

Strukturierte Zusammenfassung der Dissertation

Erforschung der Strömung von Blut und von Blutanaloguefluiden unter Berücksichtigung des Einflusses der Partikelmigration in Mikrokanälen

vorgelegt von

M. Sc. Finn Knüppel

Herzinsuffizienzen zählen weltweit zu den häufigsten Todesursachen. Sie können durch verschiedene Erkrankungen verursacht werden, wie z. B. koronare Herzkrankheit oder dilatative Kardiomyopathie. Charakteristisch für die Erkrankung ist die eingeschränkte Fähigkeit des Herzens, die Sauerstoffversorgung im Körperkreislauf sicherzustellen. Häufig geht es mit einer Dilatation einer oder beider Herzkammern einher. Obwohl die Herztransplantation weiterhin als Goldstandard in der Therapie gilt, stellt der Mangel an Spenderherzen ein erhebliches Problem dar. Dies hat zur Entwicklung mechanischer Herzunterstützungssysteme geführt, die entweder als Überbrückung bis zur Transplantation (bridge-to-transplant therapy) oder als dauerhafte Alternative (destination therapy) eingesetzt werden können.

Ein Ventricular Assist Device (VAD) ist eine Lösungsvariante der mechanischen Herzunterstützungssysteme, das entwickelt wurde, um Blut von einem geschwächten linken Ventrikel in die Aorta zu pumpen. Die Aufgabe eines VADs ist es, einen ausreichenden Blutfluss im gesamten Kreislaufsystem aufrechtzuerhalten. Um dies zu erreichen, muss das VAD den Blutdruck erhöhen. Der Druck wird durch einen Impeller erhöht, der mit mehreren tausend Umdrehungen pro Minute rotiert. In Ventricular Assist Devices führen unphysiologisch hohe strömungsinduzierte Kräfte, wie insbesondere hohe Scherbeanspruchungen, zur Blutschädigung. Für die meist verwendete Analyse der VAD-Strömung wird das Blut überwiegend als einphasiges, newtonsches Fluid mit blutäquivalenter Dichte und Viskosität approximiert. Da in der Strömung von VADs Scherraten im Bereich von ($\dot{\gamma} = 150 - 150,000 s^{-1}$) auftreten und sich die Viskosität in diesem Bereich nicht signifikant ändert.

Für experimentelle Untersuchungen werden vermehrt Blutanaloguefluide verwendet. Diese bilden jedoch häufig nicht gleichzeitig die reale Dichte und reale Viskosität von Blut bei hohen Scherraten ab. So war ein definiertes Ziel, ein Blutanaloguefluid zu finden, dass Dichte und Viskosität bei Scherraten $> 300 s^{-1}$ abbildet. Hierzu wurden sechs verschiedene Blutanaloguefluide auf Fluideigenschaften, Handhabung und Kosten miteinander verglichen. Das Ergebnis dieser Versuche war, dass von allen untersuchten Fluiden nur das Polyethylenglykol 200-Wasser-Gemisch (PEG-200-W) genau den gewünschten Bluteigenschaften entspricht. Die Pumpencharakteristik mit PEG-200-W lag im erwarteten Bereich für den analysierten Betriebspunkt (Auslegungspunkt) des VAD. Darüber hinaus konnte experimentell gezeigt werden, dass mit dem Blutana-

log PEG-200-W eine Förderhöhe (73.6 mmHg) erreicht werden kann, die deutlich näher an der mit CFD ermittelten Förderhöhe (73.8 mmHg) von Blut liegt. Die Abweichung der Förderhöhe von Wasser-Glyzerin und PEG-200-W betrug 5%.

Zusätzlich existieren in einer VAD auch Strömungsgebiete, in denen Sekundärströmungen auftreten. Diese sind in den Spaltbereichen von VAD zu finden. Die reale Blutströmung in den Spaltbereichen sind bisher nur wenig erforscht. Es wird vermutet, dass in den Spalten einer VAD ein mehrphasiger Charakter des Blutes auftritt, der bisher nicht ausreichend betrachtet wurde. Daher ist aus strömungsmechanischer Sicht wichtig, die reale Strömung in den Spalten zu verstehen, da hier die höchsten Scherspannungen auftreten. Diese Scherspannungen erreichen mit mehreren hundert Pascal Werte, in denen Blutzellen potentiell geschädigt werden können. Der vermutete mehrphasige Effekt ist bei physiologischen Strömungsbedingungen ($Re < 1$) unter dem Fåhræus-Lindqvist Effekt bekannt. Bei einem Gefäßdurchmesser von $(5 - 300) \mu\text{m}$ migriert der zelluläre Anteil des Blutes zur Gefäßmitte. Hierdurch entsteht eine niedrigviskose zellfreie Schicht (engl.: Cell-Free Layer) zwischen den Zellen und der Wand. In der Gefäßmitte sind die Zellen kleineren Scherspannungen ausgesetzt. Die Migration der Zellen hat erhebliche Auswirkungen auf die Strömungsdynamik und führt zu geringeren Scherspannungen sowie geringeren Druckverlusten im Vergleich mit einer homogenen Zellverteilung. Für das Verständnis der Strömung in den Spalten von VAD wurde ein generischer Testfall entwickelt, mit dem der mehrphasige Charakter des Blutes bei den auftretenden Reynoldszahlen untersucht wurde.

Ein Schwerpunkt lag auf der Analyse des Migrationsverhaltens der Partikel in engen Spalten sowie den damit verbundenen Reduktionen der Scherspannungen und Druckverluste. Durch die Bildung einer partikelfreien Schicht an der Wand (Cell-Free Layer) ändert sich die wirkende Spannung an der Wand. Die erstmalig mit einem Wandschubspannungssensor direkt gemessen wurden. Die Untersuchungen zeigten, dass bei allen untersuchten Partikelvolumenkonzentrationen eine messbare Reduktion der Wandschubspannung und Scherspannung durch die Migration auftrat. Die einphasige Annahme in den Spalten führt zu einer abweichenden Ergebnissen in Druckverlust und Scherspannung.

Nach der Feststellung, dass ein Migrationsverhalten bei einer typischen Spalthöhe und dem Reynoldszahl-Bereich ($50 < Re < 150$) auftritt, lag der Fokus auf der numerischen Modellierung dieses Effektes. In der Literatur wurde vorgeschlagen, nicht das Migrationsverhalten einzelner Zellen zu berücksichtigen, sondern die durch die Migration entstehende lokale Viskositätsverteilung zu verwenden. Bisher existiert kein Modell, welches die Cell-Free Layer numerisch allgemein und die Entwicklungslänge berücksichtigt. Daher stellte sich die Forschungsfrage, ob ein numerisches Viskositätsmodell entwickelt werden kann, mit dem der Einfluss der lokalen Partikelvolumenkonzentration für Blutströmung Reynoldszahl-Bereich ($50 < Re < 150$) abgebildet wird. Die Grundlage des daraufhin selbst entwickelten Viskositätsmodells bildet die Analyse optischer Messergebnisse zur lokalen Partikelverteilung, welche in einem generischen Testfall mit einem blutanalogen Fluid untersucht wurden. Ergänzend wurde eine weitere Messreihe mit Schweineblut bei einem Hämatokritwert von 5% durchgeführt. Auf dieser Basis wurde

ein Modell entwickelt, das eine lokale Viskositätsverteilung für Strömungen mit Partikeln bzw. Zellen sowie einer zellfreien Schicht beschreibt. Anwendbar ist das Modell auf Blut und blutanalogue Fluide mit Partikelvolumenfraktionen von bis zu 5%, Spalthöhen von 150 μm und Reynoldszahlen im entsprechenden Bereich. Die Validierung des Viskositätsmodells erfolgte durch den Vergleich der Simulationsergebnisse mit experimentellen Daten hinsichtlich der Wandschubspannung und des Druckverlusts für Blut sowie das blutanalogue Fluid.

Die erlangten Erkenntnisse führen zu einem besseren Verständnis der Strömung in den Spalten und zu einem besseren VAD-Design.