

Für den rettenden Atemzug

Strömungsforschung im Dienst der Gesundheit

Von Lars Krenkel

Von medizinischen Anwendungen der Luft- und Raumfahrtforschung war in DLR-Publikationen schon des Öfteren zu lesen. Seien es humanphysiologische Experimente in Schwerelosigkeit oder neue Materialien beispielsweise für die Herzchirurgie. Diesmal ist von strömungsmechanischen Forschungsarbeiten zu berichten, die einer noch wirksameren und schonenderen künstlichen Beatmung bei akutem Lungenversagen zugute kommen sollen. DLR-Wissenschaftler bringen in ein interdisziplinäres Schwerpunktprojekt der Deutschen Forschungsgemeinschaft ihre Kompetenz bei der Bildverarbeitung sowie der experimentellen und numerischen Untersuchung von Strömungsprozessen ein.

Im DLR-Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik in Göttingen beschäftigt sich die Abteilung Fluidsysteme auch mit der Verbesserung der künstlichen Beatmung. Die sogenannte Hochfrequenz-Oszillationsventilation (HFOV) ist seit den 60er Jahren als Lungen schonendes Verfahren bekannt und hat sich in der Neuge-

borenen- und Kinderheilkunde (Neonatalogie/Pädiatrie) bereits etabliert. In der Erwachsenenmedizin findet sie vorwiegend bei Patienten mit akutem Lungenversagen Anwendung, bisher jedoch ausschließlich als „Rescue-Methode“, also als letztes Mittel der Wahl. DLR-Wissenschaftler untersuchen nun die strömungsmecha-

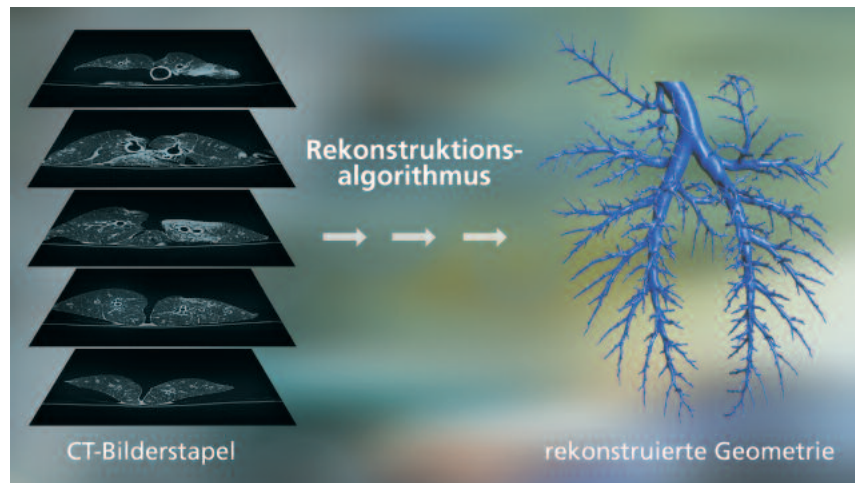
nischen Transportmechanismen im Zusammenhang mit der Hochfrequenz-Oszillationsventilation im Detail. Sie wollen die Einfluss- und Regelparameter genauer identifizieren. Wenn sich diese Beatmungsstrategie als Methode etablieren soll, müssen die komplexen Transportvorgänge noch besser verstanden werden, um die

Sauerstoffanreicherung und die Ventilation der Lunge optimieren zu können.

Um diese komplexe strömungsmechanisch-medizinische Thematik bestmöglich und unter Nutzung modernster Methoden bearbeiten zu können, wird das Projekt im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsschwerpunkts „Protektive Beatmung“ in interdisziplinären Forschungsgruppen bearbeitet. In der interdisziplinären Gruppe aus Medizinern und Naturwissenschaftlern arbeiten neben dem DLR das Universitätsklinikum Mainz mit seiner Klinik für Anästhesiologie und der Klinik für Radiologie, Bereich medizinische Physik, sowie der Hersteller für Beatmungsgeräte VIASYS GmbH Höchberg zusammen.

Die DLR-Wissenschaftler haben dabei die Aufgabe, die komplexen Strömungsvorgänge und Transportmechanismen in den zentralen Atemwegen der Lunge numerisch und experimentell zu untersuchen. Als Zentrale Atemwege werden die oberen bronchialen Abschnitte der Lunge bezeichnet. Ausgehend von der Lufttröhre (Trachea) verzweigen sich die Atemwege in der Lunge zunehmend. Die Anzahl der Verzweigungen entlang eines Bronchienastes wird dabei als „Generation“ bezeichnet. In dem Forschungsprojekt sind Untersuchungen bis in den Bereich der achten Generation geplant.

Um realistische Ausgangsdaten von den Lungengeometrien sowohl für die numerischen Simulationen als auch für die experimentellen Untersuchungen zu bekommen, wurde zunächst ein vom DLR entwickeltes bildgebendes Verfahren angewandt. Mit ihm werden nahezu automatisch



Schematische Darstellung der Geometrierekonstruktion

die Geometrien aus einer Serie von computertomographischen (CT) Schnittbildern rekonstruiert. Somit ist es möglich, die reale Geometrie der Atemwege eines Menschen aus einem hochauflösenden CT-Datensatz zu rekonstruieren. Ein so genanntes Oberflächengitter dient im weiteren Verlauf als Ausgangsbasis sowohl zur Erstellung eines Silikonabgussmodells für die Experimente als auch zur Erzeugung von Volumen-Rechengittern für die numerische Simulation.

Die experimentelle Modellfertigung erfolgt mittels moderner Rapid-Prototyping-Verfahren. Dabei wird zunächst ein positives Wachs-Modell erstellt. Dieses dient im nachfolgenden Schritt als Kern für ein Silikonmodell. Nach dem Aushärten des Silikons wird der Wachs-Kern herausgeschmolzen und es entsteht ein optisch transparentes Abbild der zentralen Atemwege. Dieses Modell wird dann zur Untersuchung der Strömungsverhältnisse bei unterschiedlichen Randbedingungen mittels

optischer Messverfahren, wie der Particle-Image-Velocimetry (PIV), einem berührungslosen Geschwindigkeitsmessverfahren, verwendet.

In Zusammenarbeit mit den Partnern des Universitätsklinikums Mainz werden des Weiteren neuere Methoden zur Geschwindigkeitsmessung mittels Magnet-Resonanz-Tomographie (MRT) unter Verwendung eines identischen Abgussmodells getestet und mit experimentellen und numerischen Daten des DLR verglichen. Die Besonderheit des gemeinsamen Projektes zur Optimierung der Hochfrequenz-Oszillationsventilation besteht somit in der Anwendung verschiedener experimenteller Verfahren aus der klassischen Strömungsmesstechnik und moderner Methoden aus der Medizin im Zusammenspiel mit numerischen Strömungsberechnungen.

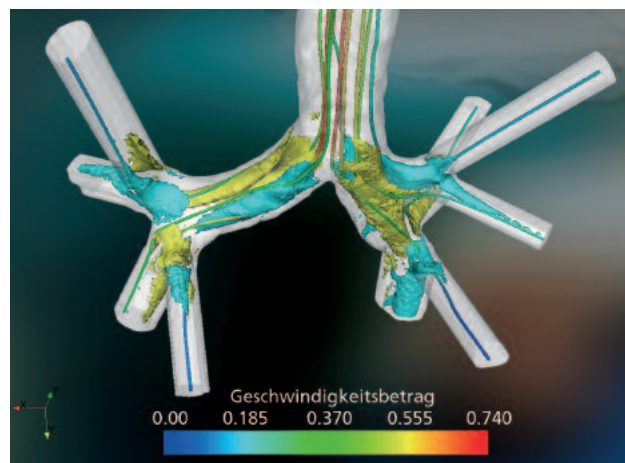
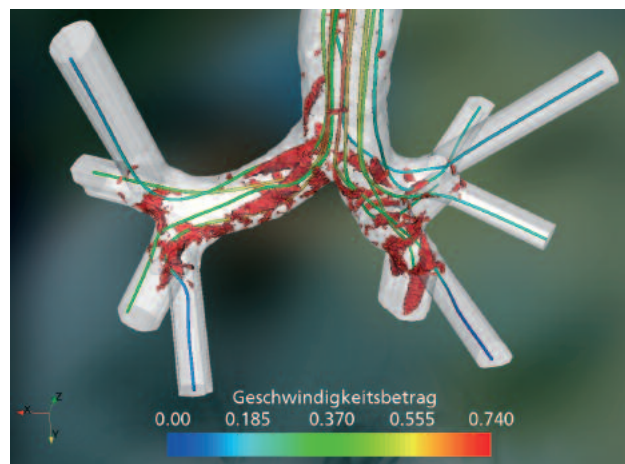
Erst kürzlich konnten große Teile der experimentellen und numerischen Prozesskette anhand eines vereinfachten Plexiglasmodells erprobt werden. Dabei wurden die Strömung in

Atemphysiologie und künstliche Beatmung

Unter dem Begriff „künstliche Beatmung“ versteht man die vollständige oder auch nur teilweise Übernahme der menschlichen Atemarbeit durch ein Beatmungsgerät, den so genannten Respirator. Das Gerät muss sowohl den Gasaustausch von „frischer“ und „verbrauchter“ Atemluft in der Lunge aufrecht erhalten (Ventilation) als auch den ausreichenden Sauerstoffaustausch (Oxygenierung) in den Lungenbläschen (Alveolen) gewährleisten. Der Respirator kann daher mit einer zusätzlichen künstlichen Atemmuskulatur verglichen werden.

Bei einem gesunden, selbstständig atmenden Menschen bewirkt ein Zusammenziehen der Atemmuskulatur (vor allem des Zwerchfells) eine Vergrößerung des Lungenvolumens im Brustraum. Dies führt zu einer Verringerung des Drucks in der Lunge, sodass die Luft aufgrund der Druckdifferenz von außen durch Nase und Mund entlang der Luftröhre in die Lunge strömt. Bei ruhiger Ausatmung zieht sich die Lunge nach Erschlaffen der Atemmuskulatur aufgrund elastischer Kräfte wieder zusammen. Dies bewirkt eine Druckerhöhung in der Lunge, sodass „verbrauchte“ Luft in umgekehrter Richtung nach außen strömt.

Im Gegensatz zu der Erzeugung eines Unterdrucks in der Lunge während der normalen (spontanen) menschlichen Atmung wird von Beatmungsgeräten im Allgemeinen während der Einatemphase außerhalb der Lunge ein Überdruck erzeugt. Dadurch strömt Luft von außen in die Lunge und bläht diese auf. Während der Ausatmung wird der Druck am Beatmungsgerät wieder reduziert, sodass sich die Lunge wieder zusammenziehen kann und die „verbrauchte“ Atemluft nach außen strömt. Dieser Zyklus wiederholt sich bei konventioneller Beatmung zehn- bis fünfzehn-mal pro Minute. Als Steuergröße dienen dabei im einfachsten Fall entweder der einstellbare maximale Atemwegsdruck (wichtig für die Oxygenierung) oder aber das zuzuführende konstante Atemgasvolumen (wichtig für die Ventilation). Als Variation ergeben sich aus den beiden Steuergrößen in Abhängigkeit von der Erkrankung des Patienten entweder unterschiedlich verabreichte Atemgasvolumina bei der Drucksteuerung oder aber unterschiedliche Atemwegsdrücke bei der Volumensteuerung.

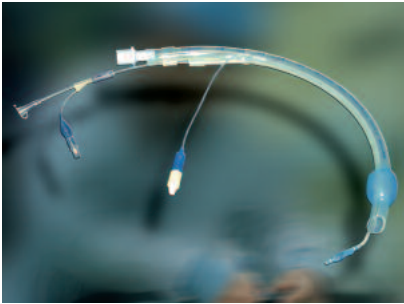


Komplexe Strömungsstrukturen werden mit Hilfe der numerischen Simulationen visualisiert, hier ein Modell der oberen zentralen Atemwege

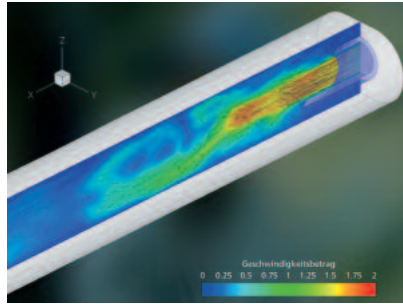
Oben sind farbko-dierte Stromlinien und wirbelige Strukturen (in roter Farbe) dargestellt

Das untere Bild verdeutlicht in den Farben Gelb und Blau die Drehung und somit die Dreidimensionalität der Strömung deutlich

einem der Luftröhre ähnlichen Modellaufbau mittels geschwindigkeitskodierter Magnet-Resonanz-Bildgebung sowie numerischer Simulation (CFD – Computational Fluid Dynamics) untersucht und die Ergebnisse verglichen. In einem nächsten Schritt wird ein komplexeres Modell der Luftröhre mit der ersten Verzweigung mittels MRT, PIV sowie Computersimulation untersucht. Ziel dieser ersten Arbeiten ist es, die angewandten Messmethoden zu überprüfen und zu optimieren. Zugleich wurden im Rahmen der Versuchsdurchführung in der interdisziplinären Arbeitsgruppe auch Datenaustausch und Logistik verbessert.



Endotracheal-Doppellumen-Tubus, wie er im Rahmen der experimentellen und medizinischen Untersuchungen verwendet wird



Momentaufnahme einer zeitaufgelösten numerischen Simulation der Strömung in einem Modell der Luftröhre mit Endotracheal-Tubus

Es hat sich gezeigt, dass vor allem der so genannte Endotrachealtubus, ein Schlauch, der einem beatmungspflichtigen Patienten zur Sicherung der Atemwege in die Luftröhre geführt wird, ein wichtiger Parameter ist. Deshalb werden nun numerische Felduntersuchungen zur Auswirkung von Endotrachealtuben auf das Strömungsverhalten in der Luftröhre und in den zentralen Atemwegen durchgeführt. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem Druckverlust, der durch den Tubus verursacht wird, sowie auf den im Tubusnahbereich ausgebildeten turbulenten Strömungsstrukturen.

Die vollständige Simulation der Strömung in den zentralen Atemwegen unter Hochfrequenz-Oszillationsventilation (HFOV) stellt eine besondere Herausforderung dar. Legt man eine Geometrie der 8. Generation zu Grunde, so ergeben sich insgesamt 2^8 , also 256, Endigungen. Dies erfordert einerseits hohe Präzision bei der Rekonstruktion der Geometrie aus den medizinischen Bilddaten und andererseits einen ausgereiften Automatisierungsgrad in der Nachbearbeitung. Die eigentliche Herausforderung der Simulation eines Beatmungsfalles unter HFOV liegt jedoch in der Ent-

wicklung von geeigneten numerischen Randbedingungen an den jeweiligen Enden. Diese Randbedingungen müssen die Charakteristiken der numerisch nicht aufgelösten Anteile der Lunge (Elastizität/Widerstand) berücksichtigen beziehungsweise simulieren und dazu eine zeitabhängige, nicht kontinuierliche und unregelmäßige Strömung zulassen.

Um diese Entwicklung gezielt anzunähern, wird zunächst an einfacheren Geometrien gearbeitet, um die zuvor beschriebene vereinfachte Geometrie der Luftröhre mit nachfolgender Verzweigung verwendet. Im Rahmen des Projektverlaufs soll die Entwicklung der Methoden stetig verbessert werden, um abschließend im Zusammenspiel zwischen Experimenten und Numerik zum Ziel zu gelangen: dem Verständnis und der Optimierung der strömungsmechanischen Prozesse bei der Hochfrequenz-Oszillations-Ventilation.

Autor:

Lars Krenkel arbeitet im DLR-Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik auf dem Gebiet biomedizinischer Strömungen.

Die Hochfrequenz-Oszillationsventilation (HFOV)

Mit Sauerstoff angereichertes, befeuchtetes Atemgas wird kontinuierlich mit hoher Flussrate an einer oszillierenden Membran vorbeigeleitet. Im Unterschied zu konventionellen Beatmungsgeräten mit zehn bis 15 Zyklen pro Minute schwingt die Membran drei- bis 15-mal pro Sekunde bei sehr kleinen Amplituden. Der mittlere Atemwegsüberdruck und somit die Oxygenierung (Sauerstoffanreicherung) in den Alveolen wird durch den kontinuierlichen Gasfluss im Zusammenspiel mit einem regelbaren Überdruckventil gesteuert. Die Lungenventilation ist damit über die Druckamplitude der Membran sowie die Frequenz der Schwingung regelbar.

Neben der vielfach höheren Beatmungsfrequenz liegen die Unterschiede zwischen der HFOV und konventioneller Beatmung vor allem in der Beschränkung der verabreichten Gasvolumina sowie der fast vollständigen Trennung der Ventilation und Oxygenierung bei der HFOV. Durch die kleinen Gasvolumina wird eine Überblähung der Alveolen vermieden. Des Weiteren erlaubt die Entkopplung der Sauerstoffanreicherung und des Gasaustausches auch eine unabhängige Einflussnahme. Aus diesen Gründen gilt dieses Beatmungsverfahren als „lungenprotektiv“, also als schützend bzw. schonend für die Lunge.