

Innovation in der funktionell-ästhetischen Nasenchirurgie: Rhino-CFD[©]

Autoren_Dipl.-Med. Thomas Hildebrandt, Birkenwerder; Dr.-Ing. Stefan Zachow, Dr.-Ing. Alexander Steinmann, Berlin; Prof. Dr. med. Werner Hept, Karlsruhe

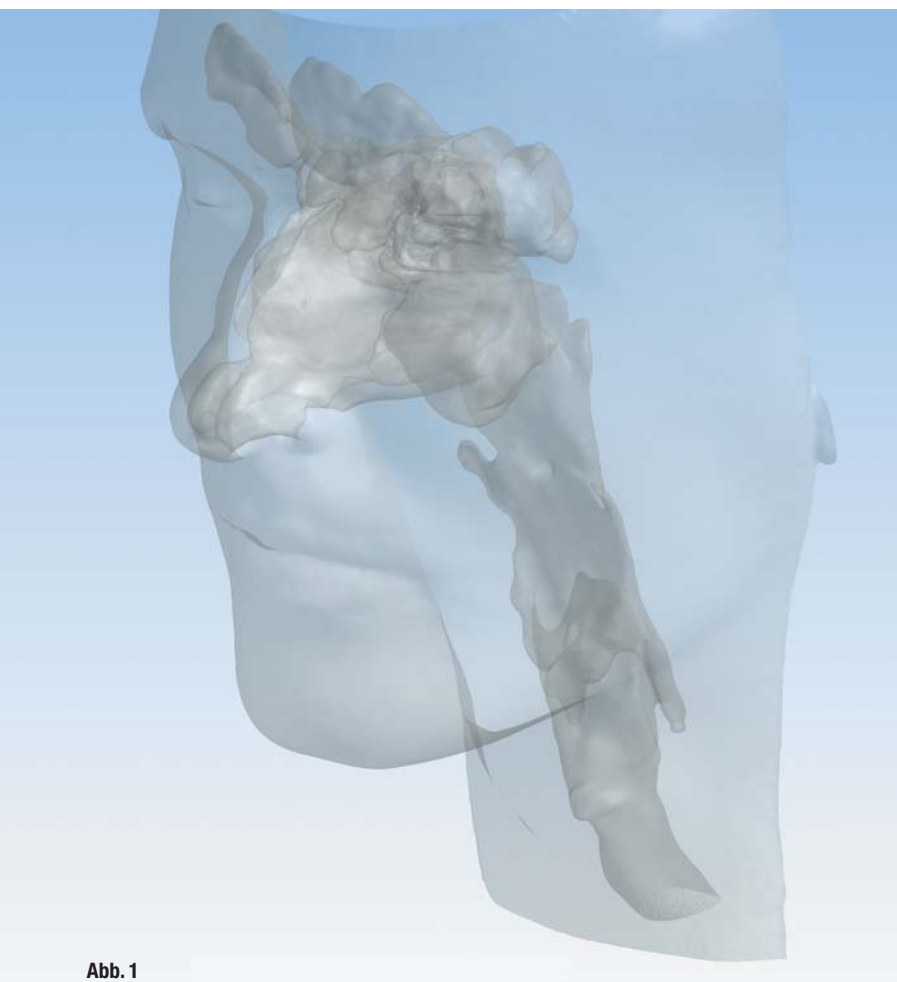


Abb. 1

Abb. 1_3D-Geometrie der Nase, Nasennebenhöhlen und des Pharynx.

_Einleitung

In der Nase sind Funktion und Form in besonderer Weise miteinander verknüpft. Neben vielfältigen physiologischen Aufgaben hat die Nase einen ent-

scheidenden Einfluss auf die Ausstrahlung der Gesichtszüge. Die Rhinochirurgie besitzt demzufolge einen dualen Charakter. Sie muss funktionellen und ästhetischen Aspekten gleichermaßen gerecht werden. Dabei ist es eine besondere Herausforderung, die Bedeutung bestimmter präoperativer Befunde einzuschätzen und die Auswirkungen von chirurgischen Veränderungen der inneren und äußeren Nase präzise vorherzusagen. Oberstes Prinzip der Nasenchirurgie sollte die Bewahrung beziehungsweise Wiederherstellung einer möglichst physiologischen Nasenanatomie sein. Moderne endoskopische und mikrochirurgische Operationsverfahren ermöglichen heute ein sehr zielgerichtetes und schonendes Vorgehen. Um dieses Potenzial auszuschöpfen, ist unter anderem ein detailliertes Verständnis der aerodynamischen Vorgänge bei der Nasenatmung erforderlich.

_Funktionen der Nase

Die Nase hat eine respiratorische, sensorische und immunologische Funktion. Die respiratorische Funktion umfasst die Realisierung eines ausgewogenen, geregelten Atemstromes mit einem Druckgradienten, der sich möglichst komplementär zum individuellen Atemzugvolumen einstellt. Dabei müssen die herrschenden Umgebungsbedingungen (zum Beispiel Luftfeuchtigkeit und Temperatur) berücksichtigt sein. Entsprechend dem komplizierten Bau der Nasenhaupthöhle und des angegliederten Nasennebenhöhlensystems sind die Strömungsmuster sehr komplex. Die anatomischen Strukturen sind im Laufe der Evolution optimal der Funktion angepasst und strömungsphysikalisch fein aufeinander abgestimmt. Grundsätzlich besteht ein ausbalanciertes Verhältnis von verschiedenen Strömungsarten. Die Nasenatmung dient der Reinigung, Anfeuchtung und Erwärmung der eingeatmeten Luft. Ein physiologischer

Atemstrom durch die Nase ist die Voraussetzung für wirksame olfaktorische und immunologische Prozesse sowie einen intakten Geruchssinn. Die Rolle des Nasennebenhöhlensystems ist bis heute nicht definitiv geklärt. Es muss aber kontinuierlich über die Nasenhaupthöhle belüftet und drainiert werden.

Rhinologische Beschwerden und Folgeerkrankungen sind sehr häufig. Dazu gehören zum Beispiel Nasenatmungsbehinderung, Beeinträchtigung des Geruchssinnes, Kopfschmerzen, Schnarchen und rezidivierende bzw. chronische Sinusitiden sowie pulmonologische Erkrankungen. In der HNO-Heilkunde nimmt die Therapie rhinologischer Probleme deshalb einen breiten Raum ein.

„Schwierigkeiten bei der Beurteilung der Nasenatmung

Beeinträchtigungen der Nasenatmung sind schwer zu charakterisieren. Die subjektive Einschätzung durch den Patienten unterliegt starken psychischen Einflussfaktoren und die Übergänge von einer Befindlichkeitsstörung zu einem Funktionsdefizit mit echtem Krankheitswert sind unscharf. Die klinische Erfahrung zeigt, dass erhebliche Einschränkungen der respiratorischen Funktion schon durch disproportional kleine Veränderungen der Nasenanatomie hervorgerufen werden können (zum Beispiel Nasenklappe). Andererseits sind sogar grobe Knochensporne im hinteren Septumbereich häufig ohne Bedeutung.

Die Diagnostik beziehungsweise Prüfung der Nasenventilation erfolgt in der Regel durch die Aktive Anteriore Rhinomanometrie (AAR). Damit werden Druckabfall und Flow beziehungsweise Strömungswiderstand jeweils einer Nasenseite bei der Atmung integral gemessen. Die Methode hat sich im klinischen Alltag bewährt und wird von der Europäischen Rhinologischen Gesellschaft als standardisiertes Verfahren empfohlen. Dezidierte Aussagen über den Einfluss einzelner anatomischer Strukturen erlaubt sie aber nicht. In gewissen Grenzen ist höchstens die Beurteilung der Nasenklappe möglich. Nicht selten ergeben sich bei der Untersuchung der Nasenatmung eines Patienten erhebliche Diskrepanzen zwischen der subjektiven Bewertung durch den Betroffenen und der Einschätzung der gemessenen Werte durch den Arzt.

Die etablierten Normwerte können strömungsphysikalisch nicht uneindeutig einer konkreten anatomischen Konfiguration der Nase zugeordnet werden. D.h. theoretisch ließen sich unterschiedlichste Nasengeometrien finden, die formal einen regelrechten Flow ermöglichen. Eine physiologische Nasenatmung ist damit aber a priori nicht anzunehmen. Diese begrenzten diagnostischen Möglichkeiten erschweren eine objektive und zuverlässige Prognose beziehungsweise Planung operativer Maßnahmen. Augenscheinlich wird die Problematik auch bei der unkritischen Anwendung ausgedehnter chirurgischer Maßnahmen im Sinne einer

Flowmaximierung, zum Beispiel bei Muschelamputationen. Die Folge kann das Syndrom einer „empty nose“ sein. Dabei können die rhinomanometrischen Messungen den Normwerten entsprechen, der Patient hat aber trotzdem das Gefühl einer gestörten Nasenatmung.

Die prinzipiellen Schwierigkeiten bei der Beurteilung der respiratorischen Nasenfunktion konnten bisher nicht überwunden werden.

„Ein neuer Lösungsansatz: CFD

In jüngster Zeit ist es möglich geworden, für die Untersuchung aerodynamischer Prozesse bei der Nasenatmung die numerische Strömungsanalyse anzuwenden (CFD, Computational Fluid Dynamics). CFD-Methoden sind im Flugzeug- und Schiffsbau sowie auch in der Fahrzeugentwicklung bereits Routineverfahren. Sie erlauben es, Strömungsparameter ört-

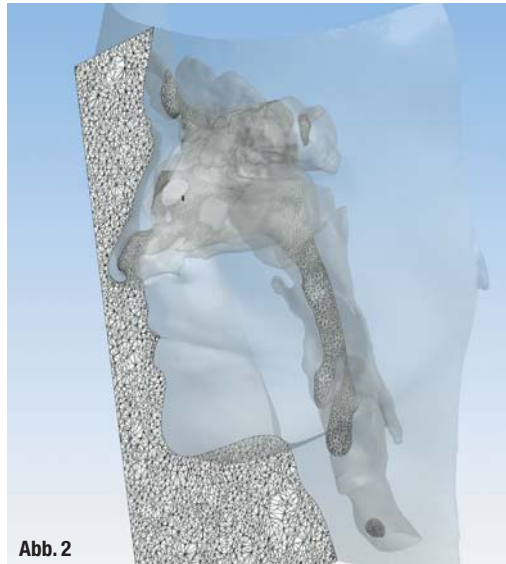


Abb. 2

Abb. 2_Sagittalschnitt durch das Rechengitter.

lich und zeitlich hochaufgelöst darzustellen. In den letzten Jahren konnten verschiedene Arbeitsgruppen zeigen, dass die Anwendung von CFD in der Rhinologie vielversprechend ist und ähnlich wie in der Industrie valide Ergebnisse liefern kann. Unsere eigenen Untersuchungen erlauben ebenfalls diese Schlussfolgerung. Noch ließ sich aber der bestehende experimentell und empirisch gewonnene Wissensstand damit nicht entscheidend erweitern.

„Was ist Computational Fluid Dynamics (CFD)?

Die numerische Strömungsmechanik (CFD, Computational Fluid Dynamics) ist die jüngste Methode zur Strömungsanalyse. Sie ergänzt die analytische und die experimentelle Strömungsmechanik. Mit CFD werden zeitlich und räumlich hochaufgelöste Ergebnisse

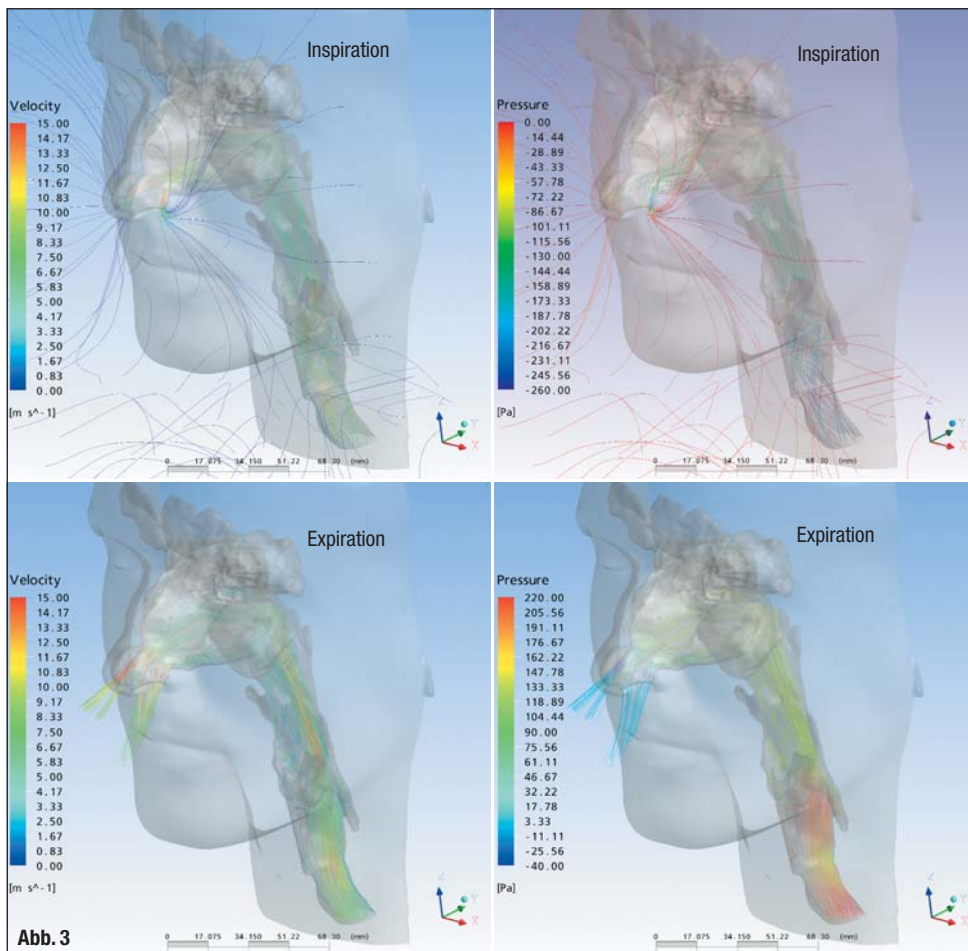


Abb. 3

Abb. 3 Momentaufnahmen einer transienten Strömungsberechnung der Nasenatmung. Farbcodierte Darstellung der Parameter: Geschwindigkeit und Druck.

erzielt und somit Detailinformationen von Strömungen gewonnen.

Grundlage der numerischen Strömungsanalyse sind die physikalischen Kontinuitätsgleichungen zur Erhaltung von Masse, Impuls und Energie. Die Gleichungen lassen sich einem System nichtlinearer partieller Differenzialgleichungen zusammenfassen, der sogenannten Navier-Stokes-Gleichung.

Um die Transportgleichung numerisch zu lösen, müssen folgende Arbeitsschritte ausgeführt werden:

- _ Erstellung eines Geometriemodells
- _ Erstellung eines Rechengitters
- _ Durchführung der Berechnung
- _ grafische und quantitative Auswertung.

Als Grundlage zur Generierung des adäquaten 3D-Modells der Nasenhöhle und des Nasennebenhöhlensystems dient der Datensatz einer hochauflösenden Computertomografie. Als problematisch hat sich dabei die zuverlässige Segmentierung beziehungsweise Differenzierung der unterschiedlichen Gewebearten erwiesen.

Das Strömungsgebiet wird in einem 2. Schritt diskretisiert, um das Rechengitter zu erhalten. Hierbei erfolgt die Zerlegung in kleine Volumenelemente. Mit diesen polygonalen Zellen (Tetraeder, Hexaeder, Pris-

men) muss ein möglichst genaues Abbild des Strömungsraumes erzeugt werden. Die bizarre Formgestalt der Nasenhöhlen macht diesen Prozess schwieriger als bei den meisten technischen Anwendungsgebieten.

Die Berechnung erfolgt für jedes einzelne Volumenelement. Gleichzeitig werden die Werte mit den jeweiligen Nachbarzellen verknüpft. Durch das Lösen des Gleichungssystems sind entsprechend den Randbedingungen an jedem Knoten Geschwindigkeitskomponenten, Druck, Temperatur und andere Größen berechenbar. Die Darstellung kann zum Beispiel in Konturlinien, Isoflächen, Vektoren und Stromlinien erfolgen. Die Interpretation des Strömungsbildes ist gerade für die Nase wegen der großen Komplexität aber nicht trivial.

_Rhino-CFD-Projekt Berlin/Karlsruhe

Wir sind überzeugt, dass von der numerischen Strömungssimulation der Nasenatmung durch eine verbesserte Qualität des Geometriemodells beziehungsweise des Rechengitters im Zusammenhang mit einer transienten Rechnung über mehrere

Atemzüge neue Entwicklungsimpulse zu erwarten sind. Wir gehen von einem Referenzgitter aus, bei dem in erster Näherung ein pathophysiologisch ungestörtes Strömungsmuster vorliegt. Es umfasst die gesamte Nasenhaupthöhle, die Nasennebenhöhlen sowie den prä- und postnasalen Strömungsbereich. Im ersten grundlegenden Schritt sollen neue Überlegungen zu einem verbesserten Ersatzmodell der Nasenhöhle verifiziert werden. Es wäre die Voraussetzung, um in Zukunft mithilfe relativ weniger anatomischer Parameter die ventilatorische Funktion der Nase genauer zu bewerten. Wir erhoffen uns davon auch neue Hinweise auf die Funktion der Nasennebenhöhlen und des Nasenzyklus sowie Anregungen zur Weiterentwicklung der Rhinomanometrie oder deren Ersatz. Wir denken, dass sich mit einer geeigneten Modellvorstellung wesentliche Eigenschaften der komplexen Nasenströmung hinreichend genau charakterisieren lassen. Auf dieser Basis sind die notwendigen Folgeuntersuchungen zielführender konzipierbar. Dazu gehören systematische Strömungsberechnungen, die virtuell modifizierte Varianten der Referenzgeometrie als Grundlage haben. Die Modifikationen sollten nach klinischen Gesichtspunkten erfolgen. Interessant wäre beispielsweise die 3D-Geometrie bzw. das Rechengitter der Referenzanatomie in typische Nasen-

formen, wie Sattel- oder Spannungsnase zu transformieren oder auch einen Zustand nach virtueller Ethmoidektomie zu generieren. Neben Geschwindigkeits- und Druckgradienten wäre es sinnvoll, dabei Partikelverteilungen sowie Wärmeaustausch- und Mischungsprozesse zu simulieren. Die erarbeiteten strömungsmechanischen Prinzipien der Nasenatmung müssen im Rahmen einer Patientenstudie überprüft werden, um richtige Konsequenzen für die Diagnostik und für Therapieplanungen abzuleiten.

Ausblick

Langfristig wird es durch die technische Entwicklung leichter möglich sein, auch Strömungsberechnungen bei veränderlicher Geometrie durchzuführen, um Effekte an der Nasenklappe zu untersuchen.

Fernziel ist die Entwicklung eines Tools für die individuelle patientenbezogene numerische Simulation der Nasenströmung, das zur Diagnostik, unmittelbaren Therapieplanung sowie der Evaluierung der Behandlungsergebnisse dienen soll und eine Anwendung im klinischen Alltag ermöglicht. _

Eine Literaturliste ist beim Verfasser erhältlich.

Autoren

face

Dipl.-Med. Thomas Hildebrandt

ChA der Sektion Rhinochirurgie,
Abteilung für Plastische Chirurgie
Asklepios Klinik Birkenwerder
Hubertusstr. 12–22, 16547 Birkenwerder
E-Mail: th@nasen-operation.de
www.nasen-operation.de, www.asklepios.de

Dr.-Ing. Stefan Zachow

Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik
(ZIB), Berlin
www.zib.de

Dr.-Ing. Alexander Steinmann

CFX Berlin Software GmbH, Berlin
www.cfx-berlin.de

Prof. Dr. med. Werner Heppt

HNO, Städtisches Klinikum Karlsruhe
www.klinikum-karlsruhe.com

ANZEIGE



Perfection for pure beauty

Spezialisten der ästhetischen Chirurgie sind von der Feinmotorik der UFSK-OSYS OP-Stühle in Verbindung mit der neu gewonnenen Mobilität überzeugt. Im Besonderen führt die stufenlose Verstellbarkeit der einzelnen Segmente bei allen ambulant ästhetischen Eingriffen im Oberkörper-Kopfbereich zu verlässlichen Ergebnissen – auf Knopfdruck perfekt positioniert!

BATTERY POWERED



surgiLine

BL 500 XLE



Ästhetik – Laser – MKG
Diagnostik – Ophthalmologie – Ambulante OP

ufsk-international osys gmbh
Kirchhoffstr. 1
93055 Regensburg
Deutschland

tel +49 (0) 941 78862-0
fax +49 (0) 941 7886218
info@ufsk-osys.de
www.ufsk-osys.de