

# Bestimmung der Betriebsbedingungen saugseitig gedrosselter Kreiselpumpen mittels Schallemissionsanalyse

Burkhard ZIEGLER  
Technische Hochschule Mittelhessen, FB ME,  
Wiesenstr. 14, 35390 Gießen  
Burkhard.Ziegler@me.thm.de

**Kurzfassung.** Für den sicheren und ökonomischen Betrieb von Kreiselpumpen benötigt man fortlaufend Informationen über deren Betriebszustand. Dieser Bericht beschreibt die Anwendung der Schallemissionsanalyse zur Bestimmung kritischer Betriebszustände (Kavitation, Verstopfung des Laufrades mit entgaster Luft) bei der saugseitigen Drosselung von Kreiselpumpen. Die Ergebnisse werden mit denen konventioneller Methoden verglichen.

## 1. Einleitung

Kreiselpumpen spielen für den Transport von Flüssigkeiten durch Rohrleitungsanlagen, z.B. zur Trink- oder Kühlwasserversorgung, eine sehr wichtige Rolle. Zur Sicherstellung des ununterbrochenen, ökonomischen Betriebs sowie der zustandsbezogenen Instandhaltung benötigt man fortlaufend Informationen über den jeweiligen Betriebszustand der Pumpen. Gemäß der Charakteristik der jeweiligen Rohrleitungsanlage muss die Pumpe die geodätische Förderhöhe und/oder die Rohrleitungsverluste ausgleichen. Durch die Pumpe, die mit ihren Saug- bzw. Druckstutzen mit der Rohrleitungsanlage verbunden ist, erfährt die Förderflüssigkeit eine Strömung. Armaturen, die zur Drosselung des geförderten Volumens führen, werden nach Möglichkeit in den druckseitigen Teil der Rohrleitungsanlage eingebaut. In praktischen Anwendungen ist jedoch manchmal die bewusste Drosselung der Saugseite notwendig oder sie findet aufgrund eines verstopften Grundventils bzw. der zunehmenden Verschmutzung eines Filters zwangsläufig statt. In einer Kreiselpumpe liegt unmittelbar an den Schaufeleintrittskanten, siehe Bild 2 übernächste Seite, der geringste statische Druck vor. Dort und auch in der Saugleitung führt die saugseitige Drosselung zu einer zusätzlichen Verringerung des Druckes, die sich auf die Betriebsbedingungen der Pumpe negativ auswirkt. Die Detektion dieser Betriebsbedingungen mit Hilfe der Schallemission (nachfolgend SE) im Vergleich zu konventionellen Methoden wurde in dieser Arbeit erforscht. Praxisnahe Versuchsbedingungen wurden durch das Verwenden von „normalem“, d.h. nicht entgastem, Wasser als Förderflüssigkeit und die Reduktion des statischen Druckes durch einen saugseitigen Schiebers erreicht.

## 2. Physikalische Grundlagen

Sinkt der lokale statische Druck in einer Flüssigkeit, kommt es zu zwei unterschiedlichen physikalischen Effekten, die beide zur Blasenbildung in der Flüssigkeit führen. Beide Effekte haben sehr unterschiedliche Auswirkungen in Bezug auf die Anwendung der Schallemission. Die physikalischen Grundlagen beider Effekte werden nachfolgend erläutert.



## 2.1 Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten

Das *Henry-Dalton'sche* Gesetzes besagt, dass die Löslichkeit von Gasen in Wasser vom Druck über der Flüssigkeit und deren Temperatur abhängt [1]. Je höher der Druck und je niedriger die Temperatur der Flüssigkeit desto mehr Gas kann sie physikalisch lösen. Ein Liter Wasser kann z.B. bei 20°C und 1bar Druck maximal 18,3ml Luft aufnehmen. Aus physikalischen Gründen entgast Luft schneller aus Wasser, als dass sie sich im Wasser löst.

## 2.2 Dampfdruck und Kavitation

Denjenigen absoluten Druck bei dem Wasser von der flüssigen Phase in die Gasförmige übergeht bezeichnet man als Dampfdruck. Dieser ist stark temperaturabhängig. Wasser kann auf zwei verschiedenen Wegen verdampfen (sieden). Durch:

- Temperaturerhöhung bei konstantem Druck. Auf Meereshöhe verdampft Wasser bei ca. 100°C, es hat demnach bei dieser Temperatur einen Dampfdruck von 1,0133bar.
- Druckerniedrigung bei konstanter Temperatur. Reduziert man den Druck in 20-gradigem Wasser auf 0,02337bar und sind genügend sogenannte Kavitationskeime (mikroskopisch kleine Luft- oder Dampfblasen  $\varnothing$  ca.  $10^{-3}$  bis  $10^{-1}$ mm) vorhanden, bilden sich in der Flüssigkeit dampfgefüllte Blasen.

Die durch hydrodynamische Druckreduzierung gebildeten Wasserdampfblasen heißen Kavitationsblasen. Werden diese in Bereiche transportiert, in denen der Dampfdruck überschritten wird, implodieren sie schlagartig. Dadurch können lokal Drücke über 1000bar erreicht werden. Je nach Intensität und Dauer der Blasenimplosionen sowie der Kavitationsresistenz des Materials führt dies zu Schäden an den betroffenen Maschinenteilen.

## 2.3 Generierung und Dämpfung von Schallemission in einer Pumpe

Schallgenerierung:

- Die dreidimensionale, instationäre und meistens sehr turbulente Strömung in Kreiselpumpen generiert starke kontinuierliche SE [2].
- Stochastisch implodierende Kavitationsblasen erzeugen kontinuierliche SE mit einem breitbandigen Frequenzspektrum [3, 6].

Schalldämpfung:

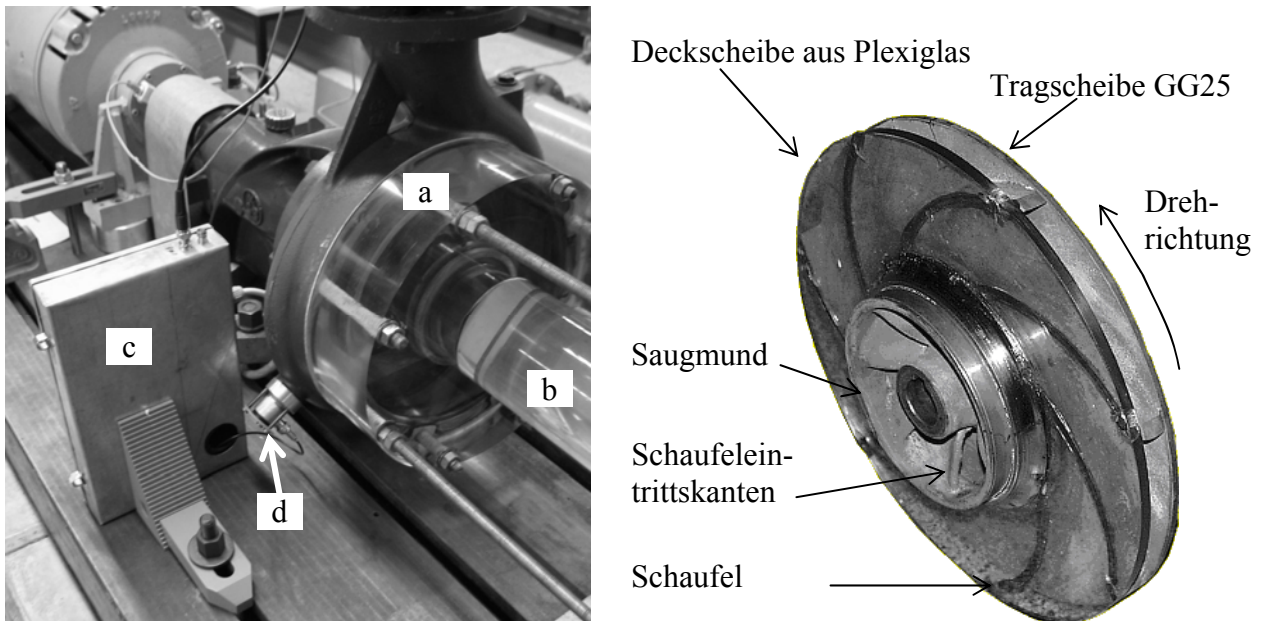
- Grundsätzlich verändern beide, sowohl Luft- als auch Dampfblasen, die akustischen Eigenschaften des Wassers. Der große Dichteunterschied zwischen den Blasen und dem Wasser führt zu einem großen akustischen Impedanzsprung. Durch Streuungs- und Absorptionseffekte werden die Schallamplituden stark gedämpft [6, 7].

## 3. Versuchsaufbau

Die Untersuchung fand am Kreiselpumpenprüfstand des FB Maschinenbau und Energietechnik der THM statt. Das Schallemissionsequipment stellte das Tribologielabor des Fachbereichs zur Verfügung.

### 3.1 Kreiselpumpenprüfstand

Für Lehrzwecke ist die Kreiselpumpe (KSB 80-250), siehe nachfolgendes Bild 1 sowohl mit einem transparenten Gehäusedeckel, siehe Markierung a, als auch mit einem Ansaugrohr aus Plexiglas®, siehe Markierung b in Bild 1, versehen. Um die Strömung auch innerhalb des Laufrads mittels Stroboskop verfolgen zu können, wurde dessen GG25-Deckscheibe ebenfalls durch eine aus Plexiglas ersetzt, siehe Bild 2.



**Bild 1.** Kreiselpumpe mit transparenten Gehäuseteilen und Schallemissionsmesskette

Der Kreiselpumpenprüfstand besitzt einen geschlossenen Wasserkreislauf. Zwischen dem belüfteten Vorratsbehälter ( $V = 3\text{m}^3$ ) und dem Saugstutzen der Pumpe befindet sich im Ansaugrohr ( $D_i = 100\text{mm}$ ) ein Plattenschieber, der es gestattet, den Volumenstrom und Druck des zur Pumpe fließenden Wassers zu regulieren. Die Pumpe arbeitet im Zulaufbetrieb, d.h. der Wasserspiegel im Tank steht ca.  $1,5\text{m}$  über der Pumpenmitte. Auf der Druckseite ( $D_i = 88,9\text{mm}$ ) kann der Volumenstrom mittels eines Kugelhahns gedrosselt werden. Sind beide Absperrorgane geöffnet so fördert die Pumpe bei einer Drehzahl von  $1400\text{min}^{-1}$  einen Volumenstrom von  $100\text{m}^3/\text{h}$  durch die Anlage. Die statischen Drücke auf der Saug- und Druckseite der Pumpe werden kontinuierlich durch elektronische Sensoren (Ahlborn FDA 612-L3R, Ahlborn FDA 612-L4A) gemessen. Den aktuellen Durchfluss ermittelt ein magnetisch-induktiver Volumenstrommesser (B&R MDM-ANFV 80/F2-H). Eine elektronische Regelung hält die Drehzahl des Antriebsmotors und damit der Pumpe konstant (Toleranz  $\pm 5\text{min}^{-1}$ ). Die Temperatur des Wassers zur Bestimmung des Dampfdrucks wird mittels Handthermometer gemessen. Die Untersuchungen fanden bei einer Wassertemperatur von  $20^\circ\text{C}$  mit einer Toleranz von  $\pm 1^\circ\text{C}$  statt. Eine mehrkanalige Messwerterfassungsanlage (Ahlborn AMR ES 5590-N1) mittelt die elektrischen Ausgangssignale der Druck- sowie des Volumenstromsensoren über 3 Sekunden und überträgt sie kontinuierlich an einen PC.

### 3.2 Schallemissionsmesskette

Die Schallemissionsmesskette bestand aus folgenden Komponenten: SE-Sensor (Piezo Test 0,15 ESS 20), SE-Verstärker (Physical Acoustics Corporation 1220C Preamplifier, 50-150kHz, 40dB), RootMeanSquare-Modul (Analog Devices 536A, Mittelungszeit 50ms). Die zu dessen Eingangssignal energieäquivalente Ausgangsspannung des RMS-Moduls wurde ebenfalls an die v.g. Messwerterfassungsanlage geführt und dort synchron mit den hydraulischen Messwerten verarbeitet. Der SE-Sensor, siehe Markierung d in Bild 1, wurde an der Außenseite des Spiralgehäuses der Pumpe mittels eines Koppelstückes befestigt, das auf dem Pumpengehäuse vollflächig verklebt war. Die Schallleitung zwischen Sensor und Koppelstück gewährleistete hochviskoses Schmierfett. Aus EMV-Gründen sind Vorverstärker, RMS-Modul sowie die Spannungsversorgung in einem Metallgehäuse integriert, siehe Markierung c in Bild 1.

## 4. Versuchsdurchführung

### 4.1 Vorversuche

Die von einer Pumpe generierten SE-Wellen ändern sich je nach Betriebszustand und sind von verschiedenen Störsignalen überlagert [3, 4, 6]. Um die Schallemission zur Diagnose der Betriebszustandes einsetzen zu können, muss:

- ein geeignete Messkette eingesetzt werden und
- für jeden Pumpentyp die optimale Ankoppelposition für den Schallaufnehmer an der Außenseite des Gehäuses bestimmt werden.

Die unter Kap. 3.2 vorgestellte Messkette hat sich schon bei der Detektion anderer, durch Strömungsvorgänge generierter, kontinuierlicher SE bewährt [5] und wurde deshalb auch bei dieser Untersuchung verwendet. Die endgültige Position des SE-Sensors wurde durch systematische Experimente bestimmt und stellt bei dieser Pumpe ein Optimum bzgl. der Empfindlichkeit und Minimierung von Störsignalen dar. Mechanische Störsignale werden z.B. durch die Wälzlagerung der Pumpenwelle und die Abdichtung des Ringspaltes zwischen der Welle dem Gehäuse mittels berührender Stopfbuchsendichtung erzeugt.

### 4.2 Bestimmung beginnender Kavitation

Der Kavitationsbeginn in einer Kreiselpumpe kann u.a. durch folgende Kavitationskriterien bestimmt werden [8]:

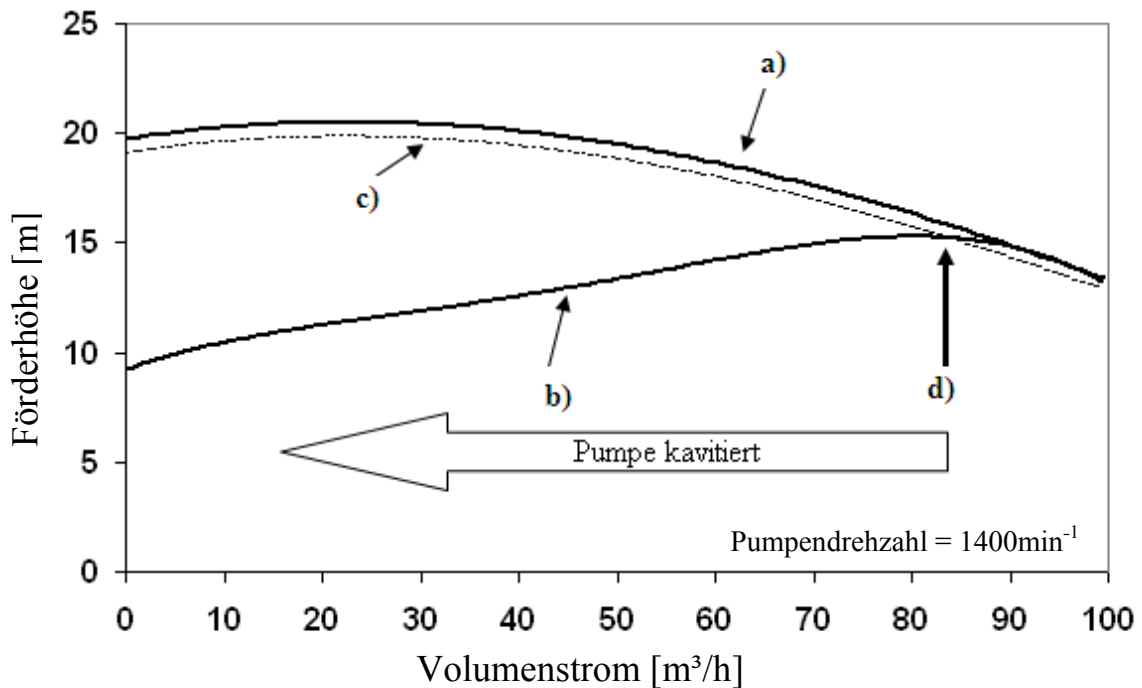
1. Auftreten von ersten Dampfblasen im Saugmund und in den Kanälen des Laufrades, siehe Bild 2. → Beobachtung mittels stroboskopischem Ausleuchten durch transparente Teile des Pumpengehäuses hindurch. Die Menge der entstandenen Dampfblasen, nachfolgend „Blasenschwarm“ genannt, die für die verschiedenen Kavitationsgrade vorhanden sein müssen, ist nicht eindeutig festgelegt. Die Interpretation des Blasenschwarms hängt von der Erfahrung des Experimentators ab.
2. Abnahme der Förderhöhe um 3% relativ zur Förderhöhe bei kavitationsfreien Betrieb bei gleichem Förderstrom (nachfolgend  $3\% \Delta H$ ). → Berechnung bzw. Messung der Förderhöhe und des Volumenstroms anschließend Vergleich der Förderhöhen.
3. Erhöhte Laufunruhe durch verändertes Schwingungsverhalten im Vergleich zum kavitationsfreien Betrieb. → Einsatz von Schwingungssensoren.

### 4.3 Kavitationsversuche

Die verwendete Pumpe arbeitet in der Versuchsanlage bei allen Drehzahlen bis zu einer Wassertemperatur von ca. 30°C kavitationsfrei. Erst durch die saugseitige Drosselung wird, der statische Druck im Wasser soweit verringert, dass sich im Saugmund der Pumpe, kurz hinter den Schaufeleintrittskanten, Kavitationsblasen bilden. Die beginnende Kavitation gemäß dem Kriterium  $3\% \Delta H$  wurde wie folgt ermittelt, siehe Bild 3:

- Messung der druckseitig gedrosselten Pumpenkennlinie, Kurve a,
- Messung der saugseitig gedrosselten Pumpenkennlinie, Kurve b,
- Darstellung der um 3% Förderhöhe heruntergerechneten Pumpenkennlinie, Kurve c,
- Der Schnittpunkt der Kurven b und c, siehe Punkt d, markiert beginnende Kavitation.

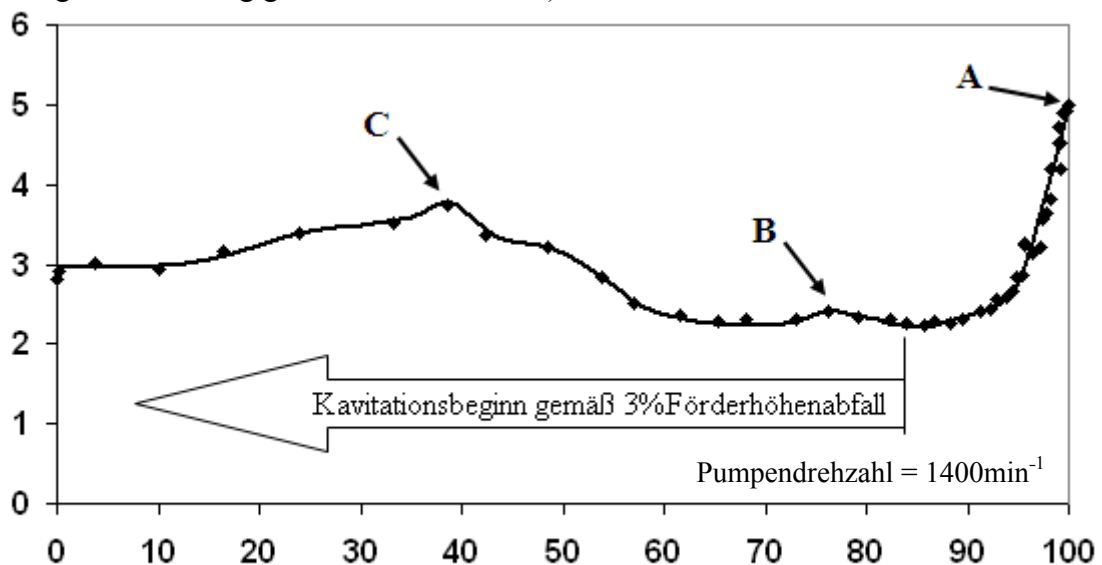
Behält man die Pumpendrehzahl und die Wassertemperatur bei und stellt mittels saugseitigem Schieber einen Volumenstrom von 84m<sup>3</sup>/h ein, so kann man im Laufrad beginnende Kavitation gemäß dem Kavitationskriterium  $3\% \Delta H$  erkennen, siehe Bild 5b. Auch lassen sich einige Blasen identifizieren die durch das Laufrad der Pumpe gespült werden. Dabei kann es sich nur um Blasen mit entgaster Luft handeln, denen die sehr kurze Aufenthaltszeit ( $\Delta t < 0,1$  Sekunden) innerhalb des Laufrades nicht genügt, um sich im Wasser zu lösen.



**Bild 3.** Verlauf der Drosselkurven: a) bei druckseitiger Drosselung, Kurve b) bei saugseitiger Drosselung, Kurve c) zeigt die um 3% Förderhöhe reduzierte Kurve a). Der Schnittpunkt d) markiert den Kavitationsbeginn gemäß dem Kavitationskriterium  $3\% \Delta H$ .

Die Kavitationsblasen hingegen implodieren wieder in den Bereichen des Laufrades (der Druck im Laufrad nimmt mit dem Radius zu), in denen ein höherer statischer Druck als der Dampfdruck herrscht. Dieses ungleiche Verhalten von Luft- und Dampfblasen lässt sich als Unterscheidungsmerkmal einsetzen, da beide Blasenarten optisch sonst nicht zu unterscheiden sind. Die dynamischen Vorgänge in der Pumpe lassen sich durch direkte Beobachtung mit Hilfe eines Stroboskops besser erkennen als auf Foto- oder Filmaufnahmen.

Bild 4 zeigt den Verlauf der synchron gemessenen RMS-Werte der SE während der saugseitigen Drosselung gemäß Bild 3 Kurve b).



**Bild 4.** Verlauf des RMS-Wertes der Schallemission vs. des Volumenstroms bei saugseitiger Drosselung. PUNKT A: Start der Drosselung → keine Kavitationsblasen sichtbar, siehe Bild 5a. PUNKT B: Anstieg der Schallemission → Beginnende Kavitation sichtbar, siehe Bild 5b. PUNKT C: Vollentwickelte Kavitation sichtbar → größter RMS-Wert, siehe Bild 6b).

Der Versuch startet mit vollständig geöffneten Absperrarmaturen und damit maximalem Volumenstrom, der gemäß Kap. 2.3. starke, kontinuierliche SE erzeugt, siehe Punkt A in Bild 4. Durch die anschließende saugseitige Drosselung sinkt der statische Druck im Saugstutzen. Noch bevor der Dampfdruck erreicht wird, entgast die im Wasser gelöste Luft, gleichzeitig verringert sich der Volumenstrom durch die Pumpe und damit auch die Stärke der generierten SE. Zusätzlich dämpfen die Luftblasen die Schalleitung im Wasser. Weiteres Drosseln führt erst zur weiteren Verringerung des RMS-Wertes, dann zu dessen Stagnation und schließlich erreicht er ein kleines lokales Maximum, siehe Punkt B in Bild 4. Die Ausprägung des Kavitationsblasenschwarms unterscheidet sich hier nur unwesentlich von der in Bild 5b dargestellten. Durch weiteres Reduzieren des statischen Druckes gelangt man von der „entwickelten“ Kavitation, siehe Bild 6a, zur „vollentwickelten“ Kavitation, siehe Punkt C in Bild 4 und Bild 6b. Die SE steigt mit dem Grad der Kavitation stark an. Der Zustand der vollentwickelten Kavitation lässt sich nicht weiter steigern, da in diesem Punkt nahezu der geringste erreichbare Druck in der Pumpe vorhanden ist, siehe Bild 7 Punkt C.



**Bild 5a.** Blick in die Kreiselpumpe durch das transparente Gehäuse kurz vor der saugseitigen Drosselung. Markierung 1 zeigt eine der sieben rückwärtsgekrümmten Schaufeln des Pumpenlaufrades.



**Bild 5b.** Innerhalb des, mit einer geschlossenen Kurve markierten, Bereichs lassen sich Dampfblasen der beginnenden Kavitation erkennen. Die eingezeichneten Pfeile zeigen auf einige einzelne Gasblasen in der Nähe des Laufradrandes.



**Bild 6a.** Die geschlossene Kurve markiert den Dampfblasenschwarm der entwickelten Kavitation in einem Laufschaufelkanal.

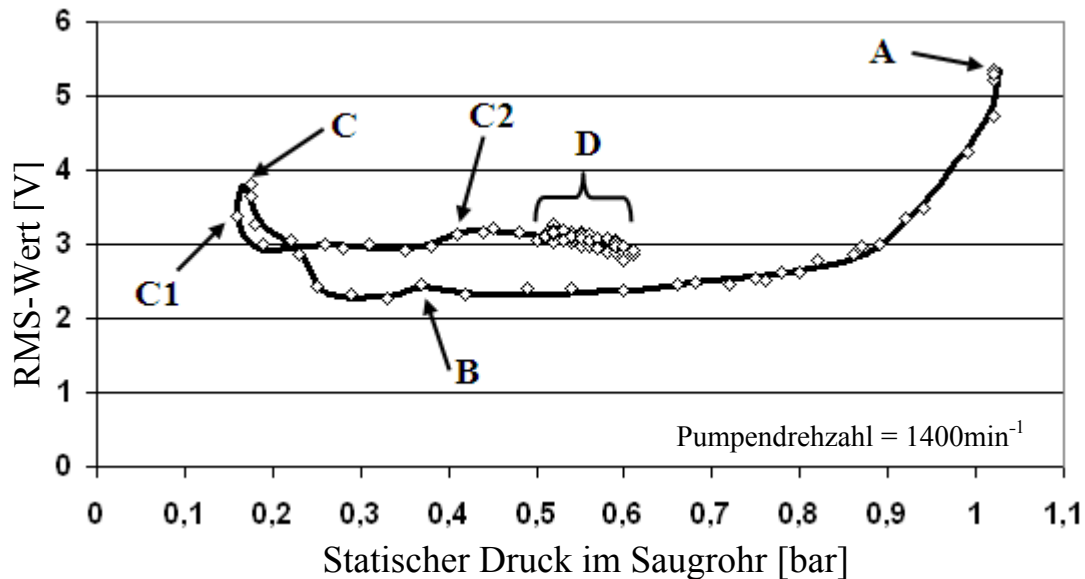


**Bild 6b.** Die Blasenschwärme der vollentwickelten Kavitation sind in zwei Schaufelkanälen ebenfalls mit geschlossenen Kurven markiert.

#### 4.3 Versuche zur Laufradverstopfung

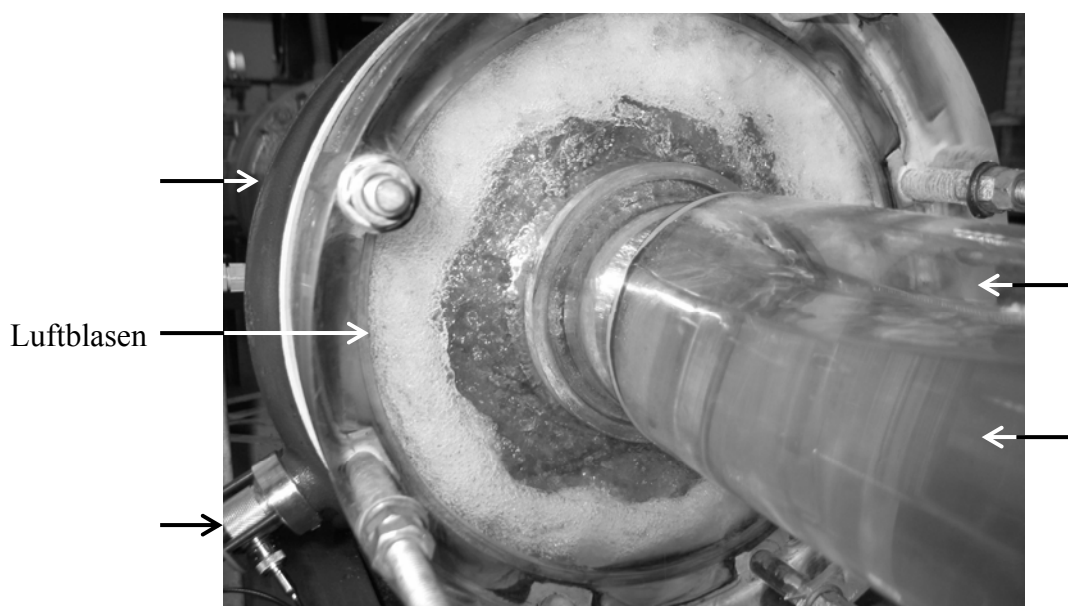
Bild 7 zeigt den Verlauf der RMS-Werte aufgetragen über dem statischen Druck im Saugrohr bei saugseitiger Drosselung. Die Punkte A bis C wurden schon in Kap. 3.2 erläutert.

Nach dem vollständigen Schließen des Schiebers, siehe Punkt C1, wird kein Wasser mehr durch die Pumpe gefördert. Der RMS-Wert fällt weiter auf ca. 3V ab. Der statische Druck im Saugrohr und in der Pumpe steigt langsam wieder an. Die kleineren Luftblasen vereinigen sich zu Größeren. Um den Punkt C2 steigt der RMS-Wert wieder leicht an. Um den Punkt C2 steigt der RMS-Wert wieder leicht an.



**Bild 7.** Verlauf der RMS-Werte vs. des statischen Druckes im Saugrohr bei saugseitiger Drosselung bis zur Verstopfung des Laufrades. Der lokale Druck im Saugmund ist aufgrund der Schaufelversperrung sehr viel geringer als der angezeigte statische Druck im Saugrohr. Die markierten Punkte A, B und C wurde schon vorher erläutert. PUNKT C1: Der saugseitige Schieber ist vollständig geschlossen, PUNKT C2: Die SE steigt wieder leicht an. PUNKT D: Sehr großer Luftanteil in der Pumpe, siehe Bild 8.

Bild 8 zeigt die Pumpe ca. 45 Sekunden nach dem vollständigen Absperren der Saugleitung. Die Pumpe ist fast vollständig durch die entgaste Luft blockiert. Der äußere, schaumige Kreisring hat einen höheren Luftanteil als der innere, fast wasserklare. Es wurde soviel Luft entgast, dass sogar das Saugrohr zu einem Drittel mit Luft gefüllt ist. Der RMS-Wert sowie der statische Druck in der Pumpe stagnieren, siehe Bereich D in Bild 7.



**Bild 8.** Die Aufnahme zeigt den Grad der Verstopfung des Laufrades mit entgaster Luft 45 Sekunden nach dem vollständigen Schließen des saugseitigen Schiebers. Das obere Drittel des Saugrohres ist mit Luft gefüllt. Es wird kein Wasser mehr gefördert. Die Drehzahl der Pumpe beträgt  $1400\text{min}^{-1}$ .

## 5 Diskussion der Versuchsergebnisse

Im Vergleich mit dem Kavitationskriterium  $3\% \Delta H$  registrierte die SE beginnende Kavitation erst bei etwas fortgeschrittenerer saugseitiger Drosselung, da beginnende Kavitation erst dann detektiert werden kann, wenn die Schallenergie, die durch die Dampfblasenimplosionen erzeugt wird, größer ist, als die, die durch die Dämpfung der Luft- und Dampfblasen in Wärme umgewandelt wird. Die Ausprägung des Blasenschwarms bei beginnender Kavitation bei beiden v.g. Detektionsmethoden unterschieden sich nur unwesentlich.

Das Ansteigen des RMS-Wertes mit der Zunahme der Kavitationsblasen bis zur vollentwickelten Kavitation, siehe Punkt C in Bild 4, lässt sich durch die Zunahme der Menge der implodierenden Kavitationsblasen logisch erklären.

Nach dem Punkt C sinkt die Intensität der Kavitationsimplosionen wegen des geringer werdenden Druckes auf die Dampfblasen. Der statische Druck im Laufrad sinkt, da sich aufgrund des 2-Phasengemisches die Energieumsetzung im Laufrad verschlechtert.

Nach dem völligen Schließen des Schiebers, siehe Punkt C1 in Bild 7, entfällt die hydrodynamische Druckreduzierung gänzlich und der statische Druck steigt auch durch das weitere Entgasen von Luft, die nicht mehr wegtransportiert wird, wieder an. Die zusätzliche Luft verschlechtert die Schallleitung, gleichzeitig lässt die Interaktion der Laufschaufeln mit dem Gemisch aus Luft und Wasser die SE um den Punkt C2 wieder leicht ansteigen.

Der Verlauf des RMS-Wertes bei saugseitiger Drosselung bis zur Verstopfung des Laufrades ist charakteristisch und bei konstanter Pumpendrehzahl, Wassertemperatur sowie Luftgehalt reproduzierbar.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Es fanden vergleichende Untersuchungen statt, um die verschiedenen Betriebszustände, die eine saugseitige Drosselung einer Kreiselpumpe hervorruft, zu bestimmen. Die RMS-Werte der SE, die stroboskopischen Beobachtungen der Strömung im Laufrad sowie die gemessenen Förderhöhen wurden korreliert. Die verschiedenen Kavitationsgrade als auch die nachfolgende Verstopfung des Laufrades lassen sich aus dem Verlauf des RMS-Wertes reproduzierbar separieren. Es zeigte sich, dass der Gehalt an gelösten Gasen im Wasser sowohl einen starken Einfluss auf die Betriebszustände der Pumpe als auch die generierte SE hat. Weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen Wassertemperaturen sind geplant.

## 7 Referenzen

- [1] **Bollrich, G.**, *Technische Hydromechanik I*, 6. Auflage. ISBN 978-3-345-00912-9, Huss-Medien GmbH Berlin, 2007.
- [2] **Dürrer, B., Wurm, F.-H.**, *Noise sources in centrifugal pumps*, Proceedings of the Int. Conference on Applied and Theoretical Mechanics, Venice Italy, Pages 203-207, 2006.
- [3] **Huhn, M.**, *Diagnose hydraulischer Fehlerzustände bei axialen Tauchmotorpumpen*, Dissertation TU Berlin, Fachbereich Verkehrs- und Maschinensysteme, 2003.
- [4] **Kliem, M.**, *Experimentelle und numerische Untersuchung zum Einfluss von Einbaubedingungen auf das Betriebs- und Kavitationsverhalten von Kreiselpumpen*, Diss. TU Darmstadt, FB Maschinenbau, 2006.
- [5] **Ziegler, B., Wiercholski, K., Miszczak, A.**, *Friction Forces Measurements for slide bearing test stand in maritime university Gdynia using the acoustic emission methode*, KONES 2008, Journal of Kones, Vol.15, Nr. 2, Pages 571 – 577, ISSN 1231 – 4005, Permanent Committee of KONES, Warsaw, 2008.
- [6] **Gülich, J.**, *Kreiselpumpen*, 3 Auflage, ISBN 978-3-640-05478-9, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2010.
- [7] **Kuttruff, H.**, *Physik und Technik des Ultraschalls*, ISBN 3-7776-0427-5, Hirzel Verlag 7000 Stuttgart, 1988.
- [8] **Bohl, W., Elmendorf, W.** *Strömungsmaschinen I*, 10. Auflage, ISBN 978-3-8343-3130-4, Vogel Verlag Würzburg, 2008.