

Theoretische und experimentelle Untersuchungen der Schicht- und Wolkenkavitation

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

eingereichte

D I S S E R T A T I O N

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Thomas Keil

aus Gera

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Jens Friedrichs
Tag der Einreichung:	28.01.2014
Tag der mündlichen Prüfung:	14.05.2014

Darmstadt 2014

D 17

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

Band 4

Thomas Keil

**Theoretische und experimentelle Untersuchungen
der Schicht- und Wolkenkavitation**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2014

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3014-3

ISSN 2194-9565

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Kontext

Kavitation ist ein mechanisch induziertes Mehrphasenphänomen (im Gegensatz zum thermisch induzierten Sieden), welches sowohl vom Betriebszustand eines Systems, der Gestalt des Apparates bzw. der Maschine, der Oberflächenbeschaffenheit und letztlich von der Flüssigkeit, d.h. deren Keimgehalt, Gasgehalt, Gaslösevermögen sowie Verdampfungseigenschaften abhängt.

In der mechanischen Verfahrenstechnik (Reinigung z.B. in der Halbleiterindustrie) und der Medizintechnik (Gewebeabtrag, Kavitationsblasen als Kontrastmittel in der Ultraschalldiagnose, örtlich auflösende Medikamentengabe) wird zunehmend die zeitliche und Energiefokussierung im Kavitationsprozess genutzt, wohingegen bei hydraulischen Maschinen und Anlagen diese Fokussierung zu starken Schallemissionen, Schwingungen, rotordynamischen Problemen und Erosion führen.

Diesen Problemen steht der physikalische Reichtum von Kavitationsphänomenen gegenüber. Er übersteigt den der Turbulenz bei weitem. So kennt man Wirbelkernkavitation, Blasen-, Schicht-, Wolkenkavitation, Vollkavitation, Streifenkavitation bei Gleitlagern und „Jellyfish-Streaming“ bei akustisch induzierter Kavitation. Immer ist die Phasengrenze zwischen der gasförmigen und kondensierten Phase für die Erscheinung wesentlich.

In den meisten Fällen ist Kavitation wie Turbulenz instationär und dreidimensional: Blasen wachsen, arrangieren sich zu Blasengebilden, das sind Schichten oder Wolken, und erleben in diesen aggregierten Gebilden eine nichtlineare Dynamik, die mit der nichtlinearen Blasendynamik gekoppelt ist (vgl. Buttenbender, „Über die Dynamik von Kavitationswolken“, Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik, Band 1, Institut für Fluidsystemtechnik, TU Darmstadt, 2012). Da in Kavitationswolken in besonderem Maße die angesprochene Energiekonzentration stattfindet, ist diese Kavitationsform von besonderer Bedeutung für die Verfügbarkeit von hydraulischen Maschinen und Anlagen.

II

Die Wichtigkeit der Verfügbarkeit unserer hydraulischen Infrastruktur wird uns erst dann bewusst, wenn der Transport und die Aufbereitung von Wasser ausfällt, Trinkwasser nicht verfügbar ist oder die Kanalisation versagen. Auf der anderen Seite brauchen wir den Transport von Flüssigkeiten als Wärmeträger beim Kühlen oder Heizen von Gebäuden. Letztlich kommt es bei Wasserturbinen regelmäßig zu Kavitationserscheinungen.

Forschungsfrage

Das periodische Herauslösen von Kavitationswolken aus Kavitationsschichten ist ein selbsterregter Vorgang. Selbsterregung erfordert bekanntermaßen „Schalter“. Bei Stick-Slip-Schwingung, die wir alle als Quietschen im Ohr haben, ist der Schalter die Haftbedingung zwischen zwei relativ zueinander bewegten Körpern. Bei der elektromechanischen Türklingel, die Unterbrechung des Spulenstromes und damit des magnetischen Feldes.

Die bisher nicht beantwortete Forschungsfrage, der sich Herr Keil in seiner wissenschaftlichen Arbeit stellt, lautet:

Was ist die Ursache für den Übergang von Schicht- zu Wolkenkavitation bei bestimmten Betriebszuständen und wie lässt sich dieser Vorgang beschreiben?

Die Beantwortung dieser Frage ist für den dauerhaft sicheren Betrieb einer Maschine von hoher Bedeutung und damit von hoher technischer und ökonomischer Relevanz. Es ist von hohem Nutzen, dem Maschinenhersteller oder Betreiber ein klares Kriterium an die Hand zu geben, welcher Betriebszustand für eine gegebene Maschinengestalt und Maschinenoberfläche als kritisch zu bewerten ist.

Daneben adressiert Herr Keil weitere Forschungsfragen zur Wolkendynamik und zur Kavitationserosion. Die Wolkendynamik ist allerdings in der oben angesprochenen Dissertation von Herrn Dr.-Ing. Buttenbender in überzeugender Weise behandelt, so dass die Frage nicht erneut gestellt werden muss. Die Fragen zur Kavitationserosion ist dagegen noch nicht ausreichend beantwortet und Gegenstand aktueller Forschung an anderer Stelle und der TU Darmstadt.

Methoden und Ergebnisse

Die Moderne und die Entwicklung der technischen Welt sind im Wesentlichen empiristisch, d.h. durch Erfahrung und Beobachtung gegründet. Der Bodensatz der Erfahrung sind Massenerhalt, Impulssatz, Drallsatz, Energiegleichung, Zweiter Hauptsatz, Maxwellsche Gleichung(en). Gemeinsam mit Materialgesetzen und kinematischen Beziehungen werden die Erfahrungssätze diskretisiert, so dass - so die Vorstellung - für beliebige physikalisch-technische Situationen ein virtuelles Abbild geschaffen werden kann. Dies gelingt dann, wenn die wesentlichen physikalischen Effekte richtig modelliert werden. Ist entweder die Physik noch nicht richtig verstanden, oder ist es einfach praktisch unmöglich „unzählige“ Blasen einer Schicht oder Wolke im Detail zu berechnen, dann hilft der Ingenieur sich zuweilen mit Hypothesen, die mehr praktischen Erwägungen als physikalischen Einsichten entsprungen sind.

Die in käuflich erwerblichen CFD-Programmen (CFX, Fluent) implementierten Kavitationsmodelle gehören zur Klasse der „homogenen“ Modelle, d.h. die oben angesprochene Phasengrenze wird nicht diskretisiert. In den besprochenen Programmen wird die Blasendynamik aufgrund ihrer nicht zu lösenden Nichtlinearität aus praktischen Erwägungen ignoriert. Es werden Verdampfungsraten eingeführt, die durch „Fitting“ an Messdaten angepasst werden. Sofern dies im Bewusstsein der Unzulänglichkeiten der Modelle geschieht, ist dagegen nichts einzuwenden. Der Erkenntnisfortschritt und das Stützen auf Modellaussagen werden dann aber gefährdet, wenn der Anfänger die Modellwelt, d.h. die virtuelle Welt, als die einzige Welt ansieht, die er beobachten kann. Das alleinige Berufen auf numerische Ergebnisse führt dazu, dass Empirismus und Rationalismus in der virtuellen Welt miteinander verschmelzen. In der letzten Konsequenz kann die Technik dadurch nicht beschrieben und schon gar nicht verbessert werden.

Diesen Weg geht Herr Keil nicht. Das Fundament der Arbeit von Herrn Keil ist eine Vielzahl von Experimenten, die an einer konvergent-divergenten Düse gewonnen wurden. Die Gestalt der Düse ist derart, dass (i) die Strömung sehr gut beobachtbar ist, (ii) die Gestalt sich sehr gut durch Längenverhältnisse beschreiben lässt, (iii) sich wesentliche Phänomene der Schicht- und Wolkenkavitation im Versuch darstellen lassen und (iv) der Betriebsparameterraum aufgespannt durch Kavitations- und Reynoldszahl ausreichend groß ist. Dabei stellt bekanntermaßen die Kavitationszahl den dimensionslosen Abstand zum Dampfdruck dar.

IV

Die Reynoldszahl als Verhältnis von Trägheitskräften zu viskosen Kräften kann im Kontext von hydraulischen Maschinen vorteilhaft als inverse dimensionslose Flüssigkeitsreibung oder auch Größe der Komponente interpretiert werden.

Der wesentliche Unterschied zu einer Laufradströmung besteht darin, dass in der Strömung kein Auftriebskörper, d.h. keine gebundene Zirkulation anzutreffen ist. Daher hat Herr Keil ergänzende Versuche an der ETH Lausanne durchgeführt. Hier wurde ein auftriebsbehaftetes Einzelprofil im Kavitationskanal untersucht.

Herr Keil beobachtete die räumlich und zeitlich größten Skalen der kavitierenden Strömungen, d.h. Schichtlängen, Wolkengrößen sowie die Geschwindigkeit des die Schicht unterwandernden Flüssigkeitsfilms, der im englischen und leider auch im deutschen Sprachraum irreführend als „Jet“ bezeichnet wird. Weiterhin beobachtet Herr Keil Wolkenablösefrequenzen und Oberflächenschädigungen. Letzteres untersucht er sehr zeitaufwendig, indem er die akkumulierte plastische Deformation einer Weichmetalloberfläche für jeden Betriebspunkt auf das Neue vermisst.

Alle Ergebnisse sind durch Herrn Keil dimensionsanalytisch verallgemeinert, d.h. befreit von künstlichen Maßsystemen dargestellt. Dadurch wird die Dimension des Parameterraums bei dem behandelten dynamischen, mechanischen Problem um drei reduziert. Ein aus meiner Sicht wesentliches Ergebnis der experimentellen Arbeit von Herrn Keil sind die Stabilitätskarten, die den Übergang von Schicht- zu Wolkenkavitation als Funktion von Kavitations- und Reynoldszahl darstellen (vgl. Abbildung 4.12 bis 4.14). Die Sorgfalt und der Aufwand für die durchgeführten Versuche sind nicht zu unterschätzen. Hinter jedem Punkt in den genannten Abbildungen verbirgt sich eine Unmenge von Rohdaten, die zum Teil mittels Bilderkennungsalgorithmen, zum Teil händisch ausgewertet wurden.

Wesentlich ist, dass erstmals der Einfluss des Betriebspunktes oder der Anlagengröße (beides wird durch die Reynoldszahl beschrieben) auf das Phänomen der Wolkenkavitation sehr klar hervortritt. Bei gleichem dimensionslosen Abstand zum Dampfdruck kann eine Modellmaschine Schichtkavitation zeigen, wohingegen in der Großausführung bei größerer Reynoldszahl Wolkenkavitation vorherrschen kann.

Derzeit ist kein Kavitationsmodell in der Lage dieses wichtige physikalische Geschehen ohne „curve fitting“, d.h. ohne Kalibration allein axiomatisch begründet vorherzusagen.

In der Folge der empirischen Untersuchung stellt Herr Keil gemeinsam mit mir die Hypothese auf, dass der Übergang von Schicht- und Wolkenkavitation dann gegeben ist, wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Films größer als die Wachstumsgeschwindigkeit der Schicht ist. Die kritische Reynoldszahl als Funktion der Kavitationszahl, d.h. die Stabilitätsgrenze, ergibt sich demnach aus der Hypothese gleicher mittlerer Geschwindigkeiten für beide Vorgänge.

In der Folge entwickelt Herr Keil zwei voneinander unabhängige Modelle, eines für die Ausbreitung des angesprochenen Flüssigkeitsfilms unter der Kavitationsschicht und eines für das Entstehen und das Wachsen der Kavitationsschicht. Beide Modelle sind derart in der Literatur nicht zu finden und schaffen ein wesentlich vertieftes Verständnis für die Vorgänge kavitierender Strömungen. Es wird deutlich, dass die Kavitationsschicht nicht stationär, sondern überaus lebendig ist. Auf der einen Seite wird die Schicht - so das asymptotische Schichtmodell von Herrn Keil - permanent mit neuen Blasen „gefüttert“.

Die Blasen entstehen aus Keimen mit einer von der Reynoldszahl unabhängigen Bildungsrate stromab einer Rauheit. Die Blasengröße ist von gleicher Größenordnung wie die der Rauheit.

Mit Bedacht ist dieser Satz hervorgehoben, da er aus meiner Sicht die einzige wesentliche Hypothese in der Arbeit von Herrn Keil darstellt¹. Die Blasen folgen einander wie Soldaten, die mit der Hauptströmungsgeschwindigkeit in die Schlacht ziehen, wobei alle die Gewissheit haben in der ersten Linie zu kollabieren. Die Front (nicht der Strom an Blasen) kommt zur Ruhe, wenn die sich aus der Blasendynamik ergebende Kollapszeit gleich der inversen Bildungsrate ist. Dieser Vorgang geschieht asymptotisch, woher der Name „asymptotisches Schichtmodell“ resultiert. Die Übereinstimmung der Modellvorhersage ist in Anbetracht der Komplexität des Vorgangs erstaunlich gut.

¹Die Überprüfung dieser Hypothese ist Gegenstand der aktuellen Forschung des Nachfolgers von Herrn Keil, Herrn Groß. Heute vermuten wir zwei verschiedene Mechanismen, zum einen durch Diffusion kontrollierten Vorgang der bei Ölströmungen als dominant vermutet wird und zum anderen ein Aufziehen von Kavitationskeimen in Wirbelkernen von Scherschichten im Nachlauf von Rauheiten oder Strömungskanten.

VI

Gleiches gilt für das Filmmodell zu sagen. Es ist ein ganz klassisches strömungsmechanisches Modell für eine Einphasenströmung und berücksichtigt durch die Reibung an der benetzten Oberfläche die viskosen Einflüsse und damit den Reynoldszahl-Einfluss, welcher (s.o.) in gleichem Maße Betriebspunkt wie Bauteilgröße widerspiegelt.

Das Filmmodell ist ein schönes Beispiel dafür, wie falsche Begriffe das Denken beeinflussen. Glücklicherweise gelingt es Herrn Keil sich von dem Begriff „Jet“ zu lösen, der in den Köpfen der meisten Forscher verankert ist. Oben wurde gesagt, dass nach dem Modell von Herrn Keil die Schicht vom Schichtbeginn permanent mit neuen Blasen „gefüttert“ wird. Auf der anderen Seite „knabbert“ der Film vom anderen Ende, d.h. der Filmfront permanent an derselben.

Zu den schönen Modellvorstellungen konnte Herr Keil nur durch ein sehr vertieftes Studieren der Erscheinungen in seinen zeitlich hochauflösenden Filmen kommen. Abschließend bleibt also festzustellen, dass der Empirismus immer noch eine wesentliche Erkenntnisquelle ist und das Experiment heute wieder zunehmend Bedeutung erlangt.

Peter Pelz
Darmstadt, am 23.04.2014

Danksagung

Während meiner vierjährigen Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fluidsystemtechnik der TU Darmstadt entstand die vorliegende Arbeit. Die Dissertation selbst ist jedoch nicht nur die Tat eines Einzelnen, sondern wurde durch die Mithilfe vieler Personen ermöglicht.

Meinen besonderen Dank widme ich dem Leiter des Instituts für Fluidsystemtechnik, Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz, der mich an seinem Institut aufgenommen hat und mir damit die Gelegenheit gab, auf dem hochinteressanten Gebiet der Kavitation zu forschen. Ich bedanke mich bei ihm für die Übernahme des Hauptreferates, die vielen Anregungen, die wissenschaftlichen Diskussionen und ganz besonders für die gewonnenen Erfahrungen.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens Friedrichs, Leiter des Instituts für Flugantriebe und Strömungsmaschinen der TU Braunschweig, bedanke ich mich für die Übernahme des Korreferates und die konstruktiven Hinweise zum Inhalt meiner Arbeit.

Herzlich bedanke ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Johannes Buttenbender, der mich an seinem umfassenden Wissen über die Strömungsmechanik teilhaben lies und für die stets fruchtende Zusammenarbeit und konstruktiven Diskussionen.

Weiterhin bedanke ich mich bei meinen ehemaligen Kollegen. Hervorheben möchte ich hier Herr Dr.-Ing. Martin Dimitrov und Herr Dipl.-Ing. Sebastian Lang, die mich unter anderem bei der Weiterentwicklung der Pit-Count-Vorrichtung und -auswertung unterstützten. Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Gerhard Ludwig, der mir während der Institutszeit stets konstruktive Ratschläge und freundschaftliche Hinweise gab. Mein herzliches Dankeschön gilt auch Frau Silke Wallner, die mich vor allem mit organisatorischen Hinweisen und Ratschlägen unterstützte, sowie der Institutswerkstadt, die mit ihrem Engagement meine experimentellen Arbeiten ermöglichten.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei meinen Studenten, die ich im Laufe der Zeit betreute und die mit ihren Arbeiten die Dissertation bereichern.

Meinen besonderen Dank möchte ich zum Schluss meiner Familie, vor allem meiner Frau Sarah und meinen Eltern aussprechen, die mir bei den Korrekturen der Arbeit halfen und mir während der Promotionszeit stets beistanden.

VIII

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, abgesehen von den in ihr ausdrücklich genannten Hilfen, selbständig verfasst habe.

Thomas Keil
Darmstadt, im Januar 2014

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Hydrodynamische Kavitation	7
2.1	Bedeutung und Stabilität der Keime	7
2.2	Schicht- und Wolkenhistorie	14
2.3	Definition des Kavitationszustandes	17
2.4	Strömungsumschläge im Kavitationsverhalten	19
3	Hypothese und Modellbildung	24
3.1	Schichtstabilität	24
3.1.1	Stabilitätskriterium	24
3.1.2	Modellansatz zur Schichtkavitation	27
3.1.3	Filmmodell zum Re-Entrant Jet	44
3.2	Modell der Wolke	56
3.2.1	Die zwei Hauptklassen der Wolkenmodellierung	56
3.2.2	Modell zur Kavitationswolke	58
3.2.3	Potential weiterer Wolkenformen	63
3.2.4	Einflüsse ausgewählter Parameter	66
4	Experiment und Validierung	76
4.1	Prüfstände und experimentelles Vorgehen	76
4.2	Schichtkavitation und Stabilität	81
4.2.1	Experimentelle Datenermittlung	81
4.2.2	Schichtlänge	83
4.2.3	Charakteristische Geschwindigkeiten	84
4.2.4	Wolkenablösefrequenz und Stabilität	87
4.2.5	Zirkulation	93
4.3	Wolkenkavitation und Erosion	95
	Zusammenfassung	107

A	Versuche	115
A.1	Fehleranalyse und Fehlerabschätzung	115
B	Simulationen	119
B.1	Sphärische Wolke	120
B.2	Toroidale Wolke mit wenig Interaktion	121
B.3	Toruswolke mit mittlerer Interaktion	122
B.4	Toruswolke mit hoher Interaktion	123
B.5	Toruswolke mit mittlerer Interaktion und Zirkulation	124
B.6	Toruswolke im Kavitationskanal	125