

<b>Zeitschrift:</b>	Schweizerische Bauzeitung
<b>Herausgeber:</b>	Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
<b>Band:</b>	69 (1951)
<b>Heft:</b>	33
<b>Artikel:</b>	Aerodynamische Berechnungsmethoden für hochbelastete Axialverdichter
<b>Autor:</b>	Quenzer, H. / Schwarz, G.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-58909">https://doi.org/10.5169/seals-58909</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 22.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

Reisenden wie das Auto. Amerikanische und englische Flugzeugbauer rechnen damit, dass erst in 10 bis 12 Jahren ein leistungsfähiger und nicht zu teuer arbeitender Hubschrauber mit 240 km/h und 12 Sitzplätzen zur Verfügung stehen wird, der auch vom Standpunkt der Sicherheit allen Anforderungen in der Personenbeförderung gerecht zu werden vermag. Es wird kein Problem sein, für diesen Fall im Zentrum der Stadt

Lande- und Startflächen von  $80 \times 100$  m für Hubschrauber auf Plätzen, grossen Gebäuden oder Bahnsteigdächern herzurichten, so dass die weitere Entwicklung in Ruhe abgewartet werden kann. An der Planung des eigentlichen Luftverkehrsnetzes wird der Hubschrauber nichts ändern, so dass diese Planungen als Grundlage für den Hubschrauberverkehr massgebend bleiben können.

## Aerodynamische Berechnungsmethoden für hochbelastete Axialverdichter

Von Dipl. Ing. H. QUENZER und Ing. G. SCHWARZ, Bremen

### B. Der Zusammenhang zwischen $c_m$ - und $c_u$ -Verteilung

Wie unter II, 1 ausgeführt, können die Vorstufen nicht mit  $c_u r = \text{konst}$  ausgelegt werden, wenn sie optimalen Eingangsdrall ergeben sollen. Ebenso lässt sich auch bei den nachgeschalteten Stufen im allgemeinen eine Drallverteilung nach dem Gesetz  $c_u r = \text{konst}$  nicht mehr durchführen. Somit ist im Hochleistungsverdichter ein Strömungsgleichgewicht nur bei schräger  $c_m$ -Verteilung zu erwarten. Es muss aber für die Durchführung der Rechnung zunächst der funktionsmässige Zusammenhang zwischen den Einflussgrössen  $c_m$ ,  $c_u$ ,  $u$  und  $\omega$  geklärt werden, wobei für  $c_m$  und  $c_u$  jeweils zwei Werte (Eintritt und Austritt am betrachteten Schaufelkranz) in die Rechnung eingehen.

#### 1. Die Differentialgleichung des Strömungsgleichgewichtes

Von K. Schaaff und Dr. O. Schmidt wurde gleichzeitig im Jahre 1947 die Differentialgleichung aufgestellt, die die Bedingung des Druckausgleichs und damit des Strömungsgleichgewichtes erfüllt. Diese Gleichung lautet:

$$(11) \quad c_{m_2} \frac{dc_{m_2}}{dr} = c_{m_1} \frac{dc_{m_1}}{dr} + (c_{u_1} - u) \frac{dc_{u_1}}{dr} - (c_{u_2} - u) \frac{dc_{u_2}}{dr} - (c_{u_1} - c_{u_2}) \omega - \frac{c_{u_2}^2}{r} + \frac{c_{u_1}^2}{r}$$

Zur Lösung verwendet man die Richtungsfeld-Methode, wobei man sich für jede angenommene Verteilung der unab-

DK 621.515-154

Schluss von Seite 435

hängigen Variablen ein Richtungsfeld für die abhängige Variable aufstellt. Die Auswahl der Lösung erfolgt unter Zuhilfenahme der Kontinuitätsgleichung, mit der sich ein guter Ueberblick über die  $c_m$  —  $c_u$ -Verteilung gewinnen lässt.

Bei der Berechnung eines mehrstufigen Laders muss nun jedes Rad auf die vom vorherigen Rad geschaffenen Bedingungen abgestimmt werden, und durch schrittweises Aufbauen der einzelnen Lauf- und Leiträder wird die geforderte Förderhöhe mit einem Minimum an Stufen erreicht.

In der Praxis ist es notwendig, die Berechnungsmethode nach der Bestimmung des Richtungsfeldes noch durch die schrittweise Ausgleichsrechnung zu ergänzen, bei der dann die Veränderlichkeit des spezifischen Gewichtes, die örtlichen Temperaturen und eventuell auch eine Veränderung des Stufenwirkungsgrades über der Schaufelhöhe berücksichtigt werden. Da diese Nachrechnung zur Erreichung grösstmöglicher Genauigkeit notwendig ist, kann man bei entsprechender Übung und Erfahrung auf die Richtungsfeldmethode verzichten und diese durch die schrittweise Ausgleichsrechnung ersetzen.

#### 2. Die Ausgleichsrechnung

Diese Rechnung geht von der Voraussetzung aus, dass an jeder Stelle des Spaltraumes zwischen Lauf- und Leitrad der axial von der Schaufel erzeugte Druck gleich sein muss der Summe des nabenseitig erzeugten Druckes und des durch Zentrifugalkräfte von der Nabe bis zum betrachteten Schnitt aufsummierten Druckanteils. Um zu guten Ergebnissen zu kommen, muss die Veränderlichkeit des spezifischen Gewichtes eingeführt werden. Die Integration erfolgt durch schrittweise Mittelwertbildung, so dass nur abschnittweises Rechnen möglich ist. Typische Geschwindigkeitsdiagramme von Laufrädern verschiedener Förderhöhenverteilung zeigt Bild 5.

#### C. Die Geschwindigkeits-Diagramme

Bei der Anwendung eines Vordralls mit  $c_u r \neq \text{konst}$  ergeben sich durch den ganzen Lader schräge Verteilungen der Durchsatzgeschwindigkeiten, bis nach der letzten Leitstufe bei drallfreiem Austritt wieder ein konstantes  $c_m$  und eine konstante Förderhöhe über der Schaufelhöhe erreicht sind. Man erhält somit Geschwindigkeits-Diagramme, die sich von der bekannten Form durch die  $c_m$ -Veränderlichkeit unterscheiden.

Die in Bild 6 ersichtliche schräge Verteilung der Durchsatzgeschwindigkeit mit ihrer Erhöhung innen und ihrer Verminderung aussen tritt bereits beim festen Vorleitrad auf und wird durch das nachfolgende Laufrad weiter verstärkt. Da das auf dieses Laufrad folgende Leitrad den Unterschied dieser  $c_m$ -Werte nicht auf den Wert  $c_m = \text{konst}$  zurückbringt, arbeiten sämtliche folgenden Stufen unter ähnlich ungünstigen Verhältnissen bei grossen  $c_m$ -Differenzen.

Bei Anordnung eines Vorlaufrades mit  $(c_u r)_a >$  als  $(c_u r)_i$  lässt sich die Durchsatzgeschwindigkeit aussen bereits vergrössern und innen verkleinern (Bild 5b), so dass die in den nachfolgenden Stufen auftretenden Änderungen der  $c_m$ -Geschwindigkeiten sich um den Mittelwert  $c_m = \text{konst}$  herum bewegen und somit eine grössere Förderhöhe pro Stufe erlauben. Wie aus Bild 6 ersichtlich, hat man bei hochbelasteten Ladern mit optimalem Eingangsdrall die Möglichkeit, an Lauf- und Leitradspitzen sowie am Leitrad in Nabennähe nahe an die Machzahlgrenze heranzugehen.

#### D. Die Bestimmung der Schaufelzahl

Bei allen schrägen  $c_m$ -Verteilungen tritt eine Strömungskomponente in radialem Bereich auf, so dass sich in diesen Fällen der reinen Axialaderwirkung ein Radiallagereffekt überlagert. Die Belastung der Schaufeln setzt sich damit aus Auftriebs-, Widerstands- und Korioliskräften zusammen. Für die Bestimmung der erforderlichen Schaufelzahl ist aber

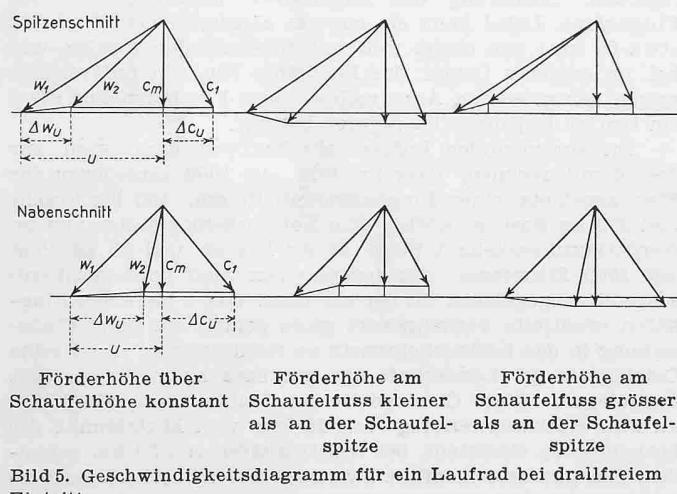


Bild 5. Geschwindigkeitsdiagramm für ein Laufrad bei drallfreiem Eintritt

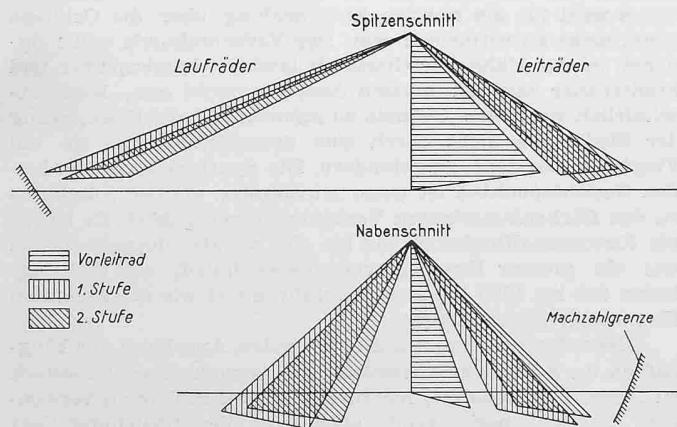
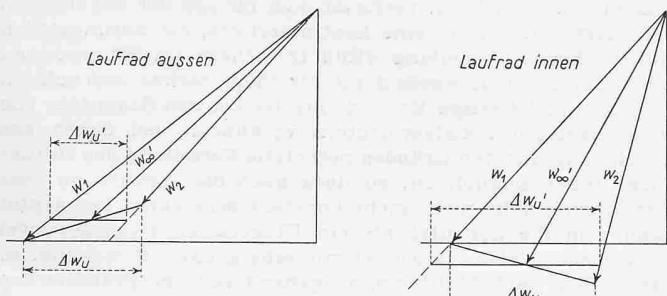


Bild 6. Geschwindigkeitsdiagramm der 1. und 2. Stufe eines hochbelasteten Axialverdichters mit festem Vorleitrad bei optimaler Eingangsdrallverteilung

Bild 7. Ermittlung der Größen  $\Delta w_u'$  und  $w_\infty'$ 

nur die aerodynamische Schaufelbelastung massgebend, die auf Zirkulation, d. h. auf Umlenkung der Strömung zurückzuführen ist. Statt der Größe  $\Delta w_u$  ist bei schräger  $c_m$ -Verteilung die Größe  $\Delta w_u'$  einzuführen. Bild 7 veranschaulicht ihre Bestimmung.

#### 1. Der Wert $c_{a \text{ erf}}$ als Funktion der Einflussgrößen

Aus den Geschwindigkeits-Diagrammen (Bild 7) erhält man die Werte  $\Delta w_u'$  und  $w_\infty'$  und aus der Beziehung

$$c_{a \text{ id}} l/t = \frac{2 \Delta w_u'}{w_\infty'}$$

den Wert  $c_{a \text{ id}}$ . Die effektive Geschwindigkeit  $c_{a \text{ eff}}$  ist wegen der Reibung kleiner als  $c_{a \text{ id}}$ . Man ermittelt zunächst den Gleitwinkel  $\varepsilon = c_w/c_a$  (Bild 8). Nun ist:

$$\frac{\Delta w_u'}{p_{\text{id}}} = \sin \gamma_\infty \quad \frac{\Delta w_u'}{p_{\text{eff}}} = \sin (\gamma_\infty + \varepsilon)$$

$$\frac{p_{\text{eff}}}{p_{\text{id}}} = \frac{c_{a \text{ eff}}}{c_{a \text{ id}}} = \frac{\sin \gamma_\infty}{\sin (\gamma_\infty + \varepsilon)}$$

somit wird

$$c_{a \text{ eff}} l/t = c_{a \text{ id}} l/t \frac{\sin \gamma_\infty}{\sin (\gamma_\infty + \varepsilon)}$$

Mit dieser Gleichung und dem angenommenen Wert  $c_{a \text{ zul}}$  lassen sich nun das notwendige  $l/t$  und damit die erforderliche Schaufelzahl berechnen. Unter Umständen muss iteriert werden, wenn der endgültige  $c_a$ -Wert stark von dem zur Gleitzahlbestimmung angenommenen abweicht. Es wird fast immer nötig sein, die derart erhaltenen Schaufelzahlen aus Schwingungsgründen so aufeinander abzustimmen, dass die Schaufelzahlen zweier aufeinander folgender Schaufelkränze keinen gemeinsamen Teiler aufweisen.

#### 2. $c_{a \text{ zul}}$ als Funktion der Einflussgrößen

Aus Windkanalmessungen, die in den NACA-Veröffentlichungen für die in Frage kommenden Profile in hinreichendem Ausmass vorliegen, lässt sich  $c_{a \text{ zul}}$  in Abhängigkeit der einzelnen Einflussgrößen ermitteln. Die Profilauswahl hat, da der Machzahleinfluss der massgebende Faktor ist, insbesondere unter Berücksichtigung des Nasenradius, der Dickenrücklage, des Dickenverhältnisses, der Wölbung und Wölbungsrücklage zu erfolgen. In Bild 9 werden Auswertungen für einige Profile angegeben, die der Bestimmung der Leistungsgrenzen des normalen, einfachen Axialverdichters zu Grunde gelegt wurden. Um die Verdrängungsströmung aus der endlichen Profildicke zu berücksichtigen, ist zu empfehlen,  $c_{a \text{ zul}} = 0,9$  bis  $1,0$  in Nabennähe nicht zu überschreiten.

### III. Die Auslegung der Beschaufelung

Bisher wurden für Leit- und Laufräder meistens Profile mit Kreisbogenskeletten verwendet. Bei hochbelasteten Ladern ist es jedoch vorteilhaft, auf Profile der NACA-Systematik überzugehen, die in aerodynamischer Hinsicht eine bessere Gestaltung ermöglichen.

#### A. Skelett, Wölbung, Wölbungsrücklage, Dicke und Dickenrücklage

Bei diesen Profilen ist die Lage der massgeblichen Wölbung frei wählbar ebenso wie die Lage der maximalen Dicke des über das Skelett zu ziehenden Tropfens.

An machzahlkritischen Schnitten muss die relative Dicke klein gehalten werden; Werte von  $6$  bis  $7\%$ , verbunden mit relativen Nasenradien  $\varrho/l = 0,55 (d/l)^2$ , sind an solchen Stellen angezeigt. An Stellen mit  $M < 0,6$  ist eine relative Dicke

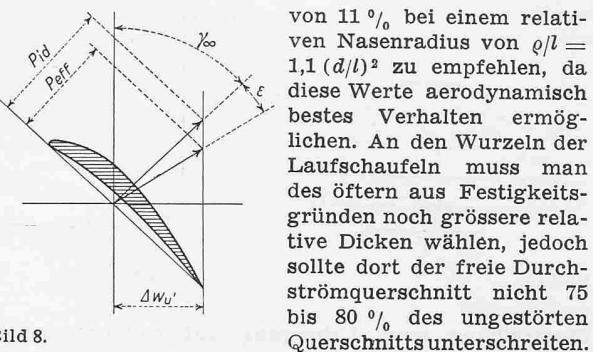


Bild 8.

von  $11\%$  bei einem relativen Nasenradius von  $\varrho/l = 1,1 (d/l)^2$  zu empfehlen, da diese Werte aerodynamisch bestes Verhalten ermöglichen. An den Wurzeln der Laufschaufeln muss man des öfters aus Festigkeitsgründen noch grössere relative Dicken wählen, jedoch sollte dort der freie Durchströmquerschnitt nicht  $75$  bis  $80\%$  des ungestörten Querschnitts unterschreiten.

Die Rücklage der maximalen Dicke ist mit Rücksicht auf die Machzahl zu wählen. Dickenrücklagen von  $40$  bis  $50\%$  sind an machzahlkritischen Schnitten angezeigt, an Schnitten kleinerer Machzahl kann man mit der Rücklage der Dicke bis auf  $25\%$  zurückgehen.

Die Rücklage der maximalen Wölbung kann zwischen  $20$  und  $60\%$  variieren. Ihre endgültige Auswahl hat mit Berücksichtigung der gewählten Dickenverteilung zu erfolgen und setzt bei korrektem Vorgehen die Durchführung von Druckverteilungsrechnungen über die Profiltiefe voraus, die die gegenseitige Induktion der Profile berücksichtigen.

#### B. Die Übertreibung der Umlenkwinkel

Die Winkelübertreibung hat den Zweck, den Mittelwert der Umlenkung aller Stromlinien auf den durch die Umlenkdigramme geforderten Wert zu bringen. Nur die in direkter Nähe der Profile verlaufenden Stromlinien folgen hinreichend genau der Profilkontur, so dass dort bei einem Gitter mit unendlichem  $l/t$  die Umlenkung der Krümmung der Skelettlinien entspricht. Beim Übergang auf einen endlichen Wert von  $l/t$  muss die Skelettkrümmung überhöht werden, damit die mittlere wirksame Umlenkung den geforderten Wert annimmt.

Gegeben ist das Geschwindigkeits-Diagramm mit den Winkeln  $T_1$  und  $T_2$ . Ein- und Ausströmwinkel schliessen den Winkel  $\vartheta_\infty$  ein. Die Winkelbezeichnungen gehen aus den Bildern 10 und 11 hervor.

Dem Winkel  $\vartheta_\infty$  entspricht ein Winkel  $\psi$  für die Eintrittstangente und ein Winkel  $\varphi_\infty$  für die Ausstrittstangente der Skelettlinie über  $\psi_\infty + \varphi_\infty = \vartheta_\infty$ . Der Zusammenhang zwischen  $\psi_\infty$ ,  $\varphi_\infty$  und  $\vartheta_\infty$  kann für ein vorgegebenes Profil aus der Skelettlinie berechnet werden. Damit ist mit  $T_1 - \psi_\infty$  ein vorläufiger Staffelungswinkel  $T_{s \infty}$  gegeben. Zur Bestimmung der Winkel-

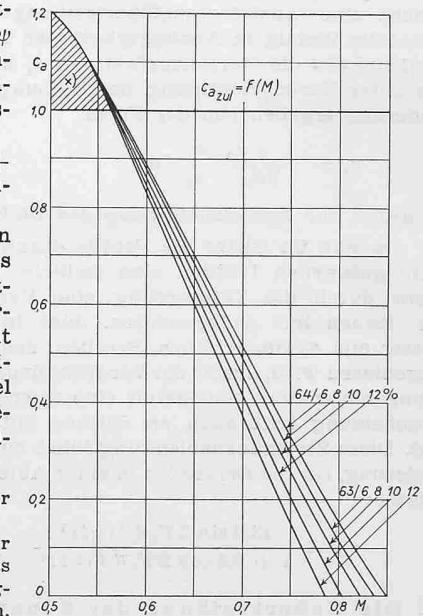


Bild 9. Auswertungen für einige Schaufelprofile. Bei der Bestimmung der Schaufelzahl soll das schraffierte Gebiet möglichst vermieden werden.

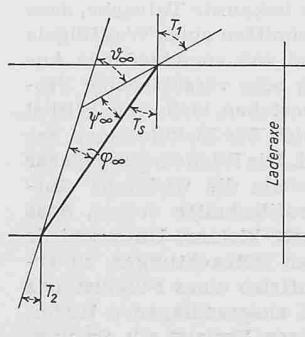


Bild 10.

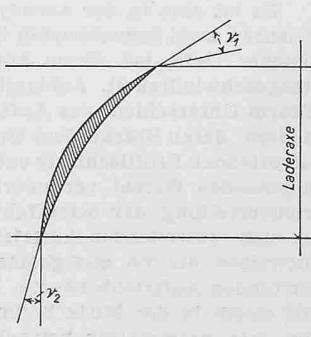


Bild 11.

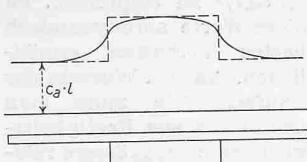


Bild 12.

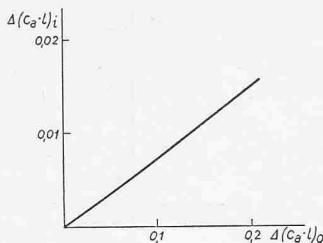


Bild 13.

Übertreibung beim Übergang auf endliche Schaufelzahl wird nun so vorgegangen, dass man in erster Näherung den Öffnungswinkel  $\vartheta_\infty$  durch  $\mu$  dividiert.  $\mu$  wurde von Weinig bereits vor einigen Jahren in Abhängigkeit von  $t/l$  und  $T_s \infty$  für kreisbogenförmige Profile bestimmt. Weiter wurde der Winkel  $\vartheta$  entsprechend der Berücksichtigung der Reibung, mit dem Faktor  $(1 + x_p)/2x_p$  mit  $x_p = c_a'/2\pi$  multipliziert; das ergibt dann den neuen Öffnungswinkel  $\vartheta'$ . Die Grösse  $(\vartheta' - \vartheta_\infty)/2$  gibt den Winkel  $\nu$ , um den die An- und Abströmrichtung durch die Winkelübertreibung geändert wird. Geht man nun von dem Kreisbogenskelett ab, dann ist zu beachten, dass sich der Angriffspunkt des Auftriebs mit der Verschiebung der grössten Wölbung ebenfalls verschiebt, so dass dadurch der Auf- und Abwind an der Ein- und Ausstrittskante geändert wird, und damit  $\nu_1$  und  $\nu_2$  geändert werden müssen. Der Faktor am Eintritt sei  $x_e$  und am Austritt  $x_a$ ; dann ist  $\nu_1' = x_e \nu_1$  und  $\nu_2' = x_a \nu_2$ . Dem Öffnungswinkel  $\vartheta$  entsprechen wieder ein Winkel  $\psi'$  und ein Winkel  $\varphi'$ . Damit wird  $\psi' + \nu_1' = \psi$ ,  $\varphi' + \nu_2' = \varphi$ ,  $\vartheta = \psi + \varphi$ , und man kann  $f/l$  aus einer Auftragung als Funktion von  $\vartheta$  ermitteln.  $f$  bezeichnet die Wölbungshöhe.

### C. Die Uebertreibung der Anstellwinkel

#### 1. Anteil zur Berücksichtigung des Gittereinflusses

Bei der Anordnung von Einzelprofilen zu einem Gitter entsteht durch die gegenseitige Beeinflussung ein Abfall von  $d c_a / d \alpha$ , sowie eine Änderung von  $\alpha_0$  zwischen dem freifahrenden Flügel und einem Profil im Gitter. Dieser Effekt macht eine Anstellwinkelübertreibung notwendig, für die ebenfalls Weinig in Abhängigkeit der Teilung und dem Anstellwinkel  $\delta$  die Korrekturfaktoren  $x_1$  und  $x_0$  abgeleitet hat, die unter Berücksichtigung der Reibung eine Anstellwinkeländerung ergeben von der Form

$$\nu_s = \frac{1 - x_p}{2 x_p} \frac{x_1}{x_0} [\alpha_0]$$

#### 2. Anteil zur Berücksichtigung des Dickeinflusses

Da nun im Gitter die Profile durch den um die Skeletlinie gezogenen Tropfen eine endliche Dicke besitzen, entsteht durch die Versperrung eine Verdrängungsströmung. Dr. Ruden hat nachgewiesen, dass in einem gestaffelten Gitter aus symmetrischen Profilen, das in  $c_a = 0$ -Richtung angeblasen wird, durch die Verdrängungsströmung eine Strömungsumlenkung und damit eine Querkraft entsteht. Diese Erscheinung tritt auch an Gittern mit gewölbten Profilen auf. Diese Strömungsablenkung führt zu einer Anstellwinkeländerung, für die Dr. Ruden in einer Ableitung folgende Form angibt:

$$\nu_D = \frac{13,0 \sin 2 T_s d/l (l/t)^2}{1 + 0,4 \cos 2 T_s d/l (l/t)^2}$$

### D. Die Uebertreibung der Schaufelverwindung

Es ist eine in der Aerodynamik bekannte Tatsache, dass zwischen zwei benachbarten Profilschnitten eines Tragflügels gleicher Tiefe, bei denen auf Grund von verschiedener Anblasgeschwindigkeit, Anblasrichtung oder verschiedener Profilform Unterschiede des Auftriebs bestehen, sich freie Wirbel ablösen, deren Stärke dem Unterschied der Zirkulationen der betreffenden Profilschnitte entspricht. Die Rückwirkung dieser abgehenden Wirbel verändert ihrerseits die wirkliche Auftriebverteilung der betreffenden Profilschnitte derart, dass die sich einstellenden Auftriebswerte kleinere Unterschiede aufweisen als die aus geometrischen Betrachtungen zu erwartenden Auftriebswerte. Der Auftrieb eines Flügelstücks mit einem in der Mitte befindlichen ausgeschlagenen Ruder, der, rein geometrisch betrachtet, einen Verlauf mit Sprung-

stellen erwartet lässt, verformt sich infolge der abgehenden induzierten Wirbel in eine kontinuierliche, die Sprungstellen ausgleichende Verteilung (Bild 12). Diese im Flugzeugbau bekannte Tatsache wurde durch Multhopp rechnerisch erfasst.

Eine gleichartige Erscheinung ist bei den Schaufeln von hochbelasteten Axialverdichtern vorhanden, bei denen aus bereits angeführten Gründen potentielle Verteilung des Dralles nicht mehr möglich ist, so dass auch die Zirkulation über der Schaufelhöhe nicht mehr konstant sein kann. Betrachtet man nun die Schaufel als ein Flügelstück zwischen zwei End scheiben, also als Flügel mit sehr grosser Streckung, so lassen sich nach Multhopp, ausgehend von der Prandtlischen Integralgleichung,

$$\alpha_i(y) = \frac{1}{4\pi v} \int_{-b/2}^{+b/2} \frac{d\Gamma}{dy'} \frac{dy'}{y - y'}$$

die  $\Delta(c_a l)_i$ -Werte mit Induktionseinfluss über den rein geometrisch zu erwartenden Werten  $\Delta(c_a l)_0$  auftragen (Bild 13).

Aus den Geschwindigkeits-Diagrammen ist am Schaufel füss und an der Schaufelpitze entsprechend

$$c_a l/t = \frac{2 \Delta w_u'}{w_\infty'}$$

die für die Umlenkung erforderliche  $c_a$ -Belastung gegeben, und aus der Beziehung

$$\Gamma = \frac{w_\infty' l c_a}{2}$$

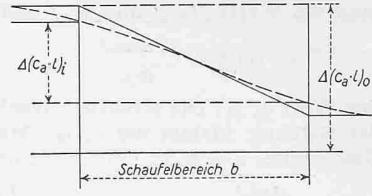


Bild 14.

die Zirkulation. Die Zirkulations-Beiwerte  $\gamma =$

$\Gamma/v_m b$  werden auf die mittlere Geschwindigkeit bezogen; hieraus erhält man an den beiden betrachteten Schnitten  $(c_a l) = 2b\gamma$  und damit die Differenz  $\Delta(c_a l)$  zwischen Fuss- und Spitzenprofil. Diese Differenz muss nun mit Induktionseinfluss erhalten bleiben. Aus Bild 13 lässt sich der erforderliche überhöhte geometrische Wert  $\Delta(c_a l)_0$  ablesen. Die Schaufel muss also zusätzlich so verwunden werden, dass am Fussende die Belastung um den Wert  $\frac{1}{2} [\Delta(c_a l)_0 - \Delta(c_a l)_i]$  erhöht wird, während an der Spitze um den selben Wert abgemindert werden muss. Nun lässt sich rückwärts über  $\gamma = c_a l/2b$  die neue Zirkulation  $\Gamma = \gamma v_m b$  berechnen und daraus über den auf die örtliche Geschwindigkeit bezogenen Zirkulationsbeiwert die erforderliche örtliche  $(c_a l)$  bzw.  $c_a$ -Belastung ermitteln (Bild 14). Aus der Differenz des ursprünglichen  $c_a$ -Wertes und dem derart erhaltenen  $c_a$ -Wert lässt sich nun die erforderliche Winkelkorrektur an jedem Schaufelschnitt ermitteln entsprechend der Gleichung

$$\nu_a = \frac{\Delta c_a}{d c_a / d \alpha} 57,3$$

### E. Prandtl- bzw. St. Venant-Korrektur

Da, wie allgemein bekannt, der Auftriebgradient unter anderem eine Funktion der Machzahl ist, müssen die Umlenk- und Anstellwinkel-Uebertreibungen noch entsprechend der örtlichen Machzahl korrigiert werden durch Division mit dem von Prandtl abgeleiteten Faktor  $P = 1/\sqrt{1 - M^2}$ . Genauere Werte, insbesondere für hohe Machzahlen, ergibt die Korrektur mit dem von St. Venant abgeleiteten Faktor

$$\frac{1}{(1 + \frac{M^2 - 1}{2})^{\frac{1}{M^2 - 1}}}$$

### F. Zusammenfassung der Winkelübertreibung

Die Winkelübertreibung setzt sich folglich zusammen aus:

1. Der Wölbungsumlenkung, die die Winkel  $\nu_1'$  und  $\nu_2'$  ergibt;
2. Den Anstellwinkel-Uebertreibungen:
  - a) aus Gittereinfluss, der den Winkel  $\nu_s$  ergibt,
  - b) aus Dickeinfluss, der den Winkel  $\nu_D$  ergibt,
  - c) aus Induktionseinfluss, der den Winkel  $\nu_a$  ergibt.

Korrigiert nach St. Venant, ergibt sich somit der endgültige Betrag

$$\nu_1^* = (\nu_1' - \nu_s - \nu_D - \nu_a) \left\{ \frac{1}{\left(1 + \frac{\zeta-1}{2} M^2\right)^{\frac{\zeta-1}{2}}} \right\}$$

und

$$\nu_2^* = (\nu_2' + \nu_s + \nu_D + \nu_a) \left\{ \frac{1}{\left(1 + \frac{\zeta-1}{2} M^2\right)^{\frac{\zeta-1}{2}}} \right\}$$

Mit  $\nu_1^*$  und  $\nu_2^*$  wird dann  $T_1^* = T_1 + \nu_1^*$  und  $T_2^* = T_2 - \nu_2^*$  und  $\vartheta^* = T_1^* - T_2^*$  der endgültige Öffnungswinkel des Skeletts. Daraus ergibt sich  $f/l^*$ ,  $\psi^*$ ,  $\varphi^*$ , und mit  $T_1^* - \psi^* = T_s^*$  ist auch der Sehnenanstellwinkel bekannt.

#### IV. Zusammenfassung und Ausblick

Das Endziel der Axialverdichter-Auslegung muss sein, durch hohe Stufenbelastung die Reibungsverluste und die induzierten Verluste auf ein Minimum zu reduzieren und so den Wirkungsgrad entsprechend zu steigern. Bei NACA wurde bereits an einer gut ausgelegten Stufe ein Wirkungsgrad von 96 % gemessen. Es muss also möglich sein, auch für mehrstufige Verdichter bei exakter Auslegung Wirkungsgrade von 88 bis 90 % und darüber zu erreichen.

Durch die in vorliegender Arbeit geschilderten Berechnungsmethoden ist es möglich, den Strömungsvorgang in Axialverdichtern wesentlich genauer zu erfassen, als es bisher gemacht wurde. Die Ergebnisse dieser Berechnungsmethode sind in Uebereinstimmung mit Versuch und Erfahrung. Der vergrösserte Berechnungsaufwand spielt bei Turbo-triebwerken nur eine untergeordnete Rolle, da eine Verbesserung von Lader- und Turbinenwirkungsgrad wegen der hohen inneren Leistung dem Gesamtwirkungsgrad des Aggregates in wesentlich höherem Masse als linear zugute kommt. Bei der Annahme eines Turbinentriebwerks, dessen innere Leistung etwa den doppelten inneren Wert der äusseren Leistung hat, wird die Nutzleistung um 10 % erhöht, wenn sich der Verdichterwirkungsgrad von 80 auf 84 % verbessert lässt. Zugleich sinkt der spezifische Verbrauch ebenfalls um 10 %. Bei gleichzeitiger Erhöhung des Verdichter- und des Turbinenwirkungsgrades von je 80 auf 84 % steigt die Nutzleistung sogar um 25 % bei ebenso grosser Herabsetzung des spezifischen Verbrauchs.

Es erscheint also nicht ausgeschlossen, dass in einiger Zeit das Anwendungsgebiet der Turbinentriebwerke sich beträchtlich ausweitet und sich auch auf kleinere Verkehrsmittel erstrecken wird, wie das auch aus Meldungen über im Ausland laufende Entwicklungen von Turbinentriebwerken für Kraftwagen hervorgeht.

#### Verarbeitete Literatur

- [1] H. Multhopp: Die Berechnung der Auftriebverteilung von Tragflügeln («Lufo» 1938/4).
- [2] F. Weinig: Die Strömung um Schaufeln von Turbomaschinen.
- [3] F. Weinig: Verwendung der Ergebnisse von Tragflügeln und Turbomaschinen.

## MITTEILUNGEN

**Die vielfach-windschiefe Fahrleitung für elektrische Bahnen.** Die Fahrgeschwindigkeit ist bei elektrischen Bahnen durch die Kontaktchwierigkeiten zwischen Fahrdrähten und Stromabnehmer begrenzt; sie liegt bei der grösstenteils verwendeten senkrechten Vielfach-Bauweise bei etwa 130 km/h. Hauptforderung für guten Kontakt sind eine möglichst gleichbleibende Elastizität des Fahrdrähtes in vertikaler Richtung und eine zweckmässige Lage des Drahtes relativ zum Gleis. Ausserdem soll die Fahrleitung geringe Erstellungskosten ergeben. Der Firma Kummler & Matter, Zürich, gelang es, eine vollelastische, vielfach-windschiefe Fahrleitung 1) zu konstruieren, die diese Forderungen weitgehend erfüllt, sich in nunmehr fünfjährigem Betrieb auf der Strecke Yverdon—Ste-Croix aufs beste bewährt hat und seither auf acht weiteren Nebenbahnen in der Schweiz eingeführt wurde. Hierüber berichtet Dipl. Ing. M. Wittgenstein, Zürich, im «Bulletin SEV» 1951, Nr. 41. Darnach wird das fest verlegte Tragseil über der Gleisaxe verlegt, wobei die Masten bei geraden Strecken abwechselungsweise links und rechts des Gleises aufgestellt werden und nur kurze Ausleger erhalten.

1) Vgl. A. Wäsch, Fahrleitung Herzogenbuchsee - Solothurn - Busswil, in SBZ Bd. 125, S. 89\* (24. Febr. 1945).

ten. Der Fahrdräht, der durch Gewichte mit gleichbleibender Zugkraft gespannt wird, hängt pro Spannweite an vier bis sechs Hängedrähten, die sich verschieden schräg einstellen, während der Fahrdräht in der Horizontalebene eine Schlangenlinie beschreibt. Die Hängedrähte sind in der Nähe der Stützen länger und gegenüber der Vertikalen stärker geneigt als im Bereich um die Mitte zwischen zwei Stützen, wodurch die in der Nähe der Stützen geringere Nachgiebigkeit des Fahrdrähtes unter der Wirkung des Anpressdruckes des Stromabnehmers ausgeglichen wird und sich so überall gleiche Elastizitätsverhältnisse ergeben. Bei Kurven wird das Tragseil auf der Aussenseite des Gleises verlegt und die gegenüber der Horizontalen nur noch schwach geneigten Hängedrähte so bemessen, dass der Fahrdräht unter der Wirkung der Zugkraft, mit der er gespannt wird, in die richtige Lage zum Gleis zu liegen kommt. Nach der selben Methode können auch doppelpurige Kurvenstrecken überspannt werden, wobei zum Aufhängen des innern Fahrdrähtes grössere Ausleger nötig sind. Neben unterbruchloser, funkenfreier Stromabnahme, die die Fahrmotoren schont und störungsfreie Rekuperation ermöglicht, ergeben sich geringere Erstellungskosten infolge Wegfall von Spurhaltern und Einsparen von Masten, sowie geringere Unterhaltkosten infolge längerer Lebensdauer der Fahr- und Hängedrähte.

**Die Edison-Gruppe** besteht aus einer Anzahl von Unternehmungen, die sich hauptsächlich mit der Erzeugung und Verteilung elektrischer Energie über einen grossen Teil von Norditalien befassen. Sie erzeugt mehr als einen Viertel der in Italien insgesamt produzierten Energie und stellt damit die bedeutendste Elektrizitätsgesellschaft dieses Landes dar. Sie betreibt hydroelektrische Kraftwerke an den Flussläufen des Toce, der Adda, des Oglio, des Noce sowie in den Westalpen und im Apennin, über die hier früher berichtet wurde! Ausserdem verfügt sie über Dampfkraftwerke in Genua (50 000 kW), Piacenza (22 000 kW), Novara (14 400 kW) und La Pianta (11 400 kW), von denen die beiden erstgenannten gegenwärtig beträchtlich erweitert werden. Die Edison-Gruppe erzeugt und verteilt Stadtgas für Mailand und Umgebung und betreibt umfangreiche Anlagen für die Gewinnung von Kohlederivaten, Kalzium-Karbid und anderen chemischen Produkten. Ihr sind ferner metallurgische Werke sowie eine Reihe von Fabriken für Halb- und Fertigprodukte aller Art (Armaturen, Akkumulatoren, Glühlampen, Zähler, elektrische Schalter, Isolatoren, Transformatoren usw.) angeschlossen. Die Gesellschaft hat soeben ein prachtvoll ausgestattetes Werk herausgegeben, in dem ihre zahlreichen Anlagen an Hand eines reichen Bildermaterials beschrieben sind, und das auch Einblicke in ihre vielgestaltige Tätigkeit gewährt. Reizvoll ist die Schilderung der geschichtlichen Entwicklung, die bis auf das Jahr 1882 zurückgeht, in der Giuseppe Colombo, Professor an der Polytechnischen Schule in Mailand, das «Comitato per le Applicazioni dell'Elettricità, sistema Edison, in Italia» gegründet hatte. Das Werk schliesst mit einer Schilderung der Wohlfahrtseinrichtungen und der Institutionen für die fachtechnische Schulung.

1) SBZ 1950, Nr. 10, 11, 13 und 14.

**Technik in der Fischwirtschaft.** Im Anschluss an die vom Deutschen Kältetechnischen Verein veranstaltete Kältetagung in Cuxhaven vom 26. bis 29. September 1949 fand eine Tagung des Fachausschusses für Lebensmitteltechnik des VDI statt. Der Arbeitsausschuss «Fischwirtschaft» bestrebt sich dabei, die Ingenieraufgaben aufzuzeigen, die innerhalb der Fischwirtschaft von den Lebensmittelgenieuren zu bearbeiten sind. Die unter diesem Gesichtspunkt gehaltenen Vorträge sind von Dr. W. Schlienz unter dem oben genannten Titel als Heft 2<sup>1)</sup> herausgegeben worden und im Gemeinschaftsverlag Deutscher Ingenieur-Verlag, GmbH, Düsseldorf, und Verlag C. F. Müller, Karlsruhe, erschienen. Das Heft enthält fünf Aufsätze, nämlich: «Ingenieraufgaben auf Fischereifahrzeugen» von Hans Hoppe, Hamburg; «Frischhaltung von Fischen in Skandinavien und anderen Ländern» von Georg Bergström, Göteborg; «Ingenieraufgaben in der Fischverwertung» von F. Lüche, Hamburg; «Die Bedeutung der Hochseefischerei im Rahmen der Fettversorgung» von Dr. Limpacher, Bremerhaven; «Die Gewinnung von Fischinsulin» von Dr. W. Roever, Illertissen. Wie auf andern Wirtschaftszweigen muss auch in der Lebensmittelindustrie die Arbeit des reinen Praktiker ergänzt, untermauert und

1) Ueber Heft 1 «Kühlhausbau» berichteten wir in SBZ 1950, Nr. 46, S. 646.