

Anwendung der Schallemissionsanalyse zur Identifikation der Betriebsbedingungen von Strömungsmaschinen

Burkhard Ziegler

Technische Hochschule Mittelhessen, FB ME
Wiesenstr. 14, 35390 Gießen

burkhard.ziegler@me.thm.de

Kurzfassung Für den sicheren und ökonomischen Betrieb von Strömungsmaschinen sind fortlaufend Informationen über deren Betriebszustand notwendig. Die Schallemissionsanalyse als integrales Messverfahren bietet sich an, Betriebszustände, die sonst nur durch das Messen von mehreren physikalischen Größen (z.B. Volumenstrom, Druck) detektierbar wären, mit einem optimal positionierten Schallemissions-sensor und geeigneten Auswertelgorithmen zu identifizieren. Die Untersuchung möchte einen Beitrag leisten, dies zu realisieren. Dazu werden an einem Kreiselpumpenprüfstand unterschiedliche, praxisübliche Betriebszustände gefahren und jeweils die hydraulischen Parameter mit der synchron gemessenen Schallemission verglichen und die Abhängigkeiten aufgezeigt.

1 Einleitung

Der Anteil der Kreiselpumpen an den elektromotorisch angetriebenen Systemen in der EU im Jahre 2012 belief sich nach Angaben des Bundesministeriums für Wirtschaft [1] auf 21,9 Prozent. Für den Antrieb von Pumpen entfielen im Jahr 2017 in Deutschland 12% (26TWh) des industriellen Stromverbrauchs [2]. Aufgrund der sehr großen Bedeutung für die Versorgungssicherheit und deren ökonomischen Betrieb ist die fortlaufende Überwachung der Pumpen angezeigt [3]. Auf der hydraulischen Seite sind dabei die Drücke im Saug- sowie im Druckstutzen der Pumpe als auch der jeweilige Volumenstrom von Interesse, Drehzahl, Drehmoment und Leistung hingegen auf der Antriebsseite. Smarte Zustandsüberwachungssysteme mit kontaktloser Datenübertragung und zentraler, automatischer Auswertung als Dienstleistung liegen im Trend [4]. Am aussagekräftigsten aber auch aufwendigsten ist die kontinuierliche Messung der hydraulischen Messwerte in Kombination mit Drehzahl und Antriebsleistung, wobei in bestimmten Anwendungsfällen, z.B. im Abwasserbereich, die Betriebssicherheit durch die mögliche Verschmutzung der Sensoren eingeschränkt ist. Abhilfe schafft hier die indirekte Erkennung der Betriebszustände durch die kontinuierliche, softwaretechnische Analyse der Betriebsparameter des Antriebsmotors, wie z.B. beim System Rag-Buster [5]. Strömungsmaschinen, wie die hier untersuchte Kreiselpumpe, arbeiten immer zusammen mit den unterschiedlichsten Rohrleitungsanlagen (Rohre, Behälter, Absperrorgane, etc.). Veränderungen der Charakteristik der Rohrleitungsanlage wirken sich direkt auf die Betriebsparameter der Pumpe aus, vice versa. Wie schon vom Autor untersucht, lässt

sich das integrale Messverfahren Schallemissionsanalyse sehr gut zur Bestimmung der Betriebsbedingungen bei saugseitiger Drosselung (ΔH -3%, Kavitation) in Kreiselpumpen ohne direkten Kontakt mit dem Förderfluid, einsetzen [6]. Diese Untersuchung möchte das Wissen um die Abhängigkeiten der generierten Schallemission (SE) während der Zusammenarbeit von Pumpen und Rohrleitungsanlagen erweitern, wobei die Charakteristik beider Partner variiert wird. Dazu korreliert man die, je nach Betriebspunkt in verschiedenen Stärken, generierte SE mit den synchron gemessenen hydraulischen und mechanischen Werten von Pumpe und Antrieb. Die in den Untersuchungen gefundenen Zusammenhänge sollen die Basis für geeignete Auswertalgorithmen (KI, künstliche neuronale Netze) [7] bilden, die dann in einer höheren Programmiersprache implementiert und praktisch einsetzbar gemacht werden.

2 Versuchsaufbau

2.1 Kreiselpumpenprüfstand

Die Versuche wurden im Labor für Technische Fluidmechanik und Strömungsmaschinen des Instituts für Mechanik und Materialwissenschaften der THM, Campus Gießen durchgeführt.

Der verwendete Prüfstand verfügt über einen geschlossenen Wasserkreislauf, siehe Abb. 1. Ausgehend vom vertikalen Vorratsbehälter wälzt eine Kreiselpumpe (KSB, 80-250) Wasser durch verschiedene Rohrleitungen und Absperrorgane um. Die Zulaufhöhe des Wassers zur Pumpe lässt sich über den Wasserstand im Behälter einstellen. Die hydraulischen Messwerte können mittels Volumstrommessgeräte (CMD, MID) und Drucksensoren in der Saug- und Druckleitung bestimmt werden. Der Antrieb der Pumpe erfolgt durch einen drehzahlgeregelten E-Motor, Drehzahl und Antriebsdrehmoment werden kontinuierlich erfasst. Eine software-gesteuerte, mehrkanalige Anlage (Ahlborn AMR ES 5590-N1) erfasst die Messwerte synchron, mittelte sie über 3 Sekunden und transferierte die Daten anschließend zur Verarbeitung und Speicherung an einen Messrechner.

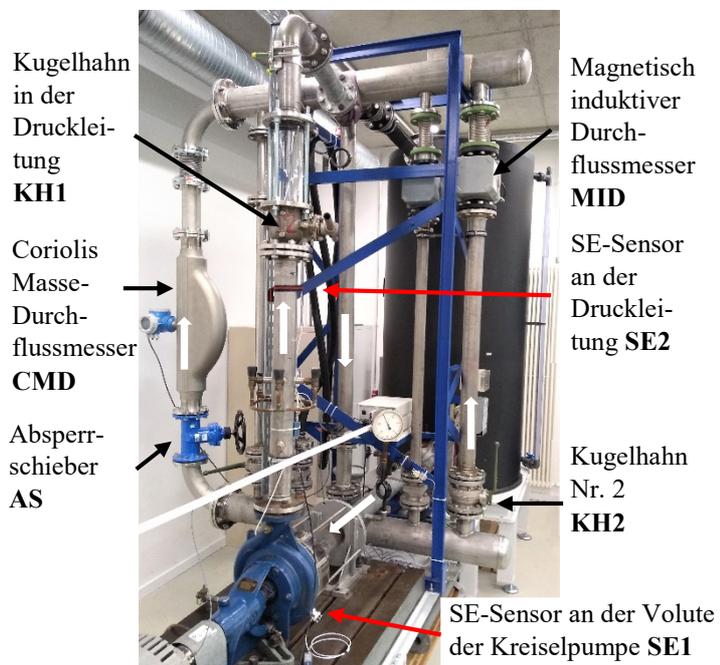


Abb. 1. Kreiselpumpenprüfstand mit den jeweiligen Strömungsrichtungen \Rightarrow und dem verwendeten Messequipment

2.2 Schallemissionsmessung

Die generierten Schallemissionen wurden mit zwei identischen Messketten der Fa. Mistras detektiert. Jede Messkette bestand aus einem WD-Breitbandsensor, einem Vorverstärker (26dB) und einem 1283-USB-AE Node™ Modul. Die Software AEwin™ for USB diente der Steuerung der USB-AE Node Module sowie der Datenspeicherung, -verarbeitung und -darstellung [8]. Folgender Hardware-Setup wurde bei beiden Kanälen verwendet: Auflösung 16Bit, feste Triggerschwelle 25dB, Bandpass 20kHz bis 1MHz, Abtastrate 5MSPS. Time

Driven Channel Data: RMS. Time Driven Rate: 50ms. Die Betriebspunkte wurden jeweils über 10s abgetastet. Die Berechnung der Mittelwerte erfolgte mit der AEWin statistics Funktion.

Eine vorhandene Fläche auf der Außenseite des Spiralgehäuses dient der Positionierung des SE1-Sensors, der die RMS-Volute Werte liefert, siehe Abb. 2. Dazu wurde die Guss Oberfläche eingeebnet und eine Andruckvorrichtung für den Sensor auf diese geklebt. Die Vorrichtung besteht aus einem kreisringförmigen Grundkörper aus Aluminium ($d_a = 38\text{mm}$, $d_i = 20\text{mm}$, Höhe = 8mm) mit drei M5 Gewindelöcher. Über eine kreisförmige Druckplatte mit Schaumstoffeinlage und 3 Kunststoffschrauben mit je einer Druckfeder wird der SE-Sensor auf die Volutenoberfläche angepresst.

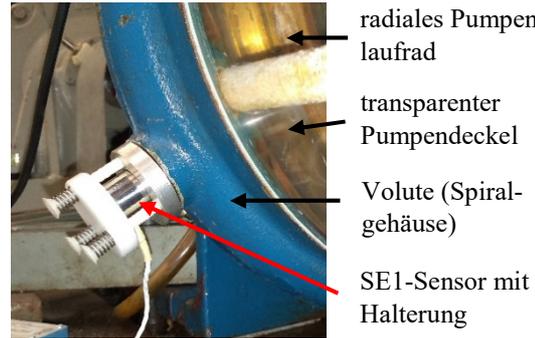


Abb. 2. Position und Fixierung des SE1-Sensors an der Volute der Kreiselpumpe

Der Sensor SE2, der die Schallemissionswellen für die Berechnung der RMS-Druckleitung Werte detektiert, wurde an der Oberfläche des Druckrohres der Kreiselpumpe positioniert. Der vertikale Abstand zum Druckstutzen der Pumpe beträgt 0,75cm. Die akustische Verbindung zwischen dem Druckrohr und dem Druckstutzen der Pumpe ist durch eine Schicht ($t=10\text{mm}$) Pertinax® getrennt. Der SE-Sensor wurde mittels Spannband und einem Koppelstück auf die Rohroberfläche gepresst. Das speziell angepasste Koppelstück dient zur Anpassung der zylindrischen Rohroberfläche an die plane, sensitive Fläche des SE2-Sensors und steigert so die Empfindlichkeit der Messung, siehe Abb. 3 [9]. Als Koppelmittel wurde dünnflüssiger Bienenhonig –nicht kristallisiert– eingesetzt. Er ermöglichte die dämpfungsarme Weiterleitung der generierten SE-Signale zwischen allen beteiligten Kontaktflächen während dieser Untersuchung.

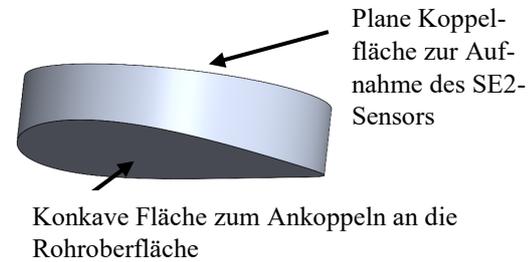


Abb. 3. Zur Erreichung konformer Flächenkontakte wurde ein spezielles Koppelstück aus Aluminium ($d_a = 19\text{mm}$) angefertigt.

3 Durchgeführte Versuche

Um möglichst viele, der in der Pumpen-Praxis vorkommende Betriebsbedingungen abzubilden, wurden drei grundsätzlich unterschiedliche Versuchsabläufe gefahren.

3.1 Reduzierung der Pumpendrehzahl

Die Variation der Drehzahl führt zu Änderung des von der Pumpe generierten Volumenstroms und der Förderhöhe. Die sogenannte Anlagenkennlinie beschreibt die Abhängigkeit der jeweils von der Pumpe zu kompensierenden Druckverlusthöhe über den gesamten möglichen Volumenstrombereich. Dazu wird die maximale Drehzahl der Pumpe ($n_{\text{Pumpe, max}} = 1402\text{min}^{-1}$) eingestellt, die Messwerterfassung gestartet und anschließend die Drehzahl langsam und kontinuierlich bis zum Stillstand reduziert. Das geförderte Wasser strömt dabei nacheinander durch die beiden vollständig geöffneten Kugelhähne KH1 und KH2, den Durchflussmesser MID und dann zurück in den Tank. Der Volumenstrom durch die Rohrleitungsanlage verringert sich dabei proportional zur Pumpendrehzahl. Die Druckverlusthöhe

zeigt eine im Mittel quadratische Abhängigkeit vom Volumenstrom. Die ins Wasser abgegebene hydraulische Leistung ($P_{\text{hydr.}}$) ist ebenfalls in Abb. 4 dargestellt. Beide RMS Verläufe zeigen ähnliche Abhängigkeiten vom Volumenstrom, wobei sich die an der Volute der Krei-

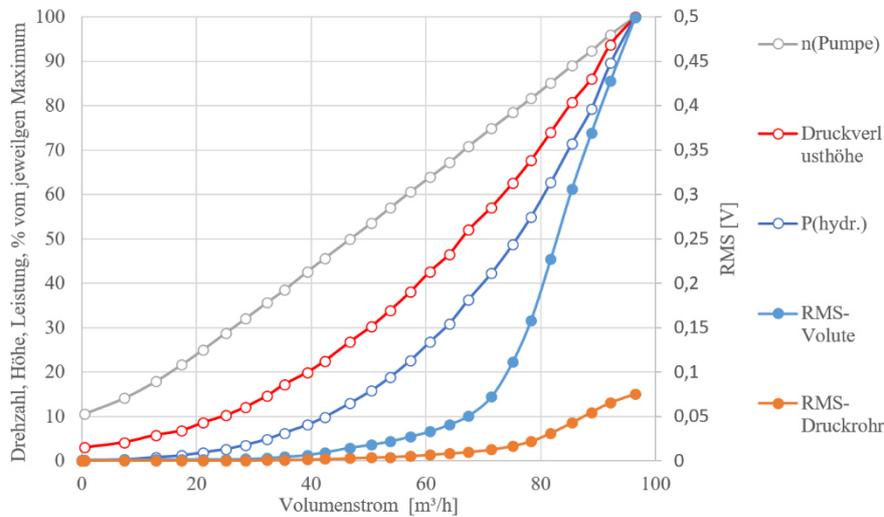


Abb. 4. Drehzahlreduzierung vom Maximum bis zum Stillstand. Die RMS-Verläufe zeigen ähnliche Abhängigkeiten vom Volumenstrom. Wobei an der Volute insgesamt viel höhere Werte gemessen wurden.

selmpumpe gemessenen Schallemissionswerte stärker mit dem Volumenstrom erhöhen als die an dem der Pumpe folgenden Druckrohr gemessenen.

3.2 Senkung der Zulaufhöhe

Die Zulaufhöhe zur Pumpe bezieht sich auf deren Laufradmitte und somit auf die Rohrleitungsachse der Ansaugleitung und die Mitte des Tankstutzens. Sie wurde durch schrittweises Ablassen des Wassers aus dem Tank reduziert. Die Ergebnisse dieses Versuches sind in Ab-

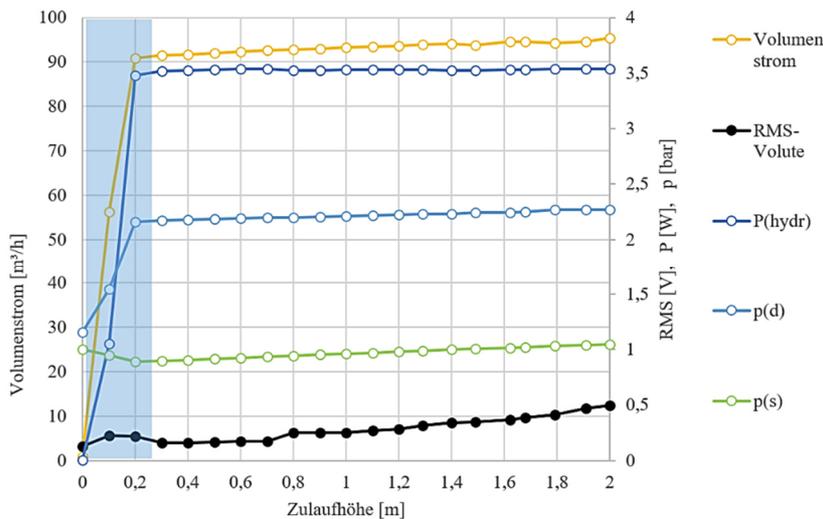


Abb. 5. Verlauf der gemessenen Werte beim Senken der Zulaufhöhe. Die RMS-Werte sinken mit der Zulaufhöhe. Ab 0,3m wird wieder deutlich mehr SE generiert, die Pumpe zieht hier Luft.

bildung 5 dargestellt. Die Pumpendrehzahl blieb dabei konstant auf 1402 min^{-1} . Auf die Darstellung des Verlaufs der RMS-Druckleitung wurde verzichtet, da dieser sich nur wenig von den RMS-Volute Werten unterscheidet. Von 2m auf 0,3m Zulaufhöhe sinkt der Volumenstrom und der Druck am Ausgang der Pumpe jeweils nur um ca. 5%. Der saugseitige statische Druck um ca. 15%. Der Verlauf der gemessenen RMS-Werte an der Vo-

lute korreliert hier am besten mit dem Verlauf statischen Druckes $p(s)$ am Saugstutzen der Kreiselpumpe. Ab einer Zulaufhöhe von 0,3m (Blau hinterlegter Bereich in Abb. 5) wird

wieder deutlich mehr Schallemission generiert. Aufgrund der jetzt ungenügenden Überdeckung zwischen der freien Wasseroberfläche und der Auslassöffnung wurden Oberflächenwirbel, sogenannte „luftziehende Wirbel“, im Tank provoziert. Dieser instationäre Vorgang führt zu einer diskontinuierlichen Wasserförderung und damit verbundenen Schwingungen in der Pumpe. Bei null Zulaufhöhe steht das Wasser nur noch bis zur Mitte des sich konstant drehenden Pumpenlaufrads, dies führt -wie im Diagramm eingezeichnet- zu entsprechend wenig Schallemission (0,15V). Läuft das Wasser vollständig aus dem Saugstutzen ist nur noch eine geringe Menge im Laufrad und im untersten Bereich des Spiralgehäuse vorhanden (sogenannter Trockenlauf), der RMS-Wert sinkt dann auf 17mV. Im Stillstand der Pumpe wurden nur noch ca. 25 Prozent dieses RMS-Wertes gemessen. Die letzten beiden Werte sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht in Abb. 5. eingezeichnet.

3.3 Druckseitige Drosselung

Mit jeweils einem der drei druckseitigen Absperrorgane (KH1, KH2, AS) wurde der Volumenstrom der Pumpe (Drehzahl = 1402 min^{-1} = konstant) kontinuierlich vom Maximum bis auf Null gedrosselt. Die Abbildungen 6 bis 8 zeigen die dabei gemessenen Verläufe beider RMS-Werte jeweils pro Absperrorgan. Die in Abb. 6 eingetragene Drosselkurve (Förderhöhe vs. Volumenstrom) gilt für alle Abbildungen des Kapitels 3.3.

3.3.1 Drosselung mittels Kugelhahn in der Druckleitung der Kreiselpumpe

Speziell im Volumenstrombereich zwischen $20 \text{ m}^3/\text{h}$ und $60 \text{ m}^3/\text{h}$ tritt starke Kavitation im Kugelhahn KH1 auf, welche entsprechend starke Schallemissionen generiert, siehe Abb. 6.

Aufgrund der kurzen Distanz zur Pumpe (1m) wird dadurch auch der RMS-Volute Wert beeinflusst, siehe dazu auch [10,11]. Der Absperrschieber AS war hierbei vollständig geschlossen, der Kugelhahn KH2 vollständig geöffnet. Der eingetragene Verlauf der Förderhöhe ist typisch für eine radiale Kreiselpumpe und wird hauptsächlich aus den gemessenen Druck- und Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Saugstutzen und Druckstutzen

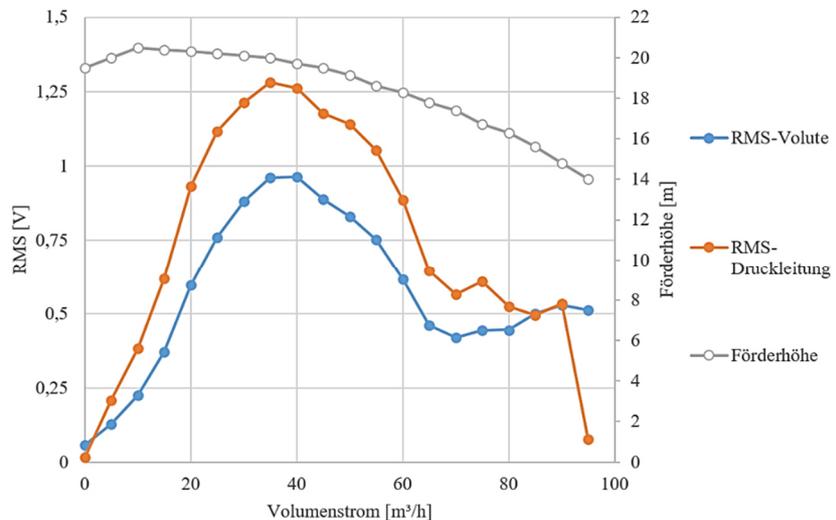


Abb. 6. Druckseitige Drosselung mittels Kugelhahn KH1. Es sind die Verläufe der Förderhöhe der Pumpe, der RMS-Volute und RMS-Druckleitungs Werte jeweils versus dem Volumenstrom dargestellt.

der Pumpe berechnet [12]. Ohne Durchfluss beträgt der RMS-Wert an der Druckleitung der Kreiselpumpe 0,015V, die hier gemessene Schallemission stammt aus der Pumpe und wird hauptsächlich durch die Reibung und Verwirbelung des Wassers in und auf dem Pumpenlaufrad generiert. Bei $95 \text{ m}^3/\text{h}$ wird ein nur fünffach höherer Wert gemessen, da ein voll geöffneter Kugelhahn strömungstechnisch mit einem einfachen Rohrstück gleichgesetzt werden kann, d.h. die durchströmte Querschnittsfläche bleibt konstant.

3.3.2 Drosselung mittels Kugelhahn KH2

Die Kugelhähne KH1 und KH2 sind baugleich und generieren jeweils die selbe Kavitationsstärke in Abhängigkeit vom Durchfluss. Trotzdem wirkt sich diese beim KH2 nicht erkennbar auf die RMS-Druckleitungs Werte aus, siehe Abb. 7. Dies lässt sich durch die Schwächung der SE-Signale aufgrund der großen Rohrleitungslänge von ca. 4,5m zwischen KH2 und SE2 erklären. Der Verlauf der RMS-Volute Werte zeigt hier demnach nur die in der Kreiselpumpe generierte Schallemission. Der Kugelhahn KH1 war vollständig offen der Schieber AS vollständig geschlossen.

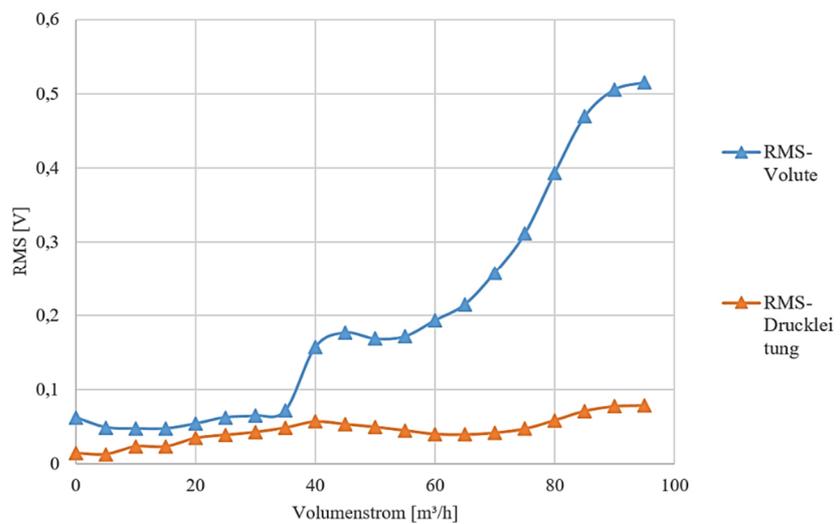


Abb. 7. Druckseitige Drosselung mittels Kugelhahn KH1. Verlauf der Werte RMS-Volute und RMS-Druckleitung

3.3.3 Drosselung mittels Absperrschieber

Auch bei der Drosselung mittels des Absperrschiebers zeigt sich keine nennswerte Beeinflussung der RMS-Volute Werte, siehe Abb. 8. Der Abstand zwischen dem AS und dem SE2 beträgt hier 5,2m. Die RMS-Verläufe sind fast identisch mit den in Abb. 7 dargestellten. Nur im Volumenstrombereich zwischen 5m³/h und 40m³/h sind geringe Unterschiede beim Verlauf RMS-Druckleitung feststellbar. Dies deutete auf ein anderes Strömungs- und Kavitationsverhalten von Absperrschiebern im Vergleich zu dem von Kugelhähnen hin und sollte noch näher untersucht werden. Das Wasser strömte hier von der Pumpe durch den voll geöffneten Kugelhahn KH1 zum Absperrschieber AS, dann durch den Coriolis Masse-Durchflussmesse CMD zur Bestimmung des Volumenstroms und zurück in den Vorratsbehälter. Der Kugelhahn KH2 war vollständig geschlossen.

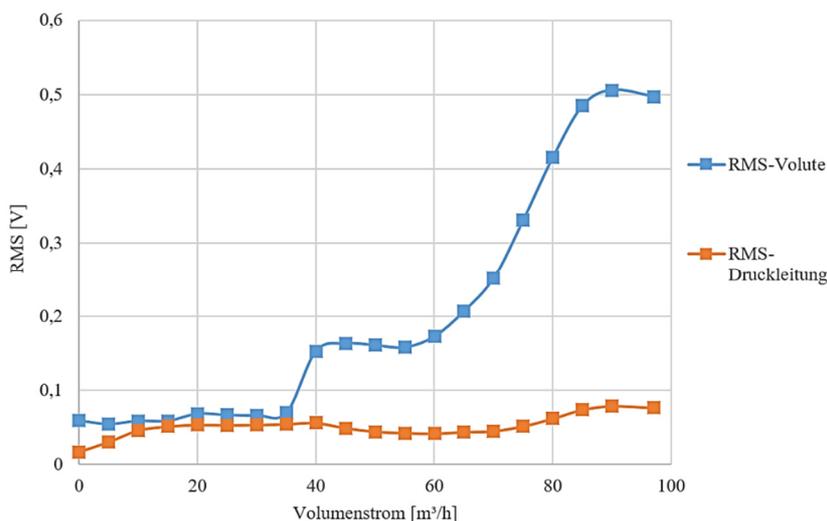


Abb. 8. Verlauf der Werte RMS-Volute und RMS-Druckleitung bei druckseitige Drosselung mittels Absperrschieber

3.3.4 Vergleich der RMS-Verläufe der verschiedenen druckseitigen Drosselarten

Die Auswirkungen der verschiedenen Drosselmöglichkeiten auf den RMS-Wert der Volute sind – zur besseren Vergleichbarkeit – in Abb. 9 zusammengefasst. Der Einfluss der Kavitation im Kugelhahn KH1 ist deutlich zu erkennen. Bei der Drosselung des Volumenstroms separiert sich der entsprechende RMS-Volute Verlauf ab $80\text{m}^3/\text{h}$ deutlich von den RMS-Volute Verläufen der beiden anderen Absperrorgane (KH2 und AS), die nahezu identisch sind. Dessen Maximum bei $40\text{m}^3/\text{h}$ ergibt sich in erster Näherung aus der im Kugelhahn generierten hydraulischen Leistung zur Erzeugung des Druckverlustes. Bei vollständiger Drosselung des Volumenstroms entstehen in keinem der Absperrorgane Strömungs- oder Kavitationsgeräusche, deshalb sind hier die RMS Werte identisch. Einzig durch das sich weiter mit konstant 1402min^{-1} drehende Pumpenlaufrad wird hier noch nennenswert Schallemission generiert.

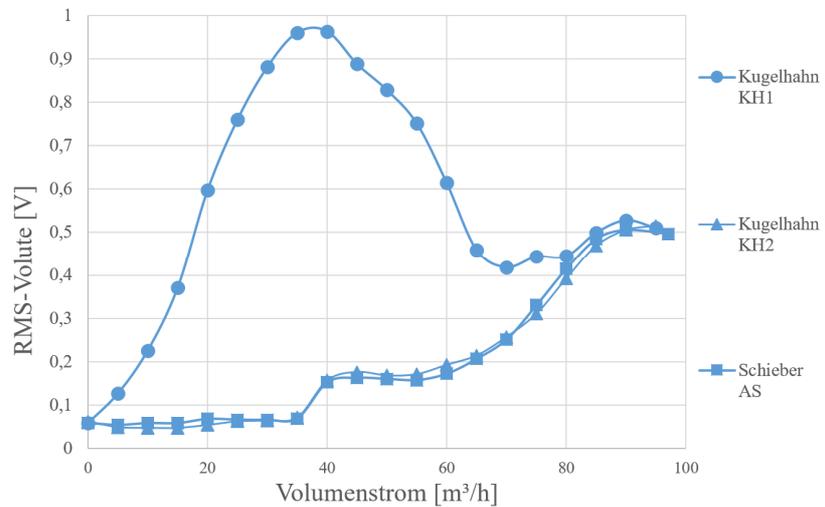


Abb. 9. Vergleich der Auswirkungen der verschiedenen druckseitigen Drosselarten auf den RMS Wert der Volute.

4 Ergebnisse und festgestellte Abhängigkeiten

Die Versuche ergaben jeweils typische RMS-Verläufe (RMS-Volute, RMS-Druckleitung), die im direkten Vergleich aber deutliche Unterschiede zeigten.

Nur bei der Senkung der Zulaufhöhe zur Pumpe waren beide nahezu identisch, siehe Kap. 3.2. Zu erklären ist dies damit, dass hierbei der Volumenstrom nicht durch eine Drehzahländerung oder eine Drosselung realisiert wird, sondern durch die strömungstechnisch weit unkritischere Absenkung der Zulaufhöhe. Ein Trockenlaufen der Pumpe macht sich durch einen charakteristischen leichten Anstieg gefolgt von einem starken Abfall der RMS Werte an der Volute bemerkbar.

Zwischen Volumenstrom und Pumpendrehzahl besteht proportionale Abhängigkeit, aber zwischen den RMS-Werten und dem Volumenstrom eine exponentielle, siehe Abb. 4. Eine direkte Abhängigkeit zwischen den RMS-Werten und der Drehzahl wurde nicht festgestellt. Eine indirekte Beeinflussung besteht natürlich über den sich ändernden Volumenstrom.

Bei druckseitiger Drosselung hat die Distanz des Absperrorgans zur Pumpe einen sehr großen Einfluss. Die Absperrorgane erzeugen den gewünschten Druckverlust durch die Einschnürung des Strahlquerschnittes, was letztlich zu Strömungs- und Kavitationsgeräuschen führt. Bei gleicher Kavitationsstärke führte ein Abstand von einem Meter zur Pumpe zu einer sehr starken Überlagerung der von der Pumpe generierten Schallemission, bei einem Abstand von größer 4m zu keiner Überlagerung, siehe Abb. 9. Die Verläufe RMS-Volute bei einer Drosselung in ausreichendem Abstand (Kap. 3.3.2 und 3.3.3) zeigen demnach nur die in der Pumpe generierte Schallemission an.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Pumpen und Rohrleitungsanlagen arbeiten immer zusammen im jeweiligen Betriebspunkt. Änderungen der Anlagenparameter beeinflussen immer auch die Pumpenparameter, vice versa. Es konnte versuchstechnisch nachgewiesen werden, dass dabei jeweils charakteristische RMS-Verläufe generiert werden. Untersucht wurden die folgende Einflüsse:

- Reduktion der Pumpendrehzahl
- Senkung der Zulaufhöhe des Wassers zur Pumpe
- Druckseitige Drosselung
 - mit unterschiedlichen Abständen des Absperrorgans zur Pumpe
 - mit unterschiedlichen Absperrorganen (Kugelhähne und Schieber).

Der Zusammenhang zwischen generierter Schallemission und der Pumpenhydraulik ist in weiteren Versuchen noch zu klären. Dazu wären weitere identische Schallemissionsensoren verteilt an der Oberfläche der Volute hilfreich. Ebenso könnte weitere Positionen an der Rohrleitungsanlage instrumentiert werden, um den Einfluss der verschiedenen Einbauten (Bögen, plötzliche Rohrrichtungsänderungen, Sammler, Wellenrohrkompensatoren, usw.) auf die Schwächung der Schallemissionssignale zu erforschen. Eine Wiederholung der Untersuchung in anderen Frequenzbereichen und mit anderen Sensorcharakteristiken ist geplant. Kreiselpumpen anderer spezifischer Drehzahl (Laufradform) und Leistung stehen für weitere Experimente bereit.

Die in den Untersuchungen gefundenen Zusammenhänge sollen in ein smartes Monitoringssystem für hydraulische Strömungsmaschinenanlagen auf Basis der Schallemissionsanalyse einfließen.

6 Referenzen

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/energieeffizienz.html>, Zugriff 01/21.
- [2] Deutsche Energie-Agentur (dena), *Energieeffizienz in kleineren und mittleren Unternehmen*, Stand 12/15, www.dena.de, Zugriff 01/21.
- [3] Werner, R., *Störungstolerantes Sensorsystem zur Zustandsüberwachung rotordynamischer Pumpen*, Dissertation im Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der TU Darmstadt, 2011.
- [4] ABB, *Condition Monitoring für Pumpen*, Ability Smart Sensor, www.abb.de/smartsensor, Zugriff 01/21.
- [5] Herborner-Pumpen, <https://www.herborner-pumpen.de/de/info/aktuelles/news/rag-buster-fuer-befreiten-pumpenlauf-bei-abwasserfoerderung-10/>, Zugriff 01/21.
- [6] Ziegler, B. *Bestimmung der Betriebsbedingungen saugseitig gedrosselter Kreiselpumpen mittels Schallemissionsanalyse*, 18. Kolloquium Schallemission, Wetzlar 2011.
- [7] Lämmel, U., Cleve, J., *Künstliche Intelligenz – Wissensverarbeitung, Neuronale Netze–*, 5. Auflage, E-Book-ISBN 978-3-446-46363-9, Hanser-Verlag, 2020.
- [8] USB-AE Node™ & AEwin™ for USB™ Software Users's Manual, Mistras Group Inc, USA, 2010.
- [9] Ziegler, B., Dudzik, K., *An overview of different possibilities to master the challenge of coupling an AE-sensor to an object of interest partly using examples of previous investigations*, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 26, No. 1 2019.
- [10] Ziegler, B., Pöllhuber, D., *Vergleich der Ergebnisse aus SE-Messungen und synchron bestimmten hydraulischen Parametern an einem Absperrorgan mit denen der numerischen Simulation*, 22. Kolloquium Schallemission und 3. Anwenderseminar Zustandsüberwachung mit geführten Wellen, Karlsruhe 2019.
- [11] Dudzik, K., Ziegler, B., *The possibility of application the acoustic emission method for monitoring flow of water within a ball valve*, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 23, No. 4 2016.
- [12] Gülich, J.-F., *Kreiselpumpen -Handbuch für Entwicklung, Anlagenplanung und Betrieb*, 4. Auflage, ISBN 978-3-642-40032-2 (eBook), 2014.