Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 69 (1951)

Heft: 31

Artikel: Aerodynamische Berechnungsmethoden für hochbelastete Axialverdichter

Autor: Quenzer, H. / Schwarz, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-58902

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: 20.02.2026

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

nur an den fast unmöglich zu verbessernden Flaschenhals des Limmatquai beim Rathaus und Helmhaus und die Abtragung der Mauer beim Hirschengraben-Seilergraben. Beide Schwierigkeiten sind darauf zurückzuführen, dass wir die Froschaugasse, das Gebiet um die Predigerkirche und vor allem das Obmannamt erhalten wollten. Wir sind heute aus einer vielleicht doch allzu kleinlichen Einstellung heraus nur zu leicht geneigt, die uns zu grosszügig scheinenden Lösungen und Versuche unserer Väter in Bausch und Bogen abzulehnen.

Heute ist man davon überzeugt, man müsse die Altstadt mit ihrem Charakter überall wo sie noch vorhanden ist, erhalten. Dieser Grundsatz wurde auch festgelegt, als man an die Gründung des Büros für Altstadtsanierung schritt. Ihm steht die Theorie gegenüber, man könne mit der quartierweisen Sanierung, wie sie seinerzeit beim Kratzquartier verwirklicht wurde, bessere Resultate erreichen. Eine Zwischenlösung bestünde darin, wertvolle Gebiete, etwa Kirchgasse, Trittligasse, Marktgasse, Neumarkt, Rindermarkt, Stüssihofstatt, vor allen den Limmatraum, Münsterhof, Peterhofstatt, Lindenhof u. a. m. so zu erhalten, wie sie sind oder besser gesagt, sie zu verbessern, indem man ihren ursprünglichen Zustand anzustreben sucht, und andere Gebiete, etwa Niederdorf, Oberdorf, Predigerquartier, Froschaugebiet, das Viertel bei der Augustinerkirche, Rennweg u. a. m. auf veränderter Grundlage nach den Erkenntnissen der Neuzeit neu zu gestalten. Einzelne Studien, die von den Schülern Prof. Salvisbergs in den dreissiger Jahren (Bilder 14 und 15) und von zwei ursprünglich gemeinsam arbeitenden Architektengruppen (Bilder 16 bis 22) angestellt wurden, mögen diese Gedanken illustrieren.

(Schluss folgt)

Aerodynamische Berechnungsmethoden für hochbelastete Axialverdichter

DK 621.515 - 154

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

Formelzeichen

Allgemein

c (m/s)	Absolutgeschwindigkeit (relativ zum feststehenden System, insbesondere zu Leiträdern)
w (m/s)	Relativgeschwindigkeit (relativ zum rotierenden System, massgeblich für Laufräder)
c_u (m/s)	Absolutgeschwindigkeits-Komponente in Umfangsrichtung
w_u (m/s)	Relativgeschwindigkeits-Komponente in Umfangsrichtung
Δc_u (m/s)	Aenderung von c_u durch Umlenkung in Leiträdern
Δw_u (m/s)	Aenderung von w_u durch Umlenkung in Laufrädern
c_m (m/s)	Axialkomponente der Durchfluss-Geschwindigkeit
u (m/s)	Umfangsgeschwindigkeit
w_∞ (m/s)	Mittlere Anblasgeschwindigkeit für aerodynamische Laufschaufel-Berechnung
c_∞ (m/s)	Mittlere Anblasgeschwindigkeit für aerodynamische Leitschaufel-Berechnung
H (m)	Förderhöhe
V (m³/s)	Durchsatz-Volumen
G (kg/s)	Durchsatz-Gewicht
D (m)	Durchmesser
z	Schaufelzahl
l (m)	Schaufeltiefe
t (m)	Teilung (gemessen in Umfangsrichtung $= \pi D/z$)
R	Reaktionsgrad
$g\left(\frac{m}{s^2}\right)$	Erdbeschleunigung
n (min^{-1})	Drehzahl
$p\left(\frac{kg}{m^2}\right)$	Druck
r (m)	Radius
$\gamma\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Spezifisches Gewicht
ϱ (kg s²/m⁴)	$= \gamma/g$
$\nu = r_i/r_a$	Nabenverhältnis
φ	Lieferzahl
ψ	Druckzahl
σ	Drosselzahl
ω (s^{-1})	Winkelgeschwindigkeit
η	Wirkungsgrad

Thermodynamik

R (m/°K)	Gaskonstante
T (°K)	Absolute Temperatur
c_p (kcal/kg °K)	Spezifische Wärme bei konstantem Druck
c_v (kcal/kg °K)	Spezifische Wärme bei konstantem Volumen
$\varkappa = c_p/c_v$	

Aerodynamik

c_a	Auftriebs-Beiwert (senkrecht zur Anblasrichtung)
$c_\Gamma = c_a\, l/t$	
c_w	Widerstands-Beiwert (in Anblasrichtung)
v (m/s)	Geschwindigkeit
$\varepsilon = c_w/c_a$	Gleitzahl
Γ m²/s	Zirkulation
γ	Zirkulationsbeiwert
M	Machzahl

Indices

a	aussen
i	innen
r	an einem Schnitt mit Radius r
u	in Umfangsrichtung
m	in axialer Richtung
1	Eintritt
2	Austritt
∞	für aerodynamische Berechnung massgebender Wert
L	Leitrad (Stator)
R	Rotor (Laufrad)
th	theoretisch

Einführung

Bisher bestimmte man die Hauptabmessungen von Axialverdichtern meist unter weitgehender Verwendung der aus dem Radialverdichterbau bekannten Erfahrungswerte, nämlich der Lieferzahl $\varphi = c_m/u$, der Druckzahl $\psi = 2\,dp/\varrho u^2$ und der Drosselzahl $\sigma = \varphi^2/\psi$, nach denen auch sämtliche Versuchsergebnisse ausgewertet wurden. Hierbei werden mehr oder weniger stillschweigend über den Radius gleichbleibende Durchsatzgeschwindigkeiten c_m und meist auch ein über den Radius gleichbleibender Reaktionsgrad vorausgesetzt. Dieses Vorgehen führt bei einfachen und nicht sehr hoch belasteten Verdichtern von ähnlichem Nabenverhältnis und kleiner Stufenzahl wohl meist auf brauchbare Ergebnisse. Bei der Entwicklung hochbelasteter kleiner und damit leichter Axialverdichter von bestmöglichem Wirkungsgrad, wie sie bei Gasturbinen verwendet werden, kann die Auslegung ohne näheres Eingehen auf die innere Aerodynamik des Verdichters nicht mehr durchgeführt werden. Zum Verständnis der späteren Kapitel über den Hochleistungs-Axialverdichter wird vorerst die Theorie des einfachen Axialverdichters behandelt.

I. Der normale, einfache Axialverdichter

A. Der Aufbau des einfachen Axialverdichters

Ein normaler, einfacher Axialverdichter besteht aus einer oder mehreren Laderstufen, bestehend je aus Laufrad und Leitrad. Die Leistung wird dem zu verdichtenden Medium nur in den Laufrädern zugeführt, sie hat je Stufe die Grösse

$$\text{(1) bzw. (2)} \quad H_{th} = \frac{w_1^2 - w_2^2 + c_1^2 - c_2^2}{2g} = \frac{u\,\Delta w_u}{g}$$

Die theoretische Förderhöhe H_{th} wird aus der von der Stufe verlangten adiabatischen Förderhöhe durch Division mit dem zu erwartenden Stufenwirkungsgrad berechnet. Ein Teil der eingeführten Leistung wird im Laufrad in eine statische Druckerhöhung verwandelt, während der andere Teil sich hinter dem Laufrad in Drallenergie vorfindet. Das Leitrad verwandelt die vom Laufrad kommende Drallenergie in statischen Druck, so dass das Medium beim normalen, einfachen Axialverdichter nach dem Leitrad drallfrei austritt.

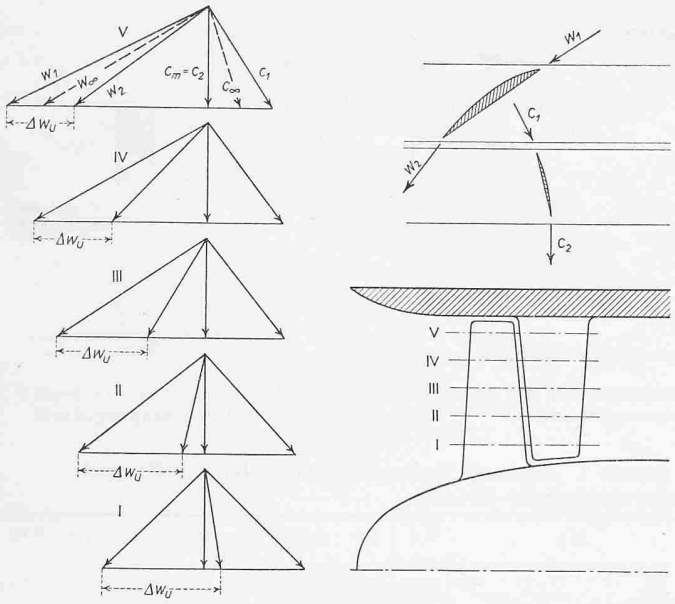

Bild 1

B. Die Geschwindigkeitsdiagramme

Entgegen der im Turbinenbau üblichen Darstellungsart, wo meist einzelne Eintritts- und Austrittsdreiecke für Lauf- und Leitrad gezeichnet werden, ist es beim Entwurf von Axialverdichtern zweckmässig, die gesamten Ein- und Austrittsdreiecke der Lauf- und Leiträder für einen Schnitt einer Laderstufe in einem Geschwindigkeitsdiagramm zusammenzufassen. Bei diesem Verfahren lassen sich auch bei mehrstufigen Ladern die Diagramme der aufeinanderfolgenden Stufen übereinander zeichnen. Zur Verdeutlichung dienen die an fünf Schnitten einer Stufe gezeichneten Geschwindigkeitsdreiecke (Bild 1). Wie ersichtlich wächst der in jedem Schnitt angesetzte Δw_u-Wert nach der Axe zu an, da die Förderhöhe über der ganzen Stufe gleichbleiben muss, während sich die wirksame Umfangsgeschwindigkeit nach innen zu vermindert.

$$H_{th} = \frac{u \Delta w_u}{g} = \text{konst.},$$

$$(3) \qquad \Delta w_u = \frac{H_{th}\, g}{u}$$

und, da $u = \omega r$, wird

$$(4) \qquad \Delta w_u = \frac{H_{th}\, g}{\omega} \frac{1}{r} = \frac{\text{konst.}}{r}$$

Bei der Betrachtung von Bild 1 erkennt man bereits, wie verschieden Anblasgeschwindigkeiten und Umlenkwinkel an den dargestellten Lauf- und Leitschaufelschnitten sind. Ein einfacher Axiallader wird an den Laufschaufelspitzen immer besonders grosse Anströmgeschwindigkeiten aufweisen, die bei zu gewagter Auslegung leicht zu Verdichtungsstössen führen können. Bei den Geschwindigkeitsdreiecken der Schnitte in Nabennähe werden besonders in den Leiträdern bei kleinen Anblasgeschwindigkeiten grosse Umlenkwinkel gefordert, so dass in Nabennähe die aerodynamische Belastbarkeit durch die erreichbaren Auftriebsbeiwerte begrenzt ist.

C. Der Reaktionsgrad und seine Verteilung über der Schaufelhöhe

In der Beziehung

$$(5) \qquad H_{th} = \frac{w_1^2 - w_2^2 + c_1^2 - c_2^2}{2g} = \frac{u \Delta w_u}{g}$$

bedeutet $(w_1^2 - w_2^2)/2g$ den im Laufrad direkt durch Geschwindigkeitsverminderung des Arbeitsmediums umgesetzten Anteil der theoretischen Förderhöhe, während das Glied $(c_1^2 - c_2^2)/2g$ den hinter dem Laufrad in Form von Drall vorhandenen Anteil der theoretischen Förderhöhe angibt, der erst im Leitrad in Druck umgesetzt werden kann. Das Verhältnis des im Laufrad direkt umgesetzten Förderhöhenanteils zu der gesamten im Laufrad eingebrachten Förderhöhe heisst Reaktionsgrad; er ist identisch mit dem Verhältnis des im Laufrad gewonnenen Druckanteils zum Druckgewinn der vollständigen, d. h. am Laufradeintritt und am Leitradaustritt drallfreien Stufe. Der Reaktionsgrad R ist also schon für ein alleinfahrendes Laufrad definierbar; für den normalen, einfachen Axialverdichter ergibt er sich bei inkompressiblem Medium anhand der bereits bekannten Beziehungen zu:

$$R = \frac{u \Delta w_u/g - (c_m^2 + \Delta w_u^2 - c_m^2)/2g}{u \Delta w_u/g}$$

Nach Umformung erhält man

$$(5a) \qquad R = 1 - \frac{\Delta w_u}{2u}$$

da $\Delta w_u = gH/u$ und $u = r\omega$, ist R über der Schaufelhöhe veränderlich, und man kann auch schreiben

$$(5b) \text{ bzw. } (5c) \qquad R = 1 - \frac{gH}{2\omega^2 r^2} = 1 - \frac{\text{konst.}}{r^2}$$

D. Der optimale Reaktionsgrad

Die Veränderlichkeit von R über der Schaufelhöhe ist im Turbinenbau allgemein bekannt und wird dort seit langem berücksichtigt. Da die Grösse von R mitbestimmend für das Verhalten, für den erreichbaren Wirkungsgrad und die Auslegung der Axialverdichter ist, muss sein optimaler Wert bestimmt werden, trotzdem er nur an einem Schnitt der Schaufel realisierbar ist. Das gelingt nur durch aerodynamische Betrachtungen. Wie schon von Weinig abgeleitet wurde, geht man bei der aerodynamischen Berechnung der Schaufeln von den Anblasgeschwindigkeiten w_∞ bzw. c_∞ aus, die aus den Geschwindigkeitsdiagrammen (Bild 1) gewonnen werden. Unter Verwendung der bekannten Beziehungen der aerodynamischen Verlustleistung $N_{verl.} = c_w \gamma F V^3/2g$ und der Beziehung für die gesamte theoretische Stufenleistung $N_{st} = (u \Delta w_u/g)\, \gamma V$ lässt sich der aerodynamische Wirkungsgrad der aktiven Schaufelflächen beim normalen einfachen Axialverdichter mit inkompressiblem Medium in geschlossener Form darstellen. Dieser aus den geometrischen Beziehungen der Umlenkdiagramme gewonnene Ausdruck heisst nach Einführung der bereits abgeleiteten Beziehung für den Reaktionsgrad

$$(6) \qquad \eta_{ae} = 1 - \left[\varepsilon_R \left(\frac{c_m}{u_r} + \frac{u_r}{c_m} R^2\right) + \varepsilon_L \left(\frac{c_m}{u_r} + \frac{u_r}{c_m}(1-R)^2\right)\right]$$

wobei u_r die Umfangsgeschwindigkeit des betreffenden Schnitts bedeutet. Zur Bestimmung des optimalen Reaktionsgrades wird die erste Ableitung dieser Funktion gleich null gesetzt, und man erhält

$$(7) \qquad R_{opt} = \frac{\varepsilon_L}{\varepsilon_R + \varepsilon_L}$$

Da die Gleitzahlwerte nicht sehr verschieden voneinander sind, liegt der optimale Reaktionsgrad bei etwa $R = 0{,}5$.

Für $\varepsilon_L = 2\,\varepsilon_R$ erhält man $R_{opt} = {}^2/_3$

für $\varepsilon_L = \frac{1}{2}\,\varepsilon_R$ erhält man $R_{opt} = {}^1/_3$

E. Das Strömungsgleichgewicht im normalen, einfachen Axialverdichter

Während beim einfachen Axialverdichter das Medium dem Laufrad gleichmässig zuströmt und sich daher am Laufradeintritt auch keine Drallenergie vorfindet, herrscht nach dem Laufrad ein Drallzustand, der den Geschwindigkeits-Diagrammen entnommen werden kann und sich durch die Gleichungen

$$c_u = \Delta w_u = \frac{gH}{u} = \frac{gH}{\omega r}$$

bzw.

$$c_u r = \text{konst.}$$

darstellen lässt. In jedem Wirbel entsteht nun in radialer Richtung ein auf Grund der Zentrifugalkräfte sich einstellender Druckgradient, der dem Gesetz

$$(8) \qquad \Delta p = \frac{1}{g} \int_{r_2}^{r_1} \gamma \frac{c_u^2}{r}\, dr$$

folgt. Für den Fall inkompressiblen Arbeitsmediums kann man γ vor das Integral setzen und erhält

$$\Delta p_{12} = 2g\gamma \frac{H^2}{w^2} \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2}\right)$$

oder

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\gamma}{g} \frac{c_u^2}{r}$$

Das Strömungsgleichgewicht erfordert nun, dass diesem aus dem Drall kommenden Druckgradienten in radialer Richtung ein ebenso grosser in radialer Richtung liegender Druckgradient vom Laufrad her entgegenwirken muss, d. h. dass das Laufrad aussen in axialer Richtung mehr statischen Druck liefern muss als in Nabennähe. Unter der für den Reaktionsgrad gewonnenen Beziehung (5b) kann der im Laufrad in axialer Richtung gewonnene Druck geschrieben werden zu:

$$\Delta p = \gamma H\left(1 - \frac{g H}{2 u^2}\right) =$$

$$= \gamma H\left(1 - \frac{g H}{2\,\omega^2 r^2}\right) = \gamma H - \frac{\gamma g H^2}{2\,\omega^2 r^2}$$

$$\frac{d p}{d r} = -\frac{\gamma g H^2}{2\,\omega^2}\,\frac{2}{r^3} = \frac{\gamma g H^2}{\omega^2 r^3}$$

Hinter dem Laufrad gilt $H = u\,c_u/g$, da beim normalen einfachen Axiallader $\Delta w_u = c_u$ ist; somit ergibt sich auch für den radialen Druckgradienten des vom Laufrad erzeugten Drucks

$$\frac{d p}{d r} = \frac{\gamma g u^2 c_u^2}{g u^2 r} = \frac{\gamma}{g}\,\frac{c_u^2}{r}$$

Mit dem Nachweis, dass der vom Laufrad kommende radiale Druckgradient ebenso gross ist wie der im Drallfeld nach dem Laufrad sich aufbauende Druckgradient, ist das Strömungsgleichgewicht der bisher in Rechnung gesetzten Geschwindigkeitsgrössen und -richtungen bestätigt. Der normale, einfache Axialverdichter stellt somit wegen seiner leicht übersehbaren Strömung einen für die Auslegung besonders einfachen Fall dar. Leider ist diese Bauart für hochbelastete Axialverdichter nicht empfehlenswert, da ihr wegen der sehr unterschiedlichen Geschwindigkeiten in Lauf- und Leitrad recht enge Leistungsgrenzen gesetzt sind.

F. Die Leistungsgrenzen des normalen, einfachen Axialverdichters

Aus den bereits bekannten Beziehungen

$$H = \frac{\Delta w_u\, u}{g}$$

$$c_a = \frac{t_R}{l_R}\,\frac{2\,\Delta w_u}{w_\infty} = \frac{t_L}{l_L}\,\frac{2\,\Delta w_u}{c_\infty}$$

$$w_\infty = \sqrt{c_m^2 + \left(u - \frac{\Delta w_u}{2}\right)^2}$$

$$c_\infty = \sqrt{c_m^2 + \frac{\Delta w_u^2}{4}}$$

lassen sich Formeln für die Leistungsgrenzen der Lauf- und Leiträder getrennt aufstellen. Um zu gültigen Aussagen zu kommen, ist es überdies nötig, die Machzahlfunktion $M = w_1/a$ einzuführen, wobei

$$w_1 = \sqrt{c_m^2 + u^2}\;;\; a = 20\sqrt{T} =$$

$$= \text{Schallgeschwindigkeit (m/s)}$$

Für das Laufrad erhält man mit $c_\Gamma = c_a\, l/t = 1$ und nach Einführung von $u^2 = M^2\, 400\, T - c_m^2$

$$(9)\qquad H_R = \frac{M_R^2\, 400\, T - c_m^2}{2\,g} \times$$

$$\times\left[\sqrt{\frac{1}{16\left(\frac{1}{c_\Gamma^2} - \frac{1}{16}\right)^2} + \frac{\frac{c_m^2}{M^2\, 400\, T - c_m^2} + 1}{(1/c_\Gamma^2 - 1/16)}} - \frac{1}{4\,(1/c_\Gamma^2 - 1/16)}\right]$$

und für das Leitrad durch ähnliche Umformung

$$(10)\qquad H_L = \frac{c_\Gamma c_m}{2\,g}\sqrt{\frac{M_R^2\, 400\, T - c_m}{1 - c_\Gamma^2/16}}$$

Diese Beziehungen für H_R und H_L lassen sich leicht numerisch auswerten, wenn man eine aus Windkanalversuchen zu entnehmende Funktion $c_{a\,\max\,\text{zul}} = f(M)$ einführt. Für Profile mit 6 % Dicke kann die Machzahlabhängigkeit etwa durch die Gleichung

$$c_a^2{}_{\text{zul}} = (8{,}005 - 18{,}85\, M_R + 11{,}12\, M_R^2)$$

dargestellt werden, wobei jedoch auch bei kleinem M $c_{a\,\text{zul}}$ nicht grösser als 1,0 eingesetzt werden darf. Tabelle 1 gibt die zugehörigen Zahlenwerte für $c_m = 100$ m/s und $l/t = 1$.

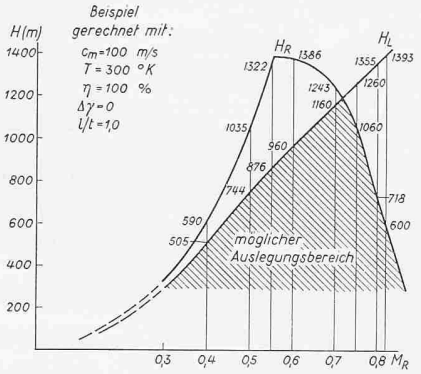

Bild 2. Leistungsgrenzen des einfachen normalen Axialverdichters

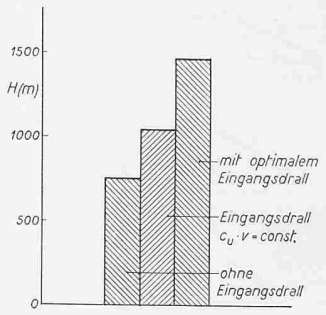

Bild 3. Steigerung der Belastbarkeit durch Eingangsdrall

Tabelle 1. Maximale Stufenförderhöhen H_R und H_L und charakteristische Grössen

M_R	0,4	0,5	0,55	0,6	0,7	0,75	0,8	0,82
H_R	590	1035	1322	1386	1243	1060	718	600
H_L	505	744	876	960	1160	1260	1355	1393
H (m) mög . . .	505	744	876	960	1160	1060	718	600
c_Γ Laufrad . . .	1	1	0,962	0,836	0,505	0,353	0,200	0,158
c_Γ Leitrad . . .	1	1	1	1	1	1	1	1
M Leitrad . . .	0,336	0,355	0,366	0,360	0,330	0,315	0,299	0,295

Bei anderer Wahl der c_m-Werte ändern sich die Verhältnisse nur unwesentlich. Man erkennt, dass ein normaler, einfacher Axialverdichter, dessen Laufrad für kleine M-Zahlen ausgelegt ist, im Leitrad durch die Grössen l/t und $c_{a\,\max}$ begrenzt ist. Bei einer M-Zahl im Laufrad von etwa 0,7 tritt ein Maximum der erreichbaren Förderhöhe auf.

Bild 2 zeigt den Zusammenhang zwischen der möglichen Förderhöhe pro Stufe und der Laufrad-Machzahl. Daraus folgt das minimal notwendige Nabenverhältnis. Denn in diesem Fall darf für eine Stufenförderhöhe von z. B. 800 m an der Schaufelspitze die Laufrad-Machzahl den Wert 0,78 nicht überschreiten und mit Rücksicht auf das Leitrad am Schaufelfuss auch den Wert 0,53 nicht unterschreiten.

II. Der hochbelastete Axialverdichter

A. Der Eingangsdrall

Falls es durch besondere Massnahmen gelingt, den Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit auf die Laufrad-Machzahl zu verkleinern, so könnte im Laufrad bei der durch aerodynamische Beziehungen begrenzten oberen Machzahl durch grössere Umfangsgeschwindigkeit mehr Leistung in die Stufe eingeführt werden. Die Verarbeitung dieser Leistung setzt jedoch gleichzeitig im Leitrad eine Erhöhung des Wertes c_∞ voraus, um den erhöhten Drall auch aerodynamisch verarbeiten zu können. Es müsste also eine Komponente der Umfangsgeschwindigkeit vom Laufrad weggenommen und dem Leitrad zugeteilt werden. Das bei dem Entwurf von hochbelasteten Axialverdichtern hierfür angewandte Mittel ist der Vordrall, der durch eine vor dem ersten Laufrad befindliche Anordnung erzeugt werden und im Drehsinn des ersten Laufrads wirken muss. Auf diese Weise zieht sich der Vordrall von der Umfangskomponente des Laufrads ab — ergibt somit Machzahlverringerung, bzw. ermöglicht bei gleicher Machzahl eine Steigerung der Umfangsgeschwindigkeit — und addiert sich zur Umfangskomponente der Leitschaufelströmung, so dass diese bei grösseren wirksamen Geschwindigkeiten arbeiten kann.

1. Die Bestimmung der zweckmässigen Eingangsdrall-Verteilung

α) Lader mit Eingangsdrall $c_u r =$ konst

Nach den in den vorstehenden Kapiteln gewonnenen Erkenntnissen liegt es nahe, die Verteilung des Eingangsdralls nach der Funktion $c_u r =$ konst zu wählen. In diesem Fall besteht ebenso wie beim normalen, einfachen Axialverdichter Strömungsgleichgewicht bei über der Schaufelhöhe konstantem Wert c_m. Die gewählte Eingangsdrall-Verteilung ergibt

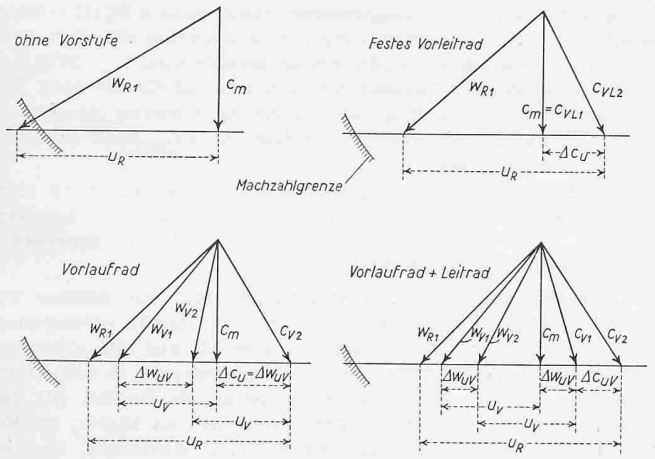

Bild 4

an der Schaufelspitze nur geringfügige Umfangskomponenten, so dass die Umfangsgeschwindigkeit aussen und damit die laufradseitig mögliche Förderhöhe nur wenig erhöht werden kann; die leitradseitig mögliche Förderhöhe wird jedoch bereits merklich verbessert, insbesondere an den Schnitten in Nabennähe, denen die nach innen zu anwachsende c_u-Komponente sehr zugute kommt.

Obwohl der Axiallader mit Potential-Eingangsdrall schon eine Verbesserung von etwa 40 % möglicher Förderhöhe gegenüber dem einfachen Lader aufweist und ausserdem in der Auslegung der Umlenkdiagramme ebensowenig Schwierigkeiten bietet wie dieser, ist er kaum ausgeführt worden. Die Entwicklung von Turbinentriebwerken besonders kleiner Abmessungen und damit geringen Gewichts liessen es angezeigt erscheinen, die Möglichkeit der Drehzahlsteigerung vollständig auszuschöpfen und zu Vordrall-Verteilungen überzugehen, bei denen gleichzeitig in Nabennähe und an den Schaufelspitzen optimale Strömungsverhältnisse geschaffen werden. Lader mit optimaler Eingangsdrall-Verteilung erreichen etwa doppelt so grosse Stufenförderhöhen wie normale einfache Axiallader; der Nachteil des wesentlich grösseren Rechenaufwandes für solche hochbelastete Axialverdichter mit über der Schaufelhöhe veränderlichem c_m muss dafür in Kauf genommen werden.

β) Lader mit optimalem Eingangsdrall

Die Auslegung von Ladern mit optimaler Eingangsdrall-Verteilung setzt die vollständige Beherrschung der in den folgenden Kapiteln geschilderten Berechnungsmethoden voraus. Für die Bestimmung der optimalen Eingangsdrall-Verteilung sind folgende Punkte zu beachten:

1. Bei grösstmöglicher Umfangsgeschwindigkeit des Laufrades Einhaltung noch zulässiger Machzahl (0,75 bis 0,8) an den Schaufelspitzen, mit Rücksicht auf die erforderlichen c_Γ-Werte.

2. In Nabennähe ebenfalls Einhaltung der Machzahlgrenzen, die dort meist erst im ersten Leitrad kritisch wird und mit Rücksicht auf die dort eng stehenden Schaufeln und damit bereits merkliche Verdrängungsströmung, sowie auf die dort verlangten grossen Umlenkwinkel nachgeprüft werden muss.

3. Vermeidung zu grosser Radialkomponenten der Strömung, damit die Unterschiede der c_m-Werte zwischen Spitze und Nabe klein bleiben (zu empfehlen ist, das Verhältnis c_{ma}/c_{mi} nicht über 2 zu wählen).

4. Aus Wirkungsgradgründen sollte sich ein Reaktionsgrad $R = 0{,}5$ etwa auf dem Zylinderschnitt einstellen, der den gesamten Durchsatz halbiert.

5. Ebenfalls aus Wirkungsgradgründen ist darauf zu achten, dass die Zirkulationsunterschiede über der Schaufelhöhe nicht zu gross werden.

Bei richtiger Berücksichtigung der Forderungen 1 bis 3 sind die Punkte 4 und 5 meist von selbst erfüllt.

2. Die Erzeugung des Eingangsdralls

Der Eingangsdrall kann durch ein festes Vorleitrad, durch einen mit verminderter Laderdrehzahl rotierenden Vorläufer oder durch eine Kombination aus rotierendem Vorläufer und nachgeschaltetem drallerhöhendem Leitrad erzeugt werden.

α) Vorleitrad (fester Leitkranz)

Das feste Vorleitrad wirkt wie ein Turbinenleitrad und setzt Druckenergie in Drall um; der dadurch entstehende Druckabfall muss in den folgenden Stufen durch höhere Belastung bzw. durch eine zusätzliche Stufe wieder ausgeglichen werden. Die bauliche Einfachheit des festen Vorleitrades wird weiterhin durch die Vereisungsempfindlichkeit dieses Rades erkauft, die insbesondere bei Axialverdichtern für Flugtriebwerke zur Heizung der Vorleitstufe zwingen kann.

β) Vorlaufrad mit reduzierter Umfangsgeschwindigkeit

Um in den durch die Machzahl gegebenen Grenzen zu bleiben, muss die Umfangsgeschwindigkeit eines rotierenden Vorlaufrades kleiner gehalten werden als die des Hauptläufers. Dies kann durch Durchmesserverringerung erreicht werden (wie z. B. beim Heinkel-Flugtriebwerk), jedoch zwingt diese Lösung zu sehr ungünstigen Nabenverhältnissen im Vorläufer und damit zu Wirkungsgradeinbussen. Eine Anordnung des Vorlaufrades mit gleichem Durchmesser wie der Hauptläufer erfordert die Anwendung eines Untersetzungsgetriebes etwa im Verhältnis 2:1. Die Bauart mit Vorlaufrad ist nicht vereisungsempfindlich; sie ermöglicht bei Druckgewinn in der Vorstufe eine optimale Eingangsdrall-Verteilung. Im Gegensatz zu der c_m-Verteilung, wie sie nach einem festen Vorleitrad für optimale Eingangsdrall-Verteilung herrscht, wird nach einem rotierenden Vorlaufrad der c_m-Wert an der Schaufelspitze angehoben, was für die weitere Durchströmung und Schaufelgestaltung des nachfolgenden Laders von grossem Wert sein kann.

γ) Vorlaufrad mit nachgeschaltetem Leitrad

In diesem Fall liefert das Vorlaufrad nur etwa die Hälfte des erforderlichen Dralls bei gleichzeitigem Druckgewinn; in dem nachgeschalteten Leitrad wird der Drall durch Abbau des Druckes auf den erforderlichen Betrag vergrössert. Auf diese Weise wird die vom Vorlaufrad benötigte Leistung geringer, und das Getriebegewicht kann entsprechend kleiner gehalten werden. (Schluss folgt)

Prof. C. F. Baeschlin 70 Jahre

DK 92

Prof. Dr. Ing. e. h., Dr. e. h. C. F. Baeschlin, unser verehrter Lehrer an der ETH für Geodäsie und Topographie von 1908 bis 1949, darf am 5. August im Vollbesitz seiner physischen und geistigen Kräfte, seines mitreissenden Temperamentes, den 70. Geburtstag feiern. Absolvent der Bauingenieurschule des Eidg. Polytechnikums (1904), betätigte er sich zunächst als Geodät der Eidg. Landestopographie, bis er 1908 als Siebenundzwanzigjähriger als Stellvertreter von Prof. M. Rosenmund an die ETH berufen und noch im gleichen Jahr zum Professor für Geodäsie und Topographie gewählt wurde. Seither hat Baeschlin die Geodäsie und das Vermessungswesen, die Ausbildung der Geometer, Vermessungs-, Kultur- und Bauingenieure massgebend beeinflusst: als Hochschullehrer, Abteilungsvorstand und Rektor der ETH, Mitglied der eidgenössischen Maturitätskommission, Präsident der eidgenössischen Geometerprüfungskommission, Präsident der Schweiz. Geodätischen Kommission, Vizepräsident der Internationalen Assoziation für Geodäsie, Redaktor der Schweiz. Zeitschrift für Vermessungswesen. Seine Absteckungen für den Lötschbergtunnel machten ihn international bekannt, seine geodätischen Arbeiten und seine Wirkung in internationalen Vereinigungen der Geodäten, Photogrammeter und Geometer begründeten seinen Ruf als international anerkannter Geodät. Das Vertrauen des Auslandes trug ihm die Ernennung zum Präsidenten der türkisch-iranischen Grenzkommission ein. — Im Kreise der G. E. P. geniesst Prof. Baeschlin als Präsident der Jahre 1933 bis 1944 Verehrung. Innerhalb und ausserhalb des S. I. A. hat er sich erfolgreich eingesetzt für die Wahrung schweizerischer Masstäbe in den Titelbezeichnungen. Als Bürger hat er in der Politik in der Wohngemeinde, im Kanton und Bund uneigennützig mitgearbeitet, als Soldat seine besten Kräfte zur Verfügung gestellt, zuletzt als Kommandant der Gruppe Glärnisch. Die schönsten Verdienste Baeschlins sind wohl in Herz und Verstand der grossen Zahl ehemaliger Schüler registriert, die während seiner 40jährigen Lehrtätigkeit an der ETH vor ihm sassen. Bei aller Strenge in der Lehre und in den Anforderungen war er seinen Studierenden immer gütiger, verstehenden Mitmensch. Hinter dem temperamentvollen Rauhbein sah sein Schüler immer den Humanismus Baeschlins. Dieser