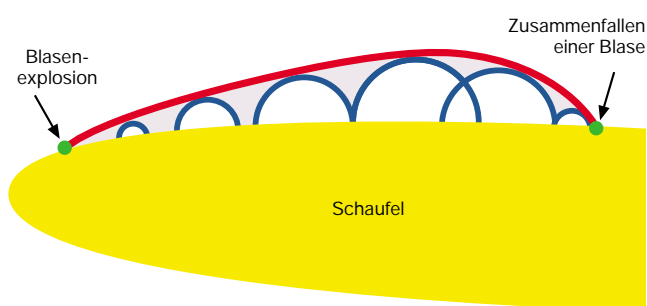


Numerische Vorhersage der Kavitation: Verbesserung der Pumpenkonstruktion

PHILIPPE DUPONT
SULZER PUMPS

Zunehmende Anforderungen an die Leistung moderner Kreiselpumpen haben die Kavitation zum Hauptbegrenzungsfaktor der Pumpenentwicklung gemacht. Sulzer Pumps kann nun das Kavitationsverhalten unter Anwendung einer neu entwickelten Methode im Konstruktionsprozess berücksichtigen. Dies hilft, das Saugvermögen zu verbessern und Erosion und Schwingungen zu verringern, speziell bei Pumpen hoher spezifischer Saugzahl.



1 ■ Kavitation tritt auf, wenn Flüssigkeit wegen Unterdruck verdampft und sich explosionsartig Blasen bilden.

Die Hülle der Blase entspricht der Form eines Hohlraums an der Schaufel einer Pumpe. Kavitation kann schwere Beschädigungen verursachen.

Die Forderung nach Kostenreduktion und somit nach höherer Leistung pro Volumeneinheit hat zu einem Umdenken in der modernen Pumpenkonstruktion geführt. Bei der traditionellen Vorgehensweise wird versucht, die Kavitation möglichst zu vermeiden, um einer Beschädigung des Laufrads vorzubeugen. Heute berücksichtigen die Pumpenkonstrukteure bei der Festlegung der Schaufelform zunehmend den Kavitationsbeginn und seine Auswirkung auf das dreidimensionale

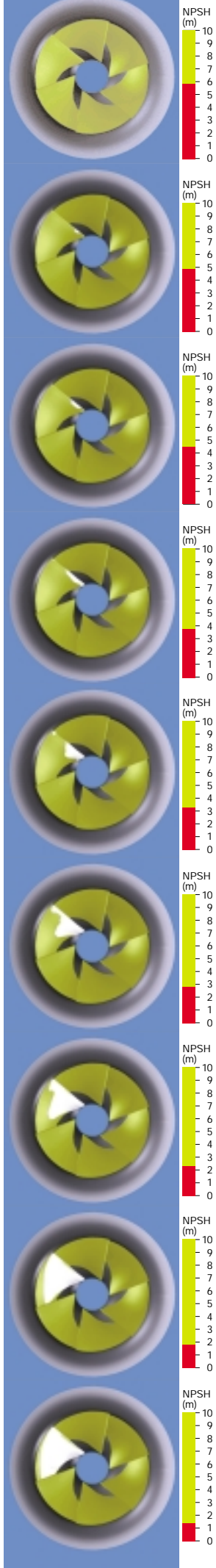
Strömungsverhalten. Die klassischen, seit Jahrzehnten angewandten eindimensionalen Konstruktionsregeln reichen nicht mehr aus, und deshalb besteht ein großer Bedarf an genaueren numerischen Methoden zur Vorhersage des Kavitationsverhaltens von Pumpen.

VERBESSERUNG DES SAUGVERMÖGENS

Die Anwendung numerischer Hilfsmittel zur Konstruktion und Optimierung der Pumpenhydraulik ist heutzutage Standard in der Industrie. Bis jetzt hat sich diese Optimierung durch bessere Beherrschung von Rückströmungen und Verminderung der Sekundärströmungen vor allem auf den Wirkungsgrad und die Stabilität der Förderhöhenkurve konzentriert. Zunehmend hat sich jedoch die Kavitation zu einem erheblichen Begrenzungsfaktor in der Pumpenkonstruktion entwickelt. Nichtsdestoweniger wurden nur wenige Versuche unternommen, die Kavitation mit numerischen

Mitteln zu verringern. Meistens beschränkt sich die Optimierung auf Änderungen des Schaufelprofils und eine feinere Anpassung der Schaufel-Eintrittswinkel aufgrund von Ergebnissen, die bei kavitationsfreien Strömungsanalysen mit Methoden der numerischen Strömungssimulationen (CFD) erhalten wurden. Während dieser Ansatz normalerweise hilft, den Kavitationsbeginn zu verzögern, unterstützt er den Konstrukteur nicht bei der Verbesserung des Saugvermögens der Pumpe. Dieses hängt stark davon ab, wie sich die Kavitation entlang der Schaufel als Funktion des Druckniveaus entwickelt und wie weit sie die Leistung der Pumpe beeinträchtigt.

Eine Optimierung des Saugvermögens ist nur möglich, wenn man die Auswirkung einer Schaufelformänderung auf den Kavitationsverlauf steuern und dabei vorhersagen kann, ob dieser Kavitationsverlauf die Förderhöhe der Pumpe beeinträchtigt. Aus diesem Grund braucht es eine genaue und schnell-



2■ Die Simulation zeigt die Bildung eines Hohlraums als Funktion der verfügbaren Saughöhe einer Radialpumpe ($n_q = 55$) bei Teillast.

le Methode zur Vorhersage der dreidimensionalen Hohlraumbildung und des damit verbundenen Leistungsabfalls. Dies gilt besonders für die Konstruktion von Pumpen hoher spezifischer Saughöhe, bei denen ein ruhiger Lauf unter Teillast nur durch Optimierung der Schaufelform erhalten werden kann, wobei das dreidimensionale Strömungsverhalten vor dem Laufrad zu berücksichtigen ist.

NUMERISCHE SCHNELLMETHODE

Einige gängige CFD-Codes bieten zweiphasige Strömungsmodelle, die einen Phasenwechsel im Strömungsberechnungscode erlauben, um die Kavitation simulieren zu können. Diese Methoden sind sicherlich in der Lage, die an der Entstehung der Kavitation beteiligten Phänomene realistisch abzubilden, ihre Anwendung ist jedoch kompliziert. Wegen der langen Berechnungszeit entspricht dieses Verfahren nicht den Anforderungen während des Konstruktionsablaufs.

Zur Vorhersage der Kavitation bei Pumpen verwendet Sulzer Pumps eine vereinfachte Version einer Hohlraum-Grenzflächen-Nachführungsmethode, die im Laboratorium für Hydraulikmaschinen an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Lausanne entwickelt wurde. Diese Methode passt die Hohlraumform iterativ an, um einen vorgegebenen Zustand zu erreichen, bei dem es sich um eine spezifische Geschwindigkeit oder einen bestimmten Druck an seiner Grenzfläche handeln kann.

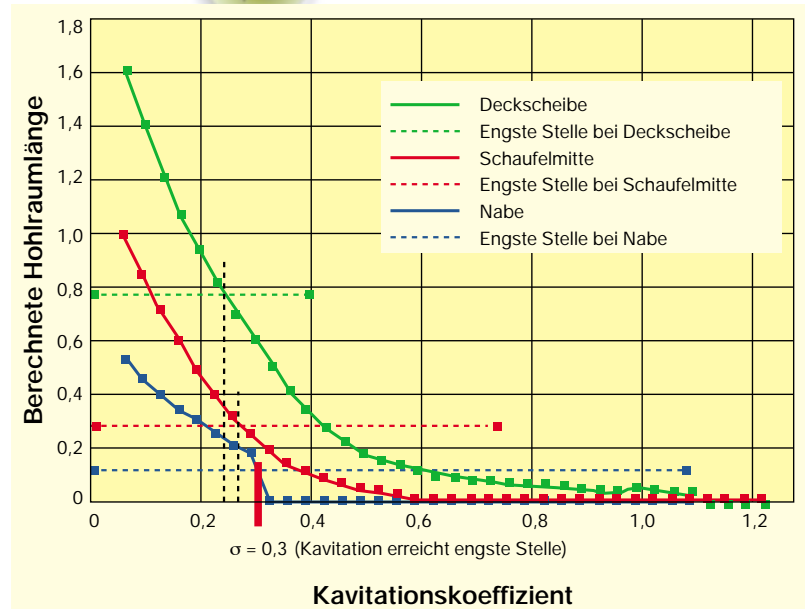
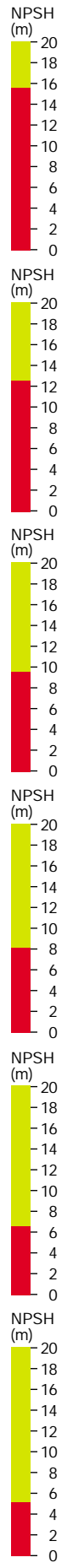
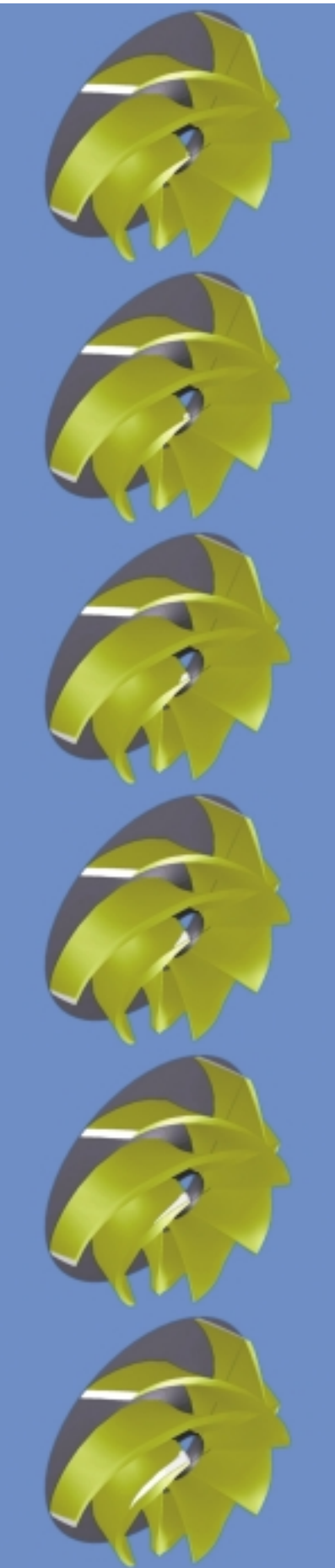
Versuche zeigen, dass die Form des Hohlraums mit einer schnellen,

nicht iterativen Formel, der bekannten Rayleigh-Plesset-Gleichung, bestimmt werden kann, solange die Entstehung des Hohlraums die Hauptströmung nicht stark beeinträchtigt. Die Bedingung wird in den meisten Fällen nahezu erfüllt, wenn der Hohlraum nicht die Kanalverengung zwischen den Schaufeln erreicht.

Bei dieser Methode ergibt ein häufig verwendetes Strömungsberechnungs-Programm, das die Navier-Stokes-Gleichungen für gemittelte Reynoldszahlen auflöst, eine kavitationsfreie Druckverteilung im Strömungsfeld des Laufrads. Dann wird eine typische Kerngröße gewählt, die ein Blasenwachstum einleiten könnte. Entlang der Maschenlinien des Berechnungsnetzes wird die Kerngröße mit dem kritischen Radius, entsprechend dem Mindestdruck, verglichen. Bei zu geringer kritischer Größe für ein explosives Wachstum der Kerne wird die Berechnung nicht ausgeführt, und der betreffende Punkt wird als kavitationsfrei oder als Ausgangspunkt für die Entstehung isolierter Blasen angesehen. Die Berechnung des Wachstums und des Zusammenfallens der Blasen ergibt eine schnelle Abschätzung des Ablösens des damit in Verbindung stehenden Hohlraums sowie der Stelle, an der er sich schließt. Die Hohlraumlänge wird dann durch die Stelle definiert, an der die Blasen in sich zusammenfallen. Ihre Hüllkurve über dem Profil entspricht annähernd der Form des Hohlraums (Bild 1■).

Der Kavitationskoeffizient bei Blasenentstehung, der einen wichtigen charakteristischen Wert für die Beschreibung des Betriebsverhaltens der Pumpen darstellt, ist als die erste nicht Null betragende





4[■] Die Länge des Hohlraums wird abhängig vom σ -Wert bestimmt, der sich aus der Beschleunigung aufgrund der Schwerkraft, des NPSH-Wertes und der Peripheriegeschwindigkeit am Laufrad-Einlass ergibt. Hier wird ein σ -Wert von 0,3 vorhergesagt. Mit dieser Information ist es möglich, den Arbeitsbereich der Pumpe genauer vorauszusagen.

Hohlraumlänge entlang dem Schaufelabstand definiert. Wegen der Oberflächenspannung und der dynamischen Wirkung der Blasen entspricht dieser Wert nicht dem Mindest-Druckkoeffizienten entlang der Schaufel. Deshalb kann der Anfangskavitationskoeffizient nicht nur aufgrund des Mindestdrucks vorhergesagt werden, der sich aus dem kavitationsfreien Zustand errechnet.

WENIGER SCHWINGUNGEN UND EROSIONEN

Mit Hilfe dieses neuen Hilfsmittels können die Ingenieure die Entwicklung der Länge eines Hohlraums mit dem NPSH-Wert (Net Positive Suction Head) unter Berücksichtigung der viskosen, turbulenten und dreidimensionalen Beschaffenheit der Strömung in einer Pumpe berechnen. Damit

lässt sich die Beeinträchtigung der Förderhöhe durch die sich entwickelnde Kavitation voraussagen. Abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit kann sich die Kavitation an der Saugseite (Bild 2[■]) oder an der Druckseite der Schaufeln (Bild 3[■]) entwickeln. Es muss angemerkt werden, dass bei Teillast die Beeinträchtigung der Förderhöhe meistens dadurch verursacht wird, dass der Hohlraum die engste Stelle zwischen den Schaufeln an der Nabe selbst dann erreicht, wenn die Entwicklung des Hohlraums an der Deckscheibe viel früher beginnt als an der Nabe (Bild 4[■]). Das liegt daran, dass die engste Stelle weiter stromabwärts zur Deckscheibe hin positioniert ist, was die Bildung eines größeren Hohlraums vor Erreichen der engsten Stelle zwischen den Schaufeln ermöglicht. Dies zeigt die Notwendigkeit auf, die Hohlraumlänge als Funktion des Kavitationskoeffizienten genau zu berechnen, um die damit verbundene Beeinträchtigung der Förderhöhe vorhersagen zu können.

3[■] Die Simulation zeigt die Bildung eines Hohlraums entlang der Druckseite der Schaufeln als Funktion der verfügbaren Saughöhe einer Radialpumpe ($n_q = 55$) bei Überlast.

Ein solches Verfahren kann auch die Zuverlässigkeit von Pumpen hoher spezifischer Saugzahl wesentlich verbessern, da es eine bessere Vorhersage der Auswirkung eines möglichen Einlauf-rückflusses bei Teillast auf das Kavitationsverhalten erlaubt. Kavitation in Verbindung mit Einlauf-rückfluss ist eine der möglichen Ursachen für Schwingungen unter Teillast. Wenn dies im Entwicklungsprozess vermieden werden kann, ist eine Erweiterung des Pumpenarbeitsbereiches möglich.

Diese Methode hilft dem Pumpenkonstrukteur, das Saugvermögen der Laufräder durch eine genaue Vorhersage der Auswirkungen geometrischer Änderungen zu verbessern.

Die genaue Voraussage der Hohlraumlänge wird ebenfalls zur besseren Abschätzung der Erosionsrate an verschiedenen belasteten Betriebspunkten verwendet und dient auf diese Weise der genaueren Vorhersage des erforderlichen NPSH-Wertes für sicheren Betrieb bei verringertem Versuchsaufwand für die Modelle.

DURCH MESSUNGEN BEWIESEN

Vor der Anwendung im industriellen Entwicklungsprozess wurde das Programm an einer Vielzahl radialer und halbaxialer Pumpen aus dem möglichen Anwendungsbereich erprobt.

Bei einer radialen Spiralgehäuse-Pumpe mit mittlerer spezifischer Drehzahl wurden die vorhergesagten und die gemessenen Hohlraum-längen miteinander verglichen (Bild 5[■]). Die numerischen Ergebnisse stimmten gut mit den gemessenen überein. Durch dieses Beispiel wird einer der Vorteile eines solchen Hilfsmittels zur Vorhersage der Kavitation illustriert: Für den Strömungskoeffizienten

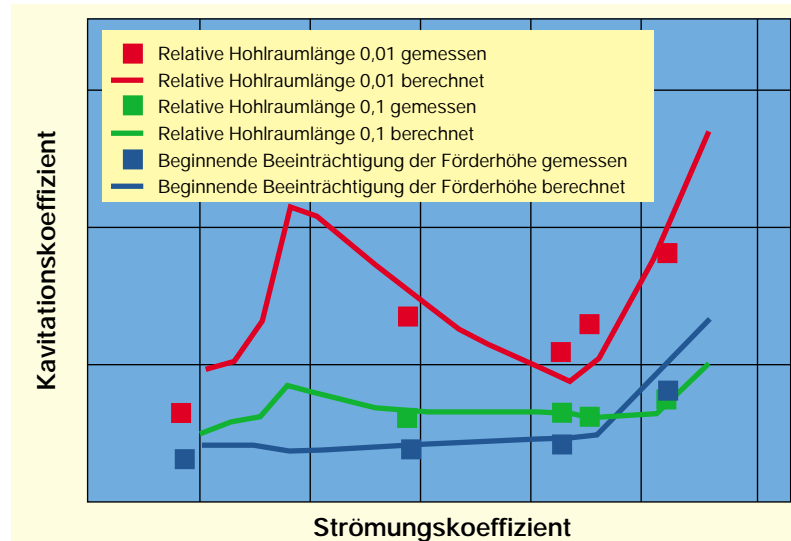
im Bereich des berechneten lokalen Maximums der sichtbaren Kavitation lagen keine Messungen vor. Aus diesem Grunde ist der erforderliche NPSH-Wert zur Erzielung eines kavitationsfreien Betriebes über den gesamten Strömungsbereich hinweg bei dieser Pumpe möglicherweise unterschätzt worden; die Pumpe kann in einem größeren Arbeitsbereich betrieben werden als bislang angenommen.

Die an einer Pumpe mit $n_q = 33$ (spezifische Drehzahl der Pumpenstufe [min^{-1}]) durchgeführten Messungen zeigen klar, dass das neue Berechnungsprogramm die Gren-

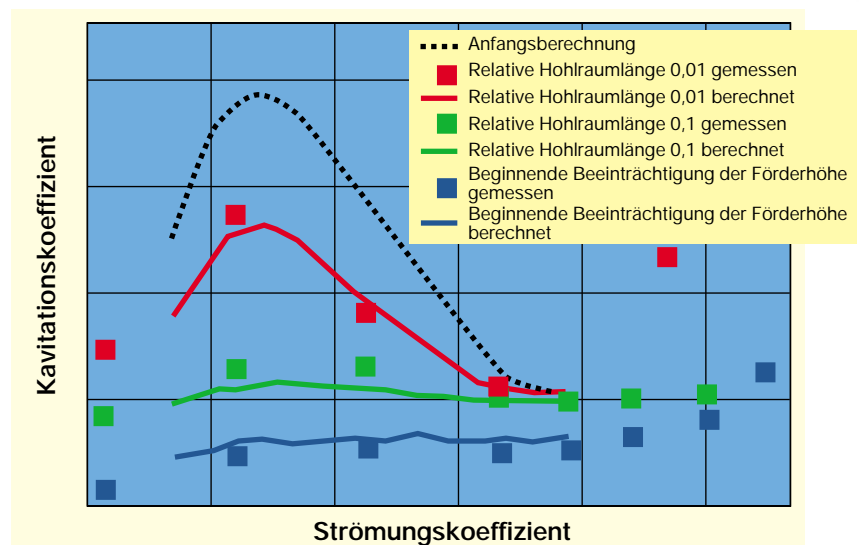
zen kavitationsfreier Betriebsbedingungen mit hoher Genauigkeit vorhersagen kann (Bild 6[■]). Dank der numerischen Vorhersage wurde die Information über den zulässigen Arbeitsbereich der Pumpe verbessert. Ω

INFO DIRECT

Sulzer Pumpen AG
Philippe Dupont
Postfach 414
CH-8401 Winterthur
Schweiz
Telefon +41 (0)52-262 40 03
Telefax +41 (0)52-262 01 80
E-Mail philippe.dupont@sulzer.com



5[■] Die Messergebnisse zeigen weitgehende Übereinstimmungen zwischen vorhergesagten und gemessenen Hohlraum-längen bei einer radialen Spiralgehäuse-Pumpe mit mittlerer spezifischer Drehzahl ($n_q = 55$).



6[■] Wie Messungen zeigen, sagt die numerische Methode die Grenze für den kavitationsfreien Betrieb einer Pumpe mit $n_q = 33$ genau vorher.

