

# Schlussbericht vom 01.09.2022

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 20275 N

## Thema

Entwicklung und Umsetzung einer Modellreduktionsmethode zur automatisierten Bereitstellung von hochaufgelösten echtzeitfähigen digitalen Zwillingen für die Smartisierung von Pumpen am Beispiel der Berechnung von Axial- und Radialkräften

Kurztitel: Echtzeitfähige digitale Zwillinge von Kreiselpumpen

## Berichtszeitraum

01.07.2019 – 30.06.2022

## Forschungsvereinigung

Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. - FKM

## Forschungseinrichtung(en)

- 1) Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Maschinenbau, Institut für Thermo- und Fluidodynamik, Lehrstuhl für Hydraulische Strömungsmaschinen
- 2) Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Maschinenbau, Institut Product and Service Engineering, Lehrstuhl für Regelungstechnik und Systemtheorie

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Zusammenfassung

3D-CFD-Methoden gehören in der Pumpenindustrie zu den Standard-CAE-Werkzeugen und haben zu erheblichen Fortschritten bei der strömungstechnischen Entwicklung und Optimierung der Pumpen beigetragen. Auf der anderen Seite sind 3D-Methoden aufwendig und nicht für einen echtzeitfähigen Einsatz geeignet. In diesem Vorhaben soll eine Methode zur Modellreduktion von 3D-CFD-Lösungen entwickelt werden, die eine in Kreiselpumpen integrierte echtzeitfähige Funktionalität ermöglicht. Es wird das Beispiel der echtzeitnahen Bestimmung der dynamischen Rotorkräfte zur Demonstration der Methode gewählt. Der zentrale Schritt ist eine möglichst präzise Reproduktion des dreidimensionalen turbulenten Strömungsfeldes mit aus wenigen gewöhnlichen Differentialgleichungen bestehenden, reduzierten Modellen. Im nächsten Schritt werden auf Basis des Beobachter- und Filterentwurfs (Softsensorik) möglichst wenige geeignete Messstellen und -größen identifiziert, mit denen dann das gesamte Strömungsfeld in der Pumpe und hier beispielhaft die dynamischen Rotorkräfte echtzeitnah auf einem kostengünstigen Mikrocontroller in einem prototypischen Laboraufbau rekonstruiert werden. Die Methodik wird an sukzessiven komplexeren Testfällen, ausgehend von einer Prinzippumpe bis hin zu einer realistischen Radialpumpe mit niedriger spezifischer Drehzahl, entwickelt und validiert. An der FSt Lehrstuhl für Hydraulische Strömungsmaschinen (HSM) werden 3D-CFD-Simulationen der Radialpumpe und die Berechnung der Rotorkräfte durchgeführt. Die Ergebnisse der CFD-Simulation werden dann an der FSt Lehrstuhl für Regelungstechnik und Systemtheorie (RUS) zusammen mit einer Galerkin-Projektion der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen genutzt, um Methoden zur Generierung reduzierter Modelle und Softsensoren zu entwickeln.

Zur Erfassung der Rotor-Stator-Interaktion werden die CFD-Simulationen auf rotierenden Rotorgittern durchgeführt. Einen erheblichen methodischen Fortschritt über den in der Literatur verfügbaren Stand der Forschung hinaus stellt die in diesem Vorhaben entwickelte Modellreduktion auf bewegten Gittern dar. Dabei werden die rotierenden Schaufeln als Teil der Fluidomäne behandelt. Die CFD-Lösung wird zur genauen Approximation der Gradienten auf stationäre kartesische Gitter übertragen. Das reduzierte Modell besteht aus wenigen gewöhnlichen Differentialgleichungen, mit denen das gesamte 3D Geschwindigkeits- und Druckfelder rekonstruiert werden kann, wobei der Fehler zwischen den Vorhersagen des reduzierten Modells und der als Referenz dienenden CFD-Simulation kontrolliert eingestellt werden kann. Auf das reduzierte Modell können anspruchsvolle aber bewährte Methoden (Beobachtbarkeitsanalysen, Kalman-Filter) angewendet werden, die eine Rekonstruktion des gesamten Strömungs- und Druckfeldes aus wenigen Messwerten des Strömungs- und Druckfeldes erlauben. Weil das reduzierte Modell im Gegensatz zu den CFD-Simulationen sehr viel schneller ausgewertet werden kann, wird durch die Kombination der beschriebenen Methoden eine Rekonstruktion des gesamten Strömungs- und Druckfeldes in Echtzeit möglich, für die zudem nur wenige Messinformationen notwendig sind. Die erzielte Beschleunigung bzw. der reduzierte Rechenaufwand macht eine Umsetzung auf einem sehr günstigen Mikrocontroller möglich.

Im Projekt wurden die beschriebenen Ziele erreicht. Auf Basis der Ergebnisse der Softsensorik wurde die Rekonstruktion der Rotorkräfte mit einer geringen Abweichung von der CFD-Lösung erzielt. Das reduzierte Modell und der Softsensor (Kalman-Filter) sind so schlank, dass sie auf einen kostengünstigen Mikrocontroller implementiert werden konnten (ESP32, in Produkten mit Internet-of-Things-Funktionalität, wie Haushaltssteckdosen oder fernsteuerbaren Heizkörperventilen etabliert). Die Funktionalität des reduzierten Modells und Softsensors wurde an einem Hardware-in-the-Loop Aufbau nachgewiesen, an dem die echtzeitnahe Bestimmung der dynamischen Rotorkräfte demonstriert wurde. Damit wurde die Machbarkeit in einer KMU-relevanten Umgebung demonstriert und die Projektziele vollumfänglich erreicht. Die Methode zur Erstellung des reduzierten Modells steht den Unternehmen zur Verfügung. Eine Anschlussfähigkeit wird in der

Reduktion der Anzahl der erforderlichen Messstellen und der weiteren Herabsetzung der Nutzungshürde für KMU durch den Einsatz von Maschinellem Lernen gesehen. Durch letzteres könnte die Galerkin-Projektion als ein zentraler Schritt der Modellreduktion durch neuronale Netze ersetzt werden, wodurch die Erstellung der reduzierten Modelle mit weniger Expertenwissen als bisher durchgeführt und somit weiter vereinfacht würde.

**Hinweis:**

Weitere Informationen und der Schlussbericht zu diesem Vorhaben können bezogen werden über:

Das Forschungskuratorium  
Maschinenbau e.V. (FKM)



Lyoner Str. 18  
D 60528 Frankfurt am Main  
[www.fkm-net.de](http://www.fkm-net.de)  
[info@fkm-net.de](mailto:info@fkm-net.de)

Den Forschungsfond Pumpen



Lyoner Str. 18  
D 60528 Frankfurt am Main  
[pu.vdma.org](http://pu.vdma.org)  
[harald.frank@vdma.org](mailto:harald.frank@vdma.org)