

VERBESSERTES PATIENTENWOHL DURCH INTERDISZIPLINÄRE UND INSTITUTIONSÜBERGREIFENDE ZUSAMMENARBEIT BEI DER ENTWICKLUNG EINES PLANUNGSTOOLS BEI NASALEN ATEMPROBLEMEN

Manuel Berger*^{1,2}, Martin Pillei^{1,3}, Aris Giotakis², Thomas Senfter¹, Andreas Mehrle⁴, Florian Kral², Wolfgang Recheis⁵, Herbert Riechelmann², Michael Kraxner¹, Wolfgang Freysinger

¹Department of Environmental, Process and Energy Engineering, MCI-The Entrepreneurial School, Innsbruck, Austria; ²Department of Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery, Medical University of Innsbruck, Innsbruck, Austria; ³Department of Fluid Mechanics, Friedrich-Alexander-University Erlangen-Nuremberg, Erlangen, Germany; ⁴Department of Mechatronics, MCI-The Entrepreneurial School, Innsbruck, Austria; ⁵University Hospital of Radiology, Medical University Innsbruck, Innsbruck, Austria

* Korrespondierender Autor: Manuel Berger, manuel.berger@mci.edu

Abstract. Die Errichtung und der Betrieb von Operationssälen und Intensivstationen sind pro Patient gerechnet wohl eine der teuersten Bereiche unseres Gesundheitssystems.

Ein möglicher Ansatz der Kostenreduktion ist durch computergestützte Planung die Erfolgsquote von Operationen zu erhöhen. Damit werden unnötige Operationen vermieden, wodurch das Gesundheitssystem und insbesondere der/die Patient/-in entlastet werden. In der gegenständlichen Arbeit wurde im Zeitraum von 2014 bis 2021 in Kooperation mit Medizinern/-innen, Softwareentwicklern/-innen und Strömungsmechanikern/-innen ein Softwaretool entwickelt, was für die Planung von nasalen Atemproblemen (z.B. Schiefstellung der Nasenscheidewand) chirurgisch relevante Bereiche und das Resektionsvolumen zielgenau für jeden Patienten individuell bestimmt. Damit kann mit einer einzelnen Operation das Ziel erreicht werden, dass der/die Patient/-in wieder beschwerdefrei Atmen kann.

Im ersten Schritt wird die Genauigkeit der Strömungssimulation mit Hilfe von Experimenten bestimmt. Damit werden chirurgisch relevante Regionen zielgenau für jeden/jeder Patienten/-in individuell bestimmt. Ergebnisse zeigen, dass Operationsvorhersagen sehr gut mit bis dato erfolgreichen Operationen korrelieren. Die Ergebnisse sind vielversprechend, um das Softwaretool im klinischen Alltag zur Operationsplanung einzusetzen.

Keywords: Operationsvorhersagewerkzeug, Nasenscheidewandschiefstellung, Lattice Boltzmann Methode, Laser Doppler Anemometrie

1 EINLEITUNG

Die Nasenhaupthöhle und die Nasennebenhöhlen gehören zu den oberen Atemwegen und haben wesentliche Funktionen bei der Atmung. Diese regulieren den Fluss, wärmen, reinigen und befeuchten die Atemluft. Darüber hinaus wird die Nasenatmung auch für den Geruchssinn benötigt, da das meiste, was ein Mensch im Mund schmeckt tatsächlich riecht [1].

Ein reduzierter Luftströmungsquerschnitt behindert die Atmung. Sehr häufig kommen Nasenscheidewandschiefstellungen oder Probleme mit einer ungewöhnlich geschwollenen Schleimhaut vor [1].

In einer bis jetzt langjährigen Kooperation zwischen dem Management Center Innsbruck, der Universitätsklinik für Hals-, Nasen und Ohrenheilkunde, der Tirol Kliniken und dem Kardinal Schwarzenberg Klinikum Schwarzach im Pongau ist in den letzten Jahren ein automatisiertes präoperatives Vorhersagewerkzeug zur Operationsplanung entwickelt worden. Dieser Beitrag zeigt die Durchführung von ersten Strömungsmessungen an Modellen der Nasenhaupthöhle bis hin zum Planungstool zur Bestimmung von operationsrelevante Bereiche und des Resektionsvolumens im Nasenatemtrakt.

2 METHODEN

Zur Überprüfung der Genauigkeit von Strömungssimulationen der Nasenatmung sind Simulationen basierend auf der Lattice Boltzmann (LB) und der finiten Volumen Methode (FVM) mit der Laser Doppler Anemometrie (LDA) verglichen worden [2]. Hierzu wurde ein 3D Druckmodell des Nasenatemtrakts gefertigt. Mit der validierten Strömungssimulation sind fünf Operationen geplant und mit postoperativen Daten verglichen worden, um die Erfolgsquote der Vorhersage zu ermitteln.

2.1 SEGMENTIEREN DER NASENHAUPTHÖHLE UND NEBENHÖHLEN

Für die Erstellung der 3D Druckgeometrie wurde zuerst der Luftraum zur Nasenatmung segmentiert. Ein Computertomografie (CT) Datensatz eines Patienten mit einer örtlichen Auflösung von $0,4 \times 0,4 \times 0,8 \text{ mm}^3$ mit Nasenscheidewandschiefstellung wurde mit < -460 Hounsfield Einheiten [3] binärisiert. Am Nasenboden wurde eine Schnittfläche hinzugefügt, sodass für die LDA Messungen die optische Zugänglichkeit gewährleistet wurde.

2.2 VALIDIERUNG VON LB UND FVM MIT LDA

Basierend auf der Rhinomanometrie [4] ist die Nasenströmung mit FVM und LB simuliert worden. FVM ist der Stand der Technik zur Durchführung von Strömungssimulationen. LB wird seltener verwendet, hat aber den Vorteil, dass die Datenstruktur des CTs ohne weiteren Vernetzungsprozess nach dem Segmentieren verwendet werden kann. LB Code ist simpel und

kann daher auf der Graphikkarte berechnet werden, was Simulationszeiten von Stunden auf Minuten reduziert [5]. Weiters ist eine virtuelle Operation durchgeführt worden, sodass die Sensitivität von Simulationen und Messungen beurteilt werden konnte [2]. Die LDA Messungen dienten zur Validierung der LB und FVM Simulationen.

2.3 PREOPERATIVES OPTIMIERUNGSTOOL

Basierend auf den validierten LB Simulationen ist ein präoperatives Operationsplanungstool entwickelt worden [6]. Zuerst wird der Nasenatemtrakt des Patienten aus dem CT Datensatz automatisiert segmentiert und simuliert. Mittels Stromlinienberechnung in ParaView [7] werden automatisiert operationsrelevante Bereiche identifiziert. Ausgewählte Bereiche (Engstellen) werden optimiert, in dem der Atemquerschnitt vergrößert wird. Der Optimierungsprozess stoppt, wenn keine operationsrelevanten Bereiche mehr gefunden werden. Die Ergebnisse der Optimierung sind mit postoperativen CT Datensätzen verglichen worden.

3 EVALUIERUNG

3.1 LB, FVM UND LDA VERGLEICH DER NASENSTRÖMUNG

Abb. 1 zeigt Ergebnisse von LB, FVM und LDA nahe der Naseklappe, welche eine bekannte Engstelle ist. Daher wurde die Geschwindigkeit flussabwärts untersucht.

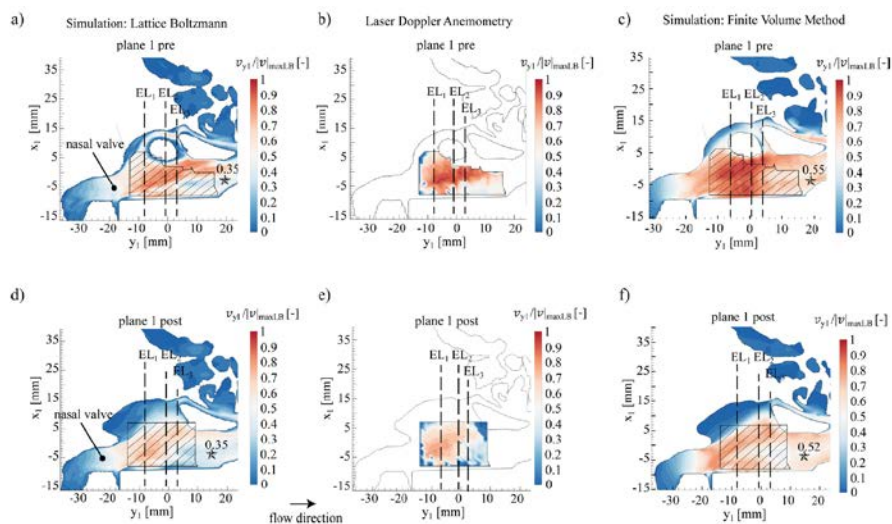


Abbildung 1. Qualitativer Vergleich der Nasenströmung simuliert mit LB und FVM und experimentell gemessen mit LDA. Der Konturplot zeigt die normalisierte y-Geschwindigkeit. Mit Hilfe der Evaluierungslinien sind die Genauigkeiten der Simulationen ermittelt worden. Die Nasenklappe (nasal valve) ist eine bekannte Engstelle, die untersucht worden ist. Pre zeigt Ergebnisse vor der virtuellen OP. Post zeigt Ergebnisse nach der virtuellen OP Bild wurde genommen von [2].

Bei den LDA Messungen fällt auf, dass der Messbereich sehr viel kleiner ist, was auf die begrenzte optische Zugänglichkeit zurückzuführen ist. Qualitativ haben beide Simulationen eine starke Ähnlichkeit mit der Messung. Mit den Evaluierungslinien EL1 bis EL4 ist die Genauigkeit der FVM und LB bestimmt worden, siehe dazu [2]. Der quadratische Geschwindigkeitsfehler in der Nähe der Nasenklappe mittels LB und FVM beträgt 7,1 % und 13,7 %.

3.2 VERGLEICH LB OPTIMIERUNG MIT POSTOPERATIVEN DATENSÄTZEN

Abb. 2 zeigt den Vergleich zwischen LB Optimierung und postoperativen Datensätzen. Der maximale Unterschied des Atemquerschnitts zwischen post-CT und optimierter Nasenströmung ist kleiner 15 % [6]. Es herrscht also eine gute Überstimmung zwischen wirklicher OP und dem Operationsvorschlag.

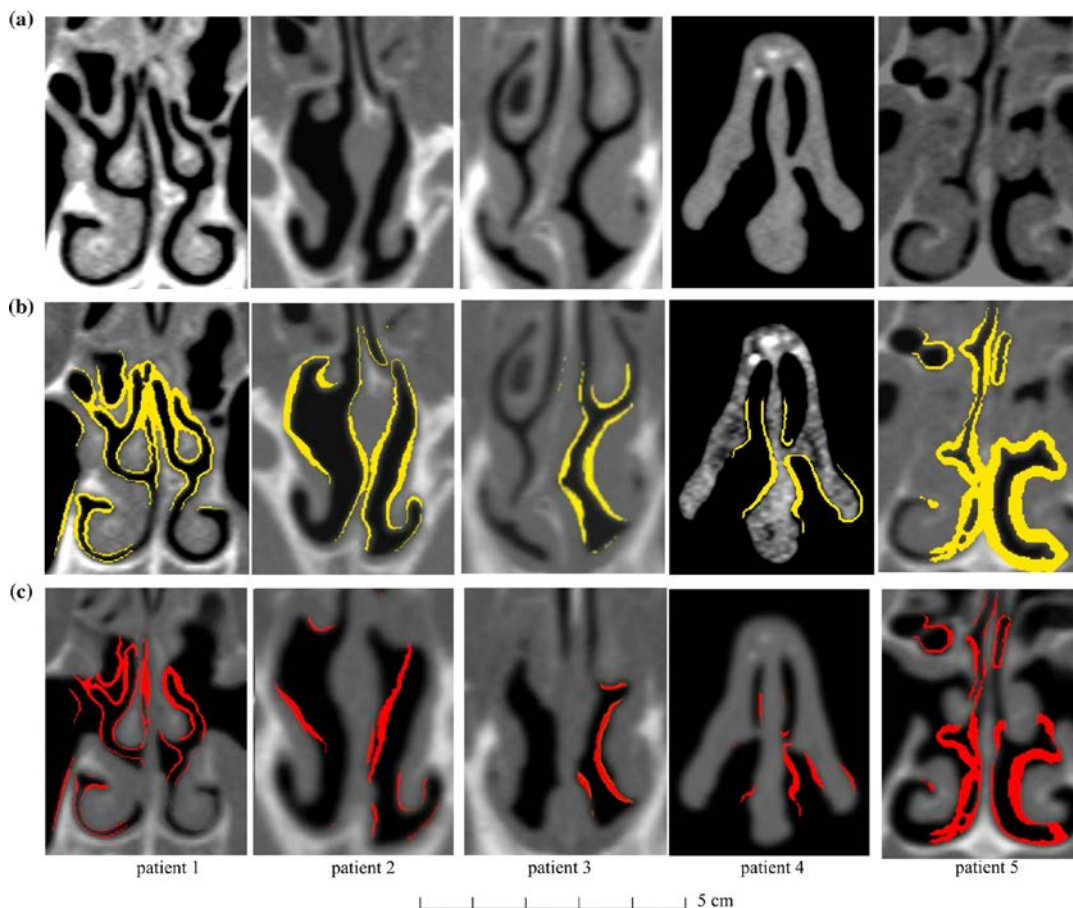


Abbildung 2. Koronale Schnitte des Nasenatemsraums a) Präoperativer CT Datensatz, b) Präoperativer CT Datensatz mit vorgeschlagenen Resektionsvolumen in gelb. c) Postoperativer CT Datensatz welcher zum präoperativen CT Datensatz registriert wurde. In rot wird das vorgeschlagene und resezierte Volumen gezeigt. Bild wurde genommen von [6].

4 CONCLUSIO

Die Conclusio dieser wissenschaftlichen Arbeit ist, dass der gewünschte Operationserfolg im Nasenatemtrakt mit hoher Genauigkeit vorhergesagt werden können. Der nächste Schritt ist das Testen der Software im klinischen Alltag.

5 REFERENZEN (IEEE)

- [1] R. Probst, G. Grevers, and H. Iro, *Basic otorhinolaryngology: a step-by-step learning guide*. Thieme, 2005.
- [2] M. Berger *et al.*, "Nasal cavity airflow: Comparing laser doppler anemometry and computational fluid dynamic simulations," *Respir. Physiol. Neurobiol.*, p. 103533, 2020.
- [3] H. Nakano *et al.*, "A new method for determining the optimal CT threshold for extracting the upper airway," *Dentomaxillofacial Radiol.*, vol. 42, no. 3, pp. 1–3, 2013.
- [4] P. A. Clement, "Committee report on standardization of rhinomanometry.," *Rhinology*, vol. 22, no. 3, pp. 151–155, Sep. 1984.
- [5] M. Januszewski and M. Kostur, "Sailfish: A flexible multi-GPU implementation of the lattice Boltzmann method," *Comput. Phys. Commun.*, vol. 185, no. 9, pp. 2350–2368, 2014.
- [6] M. Berger *et al.*, "Pre-surgery planning tool for estimation of resection volume to improve nasal breathing based on lattice Boltzmann fluid flow simulations," *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.*, 2021.
- [7] J. Ahrens, B. Geveci, and C. Law, "ParaView: An End-User Tool for Large Data Visualization," *Elsevier*, 2005.