

Experimentelle und numerische Untersuchung der Schallentstehung in Pumpen und deren Antrieben und der Abstrahlung von Flüssigkeits- und Luftschall

Abschlussbericht

Kurzfassung:

Das Ziel des Projektes war die Erarbeitung einer numerischen Prozesskette zur validen Vorhersage der Flüssigkeits- und Luftschallabstrahlung von Pumpen. Dazu wurden sieben Arbeitspakete (AP) definiert: Die ersten beiden AP wurden, in Form der numerischen Strömungsanalysen und der Simulation der Gehäuseschwingungen, von der Universität Rostock bearbeitet. Zusätzlich stand hier ein umfangreicher Messaufbau einer Prototypenpumpe zur Verfügung, der im AP5 experimentell untersucht wurde. Darauf aufbauend entwickelte die Technische Universität Hamburg eine Methode zur Simulation des Flüssigkeitsschalls und berechnete das Schallfeld in der Pumpe (AP3). Des Weiteren wurde die Luftschallabstrahlung der Pumpe mittels der im Vorprojekt fertiggestellten Prozesskette abgebildet (AP4) und mit den Messdaten aus AP5 verglichen. Zur Übertragung und Anwendbarkeit der gesamten Softwareumgebung wurde diese in AP6 umfangreich dokumentiert und es wurden die Projektergebnisse im Abschlussbericht zusammengetragen (AP7).

Die Strömungsanalysen der Prototypenpumpe erfolgten in ANSYS CFX für drei verschiedene Betriebspunkte. Zur Modellierung wurden verschiedene Turbulenzmodelle eingesetzt ($k-\omega$ -SST, $k-\omega$ -SST SAS, DES-SBES). Anschließend wurden die Wanddruckfluktuationen ausgewertet und das gesamte Strömungsfeld mithilfe der Proper Orthogonal Decomposition (POD) analysiert. Das Schwingverhalten der flüssigkeitsgefüllten Pumpe wurde mithilfe eines FEM-Modells in ANSYS Mechanical untersucht. Eigenfrequenzen und Eigenformen wurden durch eine Modalanalyse berechnet und mithilfe experimenteller Ergebnisse validiert. Basierend auf den in der Strömungsanalyse berechneten Wanddruckfluktuationen wurden anschließend für ausgewählte Frequenzen harmonische Analysen durchgeführt und die Oberflächengeschwindigkeiten für die anschließende Berechnung der Luftschallabstrahlung extrahiert. Bei der Berechnung des Schallfeldes um die Pumpe konnten gute Übereinstimmungen mit den Messwerten erzielt werden. Zur Berechnung des Flüssigkeitsschalls wurde eine numerische Vorhersagemethode in der Finite-Volumen-Umgebung OpenFOAM® entwickelt und verifiziert. Unter Verwendung der Strömungsergebnisse wurden hiermit die Schallquellen und das Schallfeld in der Pumpe untersucht. Das akustische Modell wurde um Teile des angeschlossenen Rohrleitungssystems erweitert und die Simulationsergebnisse wurden mit Hydrofonmessungen verglichen.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Berichtsumfang:	100 S., 91 Abb., 13 Tab., 30 Lit.
Beginn der Arbeiten:	01.01.2018
Ende der Arbeiten:	31.05.2020
Zuschussgeber:	Forschungsfond Pumpen
Forschungsstellen:	Universität Rostock, Lehrstuhl Strömungsmaschinen (LSM), Leiter: Prof. Dr.-Ing. F.-H. Wurm Technische Universität Hamburg, Institut für Modellierung und Berechnung, Leiter: Prof. Dr.-Ing. Otto von Estorff
Bearbeiter und Verfasser:	Dr. Andre Laß (ITU), Joscha Piepiorka (MUB), Dr. Matthias Witte (ITU)
Vorsitzender des Projektbegleitenden Ausschusses:	Dr. Tobias Kalkkuhl, WILO, Dortmund

Vorsitzender wiss. Beirat:

Dr. Gunther Treutz, MUNSCH Chemie-Pumpen GmbH,
Ransbach-Baumbach

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Das IGF-Vorhaben Nr. 19724 BG/1 der Forschungsvereinigung *FKM - Forschungskuratorium Maschinenbau e.V.* 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.

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Der vollständige Abschlussbericht des Vorhabens kann über das Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM) e. V. bezogen werden (Postanschrift: Lyoner Str. 18, 60528 Frankfurt am Main, E-Mail: info@fkm-net.de, Tel.: +49 69 6603 1681).

Inhaltsverzeichnis

1	Management Report	7
2	Einleitung	8
2.1	Problemstellung	8
2.2	Arbeitshypothese	8
2.3	Forschungsgegenstand	9
2.3.1	Prototypenpumpe	9
2.3.2	Hydraulisches System	10
3	Simulation und Analyse der Strömung	11
3.1	Modellbildung	11
3.1.1	Turbulenzmodellierung	11
3.1.2	Vernetzung	11
3.1.3	Randbedingungen	12
3.2	Erzielte Ergebnisse	13
3.2.1	Integrale Kennwerte	13
3.2.2	Analyse der Wanddruckverteilung	14
4	„Proper-Orthogonal-Decomposition“ (POD)	22
5	Simulation der Gehäuseschwingungen	26
5.1	Theoretische Grundlagen	26
5.1.1	Grundgleichungen	26
5.1.2	Modalanalyse und Harmonische Analyse	27
5.2	Modellbildung der Prototypenpumpe	28
5.2.1	Vernetzung von Struktur- und Fluidvolumen	28
5.2.2	Materialeigenschaften	29
5.2.3	Randbedingungen der Modalanalyse und Harmonischen Analyse	30
5.3	Erzielte Ergebnisse	32
5.3.1	Modalanalyse	32
5.3.2	Harmonische Analyse	34
6	Entwicklung einer Methode zur Simulation des Flüssigkeitsschalls	36
6.1	Störungsverfahren der Strömungsakustik	36
6.1.1	Expansion about Incompressible Flow	37
6.1.2	Acoustic Perturbation Equations	37
6.1.3	Linearized Perturbed Compressible Equations	37
6.1.4	Perturbed Convective Wave Equation	38
6.2	Zeitintegrationsverfahren höherer Ordnung	38
6.3	Berücksichtigung der Rotation des Schaufelbereiches	39
6.4	Transfer und Interpolation der Strömungsergebnisse	40
6.5	Randbedingungen	42
6.6	Verifizierung des Strömungsakustik-Lösers	42

6.6.1	Modellbildung	42
6.6.2	Numerische Strömungsergebnisse	43
6.6.3	Simulation der Schallabstrahlung.....	44
7	Experimentelle Untersuchungen	52
7.1	Versuchsaufbau und Durchführung.....	52
7.2	Messdatenerfassung und Analyse	53
7.3	Erzielte Ergebnisse.....	54
7.3.1	Abstrahlcharakteristiken.....	54
7.3.2	Luftschall- und Hydrofonmessungen.....	58
8	Simulation des Strömungsschalls in einer Radialpumpe	62
8.1	Modellbildung	62
8.1.1	Annahmen und Eigenschaften des Modells	63
8.1.2	Qualitative Verifizierung des Modells	63
8.1.3	Modellerweiterung zur Berücksichtigung des Rohrleitungssystems	65
8.1.4	Numerische Strömungsergebnisse	66
8.2	Simulation des Strömungsschalls in der Pumpe	67
8.2.1	Analyse der Schallquellen.....	67
8.2.2	Analyse des Schallfeldes	68
8.2.3	Diskussion der ersten Ergebnisse.....	71
8.3	Simulation des Strömungsschalls unter Berücksichtigung der Rohrleitungen	71
8.3.1	Analyse der Schallquellen.....	71
8.3.2	Analyse des Schallfeldes im Rohrleitungssystem	73
8.3.3	Vergleich mit Hydrofonmessungen	76
8.3.4	Diskussion der Ergebnisse	79
9	Simulation der Luftschallabstrahlung einer Radialpumpe.....	80
9.1	Boundary-Elemente-Methode zur Berechnung der Vibroakustik	80
9.2	Modellbildung	81
9.3	Erzielte Ergebnisse.....	83
9.3.1	Abstrahlcharakteristiken.....	83
9.3.2	Summenschalldruckpegel.....	87
10	Zusammenfassung und offene Fragestellungen.....	89
11	IGF spezifische Erläuterungen zum Forschungsprojekt.....	90
11.1	Gegenüberstellung der durchgeführten Arbeiten und den Ergebnissen mit den Zielen des Projektantrags.....	90
11.2	Erläuterung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	90
11.3	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten.....	91
11.4	Fortschreibung des mit dem Antrag vorgelegten Plans zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft, ergänzt um eine Einschätzung der Realisierbarkeit dieses	

Transferkonzepts, das auch alle Arbeiten enthält, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen	91
12 Danksagung.....	93
12.1 Literaturverzeichnis	94
12.2 Abkürzungsverzeichnis	96
12.3 Abbildungsverzeichnis.....	97

1 Management Report

In this project a software environment for the simulation of the airborne and hydroacoustic sound radiation of turbo pumps was developed. For this purpose different modelling tools were used, developed and combined to a multiphysical process chain. The functional sequence starts with a transient flow simulation, which generates the input data for the sound sources. On the one hand, the exciting wall pressure forces for the structural simulation are extracted from the flow results. On the other hand, hydroacoustic source terms are derived in the fluid. The structural vibrations of the casing and the pipes are simulated with the Finite Element Method. As a result, the surface vibrations are used to calculate the airborne sound radiation with the Boundary Element Method efficiently. The hydroacoustics in the pump and the pipe system are determined with the Perturbed Convective Wave Equation and the Finite Volume Method. The closed process chain was successfully used to predict the sound radiation of an experimental prototype pump.

The software environment can from now on be used for the numerical prediction of the sound radiation of turbo pumps. This opens new possibilities for reducing the sound emissions. In the future, numerical predictions of the sound sources and the induced sound fields can already be made and evaluated during the development phase. This allows design features for noise reduction to be tested and finally implemented. Despite the partial validation of the method for the prototype pump, the informative value regarding the comparability of several calculation results is already given. In summary, manufacturers of turbo pumps have an operational software environment for the prediction of hydroacoustic and airborne sound radiation.

2 Einleitung

Das Forschungsthema des Projektes besteht in der experimentellen und numerischen Untersuchung der Schallentstehung in Pumpen und deren Antrieben sowie der dadurch induzierten Abstrahlung von Flüssigkeits- und Luftschall. Dazu gilt es eine numerische Prozesskette zur validen Vorhersage der Schallabstrahlung von Pumpen zu entwickeln. Der Strömungsschall innerhalb der Pumpe sowie die Luftschallabstrahlung des Pumpengehäuses werden numerisch simuliert und abschließend mit experimentellen Messdaten verglichen.

2.1 Problemstellung

Pumpen werden in sehr großer Anzahl in vielen Anwendungen eingesetzt. Typische Anwendungen finden sich in der Gebäudetechnik, der Industrie, der Energietechnik, in Kraftfahrzeugen und in Konsumgütern. In einigen dieser Anwendungen ist die Abstrahlung von Flüssigkeits- und Luftschall der Pumpen ein wesentliches Kriterium für die Wettbewerbsfähigkeit des Produktes. Eine typische schallsensible Anwendung ist die Gebäudetechnik, in der Pumpen in großer Stückzahl für unterschiedlichste Anwendungen eingesetzt werden (z.B. Heizungs-, Kältekreisläufe, Wasserversorgung und Abwasserentsorgung). Systematische Untersuchungen zu den Ursachen und Beeinflussungsmöglichkeiten der Abstrahlung des Flüssigkeits- und Luftschalls von Pumpen sind den Autoren nicht bekannt. Als besonders problematisch erweist sich für Pumpenhersteller die Tatsache, dass die Vorausberechnung der zu erwartenden Schallabstrahlung eines Produktes während der Entwicklung derzeit nicht möglich ist. Dies liegt u.a. darin begründet, dass bislang keine in sich geschlossene Prozesskette numerischer Verfahren existiert, um die Flüssigkeits- und Luftschallabstrahlung zu berechnen. Experimentelle Untersuchungen mit Prototypen bzw. Parameterstudien hinsichtlich schallreduzierender Maßnahmen sind ebenfalls nur eingeschränkt möglich, da hierfür aus fertigungstechnischen Gründen meist nicht die Werkstoffe des Serienproduktes eingesetzt werden können. Die dargestellte Situation führt gegenwärtig zu sehr langen Entwicklungszeiten für Pumpen in schallsensiblen Anwendungen. Die deutschen Pumpenhersteller sind weltweiter Technologieführer für viele Pumpenanwendungen. Dies betrifft auch Pumpen für die Gebäudetechnik. Zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit und der technologischen Führerschaft der deutschen Hersteller ist es notwendig, zukünftig die Flüssigkeits- und die Luftschallabstrahlung der Produkte im Entwicklungsstadium vorhersagen zu können.

2.2 Arbeitshypothese

Die Zielstellung dieses Projektes ist es, die Flüssigkeits- und Luftschallabstrahlung von Pumpen zu erforschen und hierfür eine experimentell validierte Simulationsumgebung zur numerischen Berechnung zur Verfügung zu stellen. Die Simulationsumgebung wird die miteinander gekoppelten numerischen Verfahren zur Strömungs-, Struktur-, Flüssigkeits- und Luftschallberechnung beinhalten. Dabei werden Software-Eigenentwicklungen der Technischen Universität Hamburg (TUHH) zur Flüssigkeits- und Luftschallberechnung mit kommerziell verfügbaren Gleichungslösern zur Strömungs- und Strukturberechnung kombiniert. Mit Hilfe der in den Vorprojekten erarbeiteten experimentellen Infrastruktur an der Universität Rostock (U Rostock) können die einzelnen numerischen Verfahren mit experimentellen Daten validiert werden. Hierdurch lassen sich Rückschlüsse ziehen, inwieweit die Modellierungstiefe der eingesetzten Verfahren ausreichend ist, um alle wesentlichen physikalischen Phänomene richtig abzubilden bzw. welche Veränderungen herbeigeführt werden müssen, um dies zu erreichen. Insbesondere trifft dieser Punkt auch für die Strömungssimulationen zu, da sich aus diesen Ergebnissen die anregenden Kräfte für die Struktursimulation und die Quellterme für die Simulation des Flüssigkeitsschalls ergeben. Für die Strömungs- und Struktursimulation soll das kommerzielle Softwarepaket ANSYS eingesetzt werden. Dieses wird bei den beteiligten Industriepartnern bereits gegenwärtig verwendet. Für die Flüssigkeits- und Luftschallsimulation sollen im Rahmen des Projektes neue Verfahren entwickelt und in eine bestehende Softwareumgebung implementiert werden. Die Forschungsarbeiten werden durch die Erarbeitung angepasster Softwareschnittstellen zur Datenübergabe zwi-

schen den einzelnen numerischen Verfahren ergänzt. Die Übergabe der transienten Fluidkräfte auf das Strukturmodell erfolgt dabei innerhalb der internen Datenstruktur von ANSYS. Zur Berechnung der Flüssigkeitsschallabstrahlung werden die Ergebnisse der Strömungssimulation im transienten ANSYS CFX Format (*.trn) übergeben. Die Oberflächen-Schwinggeschwindigkeiten des Pumpengehäuses aus der Struktursimulation werden dem Löser zur Berechnung der Luftschallabstrahlung in einem strukturierten ASCII Format übergeben. Im Ergebnis werden die Industriepartner befähigt, zukünftig das akustische Verhalten von Pumpen numerisch zu analysieren und zu optimieren. Im Gesamtkontext des Forschungsvorhabens kann zukünftig mit einer deutlichen Reduzierung der Entwicklungszeit von Pumpen mit besonderen Anforderungen hinsichtlich der Schallabstrahlung gerechnet werden.