung des Abströmwinkels β_3 mit der Versetzung bei verschiedenen Abständen. Die rechte Nebenskala dient der Bestimmung der entsprechenden Änderung der Gesamtzirkulation nach der Formel

$$\frac{\Gamma}{\Gamma_0} = \frac{\Delta W_u}{\Delta W_{u0}} = \frac{\text{ctg } \beta_{10} - \text{ctg } \beta_3}{\text{ctg } \beta_{10} - \text{ctg } \beta_{30}} \quad (4.3)$$

Die Abweichung des Abströmwinkels von $\beta_3 = 90^\circ$ ist reiner Interferenzeinfluß zwischen den beiden Gittern. Diese Ergebnisse zeigen, daß der Abströmwinkel im wesentlichen unabhängig vom Abstand, dagegen sehr stark abhängig von der Versetzung ist. Bei Versetzung $h/t = 0$, bei der also die Delle der Schaufel I direkt die Vorderkante der Schaufel II trifft, vermindert sich die Umlenkung oder die Zirkulation erheblich. Diese Erscheinung kann darauf zurückgeführt werden, daß die Grenzschicht auf der Schaufelkontur des Gitters II wegen des Delleneinflusses eher zur Ablösung neigt und dadurch zu einer Abnahme der Zirkulation führt. Bei Versetzung $h/t = 0,2$ und $0,4$ bei denen also eine Delle der Schaufel I sich direkt an der Druckseite der Schaufel II befindet, nimmt die Gesamtzirkulation im allgemeinen um etwa 1% zu. Bei Versetzung $h/t = 0,8$ verschwindet der Interferenzeinfluß vollkommen, und die Abströmungsrichtung bzw. die Gesamtzirkulation stimmt mit dem Fall ohne Interferenz genau überein. Die Schwankung des Abströmwinkels klingt mit zunehmendem Abstand allmählich ab, aber selbst bei dem verhältnismäßig großen Abstand $a/l = 0,8$ ist die Schwankung noch ziemlich groß.

In Abb. 13 ist die Änderung der Verluste des Tandem-Pumpengitters dargestellt. Verlustbeiwerte des Gitters I, des Gitters II und der beiden Gittern zusammen sind bei verschiedenen Abständen über der Versetzung aufgetragen, wobei zum Vergleich auch die Verlustbeiwerte ohne Interferenz angegeben sind, die von der Versetzung nicht abhängen. Die Verlustbeiwerte des ersten und zweiten Gitters sind in ihrem Verlauf deutlich voneinander verschieden, woraus sich wesentliche Erkenntnisse über die Entstehung des Interferenzeinflusses ergeben. Die Verlustbeiwerte des Gitters I ändern sich sinusförmig um einen Mittelwert, der mit dem Verlustbeiwert ohne Interferenz gut übereinstimmt, und die Phase der Verlustkurve verschiebt sich mit zunehmendem Abstand allmählich in Richtung der Saugseite.

Abb. 14 stellt die Orte der Vorderkante der Schaufel II dar, bei denen Gitter I bei gegebenem Abstand durch den Interferenzeinfluß vom Gitter II den Minimal- bzw. Maximalverlust erreicht. Die Orte liegen praktisch auf einer Geraden, infolgedessen ändert sich die Phase linear mit dem Abstand. Bei sehr kleinem Abstand ist der Verlust des Gitters I bei Versetzung $h/t = 0$ maximal und bei Versetzung $h/t = 0,5$ minimal.

Aus der regelmäßigen sinusförmigen Änderung der Verluste des Gitters I und auch aus den gemessenen Druckverteilungen an Gitter I in Abb. 15 beim Abstand $a/l = 0,15$ kann man den Interferenzeinfluß des Gitters II auf das Gitter I erkennen: Gitter II beeinflußt zunächst die Druckverteilung des Gitters I je nach der gegenseitigen Stellung beider Gitter, und diese Änderung der Druckverteilung verursacht dann die Schwankung der Verluste des Gitters I. Zum Beispiel hat die Druckverteilung des Gitters I bei Versetzung $h/t = 0,2$ wegen des verschlechternden Interferenzeinflusses des Gitters II in der Nähe der Hinterkante starken Druckanstieg, was einen Zuwachs der Verluste zur Folge hat. Demgegenüber verläuft die Druckverteilung bei Versetzung $h/t = 0,6$ und $0,8$ ähnlich derjenigen ohne Interferenz, und infolgedessen besitzt Gitter I dafür kleinere Verluste. Wie schon oben erwähnt, kann also die Strömung in Gitter I potentialtheoretisch erklärt werden.

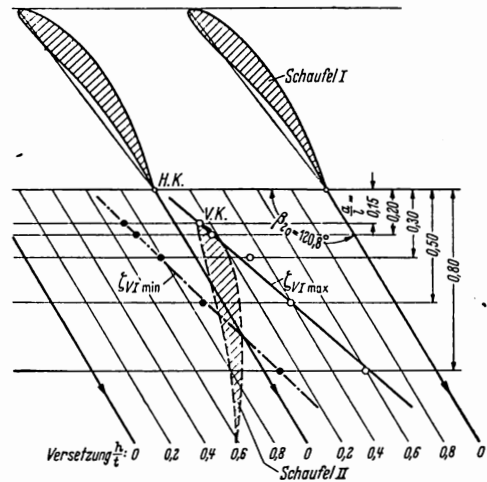


Abb. 14. Gegenseitige Lage beim Interferenzeinfluß des Gitters II auf Gitter I.

—○— Ort der Vorderkante der Schaufel II, bei dem das Gitter I bei gegebenem Abstand einen Maximalverlust erreicht;
 - - -●- - Ort der Vorderkante der Schaufel II, bei dem das Gitter I bei gegebenem Abstand einen Minimalverlust erreicht.

Bei Gitter II ändern sich die Verluste mit der Versetzung derart, daß die Verluste bei jedem Abstand zwischen Versetzung $h/t = 0$ und $0,2$ erheblich (um 50% bei $a/l = 0,15$) zunehmen, während sie bei den übrigen Versetzungen etwa konstant bleiben. Aus dem Ergebnis, daß die Verluste immer zwischen Versetzung $h/t = 0$ und $0,2$ zunehmen, d. h. die Phase der Schwankung sich nicht mit dem Abstand ändert, ist die Folgerung zu ziehen, daß die Verlustdellen von den ersten

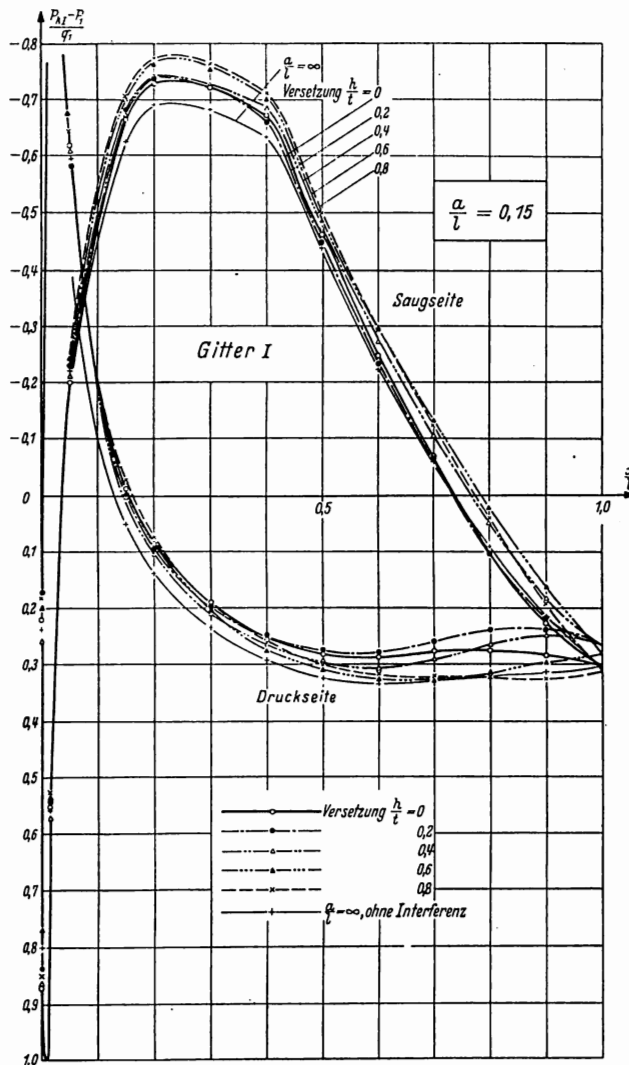


Abb. 15. Druckverteilungen des Gitters I beim Abstand $a/l = 0,15$ und verschiedenen Versetzungen h/t .

Schaufeln für die Verluste des Gitters II eine entscheidende Rolle spielen. Der Verlauf der Verluste des Gitters II läßt sich nicht durch eine potentialtheoretische Betrachtung erfassen, bei der also die Änderung der Verluste nur durch die Änderung der Druckverteilung hervorgerufen wird, sondern nur durch eine grenzschichttheoretische Betrachtung, welche aufzeigt, wie eine Delle die Grenzschichtbildung der nachstehenden Schaufel und damit die Lage der Ablösungspunkte beeinflusst.

Die Strömung in einer Delle enthält eine kleinere kinetische Energie als die Strömung außerhalb der Delle. Deshalb wird beim Überwinden des von der Außenströmung aufgeprägten Druckanstieges die Strömung in der Delle eher als die gesunde Strömung ihre kinetische Energie er-

schöpfen und infolgedessen eher ablösen, so daß sich daraus ein gewisser Zuwachs der Verluste ergibt. Dieser ausgeprägte Interferenzeinfluß einer Delle in der Zuströmung wird in Ziff. 6 noch ausführlicher behandelt.

Demgegenüber erreicht Gitter II noch kleinere Verluste als ohne Interferenz bei Versetzung $h/t = 0,4; 0,6$ und $0,8$, bei denen die Schaufel II sich in gesunder ungestörter Strömung befindet. In Abb. 16 sind die Druckverteilungen des Gitters II bei Abstand $a/l = 0,15$ bei verschiedenen Versetzungen dargestellt. Außer bei Versetzung $h/t = 0$ weichen die Druckverteilungen kaum

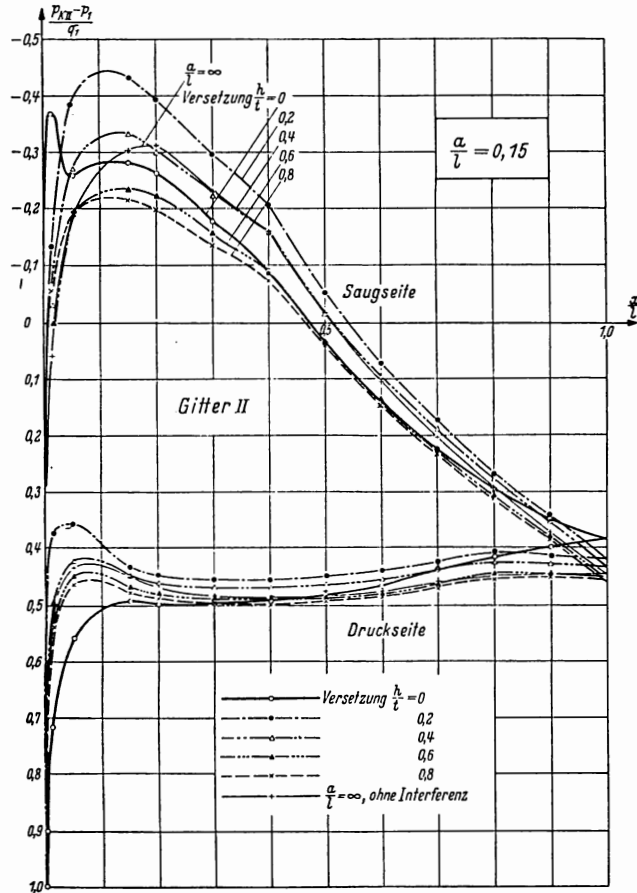


Abb. 16. Druckverteilungen des Gitters II beim Abstand $a/l = 0,15$ und verschiedenen Versetzungen h/t .

voneinander ab. Aus der Druckverteilung bei Versetzung $h/t = 0$ ist zu beobachten, daß der Druck auf der Saugseite in der Nähe der Hinterkante infolge der Ablösung der Grenzschicht nicht weiter ansteigt. Aus dieser Ablösung der Grenzschicht folgt unmittelbar der erhebliche Zuwachs der Verluste. Alle anderen Druckverteilungen bei Versetzung $h/t = 0,2; 0,4; 0,6$ und $0,8$ sind der Druckverteilung ohne Interferenz ähnlich. Die Ergebnisse der Druckverteilungsmessungen an Gitter II liefern also qualitativ dieselbe Schlußfolgerung wie die Ergebnisse der Nachlaufmessungen.

In Abb. 17 ist der Gesamtverlustbeiwert $\zeta_{V,I} + \zeta_{V,II}$ über dem Zirkulationsverhältnis Γ/Γ_0 aufgetragen. Bei festem Abstand wird dabei durch Änderung der Versetzung eine geschlossene Kurve durchlaufen. Die Werte der Versetzung sind an die einzelnen Punkte angeschrieben. Mit zunehmendem Abstand schrumpft die geschlossene Kurve allmählich zusammen und ist schließlich bei unendlich großem Abstand nur noch ein Punkt von $\Gamma/\Gamma_0 = 1,0$ und $(\zeta_{V,I} + \zeta_{V,II})_0 = 0,136$. Das Diagramm stellt den Vorgang des gegenseitigen Interferenzeinflusses sehr übersichtlich dar.

Daraus ist für den Entwurf des Tandem-Pumpengitters die Folgerung zu ziehen, daß die Versetzung $h/t = 0,8$, bei der die beiden Schaufeln sich wie ein Spaltflügel mit einer Spaltweite von $1/5$ der Teilung anordnen, und die Schaufel II sich in der nicht abgelösten gesunden Strömung an der Druckseite der Schaufel I befindet, bei einem in der Praxis gewöhnlich vorkommenden Abstand von $a/l = 0,15$ bis $0,5$ in folgender Hinsicht am günstigsten ist: erstens erreicht der Gesamtverlust dabei den Minimalwert, der etwa 10% kleiner ist als der Verlust ohne Interferenz, und zweitens stimmt die Gesamtzirkulation mit derjenigen ohne Interferenz gut überein, so daß keine

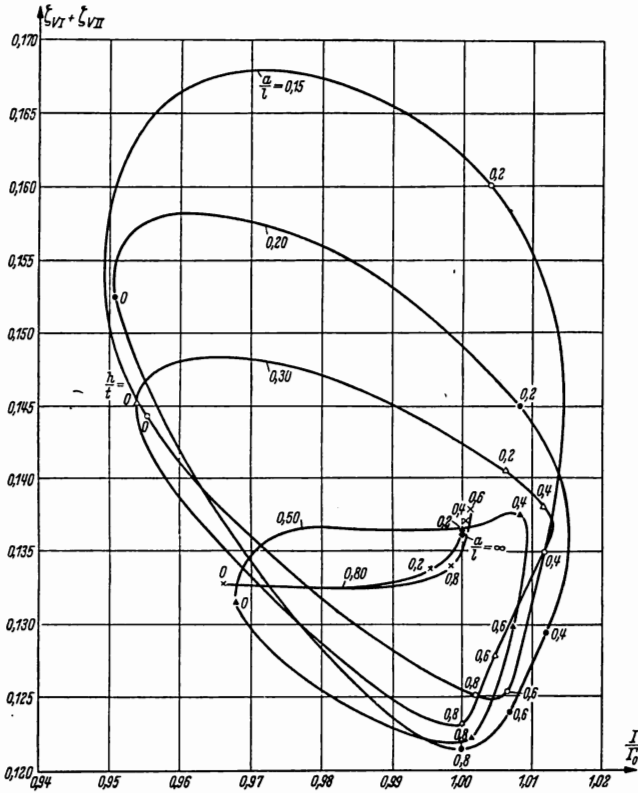


Abb. 17. Gesamtverlustbeiwert des Tandem-Pumpengitters $\zeta_{V,I} + \zeta_{V,II}$ über dem Zirkulationsverhältnis Γ/Γ_0 für verschiedene Abstände und Versetzungen.

Die Zahlen an den Kurvenpunkten geben die entsprechende Versetzung an.

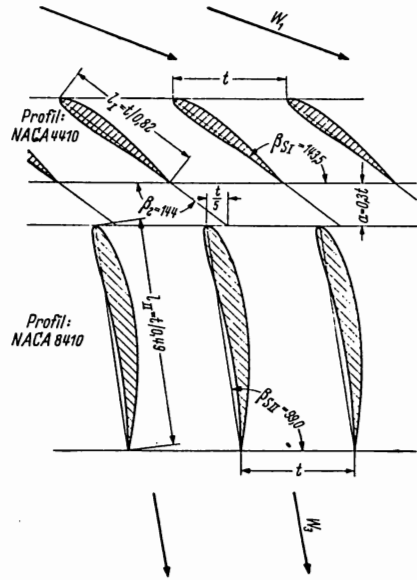


Abb. 18. Beispiel für optimale Tandem-Gitteranordnung unter Berücksichtigung der gegenseitigen Interferenz.

Gegeben: Zuströmwinkel $\beta_1 = 160^\circ$ und Abströmwinkel $\beta_2 = 100^\circ$. (Vgl. Abb. 9 zur Bestimmung der Anordnungen der beiden Gitter ohne Interferenz.)

Korrektur für den Abströmwinkel nötig ist. Der Abstand ist hierbei fast gleichgültig und kann beliebig ausgewählt werden, solange er zwischen $a/l = 0,15$ und $0,5$ liegt.

Nach den in Ziff. 3 gewonnenen Ergebnissen haben die optimalen Anordnungen der beiden Gitter ohne Berücksichtigung der gegenseitigen Interferenz nicht unbedingt die gleichen Teilungsverhältnisse. Wenn die Teilungen der beiden Gitter verschieden sind, ändert sich die relative Lage der beiden Schaufeln zueinander nicht periodisch mit der Teilung, und es kann sich der Interferenzeinfluß an einer Stelle, bei der die beiden Schaufeln sich wie ein Spaltflügel anordnen, günstig und an anderer Stelle, bei der sich die Schaufel II im Nachlauf der Schaufel I befindet, ungünstig auswirken. Um solches mit der Teilung nicht periodisches Strömungsfeld zu vermeiden und nur die günstige Wirkung des Interferenzeinflusses auszunutzen, sollten die Teilungen der beiden Gitter möglichst gleich sein.

In Abb. 18 ist ein optimales Tandem-Pumpengitter unter Berücksichtigung der gegenseitigen Interferenz für ein Geschwindigkeitsdreieck von $\beta_1 = 160^\circ$ und $\Delta\beta = 60^\circ$ dargestellt, wobei die Profilformen, Teilungsverhältnisse und Schaufelwinkel der beiden Gitter bereits nach dem Beispiel in Abb. 9 ohne Berücksichtigung der Interferenz bestimmt wurden.

5. Ein Berechnungsverfahren zum Entwurf eines optimalen Tandem-Pumpengitters für ein gegebenes Geschwindigkeitsdreieck. Neben den experimentellen Untersuchungen wurde das Entwurfsproblem eines optimalen Tandem-Pumpengitters für ein gegebenes Geschwindigkeitsdreieck auch auf theoretischem Wege unter Berücksichtigung der gegenseitigen Interferenz untersucht. Diese Untersuchungen haben ebenfalls das Ziel, die günstigste gegenseitige Stellung der beiden Gitter zu bekommen. Zunächst wurde hierbei ein potentialtheoretisches Rechenverfahren zum Entwurf eines Tandem-Pumpengitters unter Berücksichtigung der gegenseitigen Interferenz (erste Hauptaufgabe des Tandem-Schaufelgitters) entwickelt, und zwar als Erweiterung des Verfahrens, welches *N. Scholz*¹ für den Entwurf eines einreihigen Schaufelgitters mit Hilfe der Singularitätenmethode angegeben hat. Weiter wurde die Änderung der Verluste des berechneten Tandem-Pumpengitters mit der Versetzung auf Grund eines grenzschichttheoretischen Rechenverfahrens², ermittelt. Daraus läßt sich die optimale Versetzung (Minimalverlust) theoretisch bestimmen.

a) Potentialtheoretisches Berechnungsverfahren zum Entwurf eines Tandem-Pumpengitters. Das Berechnungsverfahren legt die Singularitätenmethode zugrunde, bei der eine Schaufel durch eine passend gewählte Wirbel- und Quellbelegung auf der Skelettlinie ersetzt wird, und sich das Strömungsfeld aus der Überlagerung der Translationströmung und der resultierenden, von den Singularitätenbelegungen induzierten Geschwindigkeiten ergibt. Die gegenseitige Interferenz des Tandem-Pumpengitters wird dadurch erfaßt, daß sich die induzierte Geschwindigkeit von der Singularitätenbelegung der anderen Schaufelreihe mit der gegenseitigen Stellung der beiden Gitter zueinander ändert. Infolgedessen besteht die Aufgabe im wesentlichen in der Berechnung der induzierten Geschwindigkeiten von der anderen Schaufelreihe. Bei der Berechnung sind Geschwindigkeitsdreieck, Schaufeltiefe und Gitterteilung der beiden Gitter sowie Abstand und Versetzung zwischen den beiden Gittern vorgegeben. Im übrigen wurde hierbei nur der für die Praxis hauptsächlich interessierende Fall behandelt, bei dem die beiden Gitter die gleiche Teilung besitzen.

Abb. 19 zeigt das gegebene Geschwindigkeitsdreieck für die Berechnung. Jedes der beiden Gitter besitzt ein eigenes Koordinatensystem (vgl. Abb. 20). Die Nullpunkte der beiden Koordinatensysteme befinden sich im Mittelpunkt der Schaufelsehne und haben voneinander den Abstand b_0 bzw. h_0 senkrecht bzw. parallel zur Schaufelfront. Die x -Richtung des Koordinatensystems I bzw. II ist parallel zur Grundströmung $W_{\infty I}$ des Gitters I bzw. $W_{\infty II}$ des Gitters II, und es gilt

$$\lambda_j = \beta_{\infty j} - \frac{\pi}{2} \quad (j = I \text{ und II}). \quad (5.1)$$

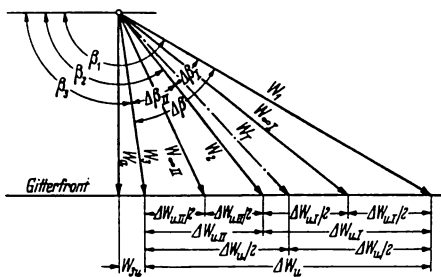


Abb. 19. Geschwindigkeitsdreieck für die Berechnung des Tandem-Pumpengitters.

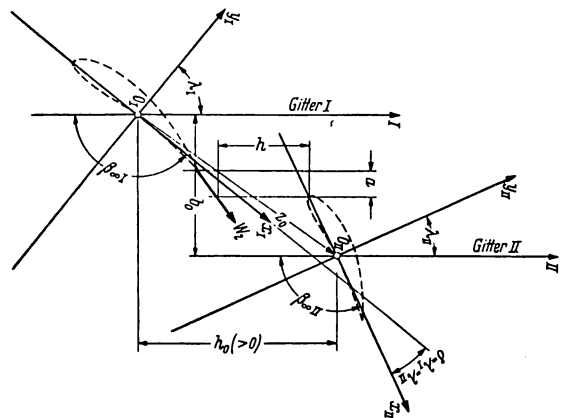


Abb. 20. Koordinatensysteme der beiden Gitter.

Damit sind die zwei Koordinatensysteme I und II für die beiden Gitter festgelegt, und die Ortsvektoren der beiden Systeme sind nach der Transformationsformel

$$z_I = z_0 + z_{II} e^{-i\delta} \quad \text{mit} \quad \delta = \lambda_I - \lambda_{II} \quad (5.2)$$

miteinander verbunden.

¹ *N. Scholz*, Strömungsuntersuchungen an Schaufelgittern. Teil II: Ein Berechnungsverfahren zum Entwurf von Schaufelgitterprofilen, VDI-Forschungsheft 442 (1954).

² Siehe Fußnote 1 von Seite 202.

Zur Vereinfachung werden die Singularitäten statt auf der Skelettlinie auf der Schaufelsehne angeordnet. Hierdurch wird die Anwendbarkeit dieses Verfahrens auf Profile mit mäßiger Wölbung beschränkt. Die passend gewählte Wirbelbelegung $\gamma(x)$ auf der Schaufelsehne erzwingt die Umströmung der Skelettlinie, während eine zusätzliche Quellbelegung $q(x)$ die Schaufel auf die vorgegebene Dickenverteilung aufbläst. Aus der Wirbelbelegung folgt die Gleichung für die Gesamtzirkulation

$$\Gamma_j = \int_{-l_j/2}^{l_j/2} \gamma_j(x_j) dx_j \quad (j = I, II), \quad (5.3)$$

und die Quellbelegung muß die Bedingung für eine geschlossene Schaufelkontur

$$Q_j = \int_{-l_j/2}^{l_j/2} q_j(x_j) dx_j = 0 \quad (j = I, II) \quad (5.4)$$

erfüllen. Die Komponenten der induzierten Geschwindigkeiten u und v lassen sich als Summe verschiedener induzierter Geschwindigkeiten folgendermaßen darstellen:

$$u_j = (u_{jE\gamma} + u_{jEq}) + (u_{jR\gamma} + u_{jRq}) + (u_{jJ\gamma} + u_{jJq}), \quad (5.5a)$$

$$v_j = (v_{jE\gamma} + v_{jEq}) + (v_{jR\gamma} + v_{jRq}) + (v_{jJ\gamma} + v_{jJq}), \quad (5.5b)$$

mit $j = I$ und II , wobei die Indizes in ihrer Reihenfolge anzeigen, erstens auf welcher Schaufel, zweitens von welcher Schaufel und drittens von welcher Singularitätenbelegung die Induktion erfolgt.

1. *Induzierte Geschwindigkeit von der Einzelschaukel \bar{w}_{jE} .* Die induzierte Geschwindigkeit im Punkt z von der Singularitätenbelegung der zu dem Punkt gehörenden Schaufelreihe \bar{w}_C erhält man bekanntlich zu

$$\bar{w}_{jC}(z_j) = \frac{e^{i\lambda_j}}{2t} \int_{-l_j/2}^{l_j/2} [q_j(x'_j) + i\gamma_j(x'_j)] \mathfrak{C}t g \left[\frac{\pi e^{i\lambda_j}}{t} (z_j - x'_j) \right] dx'_j. \quad (5.6)$$

Wenn der Aufpunkt sich direkt auf der Sehne der betrachteten Schaufelreihe befindet, wird der Integrand am Aufpunkt unendlich. Das Integral ist dann als *Cauchyscher Hauptwert* zu verstehen. Läßt man in (5.6) die Größe $z \rightarrow x$, also $y \rightarrow 0$ gehen, so liefert der Grenzübergang für die komplexe Geschwindigkeit auf der x -Achse

$$\bar{w}_{jC}(x_j) = \pm \frac{\gamma_j(x_j) - i q_j(x_j)}{2} + \frac{e^{i\lambda_j}}{2t} \int_{-l_j/2}^{l_j/2} [q_j(x'_j) + i\gamma_j(x'_j)] \mathfrak{C}t g \left[\frac{\pi e^{i\lambda_j}}{t} (x_j - x'_j) \right] dx'_j. \quad (5.7)$$

Dabei gilt das positive Vorzeichen für die obere Schaufelseite und das negative Vorzeichen für die untere Schaufelseite.

Im Grenzübergang $t \rightarrow \infty$ liefert (5.7) die induzierte Geschwindigkeit der Einzelschaukel. Man erhält unter Benutzung der Reihenentwicklung des hyperbolischen Kotangens

$$\bar{w}_{jE}(x_j) = \pm \frac{\gamma_j(x_j) - i q_j(x_j)}{2} + \frac{1}{2\pi} \int_{-l_j/2}^{l_j/2} [q_j(x'_j) + i\gamma_j(x'_j)] \frac{dx'_j}{x_j - x'_j}, \quad (5.8)$$

also in Komponenten

$$u_{jE} = u_{jE\gamma} + u_{jEq} = \pm \frac{\gamma_j(x_j)}{2} + \frac{1}{2\pi} \int_{-l_j/2}^{l_j/2} \frac{q_j(x'_j)}{x_j - x'_j} dx'_j, \quad (5.8a)$$

$$v_{jE} = v_{jE\gamma} + v_{jEq} = -\frac{1}{2\pi} \int_{-l_j/2}^{l_j/2} \frac{\gamma_j(x'_j)}{x_j - x'_j} dx'_j \pm \frac{q_j(x_j)}{2}, \quad (5.8b)$$

mit $j = I$ und II .

2. *Induzierte Geschwindigkeit vom Restgitter \bar{w}_{jR} .* Wenn man von der induzierten Geschwindigkeit eines ganzen Gitters \bar{w}_{jC} nach (5.7) die induzierte Geschwindigkeit der Einzelschaukel \bar{w}_{jE} nach (5.8) abzieht, erhält man daraus die induzierte Geschwindigkeit des Restgitters \bar{w}_{jR} auf der x -Achse der betrachteten Schaufelreihe, wodurch das ganze Integral zweckmäßig in zwei Anteile, mit und ohne Singularität, aufgespalten werden kann:

$$\bar{w}_{jR} = \bar{w}_{jC} - \bar{w}_{jE} = \frac{e^{i\lambda_j}}{2t} \int_{-l_j/2}^{l_j/2} [q_j(x'_j) + i\gamma_j(x'_j)] \left\{ \mathfrak{C}t g \left[\frac{\pi e^{i\lambda_j}}{t} (x_j - x'_j) \right] - \frac{t}{\pi e^{i\lambda_j} (x_j - x'_j)} \right\} dx'_j. \quad (5.9)$$

Das in der geschweiften Klammer von (5.9) stehende Glied ist nun eine reguläre Funktion mit den Variablen λ_j und $(x_j - x'_j)/t$. Führt man die folgende Einflußfunktion F ein:

$$F_j = R_j + i I_j = e^{i\lambda_j} \mathfrak{C} \operatorname{tg} \left(\pi e^{i\lambda_j} \frac{x_j - x'_j}{t} \right) - \frac{t}{\pi (x_j - x'_j)}, \quad (5.10)$$

wobei

$$R_j = \frac{\cos \lambda_j \mathfrak{S} \operatorname{in} \left(2\pi \frac{x_j - x'_j}{t} \cos \lambda_j \right) + \sin \lambda_j \sin \left(2\pi \frac{x_j - x'_j}{t} \sin \lambda_j \right)}{\mathfrak{C} \operatorname{of} \left(2\pi \frac{x_j - x'_j}{t} \cos \lambda_j \right) - \cos \left(2\pi \frac{x_j - x'_j}{t} \sin \lambda_j \right)} - \frac{t}{\pi (x_j - x'_j)} \quad (5.10a)$$

und

$$I_j = \frac{\sin \lambda_j \mathfrak{S} \operatorname{in} \left(2\pi \frac{x_j - x'_j}{t} \cos \lambda_j \right) - \cos \lambda_j \sin \left(2\pi \frac{x_j - x'_j}{t} \sin \lambda_j \right)}{\mathfrak{C} \operatorname{of} \left(2\pi \frac{x_j - x'_j}{t} \cos \lambda_j \right) - \cos \left(2\pi \frac{x_j - x'_j}{t} \sin \lambda_j \right)}, \quad (5.10b)$$

so lassen sich die Komponenten der induzierten Geschwindigkeit des Restgitters im eigenen Koordinatensystem wie folgt ausdrücken:

$$u_{jR} = u_{jR\gamma} + u_{jRq} = -\frac{1}{2t} \int_{-l_j/2}^{l_j/2} \gamma_j(x'_j) I_j dx'_j + \frac{1}{2t} \int_{-l_j/2}^{l_j/2} q_j(x'_j) R_j dx'_j, \quad (5.11a)$$

$$v_{jR} = v_{jR\gamma} + v_{jRq} = -\frac{1}{2t} \int_{-l_j/2}^{l_j/2} \gamma_j(x'_j) R_j dx'_j - \frac{1}{2t} \int_{-l_j/2}^{l_j/2} q_j(x'_j) I_j dx'_j, \quad (5.11b)$$

mit $j = \text{I und II}$.

3. *Induzierte Geschwindigkeit von der anderen Schaufelreihe \bar{w}_{jJ} .* Aus der Grundgleichung des induzierten Geschwindigkeitsfeldes nach (5.6) ergibt sich die vom Gitter I auf die Schaufelsehne des Gitters II induzierte Geschwindigkeit zunächst bezüglich des Koordinatensystems I zu

$$\bar{w}_{\text{II}J}(z_{\text{I}}) = \frac{e^{i\lambda_{\text{I}}}}{2t} \int_{-l_{\text{I}}/2}^{l_{\text{I}}/2} [q_{\text{I}}(x_{\text{I}}) + i\gamma_{\text{I}}(x_{\text{I}})] \mathfrak{C} \operatorname{tg} \left[\frac{\pi e^{i\lambda_{\text{I}}}}{t} (z_{\text{I}} - x_{\text{I}}) \right] dx_{\text{I}}. \quad (5.12)$$

Mit Hilfe der Translationsgleichungen

$$z_{\text{I}} = z_0 + z_{\text{II}} e^{-i\delta} = (b_0 + i h_0) e^{-i\lambda_{\text{I}}} + z_{\text{II}} e^{-i\delta}$$

und

$$\bar{w}(z_{\text{I}}) = \bar{w}(z_{\text{II}}) e^{i\delta}$$

lautet (5.12) im eigenen Koordinatensystem II

$$\begin{aligned} \bar{w}_{\text{II}J}(x_{\text{II}}) &= \bar{w}_{\text{II}J}(z_{\text{I}}) e^{-i\delta} \\ &= \frac{e^{i\lambda_{\text{II}}}}{2t} \int_{-l_{\text{I}}/2}^{l_{\text{I}}/2} [q_{\text{I}}(x_{\text{I}}) + i\gamma_{\text{I}}(x_{\text{I}})] \mathfrak{C} \operatorname{tg} \frac{\pi}{t} (b_0 + i h_0 + x_{\text{II}} e^{i\lambda_{\text{II}}} - x_{\text{I}} e^{i\lambda_{\text{I}}}) dx_{\text{I}}. \end{aligned} \quad (5.13a)$$

In gleicher Weise kann man die vom Gitter II auf die Schaufelsehne des Gitters I induzierte Geschwindigkeit $\bar{w}_{\text{I}J}(x_{\text{I}})$ bezüglich des eigenen Koordinatensystems I ableiten:

$$\bar{w}_{\text{I}J}(x_{\text{I}}) = \frac{e^{i\lambda_{\text{I}}}}{2t} \int_{-l_{\text{II}}/2}^{l_{\text{II}}/2} [q_{\text{II}}(x_{\text{II}}) + i\gamma_{\text{II}}(x_{\text{II}})] \mathfrak{C} \operatorname{tg} \frac{\pi}{t} (b_0 + i h_0 + x_{\text{II}} e^{i\lambda_{\text{II}}} - x_{\text{I}} e^{i\lambda_{\text{I}}}) dx_{\text{II}}. \quad (5.13b)$$

Das hyperbolische Glied der Integranden in (5.13a) und (5.13b) ist wieder eine reguläre Funktion auf der Schaufelsehne und es ergibt sich eine neue Einflußfunktion F_J mit den Variablen b_0 , h_0 , λ_{I} , λ_{II} , x_{I} und x_{II} :

$$F_J = R_J + i I_J = \mathfrak{C} \operatorname{tg} \frac{\pi}{t} (b_0 + i h_0 + x_{\text{II}} e^{i\lambda_{\text{II}}} - x_{\text{I}} e^{i\lambda_{\text{I}}}), \quad (5.14)$$

wobei gilt

$$R_J = \frac{\sin 2X}{\cos 2X - \cos 2Y}, \quad (5.14a)$$

$$I_J = \frac{-\sin 2X}{\cos 2X - \cos 2Y}, \quad (5.14b)$$

$$X = \frac{\pi}{t} (b_0 + x_{II} \cos \lambda_{II} - x_I \cos \lambda_I),$$

$$Y = \frac{\pi}{t} (h_0 + x_{II} \sin \lambda_{II} - x_I \sin \lambda_I).$$

Mit Hilfe dieser neu definierten Einflußfunktion sind die induzierten Geschwindigkeiten in (5.13a) und (5.13b) umzuschreiben in

$$\bar{w}_{IJ}(x_I) = u_{IJ} - i v_{IJ} = \frac{e^{i\lambda_I}}{2t} \int_{-l_{II}/2}^{l_{II}/2} [q_{II}(x_{II}) + i \gamma_{II}(x_{II})] (R_J + i I_J) dx_{II}, \quad (5.15a)$$

$$\bar{w}_{IIJ}(x_{II}) = u_{IIJ} - i v_{IIJ} = \frac{e^{i\lambda_{II}}}{2t} \int_{-l_I/2}^{l_I/2} [q_I(x_I) + i \gamma_I(x_I)] (R_J + i I_J) dx_I. \quad (5.15b)$$

Für die numerische Auswertung muß man die Gleichungen weiter in die Komponenten zerlegen. Hierbei gilt für Gitter I

$$u_{IJ\gamma}(x_I) = \frac{\sin \lambda_I}{2t} \int_{II} \gamma_{II}(x_{II}) R_J(x_I, x_{II}) dx_{II} + \frac{\cos \lambda_I}{2t} \int_{II} \gamma_{II}(x_{II}) I_J(x_I, x_{II}) dx_{II}, \quad (5.16a)$$

$$u_{IJq}(x_I) = \frac{\sin \lambda_I}{2t} \int_{II} q_{II}(x_{II}) I_J(x_I, x_{II}) dx_{II} - \frac{\cos \lambda_I}{2t} \int_{II} q_{II}(x_{II}) R_J(x_I, x_{II}) dx_{II}, \quad (5.16b)$$

$$v_{IJ\gamma}(x_I) = -\frac{\sin \lambda_I}{2t} \int_{II} \gamma_{II}(x_{II}) I_J(x_I, x_{II}) dx_{II} + \frac{\cos \lambda_I}{2t} \int_{II} \gamma_{II}(x_{II}) R_J(x_I, x_{II}) dx_{II}, \quad (5.16c)$$

$$v_{IJq}(x_I) = \frac{\sin \lambda_I}{2t} \int_{II} q_{II}(x_{II}) R_J(x_I, x_{II}) dx_{II} + \frac{\cos \lambda_I}{2t} \int_{II} q_{II}(x_{II}) I_J(x_I, x_{II}) dx_{II} \quad (5.16d)$$

und für Gitter II

$$u_{IIJ\gamma}(x_{II}) = -\frac{\sin \lambda_{II}}{2t} \int_I \gamma_I(x_I) R_J(x_I, x_{II}) dx_I - \frac{\cos \lambda_{II}}{2t} \int_I \gamma_I(x_I) I_J(x_I, x_{II}) dx_I, \quad (5.17a)$$

$$u_{IIJq}(x_{II}) = -\frac{\sin \lambda_{II}}{2t} \int_I q_I(x_I) I_J(x_I, x_{II}) dx_I + \frac{\cos \lambda_{II}}{2t} \int_I q_I(x_I) R_J(x_I, x_{II}) dx_I, \quad (5.17b)$$

$$v_{IIJ\gamma}(x_{II}) = +\frac{\sin \lambda_{II}}{2t} \int_I \gamma_I(x_I) I_J(x_I, x_{II}) dx_I - \frac{\cos \lambda_{II}}{2t} \int_I \gamma_I(x_I) R_J(x_I, x_{II}) dx_I, \quad (5.17c)$$

$$v_{IIJq}(x_{II}) = -\frac{\sin \lambda_{II}}{2t} \int_I q_I(x_I) R_J(x_I, x_{II}) dx_I - \frac{\cos \lambda_{II}}{2t} \int_I q_I(x_I) I_J(x_I, x_{II}) dx_I. \quad (5.17d)$$

Damit sind alle Komponenten der induzierten Geschwindigkeiten in (5.5) in einer praktisch brauchbaren Form dargestellt. Die numerischen Auswertungen der Integralglieder können nach der *Simpsonschen* Regel durchgeführt werden^{1, 2, 3}.

Die Schaufelform ergibt sich aus der Überlagerung einer Wölbungsverteilung $y_s(x)$ der Skelettlinie und einer Dickenverteilung $r_K(x)$, und zwar in der Art, daß die Kontur aus den Enveloppen der eingeschriebenen Kreise mit den Halbmessern $r_K(x)$ um die Aufpunkte auf der Skelettlinie entsteht.

¹ H. Ohashi, Theoretische und experimentelle Untersuchungen an Tandem-Pumpengittern starker Umlenkung. Dissertation der TH Braunschweig (1958).

² F. Riegels und H. Wittich, Zur Berechnung der Druckverteilung von Profilen, Jahrbuch Deutsch. Luftfahrtforsch. 1942, S. I 120.

³ T. Theodorsen and J. E. Garrick, General potential theory of arbitrary wing section, NACA TR 452 (1933).

Die Skelettlinie y_s ergibt sich als Stromlinie, indem die betrachtete Schaufel nur mit einer Wirbelbelegung versehen wird, alle übrigen Schaufeln, auch die von der anderen Schaufelreihe, aber die vollständige Singularitätenbelegung erhalten. Hierbei gilt für die Neigung der Skelettlinie

$$\left(\frac{dy_s}{dx}\right)_j = \frac{V_{Tj} + v_{jR} + v_{jJ} + v_{jE}y}{U_{Tj} + u_{jR} + u_{jJ}} \quad (5.18)$$

Hieraus erhält man durch Integrieren über die x -Achse für die Skelettlinie

$$y_{s,j} = \int_{-l_j/2}^{x_j} \frac{V_{Tj} + v_{jR} + v_{jJ} + v_{jE}y}{U_{Tj} + u_{jR} + u_{jJ}} dx'_j \quad (5.19)$$

Zur Ermittlung der Dickenverteilung der Schaufelkonturen wird ein krummliniges Koordinatensystem s und r längs der Skelettlinie bzw. senkrecht dazu eingeführt (vgl. Abb. 21). Nach der Kontinuitätsgleichung muß die von der Schaufelnase bis zur Stelle s auf Grund der Quellbelegung $q(s)$ ausgetretene Flüssigkeitsmenge innerhalb der Kontur bleiben. Daraus ergibt sich als Bedingung für die Dickenkoordinate die Gleichung

$$\frac{1}{2} \int_0^{s_j} q_j(s'_j) ds'_j = \int_0^{r_{Kj}} W_{sj}(s_j, r_j) dr_j \quad (5.20)$$

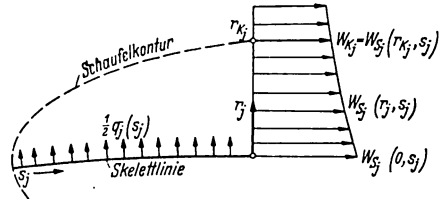


Abb. 21. Zur Berechnung der Schaufelkontur.

Ersetzt man $W_{sj}(s_j, r)$ näherungsweise durch die Geschwindigkeit auf der Skelettlinie $W_{sj}(s_j)$, so erhält man

$$r_{Kj} = \frac{1}{2 W_{sj}} \int_0^{s_j} q_j(s'_j) ds'_j = \frac{1}{2 W_{sj}} \int_{-l_j/2}^{x_j} q_j(x'_j) dx'_j \quad (5.21)$$

Hierbei ist die Skelettgeschwindigkeit $W_{sj}(s_j)$ aus dem induzierten Geschwindigkeitsfeld der vollständigen Singularitätenbelegung so anzuschreiben:

$$\begin{aligned} W_{sj}(s_j) &= W_{sjv}(s_j) + u_{jE}q(s_j) \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 + y_{s_j}^2}} \left[U_{Tj} + u_{jR} + u_{jJ} + u_{jE}q(x_j) + y'_{s_j} (V_{Tj} + v_{jR} + v_{jJ}) \pm \frac{\gamma_j(x_j)}{2} \right], \end{aligned} \quad (5.22)$$

wobei $W_{sjv}(s_j)$ die Skelettgeschwindigkeit für den Fall bedeutet, bei dem die betrachtete Schaufel nur mit einer Wirbelbelegung versehen ist.

Die Geschwindigkeitsverteilung auf der Schaufelkontur W_{Kj} wird auf gleiche Weise wie beim Einzelgitter¹ aus dem gesamten induzierten Geschwindigkeitsfeld abgeleitet. Die Konturgeschwindigkeit lautet

$$W_{Kj} = \frac{W_{sjv}}{\sqrt{1 + r_{Kj}^2}} \left(1 + \frac{u_{jE}q}{W_{sj} \sqrt{1 + y_{s_j}^2}} \right) \quad (5.23)$$

Aus der Konturgeschwindigkeit kann man leicht nach der Bernoullischen Gleichung die statische Druckverteilung p_K auf der Kontur erhalten:

$$\frac{p_K - p_1}{\frac{\rho}{2} W_a^2} = \left(\frac{W_1}{W_a} \right)^2 - \left(\frac{W_K}{W_a} \right)^2 \quad (5.24)$$

Aus den hier angegebenen Gleichungen sind die Schaufelkonturen und Konturgeschwindigkeitsverteilungen der beiden Gitter für gegebene Ausgangsdaten zu ermitteln. Hierbei erfordert naturgemäß der Rechenschritt für die Ermittlung der induzierten Geschwindigkeit von der anderen Schaufelreihe den größten Aufwand im ganzen Rechenverlauf.

b) Berechnungsbeispiele. Für die Berechnungsbeispiele an Tandem-Pumpengittern sind die Schaufelkonturen, Geschwindigkeitsverteilungen sowie daran anschließend die zugehörigen Verlustbeiwerte für die in der Tabelle 1 angegebenen Ausgangsdaten ermittelt worden. Das

¹ Siehe Fußnote 1 von Seite 215.

optimale Belastungsverhältnis ist nach Abb. 3 als $(\Delta W_{uI}/\Delta W_{uII})^* = 0,5$ angenommen. Dadurch wird die Zwischenströmung und die Zirkulation festgelegt:

$$\beta_2 = 120,8^\circ, \quad \Gamma_{I/II} W_a = \Gamma_{II/II} W_a = 0,596.$$

In diesem Fall stimmt die Translationsströmung W_T mit der Zwischenströmung W_2 überein. Die x -Richtung der beiden Koordinatensysteme wird parallel zur Grundströmung $W_{\infty I}$ des Gitters I bzw. $W_{\infty II}$ des Gitters II festgelegt. Um eine günstige Druckverteilung um die Schaufel zu gewährleisten, wurden die Wirbel- und Quellbelegungen wie in Abb. 22 ausgewählt.

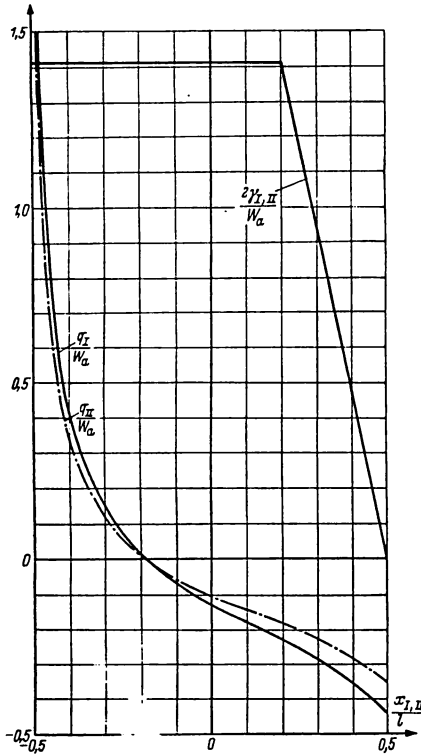


Abb. 22. Wirbelbelegung γ und Quellbelegung q längs der Schaufelsehne bei den Beispielrechnungen.

Die Rechnungen sind bei drei Anordnungen durchgeführt worden, nämlich bei Abstand $a/l = 0,1$ und Versetzung $h/t = 0$, bei Abstand $a/l = 0,1$ und Versetzung $h/t = 0,5$ und bei unendlich großem Abstand $a/l = \infty$. Die letzte Anordnung ohne Interferenz dient hierbei als Vergleichsbeispiel für den Interferenzeinfluss.

Die Rechenergebnisse zeigen, daß die Änderung der Skelettlinie mit der Versetzung schon bei verhältnismäßig kleinem Abstand $a/l = 0,1$ recht geringfügig ist, und zwar ändert sich der Schaufelwinkel mit der Versetzung bei Gitter I höchstens um $0,1^\circ$, bei Gitter II um $0,5^\circ$. Auch die Änderung der Dickenverteilung der beiden Gitter ist dabei nicht nennenswert. Aus diesen rechnerischen

Tabelle 1. Auslegungsdaten der Rechenbeispiele für den Entwurf eines Tandem-Pumpengitters

β_1	140°	λ_I	41,8°
β_2	120,8°	λ_{II}	16,6°
β_3	90°	δ	25,2°
$\Delta\beta$	50°	a/l	0,10
$\Delta\beta_I$	19,2°	b_0/l	0,952
$\Delta\beta_{II}$	30,8°	$\frac{h_0}{l} \left(\frac{h}{t} = 0 \right)$	0,567
$\beta_{\infty I}$	131,8°	$\frac{h_0}{l} \left(\frac{h}{t} = 0,5 \right)$	0,067
$\beta_{\infty II}$	106,6°	$l_{I,II}/t$	1,00
$\Gamma/l W_a$	1,192	d_{max}/l	0,10
$\Gamma_{I,II}/l W_a$	0,596	W_a	37 m/s

Ergebnissen kann man wohl die Folgerung ziehen, daß der Einfluß der gegenseitigen Interferenz auf die Schaufelkonturen schon bei kleinem Abstand $a/l = 0,1$ so gering ist, daß man beim Entwurf eines Tandem-Pumpengitters kaum darauf Rücksicht zu nehmen braucht, da die Abweichung der Konturen von denjenigen ohne Interferenz nur so groß ist wie die Genauigkeit bei der gewöhnlichen Schaufelherstellung.

Abb. 23 zeigt die Konturgeschwindigkeitsverteilungen beider Gitter. Bei Gitter I ist die Änderung der Konturgeschwindigkeit in der Nähe der Hinterkante ziemlich groß, dagegen ändert sich die Konturgeschwindigkeit des Gitters II in der Nähe der Vorderkante recht wenig. Es ist naheliegend, daß die Abweichung der Konturgeschwindigkeiten nur in dem hinteren Teil des Gitters I und in dem vorderen Teil des Gitters II entsteht, weil diese Teile der anderen Schaufelreihe besonders nahe stehen und am stärksten in deren Einflußgebiet liegen.

Anhand der oben ermittelten Konturgeschwindigkeiten wurden die Verlustbeiwerte der beiden Gitter nach dem grenzschichttheoretischen Verfahren von *L. Speidel* und *N. Scholz*¹ unter der Annahme berechnet, daß die Grenzschicht vollturbulent ist und die Reynoldszahl $Re_I = W_2 l/\nu = 1,7 \cdot 10^5$ für Gitter I, $Re_{II} = W_3 l/\nu = 1,5 \cdot 10^5$ für Gitter II beträgt. Die Ergebnisse sind in Abb. 24 dargestellt. Bei Gitter I ändert sich der Verlustbeiwert periodisch mit der Versetzung und weicht maximal um 7,5% vom Mittelwert ab. Der Minimalverlust tritt bei Versetzung $h/t = 0,5$ auf und der Maximalverlust

¹ Siehe Fußnote 1 von Seite 202.

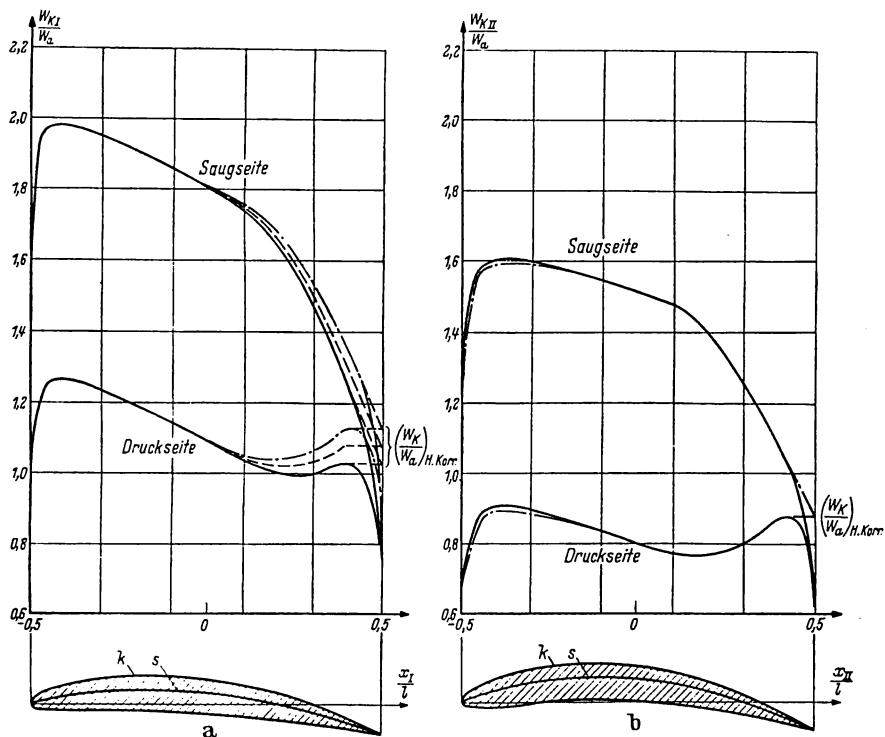


Abb. 23. Ermittelte Konturgeschwindigkeitsverteilung. — a) Auf der Schaufelkontur des Gitters I, b) Auf der Schaufelkontur des Gitters II.

- bei Abstand $a/l = 0,1$ und Versetzung $h/t = 0$;
- bei Abstand $a/l = 0,1$ und Versetzung $h/t = 0,5$;
- bei Abstand $a/l = \infty$, ohne Interferenz.

Die ermittelten Schaufelkonturen bei $a/l = 0,1$ und Versetzung $h/t = 0$ sind mit eingezeichnet, s) Skelettlinie, k) von Skelettlinie und Dickenverteilung aufgebaute Schaufelkontur.

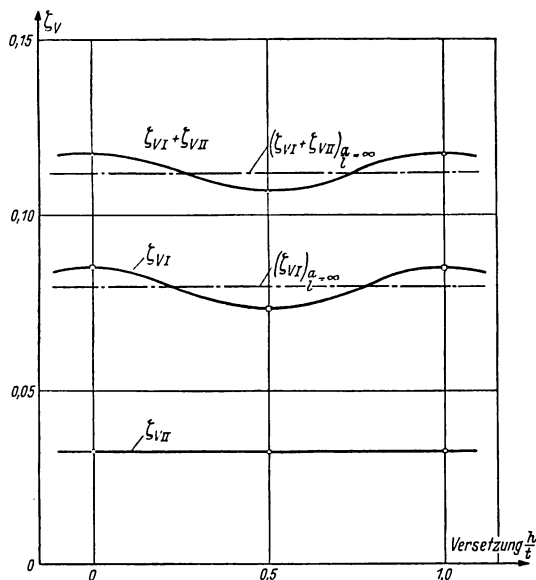


Abb. 24. Änderung der gerechneten Verlustbeiwerte des Tandem-Pumpengitters mit der Versetzung.

- $Re_I = W_1 \cdot l/\nu = 1,7 \cdot 10^4$, $Re_{II} = W_2 \cdot l/\nu = 1,5 \cdot 10^4$.
- Verlustbeiwerte bei Abstand $a/l = 0,1$;
 - - - Verlustbeiwerte bei Abstand $a/l = \infty$.

bei Versetzung $h/t = 0$. Der Mittelwert der Verluste stimmt mit dem Verlustbeiwert ohne Interferenz gut überein. Die Verlustbeiwerte des Gitters II ändern sich demgegenüber kaum, weil die Änderung der Konturgeschwindigkeit vernachlässigbar gering ist. Der resultierende Verlustbeiwert von den beiden Gittern ändert sich ebenfalls periodisch mit Abweichung von 5% vom Mittelwert, und die Phase der Schwankung stimmt mit derjenigen des Gitters I überein.

Diese rechnerischen Ergebnisse beweisen deutlich, daß die Schwankung der Verluste des Gitters I im wesentlichen durch eine potential-theoretische Betrachtung erfaßt werden kann, weil die rechnerische Änderung der Verluste des Gitters I mit der Versetzung hinsichtlich der Stärke und der Phase der Schwankung mit den Meßergebnissen sehr gut übereinstimmt. Demgegenüber kann die in Wirklichkeit auftretende starke Änderung der Verluste des Gitters II nicht mit der Potentialtheorie, sondern nur mit einer grenzschicht-theoretischen Betrachtung erklärt werden.

Nach den hier gewonnenen Ergebnissen kann man im allgemeinen beim Entwurf der Schaufelkonturen des Tandem-Pumpengitters mit mäßigem Abstand ($a/l > 0,10$) die Gitter mit guter Näherung als zwei an sich selbständige Gitter betrachten. Darüberhinaus kann man durch Auswahl der günstigsten Versetzung für den Verlust ein Minimum erhalten.

6. Interferenzeinfluß einer Delle in der Zuströmung auf die Verluste der nachstehenden Schaufel.

Um den bei den Messungen an Tandem-Pumpengittern deutlich beobachteten starken Interferenzeinfluß der Nachlaufdellen vom Gitter I auf die Schaufelverluste des Gitters II noch näher zu untersuchen, wurde ein einfacher Modellversuch durchgeführt. Um den Vorgang dieses Einflusses der Delle zu verstehen, könnte man sich zunächst vorstellen, daß eine Delle in der Zuströmung die Druckverteilung der nachstehenden Schaufel beeinflußt, und daß sich daraus eine gewisse Änderung der Verluste ergibt. Die Ergebnisse der Druckverteilungsmessungen zeigen jedoch, daß sich die Druckverteilung durch eine Delle sehr geringfügig ändert und dadurch keine große Änderung der Verluste zu erwarten ist. Infolgedessen muß eine Delle in der Zuströmung unmittelbar den Vorgang der Grenzschichtbildung, vor allem die Ablösungspunkte an der Schaufel, stark beeinflussen und die entsprechende Änderung der Verluste zur Folge haben.

Die Strömung in einer Delle enthält gewiß eine kleinere kinetische Energie als die Strömung außerhalb der Delle. Deshalb wird beim Überwinden des von der Außenströmung aufgeprägten Druckanstieges die Strömung in der Delle eher als die ungestörte Strömung ihre kinetische Energie erschöpfen und infolgedessen eher ablösen, so daß daraus ein gewisser Zuwachs der Verluste folgt. Dieser Vorgang wird hierbei Interferenzeffekt der Delle genannt.

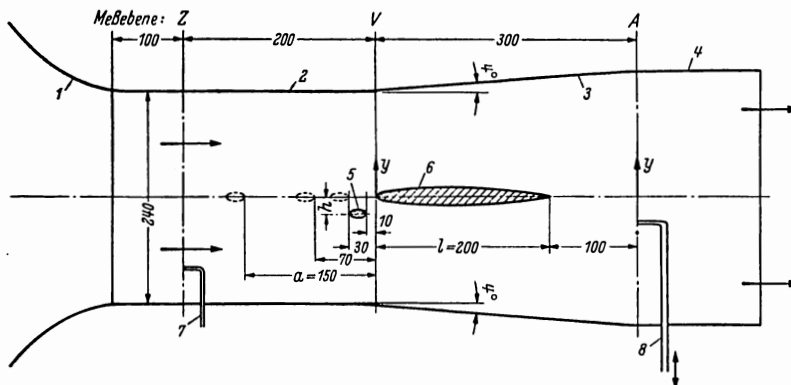


Abb. 25. Versuchsanordnung für die experimentelle Bestimmung des Interferenzeinflusses einer Delle in der Zuströmung auf die Verluste der nachstehenden Schaufel. — 1 Reduzierdüse, 2 Einlaufteil, 3 Diffusorteil, 4 Austrittsteil, 5 Störkörper, verstellbar und austauschbar, 6 Meßschaufel NACA 0010, 7 Meßsonde für den statischen Druck p_2 , 8 Nachlaufsonde für den Gesamtdruck p_A und statischen Druck p_A .

a — Abstand zwischen dem Störkörper und der Meßschaufel,
 h — seitliche Versetzung des Störkörpers.

Andererseits hat die Strömung in einer Delle eine kleinere mittlere Geschwindigkeit und einen entsprechend kleineren mittleren Staudruck als die ungestörte Strömung. Weil sich der Reibungs- und Druckwiderstand einer Schaufel in einem ähnlichen Strömungsfeld proportional zum Staudruck ändert, kann eine Delle direkt vor der Schaufel die Verminderung des Widerstandes bzw. des Verlustes verursachen. Dies soll als Schatteneffekt der Delle bezeichnet werden¹.

¹ P. Ruden, Windkanalmessungen über den Windschatteneinfluß auf Rechtecktragflügel mit symmetrischem Profil, Jahrbuch Deutsch. Luftfahrtforsch. 1940, S. I 204.

In Wirklichkeit treten beide Effekte gleichzeitig auf, und zwar in einem bestimmten Verhältnis, welches von der Stärke des Druckanstieges längs der Schaufel und von der Anordnung der auftretenden Delle abhängig ist¹.

Die Versuchsanordnung ist in Abb. 25 dargestellt. Es wurde in vereinfachter Weise eine Einzelschaukel vom Profil NACA 0010 in einen Diffusor mit 8° Öffnungswinkel eingebaut, dessen Druckanstieg etwa demjenigen eines gewöhnlichen Pumpengitters entspricht. Weil das Problem nur den Vorgang der Grenzschichtbildung auf der Schaufelkontur betrifft, genügt es, den Druckgradienten längs der Schaufel in dieser Weise festzulegen, um den Einfluß der Delle zu untersuchen. Bei den Untersuchungen wurden die gewünschten Dellen in der Zuströmung mit Hilfe von zwei verschiedenen Störkörpern erzeugt. Beide Störkörper sind leicht austauschbar und können parallel zur Schaufel in verschiedenen Abständen und seitlichen Versetzungen angeschraubt werden.

Die Nachlaufmessungen sind zunächst in Meßebene *V* (Vorderkante der Meßschaukel) ohne Meßschaukel nur mit den Störkörpern durchgeführt worden, um zu bestimmen, wie die Nachläufe der Störkörper in der Vorderkantenebene aussehen. Anhand dieser Nachlaufmessungen kann man die Geometrie der Dellen in Abhängigkeit von der Anordnung der Störkörper bestimmen und gleichzeitig die Verlustbeiwerte der Störkörper allein ermitteln. Dann sind die systematischen Nachlaufmessungen in Meßebene *A* (halbe Schaufeltiefe hinter der Meßschaukel) bei verschiedenen Anordnungen der Störkörper durchgeführt worden.

Der Verlustbeiwert ζ'_V ist hierbei als Energieverlust nach der Gleichung

$$\zeta'_V = \frac{\text{Energieverlust}}{\text{Strahlenergie in Z-Ebene}} = \int_{\text{in Delle}} \frac{W(y)}{W_Z} \frac{g_Z - g(y)}{\frac{\rho}{2} W_Z^2} dy \quad (6.1)$$

definiert. Diese Definition hat den Vorteil, daß sie auch bei der verzögerten Grundströmung für einen bestimmten Energieverlust unabhängig von der Meßebene immer den gleichen Verlustbeiwert liefert. Weil der Nachlauf in Meßebene *A* die beiden Verlustdellen vom Störkörper und von der Meßschaukel enthält, ergeben sich die Verlustbeiwerte der Meßschaukel als Differenz der Gesamtverluste und der Störkörperverluste nach der Formel

$$\zeta'_{V_s} = \int \frac{W_A(y)}{W_Z} \frac{g_Z - g_A(y)}{\frac{\rho}{2} W_Z^2} dy - \int \frac{W_V(y)}{W_Z} \frac{g_Z - g_V(y)}{\frac{\rho}{2} W_Z^2} dy \quad (6.2)$$

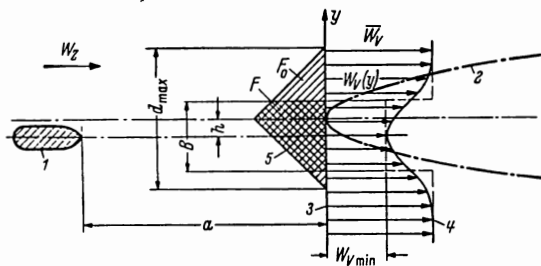


Abb. 26. Charakteristische Parameter einer Nachlaufdelle und Zusammenhang mit der Meßschaukel.

1) Störkörper, 2) Meßschaukel, 3) Meßebene *V*, 4) Nachlaufdelle des Störkörpers ohne Meßschaukel, 5) Einflußdreieck der auftretenden Delle.

$W_{V \min} / W_Z$: Tiefe der Delle;

B : Charakteristische Breite der Delle;

F_0 : Fläche des Einflußdreiecks mit Grundlinie d_{\max} ;

F : von der charakteristischen Breite B bedeckte Fläche des Dreiecks.

Bei allen Messungen wurde die Zuströmgeschwindigkeit $W_Z = 44$ m/s eingehalten. Die auf die Zuströmgeschwindigkeit bezogene Reynoldszahl der Schaufel betrug daher

$$Re = \frac{W_Z l}{\nu} = 5,8 \cdot 10^5.$$

In diesen Untersuchungen läßt sich die Geometrie der auftretenden Dellen durch ihre Tiefe und eine charakteristische Breite darstellen (vgl. Abb. 26). Die Tiefe der Dellen ist hierbei dem

¹ K. Bursig, Experimentelle und theoretische Untersuchungen über die Strömung um ein Tragflügelprofil bei Druckabfall und Druckanstieg und bei ungleichförmiger Zuströmung, Diplom-Arbeit Nr. 53 des Instituts für Strömungsmechanik der Techn. Hochsch. Braunschweig (1958).

folgenden Verhältnis entsprechend quantitativ festgelegt:

$$\frac{\text{Minimalgeschwindigkeit der Delle}}{\text{Zuströmgeschwindigkeit}} = \frac{W_{V \min}}{W_Z}$$

Die charakteristische Breite der Delle B läßt sich als die Breite eines angenommenen rechteckigen Loches in der Zuströmgeschwindigkeit definieren, welches die gleiche Tiefe und die gleiche Ver-

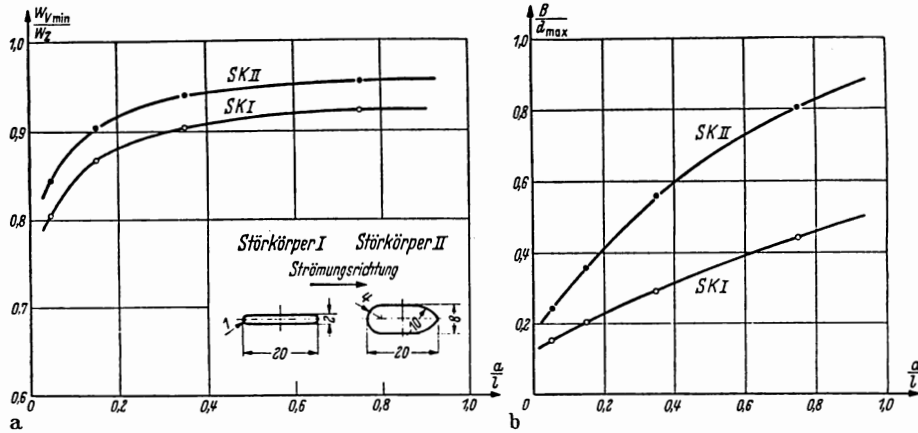


Abb. 27. Änderung der charakteristischen Parameter der Dellen mit dem Abstand a . a) Änderung der Tiefe der Dellen bei Störkörper I und II, b) Änderung der charakteristischen Breite der Dellen bei Störkörper I und II.

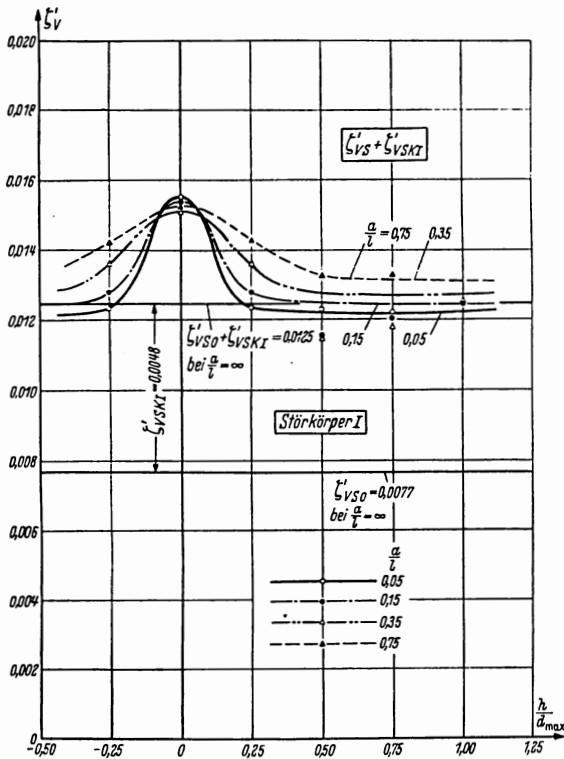


Abb. 28. Änderung der Verlustbeiwerte mit der seitlichen Versetzung bei verschiedenen Abständen für Störkörper I. $Re = W_Z \cdot l/\nu = 5,8 \cdot 10^4$.

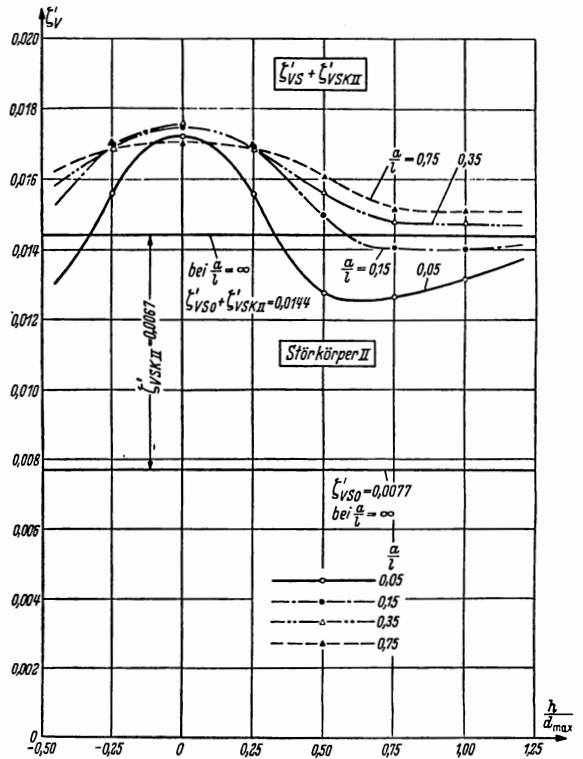


Abb. 29. Änderung der Verlustbeiwerte mit der seitlichen Versetzung bei verschiedenen Abständen für Störkörper II. $Re = W_Z \cdot l/\nu = 5,8 \cdot 10^4$.

drängungsdicke wie die ursprüngliche Delle besitzt. Die charakteristische Breite ergibt sich dann nach der Formel

$$B = \frac{1}{\bar{W}_V - W_{V \min}} \int_{\text{in Delle}} [\bar{W}_V - W_V(y)] dy. \tag{6.3}$$

Dabei bedeutet \bar{W}_V die ungestörte Zuströmgeschwindigkeit außerhalb der Delle in Meßebe V . Die Änderung der Tiefe und der charakteristischen Breite der Dellen ist in Abhängigkeit von der Anordnung der Störkörper in Abb. 27 a und b dargestellt.

Aus den systematischen Nachlaufmessungen in Meßebe A wurden die Verlustbeiwerte ermittelt, die die Verluste der Meßschaufel ζ'_{VS} und des Störkörpers ζ'_{SK} enthalten. Sie wurden für die Störkörper I und II in Abb. 28 bzw. 29 über der seitlichen Versetzung bei verschiedenen Abständen der Störkörper aufgetragen. Die ausgezogenen geraden Linien geben dabei die Verlustbeiwerte der Meßschaufel bzw. der Störkörper wieder, die ohne Interferenzeinfluß einzeln gemessen wurden. Sie werden für die Messungen mit Interferenz zum Vergleich herangezogen.

Wie bei Tandem-Pumpengittern nehmen die Schaufelverluste auch hier unter dem Einfluß einer Delle in der Zuströmung stark zu. Es ist daraus deutlich zu erkennen, daß eine die Schaufelmitte treffende Delle in der Zuströmung die Schaufelverluste um etwa 35 bis 40% vergrößert, wobei die Verluste kaum von der Tiefe und Breite der Delle abhängen. Der Interferenzeinfluß einer Delle vermindert sich allmählich mit zunehmender seitlicher Versetzung; und wie man sich leicht vorstellen kann, verschwindet der Interferenzeinfluß einer Delle mit einer schmaleren charakteristischen Breite bei kleinerer seitlicher Versetzung.

Der Interferenzeinfluß einer Delle ist praktisch abgeklungen, wenn die Delle so weit versetzt wird, daß die charakteristische Breite der Delle sich außerhalb der Maximaldicke der Schaufel befindet.

Die Verlustkurve bei Abstand $a/l = 0,05$ mit Störkörper II in Abb. 29 zeigt zwischen $h/d_{max} = 0,50$ und $0,75$ einen starken negativen Interferenzeinfluß der Delle. Das bedeutet aber nicht, daß eine Delle bei dieser Anordnung einen günstigen Einfluß auf die Schaufelverluste ausübt, sondern nur, daß der Störkörper dabei auf die Meßschaufel wie ein Vorflügel wirkt und daß der Verlust des Störkörpers selbst wegen der beschleunigten Strömung durch den Spalt abnimmt. Daraus ergibt sich eine Verminderung des Gesamtverlustes.

Der Interferenzeinfluß hängt von drei Parametern ab, nämlich von der Tiefe der Delle, der Breite der Delle und der seitlichen Versetzung. Das verursacht die Schwierigkeit, den Einfluß dieser drei Parameter in einem Diagramm darzustellen. Dazu ist ein Versuch unternommen worden, aus der charakteristischen Breite und der seitlichen Versetzung einen einzigen neuen Parameter

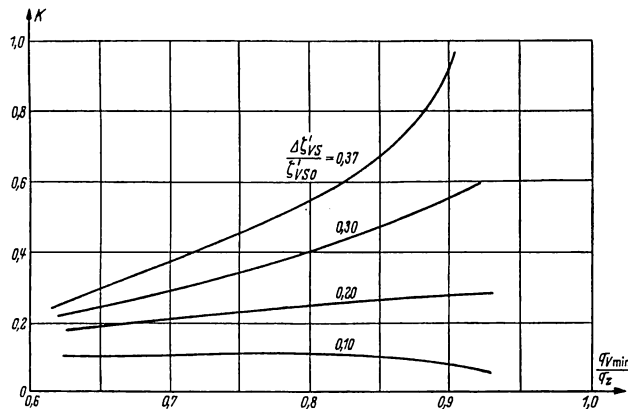


Abb. 30. Relative Änderung der Schaufelverluste in Abhängigkeit von der Tiefe $q_{V \min}/q_Z = (W_{V \min}/W_Z)^2$ und der Überdeckungsziffer K der auftreffenden Delle.

Druckanstieg des Diffusors: $\frac{P_A - P_Z}{\frac{\rho}{2} W_Z^2} = 0,195$; Reynoldszahl: $Re = W_Z \cdot l/\nu = 5,8 \cdot 10^4$.

zu bilden und die Ergebnisse in Abhängigkeit von nur zwei Parametern in einem allgemeingültigen Diagramm darzustellen. Ein neuer Parameter — Überdeckungsziffer K — wird mit Hilfe der Darstellung in Abb. 26 durch die Definition $K = F/F_0$ festgelegt. Sämtliche Meßergebnisse sind in Abb. 30 dargestellt, und zwar sind die relativen Änderungen der Verluste hierbei als Linien

konstanter Interferenzeinflüsse in Abhängigkeit von der Tiefe $q_{V_{\min}}/q_Z = (W_{V_{\min}}/W_Z)^2$ und der Überdeckungsziffer K eingetragen. Bei jeder Tiefe der Delle nehmen die Schaufelverluste mit der Überdeckungsziffer zu, und der Einfluß der Überdeckungsziffer auf das Anwachsen der Verluste ist um so größer, je tiefer die auftreffende Delle ist.

Um den in wirklichen Tandem-Pumpengittern auftretenden Interferenzeinfluß der Delle quantitativ analysieren zu können, muß man solche Untersuchungen bei verschiedenen Druckanstiegen längs der Schaufel durchführen, da der Druckgradient einer Schaufel im Gitterverband auf der Saug- und Druckseite verschieden ist. Das Einflußdiagramm in Abb. 30 gilt nur für den gemessenen Druckanstieg.

Parallel zu den experimentellen Untersuchungen ist auf verschiedene Weise versucht worden, den Interferenzeinfluß mit einer grenzschicht-theoretischen Betrachtung zu erklären. Diese theoretischen Behandlungen haben aber alle ergeben, daß der Schatteneffekt viel stärker als der Interferenzeffekt auftritt und die resultierenden Schaufelverluste unter dem Einfluß einer Delle stark absinken, während die gemessenen Verluste stets um etwa 35 bis 40% größer sind.

Dieser große Unterschied zwischen der Messung und der Theorie ist vermutlich darauf zurückzuführen, daß ein Störkörper nicht nur ein Nachlaufprofil hinter sich erzeugt, sondern auch gleichzeitig sehr ausgeprägte Turbulenz oder sogar eine Art intermittierende Störung der Strömung wie in einer Wirbelstraße in seinem Nachlauf hervorruft. Solche starke Turbulenz oder Störung kann natürlich den Vorgang der Grenzschichtbildung stark beeinflussen und einen großen Interferenzeffekt zur Folge haben, der von der Theorie bisher nicht erfaßt werden kann.

7. Zusammenfassung. Es wurden die Strömungsvorgänge in ebenen Tandem-Pumpengittern mit starker Umlenkung theoretisch und experimentell untersucht.

Zunächst wurden ohne Berücksichtigung der gegenseitigen Interferenz optimale Tandem-Gitteranordnungen für beliebig vorgegebene Geschwindigkeitsdreiecke untersucht, und zwar auf Grund von Ergebnissen an Einzelschaufelgittern mit Profilen NACA 0010, 4410 und 8410. Die Ergebnisse sind in Diagrammen dargestellt, die bei der Entwurfsaufgabe in der Praxis unmittelbar benutzt werden können. Es ergibt sich weiterhin, daß in dem Bereich $c_A/l/t > 1,2$ das Tandem-Pumpengitter geringere Verluste liefert als das entsprechende Einzelgitter.

Der Einfluß der gegenseitigen Interferenz wurde an einem Tandem-Pumpengitter aus Profilen NACA 8410, das ohne Interferenzeinfluß eine Umlenkung von 50° beim Zuströmwinkel $\beta_1 = 140^\circ$ verwicklicht, experimentell untersucht; Nachlauf- und Druckverteilungsmessungen wurden bei verschiedenen Abständen und Versetzungen der beiden Gitter zueinander durchgeführt.

Die Meßergebnisse zeigen, daß sich die Verluste des Gitters I sinusförmig mit der Versetzung ändern, was auf einen rein potentialtheoretischen Interferenzeinfluß hindeutet, während die Verluste des Gitters II etwa konstant bleiben und nur dann stark zunehmen, wenn sich die Schaufeln des Gitters II in den Dellen vom Gitter I befinden, was auf eine Interferenz der Grenzschichten beider Gitter schließen läßt.

Beim üblichen Abstand von $a/l = 0,15$ bis $0,50$ ist die Versetzung dann am günstigsten, wenn sich die beiden Schaufeln wie bei einem Spaltflügel mit einer Spaltweite von $1/5$ der Teilung anordnen, erstens weil der Gesamtverlust dabei am kleinsten ist (etwa 10% kleiner als ohne Interferenz) und zweitens weil der Abströmwinkel mit demjenigen ohne Interferenz sehr gut übereinstimmt und daher keine Korrektur für den Abströmwinkel nötig ist. Sind die optimalen Teilungsverhältnisse der beiden Gitter verschieden, sollen die beiden Schaufeltiefen so bestimmt werden, daß die beiden Gitter die gleiche Teilung besitzen.

Um optimale Anordnungen von Tandem-Pumpengittern unter Berücksichtigung der gegenseitigen Interferenz theoretisch bestimmen zu können, wurde ferner ein potentialtheoretisches Rechenverfahren zum Entwurf eines Tandem-Pumpengitters entwickelt (erste Hauptaufgabe). Die Rechenbeispiele ergeben, daß die Strömungsvorgänge am Gitter I gut mit der Theorie erfaßt werden können, während die bei Messungen beobachtete starke Änderung der Verluste des Gitters II nicht damit zu erklären ist.

Es wurde daher eingehend der Interferenzeinfluß einer Delle in der Zuströmung auf die Verluste der nachstehenden Schaufel, der für die Änderung der Verluste des Gitters II eine entscheidende Rolle spielt, an einem vereinfachten Modell untersucht. Durch eine Delle in der Zuströmung können die Verluste an der Schaufel in einer verzögerten Strömung je nach der Geometrie und der Lage der auftreffenden Delle relativ zur Schaufel stark zunehmen. Bei mäßigem Druckanstieg nehmen die Schaufelverluste durch eine Delle, die gerade die Schaufelmitte trifft, um etwa 35 bis 40% zu.

(Eingegangen am 2. September 1958.)

Anschrift des Verfassers: Dr.-Ing. Hideo Ohashi, Ichikawashi (Japan), Suganomachi 2—529.

Lebenslauf

Am 10. Mai 1931 wurde ich, *Hideo Ohashi*, als Sohn des Offiziers *Kumao Ohashi* und seiner Ehefrau *Michi*, geb. *Tanaka*, in Tokyo/Japan geboren.

Nach sechsjähriger Volksschulzeit besuchte ich drei Jahre die mittlere Schule und drei Jahre das Gymnasium, an dem ich im März 1950 die Reifeprüfung ablegte. Im April 1950 begann ich an der Technischen Fakultät der Universität Tokyo das Studium des Maschinenbaues, welches ich im März 1954 mit dem Diplomexamen abschloß.

Seit April 1954 arbeitete ich in der Entwurfsabteilung für Gasturbinen der Ishikawajima Schwerindustrie A. G. in Tokyo als Entwurfsingenieur für Axialverdichter, bis ich durch Vermittlung des Deutschen Akademischen Austauschdienstes im Oktober 1956 nach Deutschland kam.

Seitdem bin ich als Doktorand bei Herrn Professor Dr. phil. *H. Schlichting* im Institut für Strömungsmechanik der Technischen Hochschule Braunschweig tätig.

Hideo Ohashi

Braunschweig, den 31. Mai 1958