
Versuchsbedingungen bei Kavitations- messungen

Numerische und experimentelle Analyse von Einflüssen der Versuchsbedingungen bei Kavitationsmessungen an Kreiselpumpen

Dipl.-Ing. Nuri Hamadeh

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens Nr. 14865 N/1, welches aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert wurde, erarbeitet.



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Prof. Dr.-Ing. Peter Pelz

Verwendete Symbole

Basissystem

Die erste Spalte der folgenden Liste zeigt die im Text verwendeten Symbole für die auftretenden physikalischen und mathematischen Größen. In der zweiten Spalte wird die Bedeutung des Symbols beschrieben. Die Dimensionsformel jeder physikalischen Größe ist als Potenzprodukt der Basisgrößen Länge (L), Masse (M), Zeit (T), Temperatur (Θ), Stoffmenge (N), Strom (I) und Lichtstärke (J) in der Spalte 3 angegeben.

Symbol	Bedeutung	Dimension
$NPSH$	Net Positive Suction Head	L
$NPSHA$	Available Net Positive Suction Head	L
$NPSHR$	Required Net Positive Suction Head	L
$NPSH_{3\%}$	Net Positive Suction Head bei 3% Förderhöhenabfall	L
$p_{l,\infty}$	statischer Flüssigkeitsdruck	$M L^{-1} T^{-2}$
p_v	thermodynamischer Dampfdruck	$M L^{-1} T^{-2}$
$\Delta p_{krit.}$	Zugfestigkeit	$M L^{-1} T^{-2}$
q	Fördergrad	–
Q	Volumenstrom	$L^3 T^{-1}$
Q_{opt}	Volumenstrom im Auslegungspunkt	$L^3 T^{-1}$
t	Zeit	T
V	Volumen	L^3

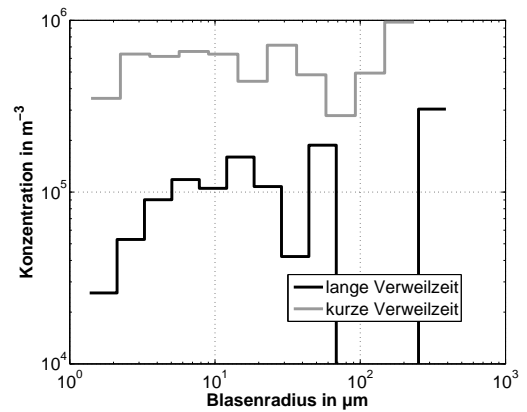
Indices

Bedeutung

∞	Größe in der unbeeinflussten Umgebung
groß	großer/ langer Kreislauf
i	Kavitationsbeginn
klein	kleiner/ kurzer Kreislauf
l	Flüssigkeit

1 Zusammenfassung

Es wurden mit experimentellen, numerischen und theoretischen Methoden die Einflüsse der Versuchsbedingungen bei Kavitationsmessungen an Kreiselpumpen untersucht. Hierzu wurde das am Fachgebiet Fluidsystemtechnik bestehende Messgerät In-situ-Düse weiterentwickelt und dessen erstmaliger Einsatz in einem laufenden Kreiselpumpenversuchsstand ermöglicht. Im Zuge dessen wurde ein Auswerteverfahren zur Ermittlung der kavitationsspezifischen Eigenschaften von Wasser aus der gemessenen Zugfestigkeit entwickelt. Mit dem um eine zweite Düse erweiterten Mess-



system wurde die Erfassbarkeit der Einflüsse der in hydraulischen Versuchsständen typischerweise variierenden Parameter Luftgehalt, Volumenstrom und Verweilzeit auf die Keimgrößenverteilung untersucht. Die gewonnenen Ergebnisse machen die unterschiedliche Signifikanz der unter dem Begriff Versuchsbedingungen zusammengefassten Einflussparameter deutlich. So hat sich die Verweilzeit des Wassers im Versuchskreislauf in Kombination mit der Kreislaufkonfiguration als der dominierende Einfluss auf die Wasserqualität erwiesen. Die dabei festgestellte begrenzte Separierbarkeit der Einflussparameter ist letztlich phänomenologisch durch die Abhängigkeit des gelösten Luftgehalts und des Keimspektrums vom hydrodynamischen Strömungszustand bedingt. Die Änderung des Luftgehalts stellt somit in Verbindung mit der Versuchsdurchführung bzw. der Versuchsdauer einen die anderen Einflüsse überlagernden Parameter dar. Damit wurde gezeigt, dass die Dauer eines Kavitationsversuchs an einer Kreiselpumpe in Verbindung mit den Prüfstandseigenschaften und dem Anfangszustand des Wassers einen wesentlichen Einfluss auf die Wasserqualität und damit das Kavitationsverhalten hat.

2 Motivation und Zielsetzung

2.1 Motivation

Bei Kreiselpumpen dienen Kavitationsmessungen zur Ermittlung des Betriebsverhaltens unter dem Einfluss von Kavitation, zum Nachweis von garantierten Eigenschaften und zur Bestimmung der für den Betreiber aus wirtschaftlichen Gründen relevanten Betriebsgrenzen. Dazu werden die Kreiselpumpen beim Pumpenhersteller in geeigneten Prüfständen getestet. Die für die Kavitation relevante Zugfestigkeit des Prüfstandswassers, die von dessen Gehalt an gelösten Gasen und so genannten Kavitationskeimen bestimmt wird, hängt von Merkmalen des Prüfstands und von der Art der Vorbehandlung des Wassers (z.B. Pressen, Filtern, Ruhezeiten) sowie von dem aktuellen Betriebs- und Kavitationszustand der untersuchten Pumpe ab, ist meist nicht bekannt und unterscheidet sich in der Regel von dem in der Anlage vorliegenden Wasserzustand. Es besteht daher ein großer Bedarf an gesicherten Kenntnissen über

- Einflüsse der Versuchsbedingungen auf die Messergebnisse von Kavitationsversuchen an Kreiselpumpen,
- die Rolle dieser Einflüsse bei der Übertragung der Versuchsergebnisse auf das Kavitationsverhalten der getesteten Pumpen unter Anlagenbedingungen,
- erforderliche Maßnahmen zur Sicherstellung reproduzierbarer und prüfstandsunabhängiger Ergebnisse.

Für eine zuverlässige und in Pumpenprüfständen durchführbare Messung der Zugfestigkeit wurde bei der Forschungsstelle ein neuartiges Gerät in Form der „In-situ-Düse“ entwickelt und unter Laborbedingungen erfolgreich erprobt. Parallel dazu wurden bei der Forschungsstelle grundlegende theoretische Betrachtungen zur Bildung und Veränderung des Keimgehalts in Wasserkreisläufen durchgeführt, die wichtige Hinweise auf die Rolle und Bedeutung verschiedener Einflussgrößen für den Keimgehalt und für die daraus resultierende Zugfestigkeit des Wassers bei Kavitationsversuchen liefern.

Damit wurden seit Abschluss vorangegangener Forschungsvorhaben wesentliche zusätzliche Voraussetzungen geschaffen, um die Frage des Einflusses der Versuchsbedingungen auf die Ergebnisse von Kavitationsversuchen an Kreiselpumpen und auf deren ggf. erforderliche Umrechnung auf andere Drehzahlen und/oder andere Wassereigenschaften (Luft-/Keimgehalt, Zugfestigkeit) einer physikalisch begründeten Lösung zuzuführen. Dabei können nunmehr insbesondere theoretisch-numerische Untersuchungen, die durch gezielte Experimente unter Nutzung neuer Messmöglichkeiten unterstützt, ergänzt und validiert werden, zur Analyse der relevanten Zusammenhänge und zur Separierung von Einflüssen dienen.

2.2 Zielsetzung

Das Vorhaben diente dazu, Fortschritte sowie neue Erkenntnisse und Werkzeuge auf den Gebieten der Modellierung, Berechnung und Messung der Zugfestigkeit von Wasser in Prüfständen sowie der numerischen Berechnung kavitierender Strömungen in Kreiselpumpen zur Klärung von Einflüssen der Versuchsbedingungen auf die beginnende und fortgeschrittene Kavitation in Kreiselpumpen zu nutzen. Die theoretisch-numerische Behandlung der Fragestellung ermöglichte dabei eine Separation der Einzeleinflüsse und somit Parameter- und Sensitivitätsstudien. Gezielte Experimente dienten zur Validierung der den Berechnungen zugrunde liegenden Annahmen und Modelle. Aus den theoretischen und experimentellen Untersuchungen wurden Informationen und Empfehlungen für die Pumpenhersteller gewonnen und vermittelt, wie die gefundenen Ergebnisse bei der Durchführung von Kavitationsversuchen sowie bei der Anwendung der daraus resultierenden Versuchsergebnisse zu berücksichtigen sind.

2.3 Bedeutung von Keimgehalt und Zugfestigkeit

Die in der Flüssigkeit vorhandenen ungelösten Gase treten überwiegend in Form von frei verteilten Mikroblasen auf. Diese wirken als Keime, an denen bei beginnender Kavitation die Verdampfung der Flüssigkeit einsetzt. Abhängig von der Größe und Konzentration der Keime, also dem vorliegenden Keimspektrum, wird demnach das Auftreten von Kavitation begünstigt oder gehemmt. Der Keimgehalt lässt sich entweder direkt durch Ermittlung des Keimspektrums z.B. mit optischen Messmethoden, oder indirekt durch Messen der Zugfestigkeit der Flüssigkeit bestimmen.

Die Zugfestigkeit ist als die positive Differenz aus dem thermodynamischen Dampfdruck und dem statischen Flüssigkeitsdruck in Keimnähe definiert: $\Delta p_{krit} := p_v - p_{l,\infty}$ [2]. Sie ist umso größer, je kleiner die Kavitationskeime sind und je weniger von ihnen in der Flüssigkeit vorhanden sind. Demzufolge kann die Zugfestigkeit bei völliger Abwesenheit von Kavitationskeimen sehr große Werte annehmen [2]. So hat beispielsweise Briggs in entsprechend vorbehandeltem Wasser Zugfestigkeiten von mehreren hundert Bar gemessen [3]. In technischen Systemen ist der notwendige Aufwand zur Herstellung einer solch hohen Keimfreiheit der Flüssigkeit jedoch praktisch nicht realisierbar. Die hier erreichbaren Zugfestigkeiten liegen daher in der Regel im Bereich zwischen null und wenigen Bar. Zur Unterscheidung von der theoretisch erreichbaren Zugfestigkeit wird daher in diesem Zusammenhang auch häufig von der technischen Zugfestigkeit gesprochen. Durch die Verwendung eines geeigneten Modells für die Kavitationskeime kann aus der Zugfestigkeit deren Größe und daraus dann deren Konzentration in der Flüssigkeit bestimmt werden.

3 Experimenteller Aufbau

3.1 Versuchsstand und In-situ-Düse

Für die experimentellen Untersuchungen wurde der Versuchsstand aus Abbildung 3.1 mit der dort eingebauten Versuchspumpe verwendet. Der Prüfstand besitzt einen kurzen und einen langen Kreislauf, so dass er mit zwei verschiedenen Flüssigkeitsvolumina ($V_{\text{groß}} = 8.8 \text{ m}^3 = 8 \cdot V_{\text{klein}}$), aus denen sich die Verweilzeiten $t_{\text{groß}} = 4 \text{ min } 13 \text{ s}$ und $t_{\text{klein}} = 32 \text{ s}$ (jeweils für einen vollständigen Anlagen-umlauf im Auslegungspunkt der Pumpe) ergeben, betrieben werden kann. Sowohl Wasservolumen als auch Umlaufzeit stellen Parameter der Versuchsanlage dar, die einen Einfluss auf den Keimgehalt des Wassers haben, so dass deren geforderte Variation bei den durchgeführten Messungen durch einfaches Umschalten zwischen den beiden Kreisläufen erfolgen konnte.

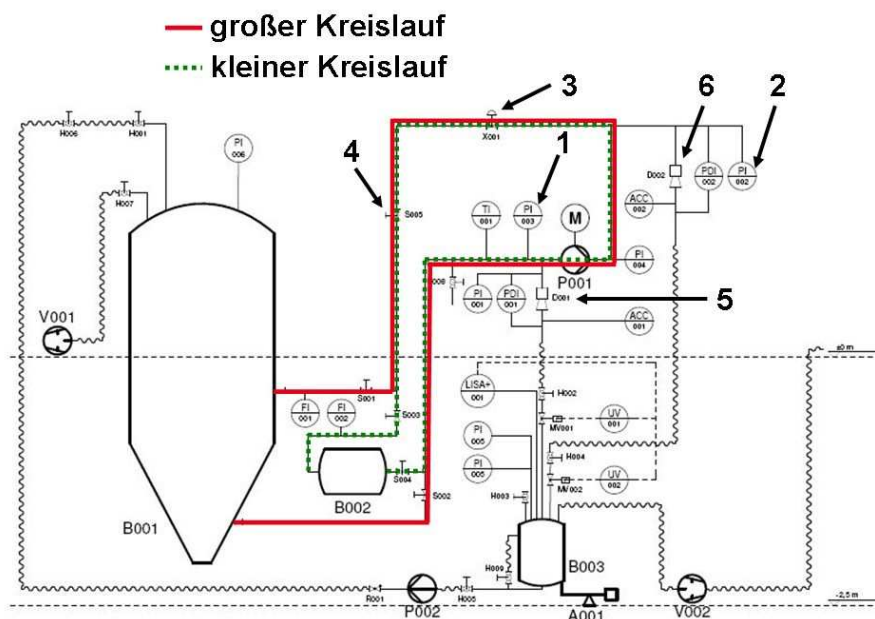


Abbildung 3.1: Schema der Versuchsanlage: 1: Messstelle des Pumpeneintrittsdrucks, 2: Messstelle des Pumpenaustrittsdrucks, 3: pneumatisches Drosselventil, 4: manuelles Drosselventil, 5: saugseitige In-situ-Düse , 6: druckseitige In-situ-Düse

Die In-situ-Düse ist als Venturidüse ausgeführt (siehe Abb. 3.2), bei der der statische Druck in der Strömung im konvergenten Teil der Düse bis zum Erreichen des Minimaldrucks im engsten Querschnitt abnimmt. Sinkt der statische Minimaldruck im engsten Querschnitt unter den Dampfdruck, dann ist die positive Differenz aus dem Dampfdruck und dem Minimaldruck als die Zugfestigkeit des Fluids definiert [2].

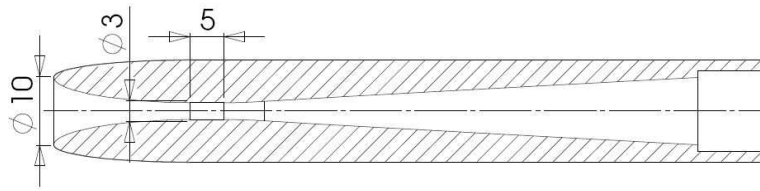


Abbildung 3.2: Schnittansicht der In-situ-Düse mit Hauptabmessungen

Die Erzeugung des Düsenvolumenstroms erfolgt durch das Aufprägen einer statischen Druckdifferenz zwischen dem Einbauort der In-situ-Düse und einem Vakuumbehälter, der in einem Gerinne ca. 2.5 m unterhalb des Versuchsstands aufgestellt ist. Der Düsenvolumenstrom wird aus einem zuvor ermittelten Zusammenhang mit der Druckdifferenz zwischen dem Düsendiffusor und einer Messstelle im Absaugrohr der Düse bestimmt [1]. Die Detektion der Kavitationsereignisse erfolgt akustisch durch einen piezokapazitiven Beschleunigungssensor.

3.2 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm umfasst Experimente zum Kavitationsbeginn und zu Zuständen unterschiedlich fortgeschrittener Kavitation in der Versuchspumpe. Der Kavitationsbeginn im Laufrad wurde dabei durch visuelle Beobachtung detektiert und daraus der zugehörige Wert $NPSHR_i$ bestimmt. Im Falle fortgeschrittener Kavitation wurden ebenfalls durch visuelle Beobachtungen Lage und Ausdehnung der Kavitationszonen im Laufrad bestimmt und für die unterschiedlichen Kavitationsausprägungen der jeweilige NPSH Wert ermittelt. Zur Bestimmung der Abhängigkeit der Pumpenförderhöhe vom NPSH Wert wurden Förderhöhenabfallkurven (Abreißkurven) aufgenommen und die $NPSHR$ Werte für einen definierten Förderhöhenabfall (üblicherweise 3%) bestimmt. Die Versuche wurden dabei unter Variation der Parameter

- Fördergrad $\frac{Q}{Q_{opt}}$
- Luftgehalt des Wassers (gelöste und ungelöste Luft)
- Keimgehalt des Wassers
- Verweilzeit

durchgeführt. Parallel dazu wurde in den in Abbildung 3.3 eingekreisten Betriebspunkten *kavitationsfreier Referenzpunkt bei ca. 50% Umgebungsdruck, Kavitationsbeginn bis 1 %iger Förderhöhenabfall, 3 %iger Förderhöhenabfall und ≈ 20 %iger Förderhöhenabfall* mit der In-situ-Düse auch die Zugfestigkeit und daraus der Keimgehalt des Wassers bestimmt. Dazu wurde eine Ausführung der Messdüse in die Saugleitung unmittelbar stromauf und eine zweite Ausführung in die Druckleitung stromab der Versuchspumpe eingebaut (siehe Abbildungen 3.4 und 3.5).

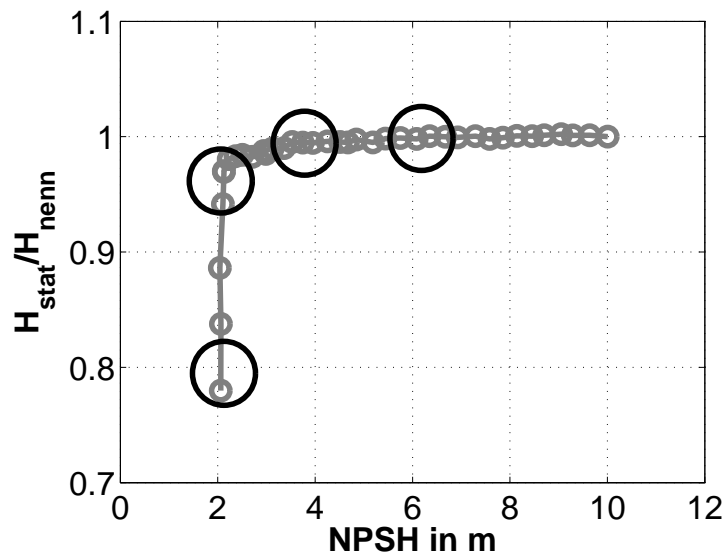
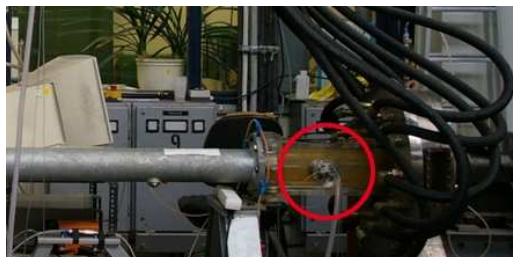


Abbildung 3.3: Abreißkurve mit den vier ausgewiesenen Zugfestigkeitsmesspunkten



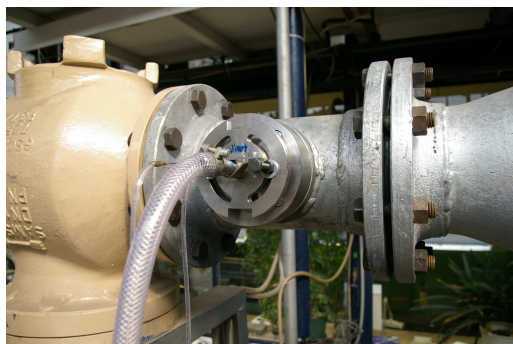
Abbildung 3.4: a) Saugseitige In-situ-Düse



b) Saugleitung der Pumpe mit eingebauter In-situ-Düse



Abbildung 3.5: a) Druckseitige In-situ-Düse



b) Druckleitung der Pumpe mit eingebauter In-situ-Düse

4 Ergebnisse

4.1 Empfindlichkeit des Messsystems

Vor der Bearbeitung des eigentlichen Versuchsprogramms wurde zunächst die Sensibilität der Messergebnisse gegenüber einer Änderung der Düsenrandbedingungen, welche durch den Druck und die Strömungsgeschwindigkeit am Düsen Eintritt gegeben sind, überprüft. Dazu wurden zum einen die Keimverteilungen auf Saug- und Druckseite miteinander verglichen (Abbildung 4.1 links) und zum anderen anhand eines entsprechenden Vergleichs auf der Druckseite die Auswirkungen einer Änderung des Kavitationszustands zwischen dem kavitationsfreien Referenzzustand und dem Zustand $\approx 20\%$ Förderhöhenabfall ermittelt (Abbildung 4.1 rechts).

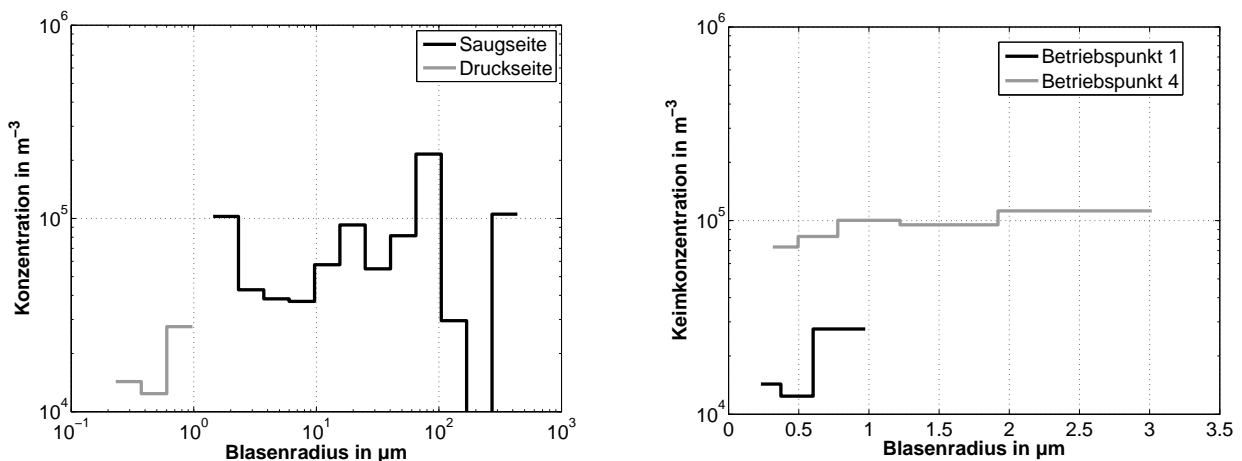


Abbildung 4.1: links: Vergleich der Konzentrationsverläufe zwischen Saug- und Druckseite bei Kavitationsbeginn in der Versuchspumpe
rechts: Vergleich der Konzentrationsverläufe auf der Druckseite zwischen dem kavitationsfreien Referenzzustand (Betriebspunkt 1) und dem Zustand $\approx 20\%$ Förderhöhenabfall

Aus dem Vergleich der beiden Messpositionen ergibt sich als wichtiges und in dieser Form völlig neues Ergebnis, dass die größten Keime auf der Druckseite um zwei Größenordnungen kleiner sind als die größten Keime auf der Saugseite. Da beide Düsen identisch sind und die Keimradien für die Darstellung bereits auf Umgebungsdruck skaliert wurden, müssen die Keime aufgrund von Diffusion von Luft in das umgebende Wasser beim Durchgang durch die Pumpe geschrumpft sein. Dies ergibt sich auch aus dem Vergleich zwischen der Verweilzeit und der Diffusionszeit von 0,1 s für einen Keim mit einem typischen Durchmesser von $10\ \mu\text{m}$. Bei der sich im Optimum der Versuchspumpe ($Q=125\ \text{m}^3/\text{h}$) ergebenden Verweilzeit von etwa 0,5 s zwischen Pumpeneintritt und druckseitiger Messposition haben beide dieselbe Größenordnung und Diffusion kann nicht vernachlässigt werden. Der Vergleich der Keimkonzentrationen bei den zwei hinsichtlich Kavitation unterschiedlichen Betriebspunkten zeigt, dass das Vorhandensein eines ausgebildeten Kavitationsgebietes stromauf der Messstelle (Betrieb-

spunkt 4) erwartungsgemäß sowohl zu einem Wachstum der bereits vorhandenen Keime, als auch zu der Entstehung neuer Keime und somit zu einem Anstieg der Keimkonzentrationen führt (vgl. z.B. [4]). Die Ergebnisse der beiden Vergleiche zeigen, dass das Messverfahren prinzipiell sensibel genug ist, um den Einfluss der Düsenrandbedingungen auf die Keimverteilung zu detektieren.

4.2 Einfluss der Verweilzeit und der Kreislaufkonfiguration

Im Rahmen des Versuchsprogramms wurden unter systematischer Variation der drei Parameter Luftgehalt, Anlagenbetriebspunkt und Verweilzeit und unter Anwendung der oben beschriebenen Vorgehensweise das Abreißverhalten der Versuchspumpe sowie die Zugfestigkeit und die Keimverteilung des Anlagenwassers ermittelt. Exemplarisch sind hierzu in Abbildung 4.2 die Ergebnisse der Variation des Parameters Verweilzeit dargestellt. Der linke Teil der Abbildung zeigt den Verlauf der Keimkonzentration über dem Keimradius, wie er aus den saugseitig der Versuchspumpe durchgeführten Zugfestigkeitsmessungen im Betriebspunkt *Kavitationsbeginn bis 1 %iger Förderhöhenabfall* ermittelt wurde. Im rechten Teil sind die dazugehörigen Abreißkurven der beiden Kreislaufvarianten dargestellt.

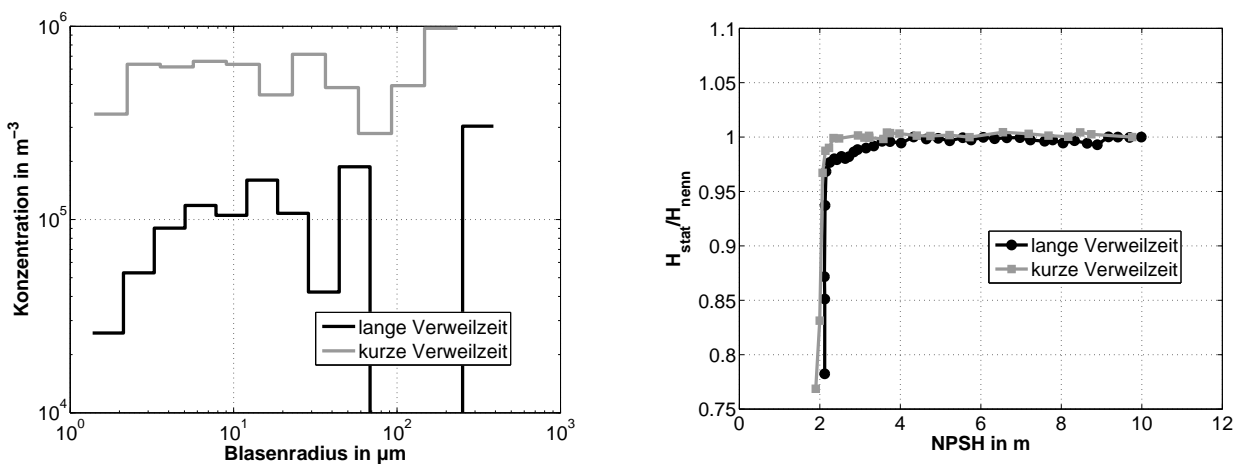


Abbildung 4.2: links: Keimkonzentrationsverläufe bei langer und kurzer Verweilzeit
rechts: zugehörige Abreißkurven

Es sei hier ausdrücklich betont, dass sich in Verbindung mit der Verweilzeit auch die Kreislaufkonfiguration ändert, da sich bei den beiden Kreisläufen geometriebedingt qualitativ und quantitativ unterschiedliche Strömungen in den Vorratsbehältern einstellen und dies möglicherweise auch Einfluss auf die Keimverteilung im Kreislauf hat. Der Behälter des großen Kreislaufs (lange Verweilzeit) besteht im oberen Bereich aus einem zylindrischen und im unteren Bereich aus einem konischen Teil, und Zu- und Abfluss befinden sich leicht versetzt auf derselben Seite des Behälters. Der zylindrische Behälter des kleinen Kreislaufs (kurze Verweilzeit) ist dagegen liegend angeordnet, Zu- und Abfluss befinden sich an den beiden Stirnseiten und auf der Oberseite des Behälters ist ein zylindrischer Windkessel aufgesetzt.

Die Messungen wurden in beiden Kreislaufkonfigurationen bei einer Pumpendrehzahl von 1750 1/min, dem Fördergrad 1.0 und einem Sättigungsgrad von 195 % durchgeführt. Es ist deutlich zu sehen, dass

die Konzentrationen im Falle der kurzen Verweilzeit über den gesamten Keimgrößenbereich größer sind als beim großen Kreislauf. Dies liegt daran, dass die Keime bei kurzer Verweilzeit weniger Zeit haben sich im Vorratsbehälter zu verteilen und so zum Großteil wieder in den Kreislauf eintreten. Durch den geringen Querschnitt an der Übergangsstelle zwischen dem zylindrischen Teil des Behälters und dem Windkessel und die aufgrund des wesentlich kleineren Volumens höhere Strömungsgeschwindigkeit im Behälter wird dieser Effekt noch zusätzlich verstärkt. Die Verläufe der mit beiden Kreislaufkonfigurationen gemessenen Abreißkurven sind bis auf den Bereich zwischen etwa 3 m und 2.5 m NPSH erwartungsgemäß. Diese Abweichungen sind auf die in diesem Betriebsbereich grundsätzlich auftretenden und während des Versuchs nur schwer ausregelbaren Volumenstromschwankungen zurückzuführen.

5 Anwendung der Forschungsergebnisse im industriellen Umfeld

Im Folgenden sollen sowohl die im aktuellen Forschungsvorhaben (AiF Nr. 14865) als auch die in vorangegangenen Projekten gewonnenen Erkenntnisse im Hinblick auf deren Relevanz und Umsetzung für die Durchführung von Kavitationsmessungen in industriellen Pumpenkreisläufen zusammengefasst werden.

1. Mit Abschluss des Forschungsvorhabens steht der Industrie eine erprobte In-situ-Messeinrichtung zur Verfügung, mit der ein entsprechend qualifiziertes Versuchspersonal in die Lage versetzt werden kann, vor und auch während der Durchführung von Kavitationsuntersuchungen eine die globale Wasserqualität charakterisierende Größe in Form der Zugfestigkeit zu bestimmen. Insbesondere im Hinblick auf den $NPSH_i$ Wert einer Pumpe kann diese Information beim Vergleich von Messungen (Kennlinien), die an unterschiedlichen Versuchstandskonfigurationen (Anlagen) ermittelt wurden, von großer Wichtigkeit sein. Dies gilt nicht nur im Hinblick auf einen Vergleich von Prüfständen verschiedener Pumpenhersteller sondern auch für unterschiedliche Anlagen desselben Pumpenherstellers. Ebenso ist es auf Grund des einfachen Aufbaus sowie der leichten Adaptierbarkeit der Messeinrichtung an die Saugleitung einer Pumpenanlage prinzipiell möglich, Vor-Ort-Messungen, z.B. direkt beim Kunden, durchzuführen und damit mögliche Problemfälle aufzuklären.
2. Die Bestimmung von Keimgrößenverteilungen in einem Strömungsquerschnitt mit der In-situ-Düse ist unter Berücksichtigung verschiedener Einschränkungen zwar möglich, erscheint der Forschungsstelle jedoch beim derzeitigen Entwicklungsstand des Gerätes, sowie im Hinblick auf eine industrielle Anwendbarkeit der Ergebnisse, von untergeordneter Relevanz. Die Idee, mithilfe von experimentell ermittelten Keimspektren Parameter zu generieren, mit denen unterschiedliche Wasserqualitäten im Hinblick auf die numerische Simulation kavitierender Strömungen Rechnung getragen werden kann, hat sich mit dem eingesetzten CFD Werkzeug IDS beim derzeitigen Entwicklungsstand als nicht zielführend erwiesen.

Auf Grund der an der Forschungsstelle im Rahmen des aktuellen, sowie auch vorangegangener Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse, können folgende Empfehlungen im Hinblick auf die praktische Durchführung von Kavitationsversuchen an geschlossenen Kavitationskreisläufen gegeben werden:

- I. Generell ist bei allen Kavitationsuntersuchungen die verwendete Anlage in einen Zustand zu versetzen, bei welchem sich keine freie Luft mehr im Kreislauf befindet und sich ein mittlerer Sättigungsgrad einstellt, der bezogen auf den im späteren Versuchsbetrieb zu erreichenden NPSHA Wert eine Größenordnung nahe eins ausweist. Dazu ist die Anlage ggf. über einen längeren Zeitraum bei entsprechendem Unterdruck zu betreiben, bevor mit den eigentlichen Messungen begonnen werden kann. Zur Bestimmung der Sättigungskonzentration kann z.B. ein einfach handhabbarer Brandtscher Apparat eingesetzt werden.

II. Insbesondere für Versuche, die der Ermittlung des Kavitationsbeginns in der hydraulischen Maschine dienen, erweisen sich die Wasserqualität und damit einhergehend letztendlich auch die Art und Weise der Versuchsdurchführung als ein wichtiger Parameter. D.h., für derartige Versuche ist in jedem Fall zu empfehlen, dass vor und nach einer Messreihe die Zugfestigkeit des Fördermediums in der Saugleitung der Anlage, möglichst nahe am Pumpeneintritt ermittelt werden sollte. Abhängig vom Unterschied dieser beiden Messwerte sind ggf. zusätzliche Messungen während einer Messreihe durchzuführen. Sollte sich bei diesen Messungen eine Zugfestigkeit ergeben, die deutlich kleinere Werte als -0.1 bar aufweist, so wird empfohlen, die Anlage hinsichtlich einer einwandfreien Entlüftung bzw. Entgasung zu überprüfen. Zugfestigkeitsmessungen, die Mittelwerte liefern, die nennenswert größer als 0.35 bar sind, weisen dagegen auf eine gut entlüftete Anlage bzw. ein stärker entgastes Betriebsmedium hin. Trotz dieses zunächst positiv zu wertenden Sachverhaltes ist jedoch zu beachten, dass es mit Pumpen deren NPSH Werte bei Versuchsbedingungen, die sich durch erhöhte Zugfestigkeitsmittelwerte ausgezeichnet haben, gemessen wurden ggf. zu Problemen am Einsatzort des Kunden, wo möglicherweise ungünstigere Betriebsbedingungen herrschen, kommen kann. Eine Möglichkeit, diesem Aspekt Rechnung zu tragen wäre, in der Versuchsanlage des Pumpenherstellers das Betriebsmedium derart zu konditionieren, dass sich Zugfestigkeitswerte einstellen, die im o.g. Intervall liegen.

III. Obgleich die Ermittlung des Kavitationsbeginns ($NPSH_i$) für einzelne Pumpen durchaus von Relevanz ist, wird für das Gros der Pumpen der $NPSH_3\%$ Wert als Beurteilungskriterium für einen unter Kavitationsaspekten zulässigen Betrieb herangezogen. Bei dieser Art von Versuchen gelten zunächst die gleichen, bereits unter I. ausgeführten, Empfehlungen. Sowohl aus den aktuellen als auch früheren Untersuchungen der Forschungsstelle geht hervor, dass die Ermittlung von Förderhöhen-Abreißkurven gegenüber dem Einflussparameter Wasserqualität eine deutlich geringere Sensibilität aufweist, als dies bei der experimentellen Bestimmung des Kavitationsbeginns (dem $NPSH_i$ Wert) der Fall ist. Allerdings entbindet diese Erkenntnis nicht von der Notwendigkeit eines entsprechend sorgfältig vorbereiteten und durchgeführten Versuchsablaufs. In dieser Hinsicht sind insbesondere folgende Aspekte zu berücksichtigen bzw. Vorgehensweisen zu empfehlen:

- Prüfstandsvorbereitung gemäß I.
- Durchführung von Abreißversuchen stets in einem Messzyklus durchführen. D.h., längere Stillstandzeiten (z.B. Tage oder gar Wochen) zwischen Versuchsreihen einer $NPSH_3\%$ Charakteristik vermeiden.
- Zeitlichen Ablauf eines Abreißversuches (Absenken des $NPSH$ -Wertes) möglichst einheitlich halten, wobei generell ein zügiger Messablauf anzustreben ist.
- Zwischen den Messungen zweier Abreißäste (Betriebspunkte der Pumpe) ausreichend lange Umwälzzeiten vorsehen, um ggf. durch Ausgasung freigesetzte Luft wieder zu lösen bzw. an exponierter Stelle der Anlage abzuführen.
- Messungen möglichst bei einheitlichem Temperaturniveau des Betriebsmediums durchführen, da das Luftlösevermögen und damit auch die Sättigungskonzentration temperaturabhängig sind.

Im Hinblick auf die oben genannten Ausführungen ist generell zu empfehlen, dass Pumpenhersteller neben der Anwendung von für Kavitationsmessungen an Pumpen verfügbaren Normen und Richtlinien, ihre Messabläufe unternehmensweit standardisieren sollten, um eine größtmögliche firmeninterne Reproduzier- sowie Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wobei es zweifelsohne erstrebenswert wäre eine solche Standardisierung auch herstellerübergreifend zu etablieren. In dieser Hinsicht bietet der Einsatz der In-situ-Düse eine gute Möglichkeit Versuchseinrichtungen sowie Versuchsbedingungen hinsichtlich ihres spezifischen Einflusses auf Kavitationsmessungen mit Hilfe der Messgröße „Zugfestigkeit“ quantitativ zu bewerten und damit Messwertdiskrepanzen erklärbar zu machen.

Literaturverzeichnis

- [1] **Beinert, C.:** *Auslegung (CFD-Modell), Konstruktion und Erprobung eines Messgerätes zur Bestimmung der Zugspannungsfestigkeit von Wasser*, Abschlussbericht zum FKM Forschungsvorhaben Nr. 071710, TU Darmstadt Fachgebiet TFA, 2003
- [2] **Brennen, C. E.:** *Cavitation and Bubble Dynamics*, Oxford University Press, New York, 1995
- [3] **Briggs, L. J.:** Limiting Negative Pressure in Water, *Journal of Applied Physics*, 21, 721, 1950
- [4] **Brunn, B.:** *Kavitation und die Zugfestigkeit von Flüssigkeiten*, Dissertation, TU Darmstadt Fachgebiet TFA, Shaker Verlag, 2006