Seria: ENERGETYKA z. 98

Mr kol. 1022

Wilfried ULM
Ingenieurhochschule Zittau<sup>1)</sup>

ZUR BERECHNUNG DER STRÖMUNG IN DAMPFTURBINENDSTUFEN BEI TEILLASTZUSTÄNDEN MIT WABENABIÖSUNG

Zusammenfassung. Im Beitraf wird über die Anwendung und Weiterentwicklung des schon früher veröffentlichten Berechnungsverfahrens
"Radiales Gleichgewicht" (RADGL) zur Berechnung der rotationssymmetrischen, stationären, reibungsbehafteten und kompressiblen Strömung in axialen Turbomaschinenstufen berichtet.
Besonderer Wert wurde dabei auf die Erfassung der bei Teillastbetrieb entstehenden Ablösezonen in Nabennähe der Stufen gelegt. Die
Methode zur Berechnung der Nabenablösung wird beschrieben. Der Vergleich ausgewählter Berechnungsergebnisse mit aus der Literatur
vorliegenden Ergebnissen experimenteller Untersuchungen für verschiedene Varianten und Betriebszustände einer Kaltluftmodellstufe
zeigt eine gute Übereinstimmung. Damit wird die Treffsicherheit des
Verfahrens RADGL auch unter den bei Endstufen vorliegenden geometrischen Bedingungen und bei Teillastzuständen mit Nabenablösung
bestätigt.

## Verwendete Formelzeichen. Indizes und Abkürzungen

### Formelzeichen

- c Absolutgeschwindigkeit
- D Durchmesser
- h spezifische Enthalpie
- 1 Schaufellänge
- l Profillänge
- m Massestrom
- p Druck
- r radiale Koordinate
- s spezifische Entropie
- t Teilung
- u Umfangsgeschwindigkeit

Dipl.-Ing. Wilfried Ulm. Sektion Kraftwerksanlagen und Energieumwandlung.

w+ - technische Arbeit am Umfang

x - axiale Koordinate

z - dimensionslose radiale Koordinate

# - Stromfunktion

- dimensionslose Stromfunktion (auf m bezogen)

### Indizes

a - am äusseren Radius

A - Auslegung

bar - barometrisch

i - an inneren Radius

m - am mittleren Radius

r - radial

s - isentrop

u - azimutal

x - axial

0 - Eintritt Leitrad

1 - Eintritt Laufrad

2 - Austritt Laufrad

### Kopfzeichen

# - Gesamtzustand

### 1. Einleitung

Die treffsichere Auslegung axialer thermischer Turbomaschinenstufen mit kleinem D<sub>m</sub>/l und die zuverlässige Vorausbestimmung ihres Betriebsverhaltens setzt eine genügend genaue Berechnung der Strömungsverhältnisse längs der Schaufelhöhe voraus. Wegen des dreidimensional ausgebildeten Charakters der Strömung ist die Berechnung mit erheblichen mathematischen Problemen verbunden. Zur Überwindung dieser Schwierigkeiten ist nach wie vor die bekannte Aufspaltung in die beiden Subprobleme Gitterströmung und Meridianströmung üblich. Zum Problem der rotationssymmetrischen Strömung in Axialstufen werden seit Mitte der siebziger Jahre im Rahmen eines Forschungsthemas der Ingenieurhochschule Zittau in Zusammenarbeit mit Industriepartnern experimentelle und theoretische Untersuchungen durchgeführt. Als Ergebnis dieser Arbeiten wurde u.a. auch das Rechenprogramm "Radiales Gleichgewicht" (RADGL) zur Berechnung der rotationssymmetri-

schen, stationären, reibungsbehafteten und kompressiblen Strömung in axialen Turbomaschinenstufen unter Berücksichtigung der Stromlinienkrümmung im Meridianschnitt entwickelt, siehe dazu z.B. [1] und [2].

Von besonderer Bedeutung für die Entwicklung und Vervollkommung eines Berechnungsverfahrens ist die Gegenüberstellung von Resultaten aus Experiment und Rechnung. Entsprechende Vergleiche für eine Axialverdichterstufe wurden in [3] angestellt. Hier wie auch in den weiteren für einzelne Turbinenleitgitter und eine Axialturbinenstufe durchgeführten Untersuchungen [4] konnte eine gute Übereinstimmung zwischen Ergebnissen aus Messungen und Rechnungen nach RADGL nachgewiesen werden.

Besonderer Wert wird in den letzten Jahren auf die Lösung der Probleme gelegt, die im Zusammenhang mit dem Teillastbetrieb von Kondensations-dampfturbinen stehen (vgl. z.B. [5, 6, 7, 8, 9]. Das betrifft insbesondere das Ablösen der Strömung im Bereich der Nabe von Endstufen, wenn infolge verringerten Massestromes oder ansteigenden Kondensatordruckes der Abdampf-volumenstrom absinkt. Da durch das Auftreten derartiger Strömungszustände Virkungsgrad, Lebensdauer und Betriebssicherheit der Endstufen beeinträchtigt werden können, ist eine Ausage über die Ablösegefahr schon bei der Auslegung und die Vorausberechnung der Ablösegebiete für den Teillastbetrieb der Stufen wichtig.

Im vorliegenden Beitrag wird über die Anwendung und Weiterentwicklung des Berechnungsverfahrens "Radiales Gleichgewicht" (RADGL) besonders für Betriebszustände mit Nabenablösung berichtet. Es wurden Berechnungen der Meridianströmung für ein mit Luft betriebenes Modell einer Dampfturbinenendstufe für verschiedene Gestaltungsvarianten und Betriebszustände durchgeführt. Die erhaltenen Berechnungsergebnisse werden mit den in [9] detailliert vorliegenden Messergebnissen verglichen.

# 2. Ausgewählte Berechnungsergebnisse für eine Modellstufe und Vergleich mit Messergebnissen

In der Arbeit [9] sind detaillierte Ergebnisse umfangreicher experimenteller Untersuchungen an verschiedenen Varianten einer Kaltluftmodellstufe dargestellt. Sämtliche zur Nachrechnung notwendigen Angaben konnten den vorliegenden Unterlagen [9] entnommen werden. Dazu muss bemerkt werden, dass in der Fachliteratur Veröffentlichungen in solcher Detailliertheit nur äusserst selten zu finden sind. Der Wert der Arbeit [9] kann somit für die durchgeführten theoretischen Untersuchungen nicht hoch genug eingeschätzt werden.

Zuerst wurde dei in [9] mit Variante II bezeichnete Stufe untersucht. Sie hat zylindrische Wandungen des Meridiankanals, ein Nabenverhältnis  $r_i/r_a=0.442~(D_m/1=2.58)$ . Damit liegen geometrische Bedingungen vor, wie sie sonst bei Endstufen vorzufinden sind. Die Stufe wurde bei Machzahlen kleiner 0.3. d.h. praktisch inkompressibler Strömung, betrieben.

48 W. Ulm

Die Leitwchaufeln sind unverwunden und haben über der Schaufellänge dasselbe Profil sowie ein konstantes Teilungsverhältnis t/lp, so dass sich entlang des Radius ein annähernd konstanter Abströmwinkel ergibt. Bei den verwundenen Laufschaufeln ändern sich Staffelungswinkel, Teilungsverhältnis und Profil über der Schaufellänge. Die Rotordrehzahl beträgt 5000 U/min. Die Auslegung erfolgte für einen Reaktionsgrad Null am Schaufelfuss.

Für die Nachrechnung mit dem Programm RADGL wurde der Kanal in 24 Rechenschnitte unterteilt. Die Schnitte 9 und 17 bilden im Rechenmodell die Austrittskanten der Leit- bzw. Laufschaufeln. Im Bild 1 ist der Meridianschnitt der Stufe mit den berechneten Verläufen ausgewählter Stromlinien für einen Durchsatz  $m/m_A = 0,972$  dargestellt. Zu Vergleich sind entsprechende Messergebnisse aus [9] mit eingezeichnet.

Da erfahrungsgemäss die Stromlinienverläufe die Abseichungen zu den Messergebnissen nicht gut widerspiegeln, bietet Bild 2 eine weitere Vergleichsmöglichkeit für die axiale Komponente der Strömungsgeschwindigkeit. Pür den Vergleich wurden die Ergebnisse der Messebene I und des Rechenschnittes 10 für den Leitgitteraustritt bzw. der Messebene III und des Rechenschnittes 20 für den Stufenaustritt herangezogen. Die Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen des Experimentes und der Rechnung ist gut. Nur in den Randbereichen treten etwas grössere Abweichungen infolge Sekundärströmungen auf. Die Änderung der Abströmwinkel infolge Radialspaltes wurde durch Vorgabe der gemessenen Winkel in diesem Bereich berücksichtigt. Für den Pall, dass keine Messergebnisse vorliegen, kann man diesen Einfluss auch abschätzen. Entsprechend verallgemeinertes Material liegt in [10] vor. Der für die Beurteilung wichtige Vergleich für die Druckverteilung im Spalt der Stufe ist im Bild 3 dargestellt. Die erzielte Übereinstimmung ist sehr gut.

Für weitere Vergleiche wurde die Meridianströmung für die in [9] vermessene und mit Variante IIk bezeichnete Turbinenstufe berechnet. Sie ist mit derselben Beschaufelung, wie die oben beschriebene Stufe ausgerüstet, hat jedoch im Bereich des Leitgitters und Spaltes eine mit etwa 30° ansteigende Aussenkontur des Meridiankanals. Der Meridianschnitt der Stufe mit einigen berechneten Strömlinien im Vergleich zu Messwerten für m/m, = 1,03 ist mus Bild 4 ersichtlich. Für die Auswertung von Interesse ist der Einfluss der nach aussen ansteigenden Kanalkontur im Bereich des Leitgitters auf die Durchströmung und insbesondere auf den radialen Druckverlauf im Spalt der Stufe. Bild 5 zeigt die gemessenen und berechneten Druckverteilungen am Leitgitteraustritt und hinter der Stufe. Auch hier ist die erzielte Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung sehr gut. In den Resultaten bestätigt sich der aus der Literatur, z.B. [4], bekannte Einfluss der Neigung der äusseren Kanalwandung, der in einer Erhöhung des radialen Druckgradienten im Spalt der Stufe zum Ausdruck kommt. Da der Verlauf des Reaktionsgrades entlang der Schaufellänge bei näherungsweise konstantem Druck am Stufenaustritt im wesentlichen durch diesen radialen Druckgradienten beeinflusst wird, resultiert daraus eine Steigerung des

radialen Gradienten des Reaktionsgrades, die letztendlich zu einer Absenkung des Reaktionsgrades an der Habe führt. Für die Stufe IIk wird in [9] der Reaktionsgrad an der inneren Kanalwandung mit etwa -30% angegeben. Dieses Ergebnis wird durch die Berechnung bestätigt.

Auch für die Axialkomponente der Geschwindigkeiten im Bild 6 fällt der Vergleich befriedigend aus. Etwas grössere Unterschiede erscheinen am Stufenaustritt, die sich auch in der Lage der berechneten Stromlinien im Bild 4 bemerkbar machen. Mit den angestellten Vergleichen für die beidem Varianten der Kaltluftmodellstufe konnte nachgewiesen werden, dass bei der Nachrechnung mit dem Programm RADGL auch bei den für Endstufen typischen geometrischen Bedingungen der Einfluss der Meridianstromlinienkrümmung auf den radialen Druckgradienten recht genau erfasst wird.

# 3. Weiterentwicklung des Programmes RADGL für Turbinen tufen mit Nabenablösung

Bei der Durchführung von Teillastberechnungen mit dem Programm RADGL und auch bei experimentellen Untersuchungen wird immer wieder festgestellt, dass am Austritt aus den Laufschaufeln und danach der Druck an der Nabe im Vergleich zum Druck am Eintritt in die Laufbeschaufelung mit sinkendem Durchsatz ansteigt. Das kommt im Absinken des Reaktionsgrades unter den Wert Null an der Nabe zum Ausdruck.

Für den Druckanstieg an der Nabe sowohl innerhalb der Laufschaufeln als auch danach gibt es bestimmte Grenzen, die vom physikalischen Standpunkt aus die bei geringen Volumenströmen auftretende Nabenablösung plausibel erscheinen lassen, selbst wenn man den Einfluss von reibungsbedingten Effekten wie Grenzschichtablösung bei verzögerter Strömung vorerst unberücksichtigt lässt. Um diesen Sachverhalt anschaulich darzustellen, betrachtet man den Zustandsverlauf einer reibungsbehafteten Strömung entlang der mittleren Stromlinie in einem Schaufelkanal im h-s-Diagramm. Dabei ist es unerheblich, ob dafür das Absolut- oder Relativsystem gewählt wird. Die Gesamtenthalpie h soll entlang der Stromlinie konstant sein. Die Darstellung im Bild 7 verdeutlicht, wie die Berechnung im Programm RADGL bisher gehandhabt wurde. Für die Bestimmung der Geschwindigkeiten und des Gesamtdruckverlustes innerhalb des Gitters wurde ein vor dem Gitter liegender "Bilanzschnitt" festgelegt. Die für die einzelnen Rechenpunkte vorgegebenen Verlustbeiwerte bezogen sich auf eine Entspannung von einem entsprechenden Punkt des "Bilanzschnittes" vor dem Gitter bis zum betreffenden Rechenpunkt innerhalb des Gitters. Im Falle, dass z.B. nach der Entspannung ein Druckanstieg erfolgt, kann es bei dieser Berechnungsvorschrift durchaus sein, dass sich der Gesamtdruck stromsbwärts erhöht. Dieser Fall ist schematisch im Bild 7 für den Punkt 4 skizziert. Abgesehen davon, dass ein solcher Sachverhalt physikalisch nicht möglich ist, führt das auch dazu, dess nach schon erfolgter Entspannung ein Bruck-

anstieg bis maximal zum Gesamtdruck vor dem Gitter realisiert werden kann und dabei immer noch eine Geschwindigkeit bestimmbar ist. Aus den genannten Gründen wurden im Berechnungsalgorithmus Änderungen vorgenommen, die den physikalischen Gegebenheiten besser entsprechen. Es wird bei der Berechnung so vorgegangen, dass der "Bilanzschnitt" für einen gerade zu behandelnden Rechenschnitt immer der vorhergehende ist und somit der bis dahin aufgetretene Gesamtdruckverlust berücksichtigt wird. Dadurch wird garantiert, dass selbat bei einem Ansteigen des statischen Druckes der Gesamtdruck entlang der Stromlinie fällt. Der entsprechende Zustandsverlauf ist schematisch im Bild B dargestellt. Ausserdem, und das ist für die Berechnung von Ablösegebieten das Entscheidende, ist entlang der Stromlinie ein Ansteigen des statischen Druckes nur bis maximal auf den Gesamtdruck des entsprechenden Punktes auf dem davorliegenden Rechen schnitt möglich. Übersteigt der statische Druck diesen vorgegebenen Gesamtdruck, so ist es physikalisch sinnvoll und berechtigt hier den Ablösepunkt zu definieren. Rechentechnisch wird das so gelöst, dass beim Auftreten dieses Zustandes im betroffenen Rechenpunkt die Meridiankomponente der Geschwindigkeit Null gesetzt wird. Diese Verfahrensweise wird schon in dem in [5] vergestellten Verfahren für die Berechnung der Meridianströmung in Axialstufen mit Nabenablösung erfolgreich angewendet. Ein weiteres Problem ist die Beherrschung des hohen Austrittsdralles bei Teillastbetrieb, wenn in Strömungsrichtung an der Nabe ein Druckanstieg zu verzeichnen ist. Da entlang den Stromlinien der Drall c, . r erhalten bleibt, führt ein Druckanstieg zu einem Absinken der Axialgeschwindigkeit der Strömung. Das geht an der Nabe aber nur so weit, bis infolge der hohen Umfangskomponente das zur Verfügung stehende Enthalpiegefalle "aufgebraucht" ist, d.h.

$$h^*(p)^* - h(p) = c_1^2/2$$
 (1)

und die Meridiankomponente zu Null wird. Steigt der Druck in Strömungsrichtung an der Nabe weiter an, so muss zur Einhaltung des Drallsatzes die Strömung von der Nabenkontur abheben. Dadurch ist auch hinter dem Gitter eine Bedingung für den Ablösepunkt formuliert, bei deren Erfullung so wie innerhalb des Gitters die Meridiankomponente der Geschwindigkeit Null gesetzt wird. Die Stromlinie für  $\Phi=0$  wird auf diese Art und Weise mit berechnet.

## 4. Vergleich von Verechnungs- und Messergebnissen für die Kaltluftmodellstufe bei Teillastbetrieb

Das modifizierte Rechenprogramm wurde vorerst für Stufen ohne Ablösung ausgetestet. Für die oben behandelte Kaltluftmodellstufe konnten für den Nenndurchsatz praktisch gleichwertige Ergebnisse wie mit dem unveränderten Rechenprogramm erzielt werden.

Nachfolgend wurde eine Teillastrechnung für diese Stufe bei m/m = = 0,564 vorgenommen. Ausgewählte Ergebnisse im Vergleich mit Messergebnissen aus 9 sind in den Bildern 9 und 10 dargestellt. Die Ablösung erfolgt bei Messung und Rechnung erst hinter der Laufbeschaufelung. Obwohl bei der Nachrechnung die volle Ausdehnung des Totwassers nicht erfasst wird, siehe Bild 9, ist die Übereinstimmung doch zufriedenstellend. Die Strömungsverteilung im Spalt der Stufe, wo keine Ablösung statifindet. wird wie bei den anderen Rechnungen recht genau erfasst. Grössere Abweichungen erscheinen in der Verteilung der Radialgeschwindigkeit hinter der Stufe (Bild 10), was mit der Ausdehnung des Nabentotwassers im Zusammenhang steht. Wie aus dem Bild ersichtlich, wird in der realen Strömung an der Nabe die Axialkomponente negativ. d.h. es kommt zum Rickströmen. Dieser Zustand kann bei der Nachrechnung mit der beschriebenen Verfahrensweise nicht erfasst werden, Damit ist auch erklärbar, warum die Ausdehnung des berechneten Nabentotwassers nicht genau mit der des gemessenen übereinstimmt. Selbst, wenn die Rückströmung nur wenige Prozent des eigentlichen Durchsatzes ausmacht, wird dadurch die Grenzstromlinie stark nach aussen verschoben. Im Bild 9 ist zur Verdeutlischung dieses Sachverhaltes eine berechnete Stromlinie für 🏚 = 0.01 eingezeichnet. Strömt an der Nabe nur 1% des Durchzatzes zurück, würde die Grenzstromlinie für 🗘 = 0 um etwa den doppelten Betrag nach aussen ausweichen. Für einen weiteren Betriebspunkt mit  $\dot{m}/\dot{m}_{A} = 0,367$  ergeben sich ähnliche Verhältnisse. Die Ablösezone beginnt jedoch schon innerhalb der Laufbeschaufelung und entwickelt sich auch zu grösseren Abmessungen, siehe Bild 11. Für den Vergleich der berechneten und gemessenen Totwassergrenze trifft das oben Gesagte zu, nur dass bei diesem geringen Durchsatz die Ruckstromung an der Nabe intensiver ist. Die Festelgung des genauen Ablosepunktes, selbst aus den detailliert vorliegenden Messergebnissen in [9], ist nicht ohne weiteres möglich, da die erste Messebene hinter dem Laufrad schon zu weit von der Austrittskante der Laufschaufeln entfernt ist. Bei der Betrachtung der Ergebnisse dürfte es auch interessant sein, dass über der gesamten Länge der Laufschaufeln ein Druckansteig zu verzeichnen ist. Aus den Rechen- und Messergebnissen geht auch hervor, dass in der gesamten Hauptströmung Energie von der Beschaufelung an das Fluid übertraten wird und die Stufe somit als Leistungsverbraucher wie eine Arbeitsmaschinenstufe arbeitet. In diesem Zusammenhang sind im Bild 12 die berechneten und gemessenen technischen Arbeiten am Umfang über der dimensionslosen Stromfunktion der Hauptströmung für die drei untersuchten Betriebszustande dargestellt.

Auch unter den extremen Teillastbedingungen liefert das modifizierte Berechnungsverfahren RADGL akzeptable Ergebnisse, wie aus den Bildern 11 und 12 zu ersehen ist. Damit bestätigt sich die Richtigkeit der gemachten Annahmen, insbesonders für die Erfassung der Ablösezonen in und hinter der Stufe unter den vorliegenden Bedingungen.

## 5. Zusammenfassung

Mit dem Programm RADGL steht in der DDR ein leistungsfähiges Verfahren für die Nachrechnung der Strömungsverhältnisse in Turbinenstufen mit kleinem  $D_{\rm m}/l$  zur Verfügung. Die ausgewählten Vergleiche zwischen Ergebnissen aus Rechnung und Messung zeigen eine gute Übereinstimmung und bestätigen die Treffsicherheit des Verfahrens auch unter den bei Endstufen vorliegenden geometrischen Bedingungen und bei Teillastzuständen mit Nabenablösung. Zur Anwendung des Programmes RADGL für Dampfturbinenendstufen als auch zum Problem der Nabenablösung wurden umfangreichere Arbeiten durchgeführt, als im vorliegenden Beitrag erläutert werden kann. Diese Untersuchungen sind in der Arbeit [11] beschrieben.

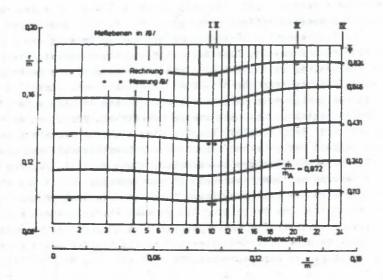


Bild 1. Meridianschnitt der Stufe II aus [9] mit berechneten und gemessenen Stromlinienverläufen

Rys. 1. Przekrój merydionalny stopnia II [9] z pomierzonymi i obliczonymi współrzędnymi linii prędu

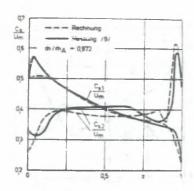


Bild 2. Berechnete und gemessene Axialgeschwindigkeitsverteilungen für die Stufe II aus [9]

Rys. 2. Obliczony i pomierzony rozkład prędkości osiowej dla stopnia II [9]

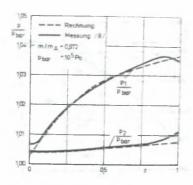


Bild 3. Berechnete und gemessene Druckverteilungen für die Stufe II aus [9]

Rys. 3. Obliczony i pomierzony rozkład ciśnienia dla stopnia II wg [9]

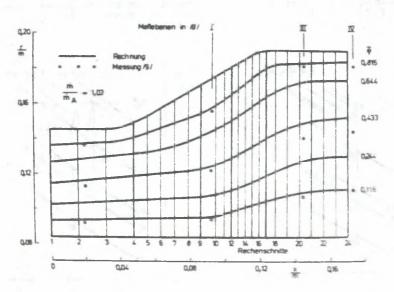


Bild 4. Meridianschnitt der Stufe II k aus [9] mit berechneten und gemessenen Stromlinienverläufer

Rys. 4. Przekrój merydionalny stopnia IIk [9] z pomierzonymi i obliczonymi współrzędnymi linii prądu

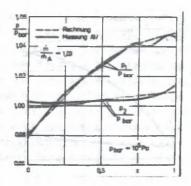


Bild 5. Berechnete und gemessene Druckverteilungen für die Stufe IIk aus [9]

Rys. 5. Obliczony i pomierzony rozkład ciśnienia dla stopnia IIk (wg [9])

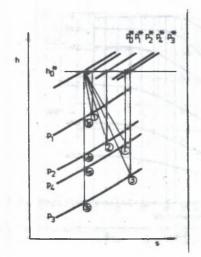


Bild 7. Zustandsverlauf im h-s-Diagramm (schematisch)

Rys. 7. Przemiany na wykresie h-s (schematycznie)

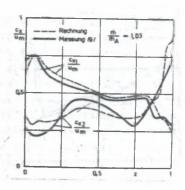


Bild 6. Berechnete und gemessene Axialgeschwindigkeitsverteilungen für die Stufe IIk aus [9]

Rys. 6. Obliczony i pomierzony rozkład prędkości osiowej dla stopnia IIk [9]

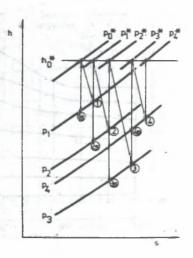


Bild 8. Zustandsverlauf im h-s-Diagramm (schematisch)

Rys. 8. Przemiany na wykresie h-s (schematycznie)

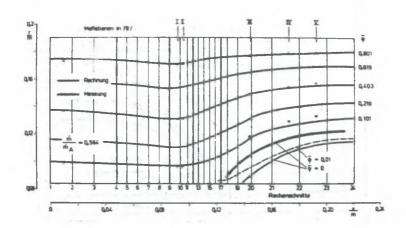


Bild 9. Meridianschnitt der Stufe II aus [9] mit berechneten und gemessenen Stromlinienverläufen bei  $\dot{m}/\dot{m}_A = 0.564$ 

Rys. 9. Przekrój merydionalny stopnia II (wg [9]) z obliczonym i pomierzonym przebiegiem linii prądu dla  $m/m_A=0.564$ 

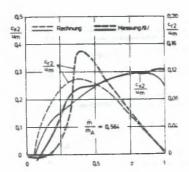


Bild 10. Berechnere und gemessene Verteilungen der Axial- und Radialgeschwindigkeit hinter der Stufe II aus [9] bei  $m/m_A$  = 0,564

Rys. 10. Obliczone i zmierzone rozkłady składowych osiowych i promieniowych prędkości za stopniem II (wg [9]) dla  $m/m_A = C.564$ 

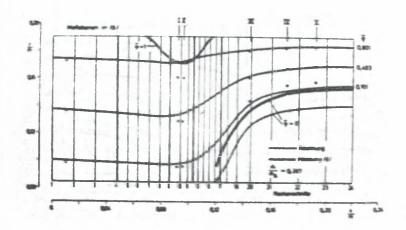


Bild 11. Meridianschnitt der Stufe II aus [9] mit berechneten und gemessenen Stromlinienverläufen bei i/i = 0.367

Rys. 11. Przekrój merydionalny stopnia II [9] s obliczonymi i smierzonymi przebiegami linii prądu dla i/i = 0.367

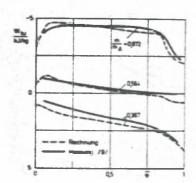


Bild 12. Technische Arbeit am Umfang über dimensionsloser Stromfunktion für drei Betriebssustände der Stufe II aus [9]

Rys. 12. Rozkłady jednostkowej pracy obwodowej dla trzech warunków pracy stopnia II (wg [9])

### LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Wolf, H. u.a.: Untersuchungen zur Berechnung der Strömung in Turbomaschinen unter Berücksichtigung der Stromlinienkrümmung im Meridianschnitt, Maschinenbautechnik, Berlin 30, (1981) 3, S. 110-114.
- [2] Wolf, H., u.a.: Fortgeschrittene aerodynamische Berechnung axialer thermischer Turbomaschinen, Energietechnik, Leipzig 34 (1984) 5, S. 167-171.
- [3] Wolf, H.: Zur aerodynamischen Berechnung von Axialverdichterstufen und zur Auslegung der Beschaufelungen, Wiss. Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, (1984) 4, S. 315-319.
- [4] Schulze, H.: Untersuchungen über den Einfluss der Meridianstromlinienkrümmung auf die Durchströmung axialer Turbinenstufen, Dissertation, Ingenieurhochschule Zittav, 1983.
- [5] Indurski, N.S. u.a.: Eine Berechungsmethode für die rotationssymmetrische Strömung in Niederdruckteilen von Dampfturbinen, Teploenergetika, Moskau (1977) 10, S. 17-22, (russ).
- [6] Teufelsberger, A.: Ventilation von Dampfturbinen bei Schwachlast, Lerrlauf und Leistungsaufnahme, VDI-Berichte (1980), Nr. 361, S. 145--152.
- [7] Šnee, J.I., Ponomarev, V.N.: Besonderheiten der Arbeit von Stufen mit Kleinem  $D_m/1$  bei geringen Belastungen, Teploenergetika, Moskau (1971) 1, S, 39-42, (russ.).
- [8] Štastny, N.: Betriebsverhältnisse einer Dampfturbine mit Endstufenventilation. Energietechnik, Leipzig (1980) 5, S. 176-180.
- [9] Ponomarev, V.N.: Untersuchung der Endstufen grosser Dampfturbinen im Arbeitsbereich von Nennlast bis Leerlauf, Dissertation, Polytechnisches Institut Charkov, 1977, (russ.).
- [10] Sauer, H.: Minderablenkung im Radialspaltbereich axialer Turbinenstufen, Maschinenbautechnik, Berlin 32, (1983), S. 210-214.
- [11] Ulm, W.: Untersuchungen zur Berechnung der Meridianstromung in Endstufen von Kondensatiinsdampfturbinen unter Berücksichtigung von Betriebzuständen mit Nabenablösung, Dissertation, Ingenieurhochschule Zittau 1987, (Manuskript).

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Tadeusz CHMIELNIAK

Wpłynęło do Redakcji w marcu 1987

PRZYCZYNEK DO OBLICZEŃ OSTATNICH STOPNI TURBIN PAROWYCH PRACUJĄCYCH Z CZĘŚCIOWYM OBCIĄŻENIEM I ODERWANIEM STRUMIENIA

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono dalsze zastosowanie metody: "Równowaga promieniowa" (RADGL, opisanej dokładnie w [1, 2]) do obliczeń osiowosymetrycznego stacjonarnego przepływu płynu nielepkiego i ściśliwego w osiowych stopniach turbinowych. Szczególną uwagę zwrócono na badamie strefy oderwania powstałej u podstawy stopnia przy jego częściowym obciążeniu. W pierwszej

części artykułu omówiono wybrane wyniki obliczeń i eksperymentu dla powietrznego stopnia modelowego.

W drugiej części opisano przedsięwzięcia doskonalące program RADGL mające na celu szerszą analizę przepływów z oderwaniem. Udoskonaloną wersję algorytmu zastosowano w obliczeniach stopnia modelowego (jego geometrię dokładnie opisano w p. 2 artykułu). Dyskusję wyników obliczeń i porównanie z danymi pomiarów zawiera p. 4 pracy.

W konkluzji stwierdzono, że zastosowana wersja programu RADGL umożliwia rozwiązanie różnych zagadnień analizy dla stopni turbinowych o mażym stowanku  $D_{\rm m}/1$ , w tym także niektórych zagadnień charakterystycznych dla częściowego obciążenia stopnia.

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ПОСЛЕДНИХ ОТУПЕНЕЙ ПАРОВЫХ ТУРБИН РАБОТАМИИХ С НЕПОЛНОЙ НАГРУЗКОЙ И ОТРЫВОМ ПОТОКА

### Pesme

В отатье представлено дальнеймее применение метода: "Радиальное равновесме" (RADGL) обстоятельно оговорено в [1, 2] для расчета осесимметричного стационарного течения невязкой и несжимаемой видкости в осевых ступенях турбины. Особое внимание обращено исследованию зоны отрыва возникией у оомнования ступени при её неполной нагрузке. В первой части статьи оговорены избранные результаты расчетов и эксперимента для воздушной модельной ступени. Во второй части описаны мероприятия совершенствующие программу с целью более обстоятельного анализа течения с отрывом. Более совершеный вариант алгоритма применён в расчетах модельной ступени (её геометрия обстоятельно описана в пкт. 2 статьи). В пкт. 4 работы оговорены результаты расчетов и сравнение с измерительными данными. В окончании установлено, что применёный вариант программы RADGL даёт возможность решении различных проблем анализа для турбинных ступеней с мажым отношением  $D_m/1$  и других проблем.