
Vorhaben Nr. 16054 N

Entwicklung und Validierung eines Modells für die Berechnung der erosiven Wirkung von Kavitation mit CFD

Die erosive Wirkung von Kavitation in Kreiselpumpen ist Schwerpunkt des von der Aif geförderten Projektes. Basierend auf eigenen experimentellen Versuchen untersucht das Institut für Fluidsystemtechnik an einem Düsenprüfstand und an einem Pumpenprüfstand das Kavitationsverhalten. Ziel ist es, ein Kavitationsmodell zu entwickeln und dies an eine stationäre CFD-Berechnung zu koppeln, um mit ökonomisch vertretbarem Aufwand kavitierende Strömungen zu berechnen.

Die numerische Simulation der Kavitationsvorgänge erfolgte mit dem am Lehrstuhl für Fluidmechanik (FLM) entwickelten Strömungslöser NS3D. Als Vorarbeit wurde in diesem Code die Behandlung der Volumenfraktions-Transportgleichung durch ein Operator-Splitting numerisch stabilisiert. Im Laufe des Projekts wurde in Zusammenarbeit der beteiligten Institute die Kanalgeometrie für eine Versuchsdüse festgelegt, welche gute Fertigbarkeit und Zugänglichkeit, aber auch für die numerische Simulation eine gute Vernetzbarkeit mit blockstrukturierten Netzen sicherstellen sollte.

Mit Hilfe einer parametrisierten Geometriefunktion sind im Forschungsvorhaben zwei Düsenkonturen untersucht.

Mit dem NS3D-Code sind Testrechnungen zunächst für einphasige turbulente Strömungen durchgeführt worden. Zum Einsatz kommen verschiedene Zweigleichungs-Turbulenzmodelle und unterschiedliche Rechennetze. Einige in Darmstadt vermessenen Betriebspunkte wurden stationär berechnet und deren Simulationsergebnisse den Helligkeitsmittelwerten der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen gegenübergestellt. Versuch und Simulation ergaben Kavitationsgebiete vergleichbarer Ausdehnung, jedoch waren die Kavitationsgebiete in der Simulation tendenziell länger und die Druckverluste in der Düse etwas größer als im Versuch.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

In den Versuchen zeigt sich ein deutlicher Geometrieinfluss in Bezug auf die Ausbildung einer Schichtkavitation mit anschließender Wolkenkavitation. Ein Übergang von einer Schichtkavitation zur wolkenbildenden Kavitation findet bei einer kritischen Reynolds-Zahl statt, die sich in einem Sprung der Strouhal-Zahl auf ihre Obergrenze äußert. Die maximale Strouhal-Zahl und die Vollkavitation begrenzen den Betriebsbereich der Wolkenkavitation.

Das Problem der zu starken Dämpfung des zeitlich veränderlichen Kavitationsvorgangs bei den instationären Simulationen ließ sich beim blasendynamischen Modell durch die Erweiterung der Turbulenzmodellierung um einen Dilatationaldissipationsterm beheben. Die im Experiment ermittelten Frequenzen der Ablösevorgänge können in der 2D-Simulation reproduziert werden. Alternativ dazu zeigten die mit dem kommerziellen Tool Ansys CFX 11.0 unter Verwendung ähnlicher Turbulenzmodelle durchgeführte Simulationen ein mit den Versuchsergebnissen vergleichbares Kavitationsgebiet.

Anhand von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und instationären Simulationen lassen sich Störungen auf der Phasengrenzschicht erkennen. Hierbei kommt ein Verfahren zur spektralen Zerlegung dieser Störungen zu Anwendung, um die Stabilität des Systems zu analysieren. Jede Kavitationswolke besitzt ihren Ursprung bereits in der Schichtkavitation, die dort als rotierende Zylinderwalze auftritt, jedoch in ihrer Konvektionsbewegung eine U-förmige Wirbelstruktur ausbildet. Das Erosionsbild entspricht der Form der Hufeisenwirbel, deren Schenkel die Konturoberfläche berühren.

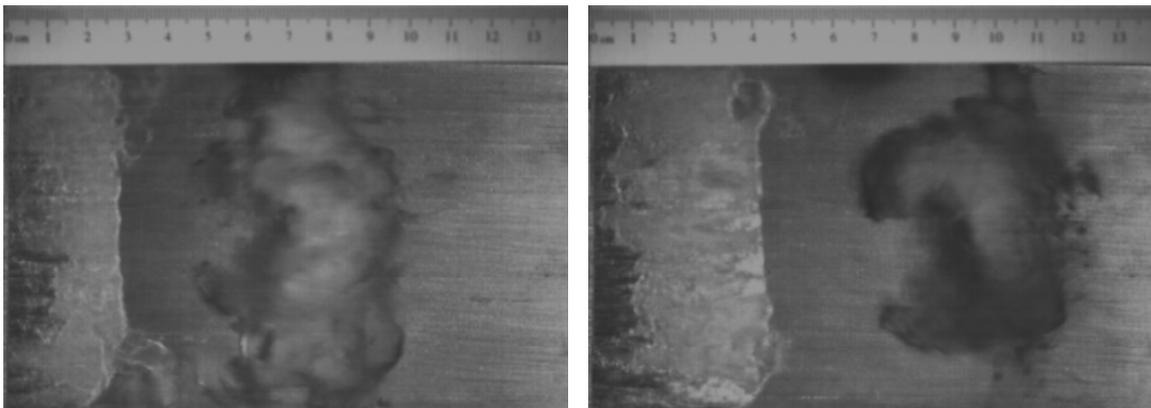


Bild 1: Aufrollen der Schichtkavitation zu einem kavitierenden Zylinder (links). Kontakt der Zylinderenden mit der Materialoberfläche und Formierung eines Hufeisenwirbels (rechts).

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Hierfür kommt ein weiterentwickeltes Pit-Count-Verfahren zur Anwendung, mit der gekrümmte und großflächige Bauteile ausgewertet werden können. Die Modellierung der Hufeisenwirbel basiert auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten, mit der sich das dynamische Verhalten und die Wechselwirkungen der Blasen wiedergeben lassen.

Des Weiteren wurden stationäre Kavitationssimulationen an einer Kreiselpumpe durchgeführt. Die Simulationen beschränken sich auf die turbulente einphasige sowie die kavitierende Strömung sowohl durch einen Schaufelkanal als auch durch die gesamte Pumpe.

Als Konvergenzkriterium für Rechnungen mit kavitierender Strömung ist der Massendefekt besser geeignet als die Residuen, da dieser meist auch bei erratischem Verlauf der Residuen einen aussagekräftigen Verlauf annimmt. Bei den Simulationen zur Erstellung der Abreißkurven zeigt sich, dass der Lehrstuhlcode am FLM ausreichend robust ist, um von einem kavitationsfreien Betriebspunkt als Ausgangslösung direkt einen Betriebspunkt im Steilabfall der Förderkurve simulieren zu können. Mit diesem Verfahren lässt sich eine konvergierende, äquivalente Lösung ermitteln. Durch anschließendes schrittweises Erhöhen des Auslassdrucks in der Simulation ist eine Berechnung der Förderhöhenabfallkurve auch mit aufsteigenden NPSH-Werten möglich. Diese Vorgehensweise hat gegenüber der bisher üblichen den Vorteil, dass sich der $NPSH_{3\%}$ -Wert und das Abreißverhalten mit einer geringeren Anzahl an Simulationsrechnungen ermitteln lassen.

Die simulierten Förderhöhenabfallkurven sind mit den am Institut für Fluidsystemtechnik (FST) in Darmstadt gemessenen verglichen. Die $NPSH_{3\%}$ -Werte in Messung und Simulation stimmen in den betrachteten Betriebspunkten gut überein. Im Teillastpunkt ergibt sich in der Simulation gegenüber der Messung eine geringe Abweichungen in der Förderhöhe. Der $NPSH_{3\%}$ -Wert weicht in Überlast geringfügig ab, wohingegen die Förderhöhe bei Teillast eine geringfügige Abweichung aufweist.

Im Laufradprüfstand bildet sich beginnend an der Schaufelvorderkante eine ausgeprägte Einzelblasenkavitation aus. Eine wolkenablösende Kavitation ist nicht zu beobachten. Untersucht sind Betriebspunkte oberhalb des $NPSH_{3\%}$ -Wertes, bei denen sich mit Pit-Count Schädigungen feststellen lassen. Die Schaufelkavitation ist durch mehrere Kavitationsgebiete gleichzeitig geprägt. So führt eine Streifenkavitation infolge Rauigkeitserhebungen sowie Ablagerungen an der Schaufelvorderkante zu einem schaufelindividuellen Kavitationsverhalten.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

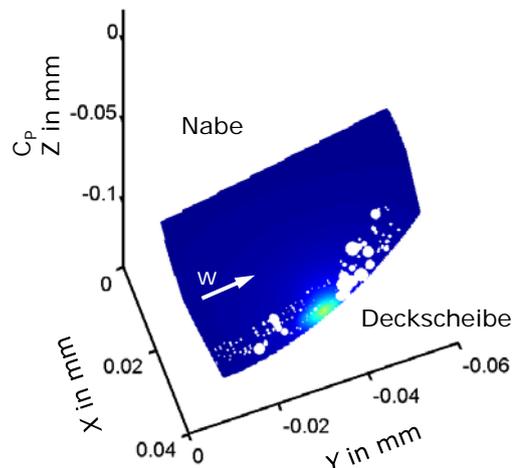
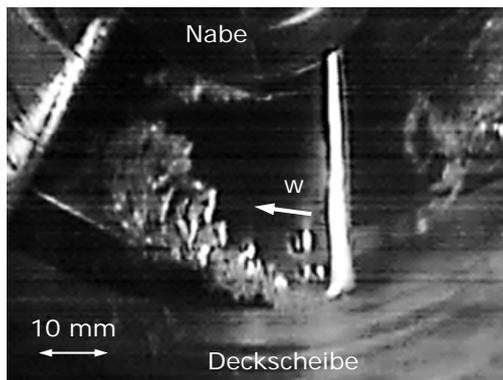


Bild 2: Kavitationsgebiet auf Laufradschaufel wird von Einzelblasenkavitation dominiert (links). Simulation der Einzelblasen und deren Wechselwirkung mit gekoppelten Rayleigh-Plesset-Gleichungen (rechts).

Am Laufradprüfstand kommt statt eines kontinuumsmechanischen Wolkenmodells wie in der Düsenströmung ein Clustermodell zu Anwendung. Mit einer örtlichen Initiierung der Keime bzw. Bläschen an der Schaufelvorderkante lassen sich verschiedene Kavitationsgebiet auf der Schaufel simulieren.

Für weitere Validierungen der Modelle am Laufrad- und Düsenprüfstand sind weitere Schädigungsversuche in mehreren Betriebspunkten notwendig. Inwieweit sich das Kavitationsverhalten auf andere Kreiselpumpen übertragen lässt, ist vor allem von der vorliegenden Kavitation abhängig. So ist auch die Anwendung des kontinuumsmechanischen Modells auf andere Maschinen möglich.

Das IGF-Vorhaben 16054 N der Forschungsvereinigung FKM wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages