

# Strömungsberechnung für ganze Turbinen

Autor(en): **Keck, Helmut / Drtina, Peter / Sick, Mirjam**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **89 (1998)**

Heft 2

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-902043>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

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

## Adresse der Autoren

Helmut Keck  
Sulzer Hydro  
Postfach  
8023 Zürich

Peter Drtina, Mirjam Sick  
Sulzer Innotec  
Postfach 414  
8401 Winterthur

■ Helmut Keck, Peter Drtina und Mirjam Sick

## 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.

## 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

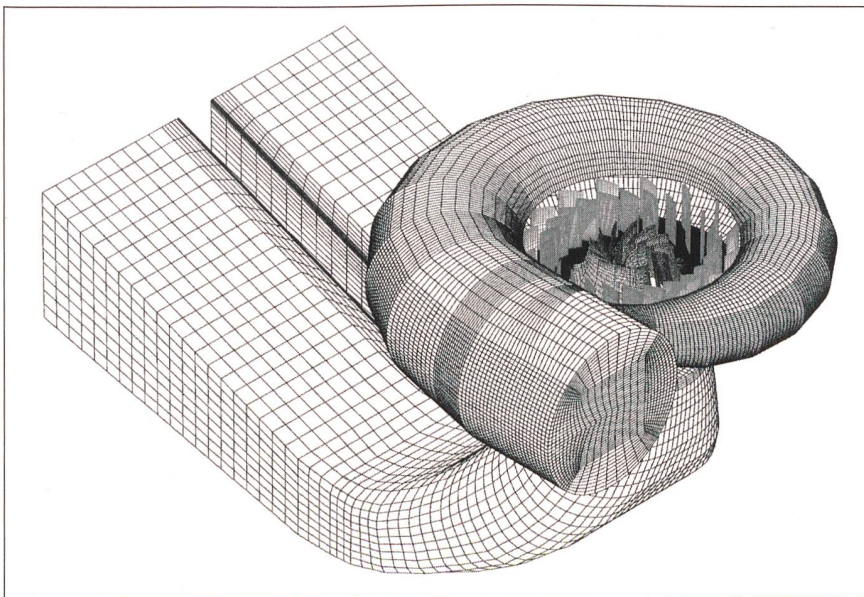
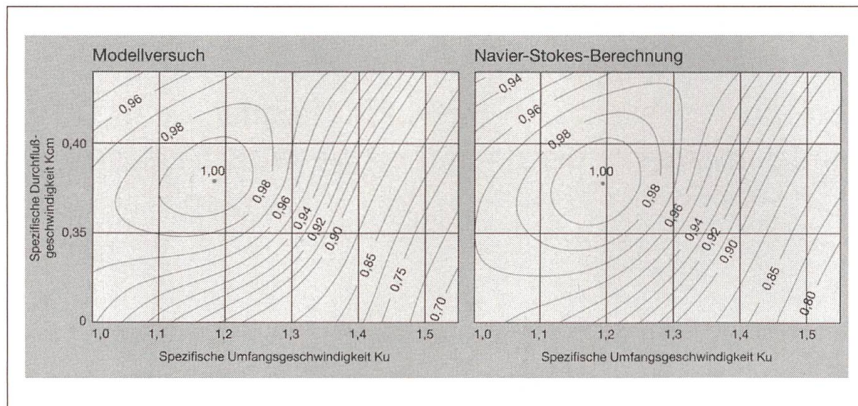
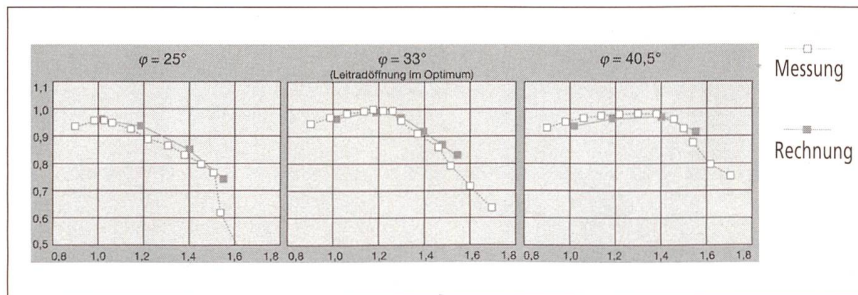


Bild 1 Erstmals konnte eine komplette Francisturbine rechnerisch simuliert werden. Hier das Rechenetz mit Spirale, Stützschaufelring, Leitschaufeln, Laufrad und Saugrohr (500 000 Knoten).





**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  $\varphi$  (als Funktion der spezifischen Umfangsgeschwindigkeit  $K_u$ ).

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 Kompo-

nenten optimiert werden müssen, ist die Strömungsnumerik ein im Vergleich zum Modellversuch wesentlich rascheres und kostengünstigeres Werkzeug der Entwicklungingenieure.

## Historischer Meilenstein

Weltweit erstmalig wurde eine komplette Francisturbine vom Spiraleintritt bis zum Saugrohraustritt mit einem Navier-Stokes-Verfahren durchgerechnet. Bild 1 zeigt das Rechnetz. Für diese Turbine waren im Labor von Sulzer Hydro in Zürich umfangreiche Strömungsmessungen (unter anderem mit Laser-messtechnik) 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).

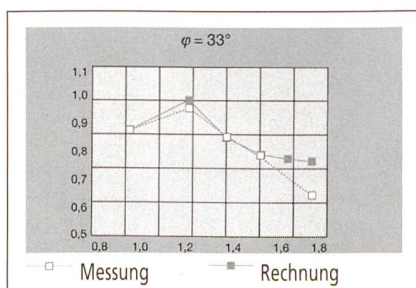
Darüber hinaus liefert die Berechnung umfangreiche Detailinformationen über lokale Strömungsphänomene, die für eine Optimierung des Turbinendesigns äusserst wertvoll sind. Bild 5 zeigt die Druckverteilung in einem Schnitt durch den Stütz- und den Leitschaufelbereich und durch einen Laufradkanal bis in 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 Umfangsrichtung 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  $\pm 2\%$  im absoluten Wirkungsgradniveau). Dies hängt mit der gewählten Netzverfeinerung und dem Turbulenzmodell ( $k-\epsilon$ ) zusammen. Verbesserungen in dieser Hinsicht sowie eine



**Bild 4** Relativer Saugrohr-Wirkungsgrad bei der Leitradöffnung  $\varphi = 33^\circ$  (als Funktion von  $K_u$ ).



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

	Euler	Navier Stokes
Berechnete Teile	Laufblad	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 Laufblätter 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.

## 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.

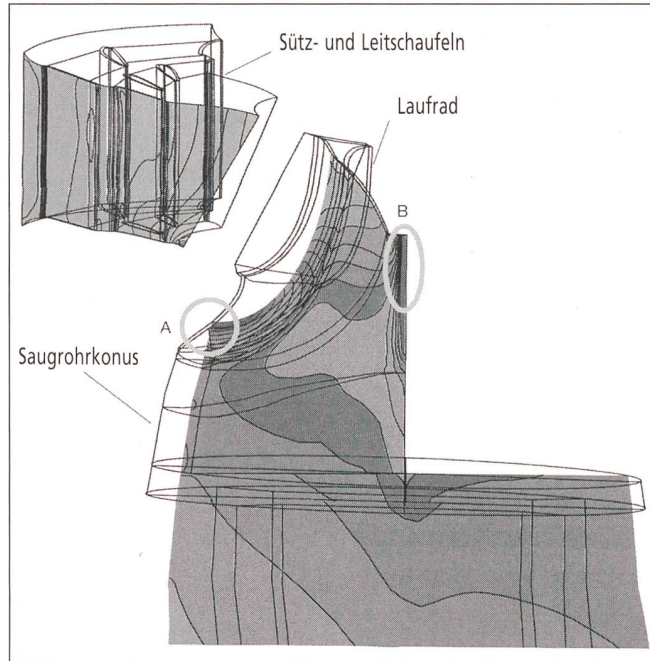


Bild 5 Druckverteilung in einem Längsschnitt durch den Strömungskanal.

A: Unterdruck am Übergang von der Schaufelsaugseite zum Kranz.

B: Unterdruck im Wirbel unterhalb der Laufblattnabe.

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

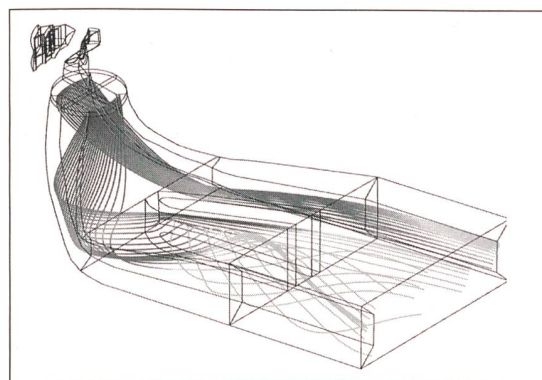
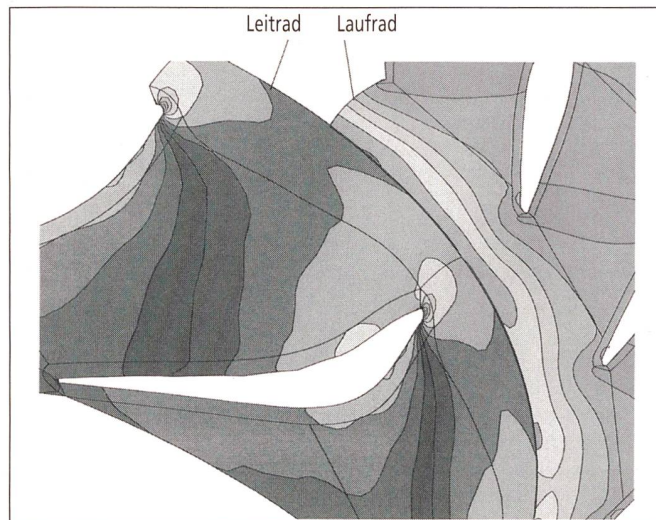


Bild 7 Stromlinien im Saugrohr bei Betrieb leicht ausserhalb des Bestpunktes (Wirbel im vorderen Diffusorkanal).

## 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

M E S S - U N D L E I T T E C H N I K  
F Ü R D I E W A S S E R - U N D  
E N E R G I E W I R T S C H A F T

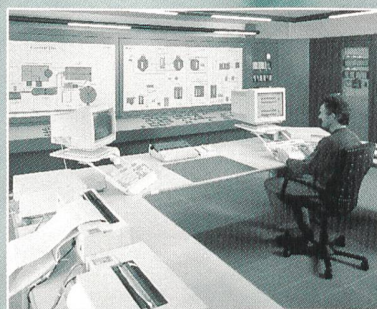
Nicht  
nur

in **Wasserkraftwerken**  
sondern

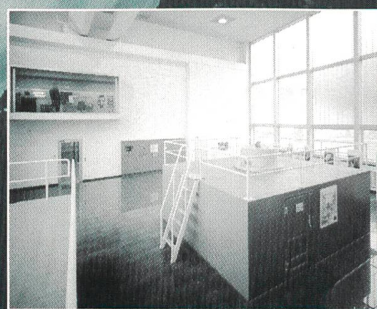
in allen Branchen der Wasser-  
und Energiewirtschaft überzeugen wir durch  
Qualität und Kompetenz



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



Kläranlagen  
und Kanalisations-  
systeme



Wasserkraftwerke,  
Flussregulierungen,  
Hydrographie  
und Talsperren