

Felix Köhler

Dr. sc. hum.

Hydraulische Auslegung, numerische Optimierung und experimentelle Untersuchung einer Miniaturdiagonalpumpe

Fach/Einrichtung: Kinderheilkunde

Doktorvater: Prof. Dr. med. Matthias Gorenflo

Die Motivation (Kap. 1), ein neuartiges Herzunterstützungssystem zu entwickeln, resultiert aus dem steigenden Bedarf aufgrund der rapiden Zunahme der Fallzahlen von Patienten mit terminaler Herzinsuffizienz. Die drei Ziele der in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Entwicklung einer Diagonalpumpe sind: Eine bei Änderungen robuste analytische Auslegung der initialen Geometrie; Erreichen des geforderten Betriebspunktes bei möglichst hohem Wirkungsgrad durch den Einsatz hochgradig automatisierter genetischer Optimierungsalgorithmen; Validierung der numerischen Berechnungen und experimentelle Ermittlung des Kennfeldes der Pumpe.

Die Fokussierung der vorliegenden Arbeit auf den hydraulischen Teil der Herzunterstützungspumpe mit den daraus resultierenden Vereinfachungen und Beschränkungen ist in Kap. 2 ausgeführt. Hier soll lediglich die Maxime hervorgehoben werden, die Blutschädigung durch eine rein wirkungsgradorientierte Optimierung zu begrenzen.

In Kap. 3 wird die analytische Auslegung der hydraulischen Geometrie als Startpunkt für die Optimierung beschrieben, welche bewusst einfach gehalten wird. Aufgrund der beschränkten Datenlage würde eine detailliertere Auslegungsphilosophie keinen Mehrwert bieten und das Ergebnis stellt zudem nur den Startpunkt der Optimierung dar.

Im ersten Teil des Kap. 4 werden die Annahmen für die numerische Simulation definiert. Herauszuheben ist hier die Tatsache, dass bei der Durchströmung der Pumpe laminares Strömungsverhalten vorliegt. Eine Netzunabhängigkeitsstudie gibt wertvolle Hinweise zur Gestaltung des endgültigen Netzes, das anschließende Benchmark die für die verwendete Hard- und Software optimale Konfiguration der Cluster-Rechenmaschinen. Der Totaldruckverlust innerhalb der Zu- und Ablaufgeometrie der Pumpe wird in einer kurzen manuellen Geometrieoptimierung um ca. 90 % bzw. ca. 58 % reduziert. Die eigentliche Optimierung der hydraulischen Geometrie beginnt im zweiten Teil des Kap. 4 mit der Beschreibung der verwendeten Prozesskette. Das eingesetzte Programmpaket Numeca Fine Design3D stellt für die notwendigen Einzelprozesse geeignete Einzelprogramme zur Verfügung: das Design of Experiments steuert die Parameterverteilung für die Datenbasis, anhand der das sog. „Surrogate Model“ trainiert wird, eine Art analytisches Ersatzmodell, welches in der Lage ist, vorgeschlagene Parameterkombinationen im Hinblick auf

Förderhöhe und Wirkungsgrad zu bewerten. Die Erzeugung der parametrisierten Geometrie aus den gewählten Datensätzen mit einer Parameterzahl von 101 Stück wird in Numeca Autoblade realisiert. Die Vernetzung der nun vorhandenen Geometrie wird mit Numeca Autogrid automatisiert durchgeführt. Der numerischen Lösung des Strömungsproblems durch EURANUS folgt die Auswertung der Ergebnisse im Postprocessing. Der im Programmpaket Fine Design3D verwendete genetische Optimierungsalgorithmus Minamo wählt nun unter Berücksichtigung der in der Datenbank vorhandenen Erfahrungen eine neue Parameterkombination, optimiert diese mit Hilfe des Surrogate Models und stellt daraus einen neuen Parametersatz zur Verfügung. Die Prozesskette beginnt von Neuem. Die gekoppelte Berechnung von Lauf- und Leitrad wird mit einem angepassten Skript durchgeführt, welches die Parameter der einzelnen Geometrien an zwei Autoblade-Modelle mit identischer Meridiankontur übergibt. In Autogrid werden diese beiden Einzelgeometrien zu einer gemeinsamen vereint und vernetzt. Die folgenden 13 Optimierungsreihen ergeben ein gutes Erreichen der Förderhöhe bei einem Wirkungsgrad von ca. 58,7 %. Die Optimierungsreihen mit den hier nicht zu vernachlässigenden durchströmten Radseitenräumen ergeben die beste Geometrie mit einer Förderhöhe von 1,18 m bei einem Wirkungsgrad von 41,3 %. Für die Validierung wird das Optimum im Maßstab 2:1 mit Blut und Wasser nachgerechnet. Eine umfassende Analyse der geometrischen und hydraulischen Eigenschaften ergibt, dass sowohl der hydraulische Wirkungsgrad als auch der Abströmbeiwert bei der analytischen Auslegung überschätzt werden. Die Überprüfung der Saugeigenschaften ergibt einen großzügigen Abstand zur Kavitationsgrenze. Insgesamt werden während der Optimierung 5099 Exemplare berechnet, von denen 69,2 % erfolgreich abschließen. Die kumulierte Rechenzeit alleine für die erfolgreichen Rechnungen beträgt ca. 1,275 Jahre.

Die experimentellen Untersuchungen (Kap. 5) werden im Maßstab 2:1 auf dem um eine mediengeschmierte Doppellagerung erweiterten Pumpenprüfstand durchgeführt. Die Analyse der analytisch ausgelegten Geometrie mit Wasser ergibt nicht nur, dass diese den Betriebspunkt Opt erheblich verfehlt, sondern auch einen geringen Wirkungsgrad aufweist. Das optimale Exemplar V007_SP_n 140 erzielt mit dem Fluid Wasser eine Förderhöhe, welche um 18,3 % über der berechneten liegt, der Wirkungsgrad ist um 17,4 % höher als der berechnete Wert. Der Designpunkt liegt etwas über dem Punkt des besten Wirkungsgrades des Kennfeldes. Die Ergebnisse mit Modellblut liegen bezüglich der Förderhöhe um 8,3 % über der berechneten, der Wirkungsgrad ist um 2,3 % niedriger als der berechnete. Der Punkt des besten Wirkungsgrades des Kennfeldes liegt exakt im Designpunkt. Abgerundet wird die experimentelle Untersuchung mit der Ermittlung des Totaldruckverlustes im zentrifugalen Turbinenbetrieb. Abschließend kann festgestellt werden, dass die numerische Voraussage, insbesondere die für Modellblut, die experimentellen Daten gut bis sehr gut wiedergibt. Daher ist die vorgestellte Designphilosophie der hydraulischen Pumpengeometrie in der Lage, die gestellte Aufgabe gut zu erfüllen.