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: 88 (1997)

Heft: 2

Artikel: Sandabraison im Griff

Autor: Drtina, Peter / Krause, Matthias

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902171

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: 08.07.2025

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

Die Lebensdauer hydraulischer Turbinen wird vor allem durch Sandabrasion beeinflusst. Mit Hilfe numerischer Strömungsberechnungen ist heute die Vorhersage von Abrasion möglich. Die durch Feldversuche abgestützten rechnerischen Vorhersagen erlauben den gezielten Einsatz konstruktiver Massnahmen zu ihrer Beherrschung.

Sandabrasion im Griff

■ Peter Drtina, Matthias Krause

Abrasionsvoraussagen

Bis zu 30 Volumenprozent Sand und Schlamm führt beispielsweise der Gelbe Fluss im Süden Chinas nach intensiven Niederschlägen mit sich. Entsprechend katastrophal sind die Auswirkungen an den Bestandteilen von Wasserturbinen. Überall in den expandierenden Märkten (China, Indien, Südamerika), aber auch in der Schweiz, klagen die Kraftwerkbetreiber über starke Sandabrasion. Sie entsteht durch den Aufprall von Sandpartikeln auf Komponenten der Wasserturbinen. Wenn ein Sandpartikel beispielsweise auf die Leitschaufel einer Francisturbine prallt, so führt das, abhängig von der Schlagkraft des Partikels, zum Abtrag einer bestimmten Menge des Materials an der Oberfläche (Bild 1).

Sulzer Innotec ist es in Zusammenarbeit mit Sulzer Hydro gelungen, mit Hilfe eines 3D-Rechenmodells Abrasionsvoraussagen zu erhalten. Sie gehen weit über den allgemeinen Stand der Technik hinaus. Gezielte konstruktive Massnahmen zur Verschleissminderung werden dadurch möglich. Erheblich längere Lebensdauer der Bestandteile von Wasserturbinen und grössere Leistungsfähigkeit sind der Nutzen daraus.

F+E-Projekt Sandabrasion

Bisher zielte der Kampf gegen Sandabrasion in erster Linie auf die Entwicklung und den Einsatz verschleissmindernder Werkstoffe. Weil jedoch Abrasionsvorgänge auch stark auf strömungsphysikalische Bedingungen zurückzuführen sind, liegt in der Optimierung dieser strömungstechnischen Grössen ein weiteres Potential zur Steigerung der Standzeit und der Verfügbarkeit von Wasserkraftanlagen. Modellversuche im Labormassstab können zwar gewisse Aufschlüsse geben, erfordern jedoch erheblichen Kosten- und Zeitauf-

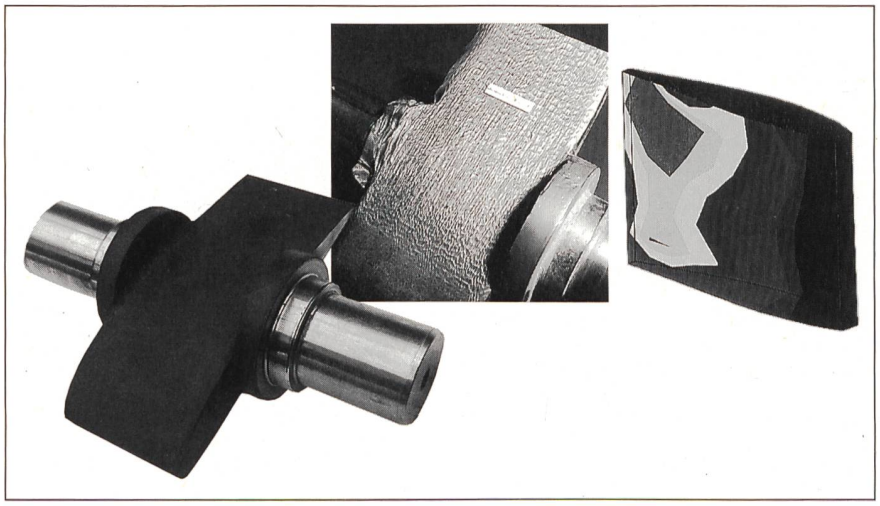


Bild 1 Neue und verschlissene Leitschaufel zu einer Francisturbine und das Bild der 3D-Abrasionsmesswerte. Mit zunehmendem Verschleiss nimmt der Wirkungsgrad der Maschine ab.

Adressen der Autoren
Peter Drtina, Sulzer Innotec, 8401 Winterthur
Matthias Krause, Sulzer Hydro, 6010 Kriens

wand. Deshalb wurde nach einem Rechenmodell gesucht, mit dem sich Abrasionsvorgänge simulieren lassen.

Zunächst wurden im Rahmen des F+E-Projekts «Sandabrasion» von Sulzer Innotec die Fähigkeiten eines vorhandenen Programms zur Simulation partikelbeladener Strömungen geprüft. Das geschah an einem implementierten Erosionsmodell. Im Anschluss daran wurden die Strömung und die Abrasion anhand einer Quasi-2D-Betrachtung des Leitschaufelrings einer Francisturbine getestet. Leitschaufelstellung, Anströmwinkel, Turbulenzgrad und Partikelgrösse wurden variiert und die resultierenden Veränderungen im Abrasionsbild registriert. Dabei zeigte sich, dass alle untersuchten Parameter einen wesentlichen Einfluss auf das Abrasionsmuster ausüben. Der Vergleich mit gemessenen Abtragstiefen an Schaufeln der simulierten Anlage zeigte eine gute qualitative Übereinstimmung. Die Untersuchungen bewiesen, dass die Abrasion an hydraulischen Maschinen erfasst werden kann, wenn die Randbedingungen ausreichend genau bekannt sind.

Ausgeklügeltes Rechenmodell

Im Anschluss an die erfolgversprechenden Ergebnisse der 2D-Berechnungen folgte die numerische Simulation eines 3D-Strömungsfelds zur Vorhersage der Flugbahn von Sandpartikeln in der Strömung. Alle Berechnungen wurden unter Anwendung des TASCflow-Navier-Stokes-Strömungscodes auf einer IBM RS/6000-Workstation vorgenommen. Der genannte Strömungscode basiert auf der Finite-Volumen-Methode. Der abrasive Verschleiss, erzeugt durch die Wechselwirkungen zwischen den Partikeln und den Wänden, wurde über ein Verschleissmodell berechnet.

Die Sandpartikeln und das Strömungsmedium können als Zweiphasensystem angesehen werden. Die Sandpartikeln bilden dabei die dispergierte Phase. Eine häufig angewandte Methode zur Beschreibung solcher Zweiphasenströmungen basiert auf der Lagrangeschen Betrachtungsweise. Einzelne virtuelle Partikeln werden auf ihrem Weg durch das Strömungsfeld unter Berücksichtigung der Turbulenzen verfolgt, wobei jedes Partikel einer grossen Anzahl realer Sandpartikeln entsprechen kann. Über Mittelungsprozeduren lässt sich aus den Bahnen vieler Einzelpartikeln das Verhalten der gesamten dispergierten Phase bestimmen. Die Wechselwirkungen der Sandpartikeln untereinander und ihr rückwirkender Einfluss auf die Strömungsturbulenz werden dabei vernachlässigt.

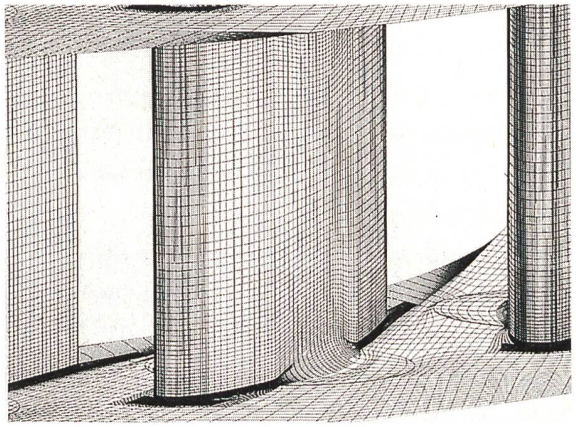


Bild 2 Der zu simulierende Leitschaufelring, dargestellt durch das Oberflächengitter, das an der Nase und an den Kanten verfeinert wurde.

Der Untersuchung lag eine rein turbulente Strömung zugrunde. Die momentane Flüssigkeitsgeschwindigkeit wurde in eine mittlere und eine schwankende Komponente zerlegt. Zwei identische Partikeln, die zu verschiedenen Zeiten an demselben Punkt im Strömungsfeld starten, bewegen sich mit der fluktuierenden Flüssigkeitsgeschwindigkeit auf getrennten Bahnen fort. Auf diese Weise bewirkt die schwankende Komponente der Flüssigkeitsgeschwindigkeit die Dispersion von Partikeln in einer turbulenten Strömung.

Geometrische Grundlagen

Die in den Rechnungen verwendete Leitschaufelgeometrie stimmt mit derjenigen der Feldversuche genau überein. Geometrieangepasste Berechnungsnetze konnten für unterschiedliche Leitschaufelstellungen durch Änderung bestimmter Parameter automatisch erzeugt werden. Der relevante Strömungsbereich wurde durch ein dreidimensionales Gitter in einzelne Elemente aufgeteilt. Schaufelsockel und Spalte wurden mitberücksichtigt. Alle Gitterelemente, die sich im Inneren der Schaufel oder des Schaufelsockels befinden, wurden für die Strömung gesperrt. Zunächst wurde ein grobes Gitter erstellt, das durch sukzessives Einbetten mehrerer feiner Teilnetze die Strömungsgebiete nahe der Schaufeloberflächen – insbesondere im Bereich der Leitschaufelnase besser auflöst (Bild 3).

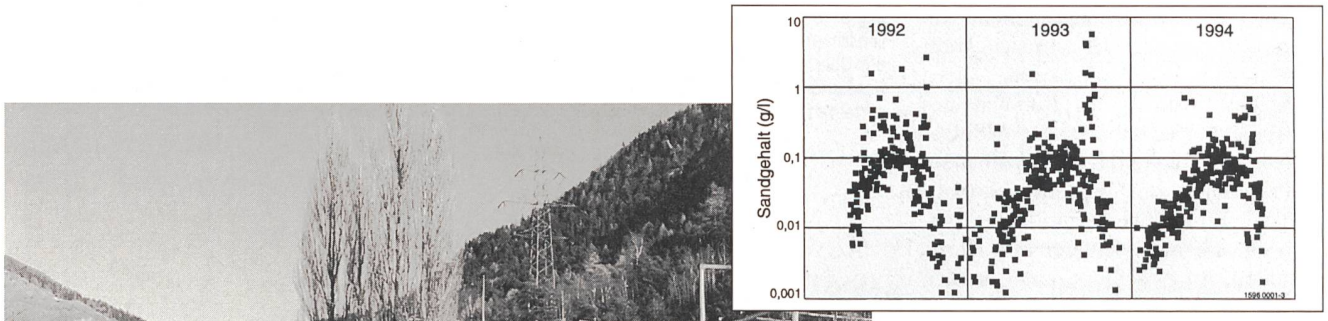
Das interessierende Strömungsgebiet wird nach aussen durch eine Anzahl Flächen begrenzt, auf denen die sogenannten Randbedingungen definiert werden. Im Eintrittsbereich der Strömung wird der Geschwindigkeitsvektor vorgegeben. Im vorliegenden Fall waren Geschwindigkeitsbetrag und Anströmwinkel konstant. Zusätzlich werden in diesem Bereich die für das Rechenmodell notwendigen Turbulenzparameter definiert. Im Austrittsbereich wurde lediglich der mittlere Druck vorgegeben. Periodische Randbedingungen sorgen für die Kopplung der Randflächen in Umfangsrichtung des Leitschaufelrings. An allen festen Oberflächen wird das logarithmische Wandgesetz verwendet. Es beschreibt die Geschwindigkeitsverteilung eines strömenden Fluids in unmittelbarer Nähe einer Wand und koppelt die turbulente Kernströmung mit einer festen Oberfläche, an der alle Geschwindigkeitskomponenten den Wert Null annehmen.

Die Sandpartikeln können an festen Wänden reflektiert werden (wie im vorliegenden Fall angenommen), kleben bleiben oder sogar verschwinden. Durch die Eintritts- und Austrittsregionen können sie das Strömungsfeld verlassen.

Die meisten Partikeln liegen typischerweise im Durchmesserbereich von 20 bis 100 µm. Für die Berechnungen wurden Partikeln mit Durchmessern von 30 µm, 60 µm und 80 µm als repräsentative Klassen ausgewählt. Zuströmung und Turbulenzintensität wurden gemäss den realen Strömungsbedingungen gewählt.

Durch Feldversuche untermauert

Um die Aussagefähigkeit der Simulationsergebnisse beurteilen zu können, wurden – in enger Zusammenarbeit mit dem schweizerischen Kraftwerk Mörel – Feldversuche an einer Francisturbine durchgeführt. Zu Beginn und am Ende des dreijährigen Feldversuchs wurde das Verschleissbild von drei der zwanzig Leitschaufeln vermessen. In Verbindung mit täglich ermittelten Sandkonzentrationen im Wasser (Bild 3) und an verschiedenen Tagen gemessenen Partikelgrössenverteilungen ermöglichte dies aussagefähige Resultate. Die Daten aus diesen Feldversuchen wurden den Ergebnissen aus den Simulationen gegenübergestellt.



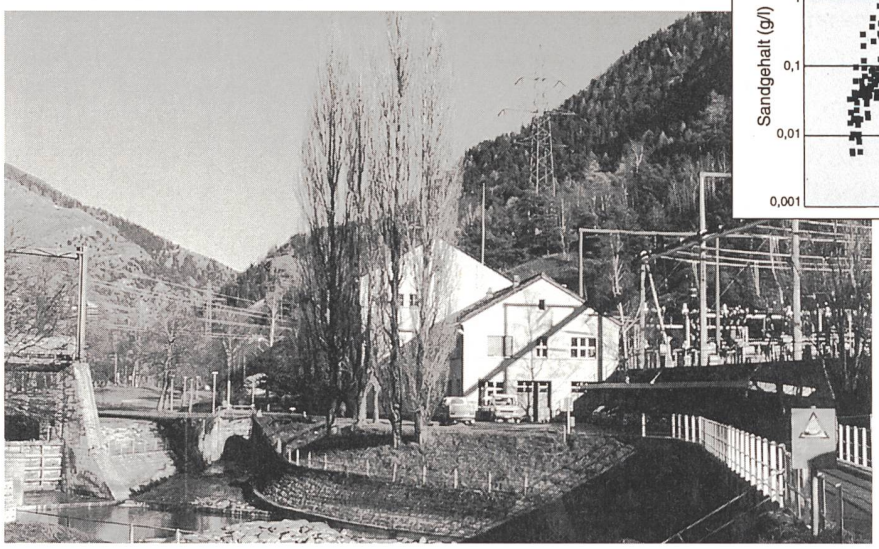


Bild 3 Je nach Jahreszeit und Niederschlagsmenge variierte der Sandanteil im Wasser des Kraftwerks Mörel, wie die Messungen der Rhone Werke AG zeigen. Das Abrasionsbild an den Leitschaufeln, das zu Beginn und am Ende des dreijährigen Feldversuchs ermittelt wurde, zeigt sehr gute Übereinstimmung mit der 3D-Vorhersage.

Überraschende Übereinstimmung

Die komplexe Geometrie der Leitschaufel, die einschliesslich Sockel und Spalt zwischen Schaufel und Schutzring modelliert wurde, lässt bei der numerischen Simulation ein stark dreidimensionales Strömungsfeld entstehen. Die auftretenden Wirbelstrukturen führen zu einer komplexen Wechselwirkung zwischen Flüssigkeit und Partikeln, die das Erosionsbild massgeblich beeinflusst. Die sehr gute Übereinstimmung mit dem Feldversuch, die gerade auch für lokal begrenzte Erosionserscheinungen erzielt wird, beweist, dass das numerisch ermittelte Abtragsbild die Verhältnisse in der realen Turbine gut widerspiegelt (Bild 4).

Dass die numerische Simulation für derartige Anwendungsfälle eine verlässliche Vorhersage erlaubt, zeigen diese Ergebnisse deutlich. Sie können direkt in den Konstruktionsprozess einfliessen, so dass die Turbine schon in einem frühen Stadium abrasionsarm ausgelegt werden kann. Stark exponierte Oberflächen, deren Abrasionsbelastung nicht durch Änderung der Geometrie beeinflusst werden können, lassen sich durch SXH-Beschichtungen (Cermet oder Keramik) schützen, welche die Lebensdauer der Turbine verlängern.

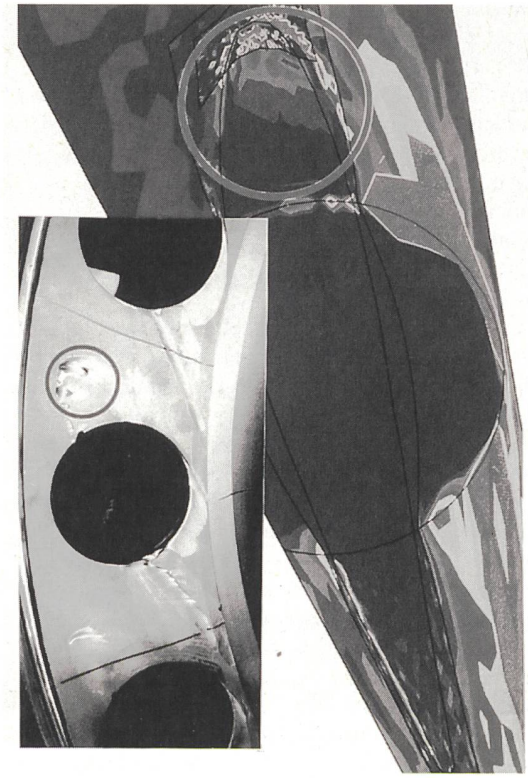


Bild 4 Vergleich zwischen simulierter und tatsächlicher Abrasion auf dem Schutzring der Francisschaufel. Die Wirbel, die sich im Bereich des Spalts zwischen Lagerring und Schaufel bilden, führten zu erhöhtem Verschleiss.

Motivation zur Fortsetzung

Die ermutigenden Resultate demonstrieren das Vorhersagepotential der numerischen Simulationsberechnungen. Sollen neben den qualitativen Erosionsverteilungen auch Aussagen über den quantitativen Abtrag gemacht werden können, muss das Erosionsmodell verfeinert und durch gezielte experimentelle Untersuchungen gestützt werden. Dann lassen sich im nächsten Schritt verbesserte Lebensdauervorhersagen auch für komplette hydraulische Turbinen ermitteln.

Erosion due au sable sous contrôle

C'est avant tout l'érosion due au sable qui influence la durée de vie des turbines hydrauliques. Grâce à des calculs quantitatifs du flux, il est de nos jours possible de prévoir l'érosion. Les prévisions calculées et fondées sur des essais de champ permettent d'appliquer des mesures constructives visant à contrôler l'érosion sableuse.