Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 89 (1998)

Heft: 2

Artikel: Strömungsberechnung für ganze Turbinen

Autor: Keck, Helmut / Drtina, Peter / Sick, Mirjam

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902043

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: 13.07.2025

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

Ein alter Traum wird Wirklichkeit: Die turbulente, dreidimensionale Strömung durch eine ganze Wasserturbine kann im Computer simuliert werden. Insbesondere Betriebspunkte weit ausserhalb des Bestpunktes lassen sich mit verblüffender Genauigkeit berechnen. Im Vergleich zum Modellversuch ist die Simulation wesentlich rascher und kostengünstiger.

Strömungsberechnung für ganze Turbinen

■ Helmut Keck, Peter Drtina und Mirjam Sick

Adresse der Autoren
Helmut Keck
Sulzer Hydro
Postfach
8023 Zürich

Peter Drtina, Mirjam Sick
Sulzer Innotec
Postfach 414
8401 Winterthur

Dreidimensionale Berechnung

Bereits seit zehn Jahren wendet Sulzer Hydro routinemässig das 3D-Euler-Verfahren zur Strömungsberechnung in Laufrädern an. Mit diesem Verfahren können dreidimensionale Strömungseffekte in beschleunigten Strömungen sehr gut wiedergegeben werden. Zahlreiche neu entwickelte Laufräder verdanken ihr ausgezeichnetes Verhalten bezüglich Wirkungsgrad und Kavitation dem 3D-Euler-Verfahren. Eine Einschränkung besteht allerdings: Das bisherige Verfahren ist reibungsfrei, das heisst, die Strömungsverluste und der Wirkungsgradverlauf über das gesamte Kennfeld können nicht berechnet werden. Um dies zu ermöglichen, muss der Schritt von der 3D-Euler-Rechnung im Laufrad allein zur 3D-Navier-Stokes-Berechnung in der ganzen Turbine gemacht werden. Dabei kann jedoch der Rechenaufwand um den Faktor 1000 (!) ansteigen (Tabelle I). Der hierdurch entstehende zeitliche und finanzielle Aufwand ist jedoch immer noch klein gegenüber demjenigen von Modellversuchen im hydraulischen Labor.

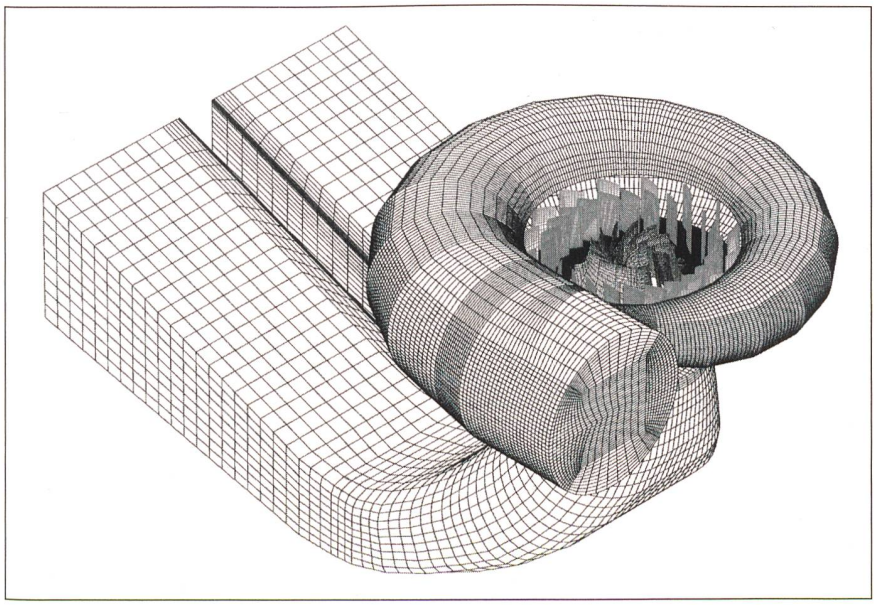


Bild 1 Erstmals konnte eine komplette Francisturbine rechnerisch simuliert werden. Hier das Rechennetz mit Spirale, Stützschaufelring, Leitschaufeln, Laufrad und Saugrohr (500 000 Knoten).

Interaktion zwischen Rotor und Stator

Bei den bisher üblichen Rechenverfahren müssen die stehenden und die rotierenden Turbinenkomponenten separat berechnet werden. Am Übergang vom Leitrad zum Laufrad sowie vom Laufrad zum Saugrohr sind Randbedingungen vorzugeben. Diese sind anfänglich jedoch nicht bekannt, sondern müssen rechnerisch oder empirisch bestimmt werden. Dies bedeutet eine mögliche Fehlerquelle und zusätzlichen Aufwand für den Benutzer des Programms.

Das Neue an dem von Sulzer eingesetzten Verfahren ist die Möglichkeit, Berechnungen in Stator und Rotor durch

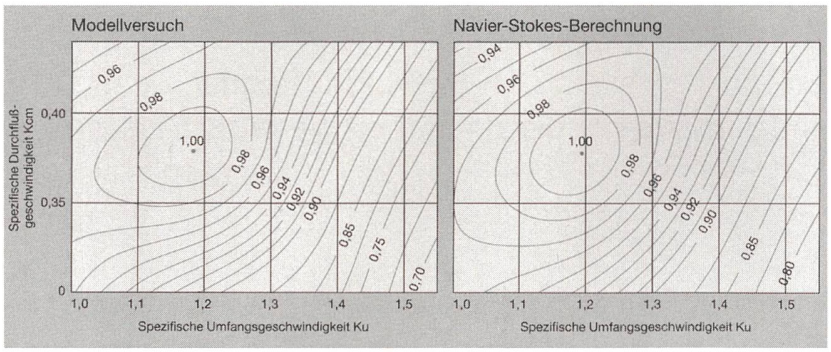


Bild 2 Vergleich des gemessenen und des berechneten Muscheldiagramms (Linien konstanten Wirkungsgrades) einer Francisturbine. Die Übereinstimmung ist verblüffend gut. Das numerische Muscheldiagramm basiert auf der Berechnung der ganzen Maschine in 14 Betriebspunkten.

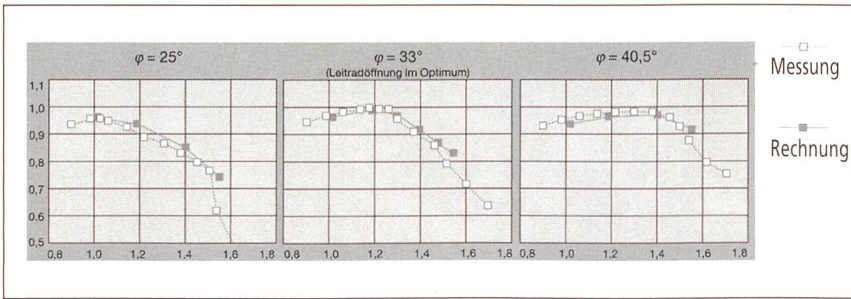


Bild 3 Relativer Turbinenwirkungsgrad für verschiedene Leitradöffnungen φ (als Funktion der spezifischen Umfangsgeschwindigkeit Ku).

sogenannte «Mixing interfaces» zu einer kompletten Maschinen- (oder Stufen-) Berechnung zu koppeln. Die Vorteile sind:

- Berechnung der Gesamtmaschine in einem einzigen Rechenschritt
- Elimination von Benutzereingriffen und damit von möglichen Fehlerquellen (insbesondere bei den Randbedingungen)
- Interaktionen (betreffend Meridianströmung) zwischen Rotor und Stator werden automatisch richtig wiedergegeben ohne die sonst nötige Überlappungstechnik.

Insbesondere bei der Modernisierung alter Kraftwerke, wo neue, leistungsfähigere Laufräder passend zu alten Komponenten optimiert werden müssen, ist die Strömungsnumerik ein im Vergleich zum Modellversuch wesentlich rascheres und kostengünstigeres Werkzeug der Entwicklungsingenieure.

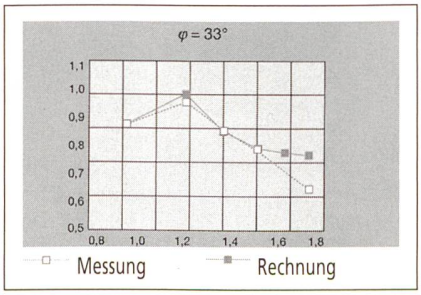


Bild 4 Relativer Saugrohr-Wirkungsgrad bei der Leitradöffnung φ = 33° (als Funktion von K_u).

Historischer Meilenstein

Weltweit erstmalig wurde eine komplette Francisturbine vom Spiraleneintritt bis zum Saugrohraustritt mit einem Navier-Stokes-Verfahren durchgerechnet. Bild 1 zeigt das Rechennetz. Für diese Turbine waren im Labor von Sulzer Hydro in Zürich umfangreiche Strömungsmessungen (unter anderem mit Lasermesstechnik) durchgeführt worden. Die Berechnungen in zahlreichen Betriebspunkten konnten somit einerseits mit detaillierten Geschwindigkeits- und Druckmessungen und andererseits mit den am Prüfstand gemessenen Turbinenkennwerten (z.B. Wirkungsgrad) verglichen werden.

Verblüffende Übereinstimmung

Die erzielte Genauigkeit der Berechnung überrascht. Erfreulich ist insbesondere, dass auch in Betriebspunkten weit ausserhalb des Bestpunktes mit grossen Rückströmzonen und entsprechend tiefen Wirkungsgraden noch gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung erzielt wurde.

Sowohl die Lage des Bestpunktes im Kennfeld als auch die spezielle Form der Wirkungsgradlinien (Muscheldiagramm, Bild 2) konnten sehr genau berechnet werden. Vergleicht man die Kennlinien für den relativen Wirkungsgrad zwischen Rechnung und Messung für verschiedene Leitradöffnungen (Bild 3), so erkennt man deutlich die gute Übereinstimmung. Lediglich bei sehr grossen Werten der spezifischen Umfangsgeschwindigkeit K_u (entspricht sehr kleinen Fallhöhen) wird die Abweichung grösser. Dort ist die reale Strömung im Saugrohr schon extrem chaotisch (am Prüfstand stark pulsierend), so dass die stationäre Rechnung gar nicht mehr genau sein kann. Dies zeigt sich auch am Vergleich der Saugrohr-Wirkungsgrade (Bild 4).

Darüber hinaus liefert die Berechnung umfangreiche Detailinformationen über lokale Strömungsphänomene, die für eine Optimierung des Turbinendesigns äusserst wertvoll sind. Bild 5 zeigt die Druckverteilung in einem Schnitt durch den Stütz- und den Leitschaufelbereich und durch einen Laufradkanal bis in den Saugrohrkonus hinein. Am Übergang von der Schaufelsaugseite zum Kranz (A) und im Wirbel unterhalb der Laufradnabe (B) sind rechnerisch die tiefsten Drücke – genau dort, wo auch am Prüfstand unterdruckbedingte Kavitationszonen auftreten.

Bild 6 zeigt das Interface zwischen Leitrad und Laufrad. Man beachte, dass eine Druckvariation in Umfangrichtung vorliegt, die Rechnung also am Übergang vom Stator zum Rotor nur eine Anpassung des absoluten Druckniveaus vornimmt.

In Bild 7 sind Stromlinien im Saugrohr gezeigt, bei Betrieb leicht ausserhalb des Bestpunktes. Deutlich erkennt man, dass sich in einem der beiden Diffusorkanäle bereits ein starker Wirbel ausbildet.

Wo sind die Grenzen?

Der relative Wirkungsgradverlauf und viele wichtige Strömungsdetails werden genau wiedergegeben, quantitativ bleibt jedoch eine gewisse Rest-Ungenauigkeit bestehen (derzeit ± 2% im absoluten Wirkungsgradniveau). Dies hängt mit der gewählten Netzverfeinerung und dem Turbulenzmodell (k-ε) zusammen. Verbesserungen in dieser Hinsicht sowie eine

Typischer Rechenaufwand des 3D-Euler-Verfahrens und des Navier-Stokes-Verfahrens auf einer Workstation (SGI, R 8000).

	Euler	Navier Stokes
Berechnete Teile	Laufrad	Ganze Turbine
Anzahl Knoten	10 000	500 000
Anzahl Unbek.	40 000	3 000 000
Rechenzeit	6 min	100 h

Tabelle I Vergleich des Rechenaufwandes.

Erweiterung auf instationäre Berechnungen zeichnen sich bereits ab.

Wo ist der Nutzen?

Der Fortschritt in der Strömungsnumerik eröffnet völlig neue Möglichkeiten:

- Bei Grossprojekten, bei denen Modellversuche zum Garantienachweis weiterhin durchgeführt werden, ergibt sich dank der Numerik ein zusätzliches Entwicklungspotential sowohl betreffend Wirkungsgrad als auch im Betriebsverhalten (Laufruhe, Kavitationssicherheit, Überlastreserven).
- Bei der Modernisierung alter Kraftwerke können neue Laufräder sogar ganz ohne Modellversuche, direkt ab numerischem Entwurf, gebaut werden (wesentliche Termin- und Kostenvorteile).
- Durch die Analyse der Strömungsverluste in der Gesamtmaschine kann die Treffsicherheit der Auslegung sowohl in der Offertphase als auch im Entwurfsstadium erhöht werden (Reduktion der Risiken).

Die hier vorgestellten Resultate der Zusammenarbeit von Sulzer Hydro und Sulzer Innotec stellen einen weiteren Meilenstein in der Entwicklung und der Anwendung modernster Werkzeuge der Strömungsnumerik auf dem Gebiet der Wasserturbinen dar.

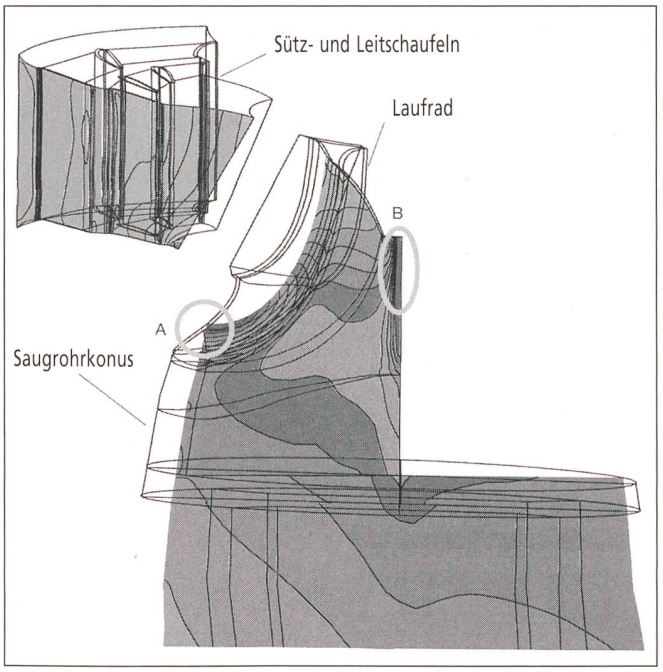


Bild 5 Druckverteilung in einem Längsschnitt durch den Strömungskanal.

A: Unterdruck am Übergang von der Schaufelsaugseite zum Kranz.

B: Unterdruck im Wirbel unterhalb der Laufradnabe.

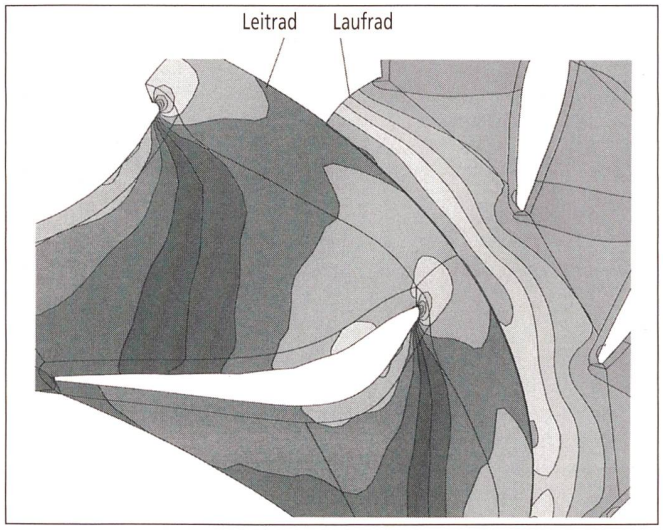


Bild 6 Druckverteilung in einem Querschnitt am Übergang vom Leitrad zum Laufrad mit «Mixing interface».

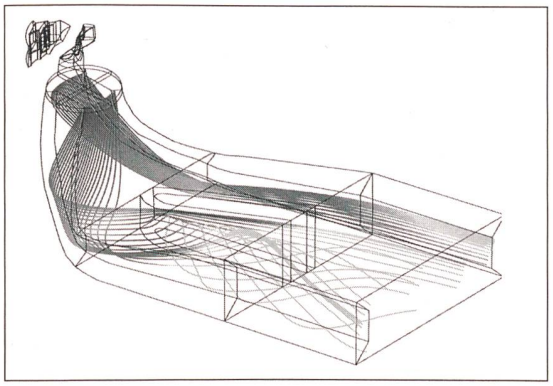


Bild 7 Stromlinien im Saugrohr bei Betrieb leicht ausserhalb des Bestpunktes (Wirbel im vorderen Diffusorkanal).

Literatur

H. Keck, P. Drtina, M. Sick: Numerical hill chart prediction by means of CFD-stage simulation for a complete Francis turbine. XVIII IAHR Symposium Hydraulic Machinery and Cavitation, Valencia, September 1996.

M. Sick, M. V. Casey, P. F. Galpin: Validation of a stage calculation in a Francis turbine. XVIII IAHR Symposium Hydraulic Machinery and Cavitation, Valencia, September 1996.

Calcul d'écoulement dans une turbine entière

Un vieux rêve devient réalité: simuler sur un ordinateur un écoulement turbulent tridimensionnel à travers une turbine hydraulique entière. En particulier, des points de fonctionnement s'écartant largement du point optimal peuvent être calculés avec une précision étonnante. Comparativement aux essais sur modèle, la simulation est sensiblement plus rapide et moins coûteuse.

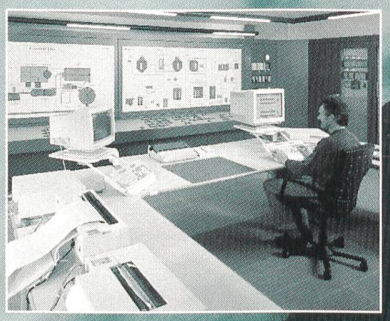
rittmeyer

MESS- UND LEITTECHNIK
FÜR DIE WASSER- UND
ENERGIEWIRTSCHAFT

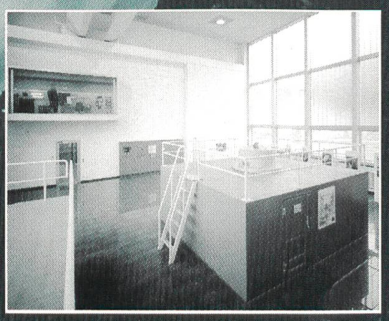
Nicht
nur
in **Wasserkraftwerken**
sondern

in allen Branchen der Wasser-
und Energiewirtschaft überzeugen wir durch
Qualität und Kompetenz

Wasser-, Gas-,
Elektrizitäts-
und Fernwärme-
Versorgungen



Kläranlagen
und Kanalisations-
systeme



Wasserkraftwerke,
Flussregulierungen,
Hydrographie
und Talsperren

Rittmeyer AG, Grienbachstrasse, Postfach 2143, CH-6302 Zug, Telefon 041 767 10 00, Telefax 041 767 10 70