

Strömungstechnische Analyse eines High-Tech-Operationssaales mit Star-CCM+

Benjamin Rußwurm, B.Eng.
Reinhold Hartwich, B.Eng.
Prof. Dr. Franz Magerl
Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

Einleitung

An der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden wurde ein hochmoderner High-Tech-OP mit dem vollen Funktionsumfang eines realen Operationssaales inklusive Lüftungstechnik für Lehre und Forschung etabliert. Dadurch konnte die Hochschule ihre Kompetenz im Studiengang Medizintechnik und als innovatives Zentrum für die Gesundheitswirtschaft in der Region stärken und ausbauen. Im Rahmen von F&E-Aktivitäten werden unterschiedliche Fragestellungen bearbeitet, wie z. B.

- Einsatz und Nutzen intraoperativer Bildgebung
- Technologieintegration
- Medizintechnikplanung
- Ergonomie
- Workflow und Effizienz
- Hygiene und Lüftungstechnik

Da die Anzahl an nosokomialen Infektionen in Kliniken in den letzten Jahren rasant gestiegen ist, muss die Frage geklärt werden, wie man diesem Trend entgegenwirken und damit für mehr Patientensicherheit sorgen kann. [1]

Hierzu ergeben sich vielfältige Themenfelder in Bezug auf Hygiene in Verbindung mit medizintechnischen Einrichtungen bzw. Ausstattung im Operationssaal. Grundsätzlich ist es wichtig, dass Partikel oder Erreger nicht von außen in den OP-Saal gelangen, damit eine mögliche Kontamination mit Keimen für den Patienten, das OP-Personal oder dem medizinischen Inventar ausgeschlossen werden kann. Speziell bei Operationen, in denen eine großflächige Freilegung aseptischer Bereiche, beispielsweise bei Implantationen, Gelenköffnungen oder in der Knochenchirurgie notwendig ist, besteht ein erhöhtes Risiko einer nosokomialen Infektion.

Neben der Betrachtung von Risiken infolge von hygienisch nicht optimalen Bedingungen, kann als weiteres Risiko hinsichtlich hygienerelevanter Themen eine Störung des

Abstract

The Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden (University of Applied Sciences) established a state-of-the-art, high-tech operating room for its research and teaching, which offers the full range of functions of a real operating room, including ventilation technology. Thus, the University was able to further broaden its competence in Medical Engineering and strengthen and expand its position as a center of innovation for the health industry of the region. Research and development activities involve various areas, such as...

- implementation and benefits of intra-operative imaging
- technology integration
- medical technology planning
- ergonomics
- work flow and efficiency
- hygiene and ventilation technology

The fact that the number of nosocomial infections has increased considerably over the past years raises the question of how to counteract this trend, thus providing for greater patient safety.

This in turn involves a number of issues regarding hygiene in connection with medical facilities and equipment. It is essential that no particles or pathogens enter the operation room from outside, so that the risk of contamination of patients, surgical staff and medical equipment and inventory by germs can be ruled out. This particularly applies to operations where the large-scale exposure of aseptic areas is necessary, e.g. in implantations, joint or bone surgery.

Besides the risks resulting from suboptimal hygienic conditions, there are additional hygiene-related risks caused by airflow disturbances in the operating room. By means of a special ventilation system a so-called

Luftstroms in einem OP identifiziert werden. Mit speziellen Lüftungssystemen wird eine sogenannte Turbulenzarme Verdrängungsströmung (TAV) generiert. Diese soll sicherstellen, dass im Bereich des OP-Tisches ein keimfreier Schutzbereich ausgebildet wird. Bildgebende Verfahren, OP-Monitore und „strömungsgünstig gestaltete OP-Leuchten (flächenhaft, kaum oder nicht luftströmungsdurchlässig) verschlechtern die Schutzwirkung der TAV-Lüftung.“ [2] Zum Grundverständnis und als Basis für Optimierungsmaßnahmen wurden Modelle generiert, um diese Einflüsse anhand von Strömungssimulationen zu untersuchen.

Lüftungstechnik im Operationssaal

Der Standard-OP (gemäß Raumklasse 1a nach DIN 1946 Teil 4) verfügt über eine raumlufttechnische Anlage (RLT), welche die einströmende Um- und Frischluft vorreinigt, temperiert und im Regelfall befeuchtet. Danach wird sie über einen Schwebstoff-Filter der Filterklasse H 13 zurück in den OP geführt. Die Einleitung der gefilterten Zuluft erfolgt durch ein OP-Deckenfeld direkt über dem Operationsbereich (OP- und Instrumententisch). Dabei wird eine turbulenzarme Verdrängungsströmung erzeugt, welche dafür sorgt, dass ein gewisser Schutzbereich entsteht, in dem die Keimlast nahezu gegen null geht. Die Charakteristika an dieser Art der Strömung sind die Zuluftströme, die mit einer definierten Strömungsgeschwindigkeit nach unten verlaufen und durch seitlich auftreffende Turbulenzen oder Hindernisse, wie OP-Lampen, OP-Team etc., nach unten abgelenkt werden [2].

Mittlerweile existieren mehrere unterschiedliche Ansätze für RLT-Anlagen. Um eine Aussage über die Effektivität der RLT-Anlagen treffen zu können, ist eine konventionelle laminare Luftströmung (LAF) Decke, die die DIN-konforme Maße von 3200 mm x 3200 mm aufweist, mit einem Konzept (Produktname: Opragon) aus Schweden von der Firma Avidicare AB verglichen worden, welches einen temperaturkontrollierten laminaren Airflow (TLAF) erzeugt.

Strömungssimulation im Operationssaal

Hierzu wurden umfangreiche numerische Strömungssimulationen für jedes Konzept durchgeführt und dessen Ergebnisse durch Luftgeschwindigkeit- und Temperaturmessungen verifiziert. Hauptziel dieser Untersuchungen war es, die entstehenden Luftströmungsphänomene im jeweiligen Operationssaal zu simulieren, um Rückschlüsse über dessen Einfluss auf die Wirksamkeit der Belüftungstechnik ziehen zu können. Mit der CFD-Software STAR-CCM+ (CD-adapco, Melville, NY, USA) [3] werden diese Wechselwirkungen für die Bildgebung im OP analysiert und die Einflüsse aufgezeigt.

low-turbulence air displacement flow (TAV) is generated to ensure a germ-free environment around the surgical table. Imaging methods, surgery monitors and surgery lamps with unfavorable flow characteristics (laminar, with no or hardly any permeability to airflow) have a negative influence on the protective effect of TAV-ventilation. For better understanding and as a basis for optimization measures, models were generated to examine these influences, using computational fluid dynamics simulation.

In einem ersten Schritt ist der gesamte Operationsraum mit technischer und personeller Ausstattung in Form eines CAD-Modells entworfen worden. Hierfür sind zunächst grundlegende Vereinfachungen angenommen worden: Unnötige Geometrien (u. a. Fasen, Rillen oder Kantenverrundungen) werden negiert, da diese für die Simulation keine große Rolle spielen. Die gesamte Belüftungstechnik ist auf den Ein- und Auslass der Luft reduziert und das OP-Personal ist idealisiert als Zylinder dargestellt worden. Die Abmessungen für Größe und Radius der Zylinder entsprechen den Angaben in der DIN 1946-4:2008-012. Der Einfluss von Fenstern, Türen und sonstigen Wandöffnungen wurde vernachlässigt.

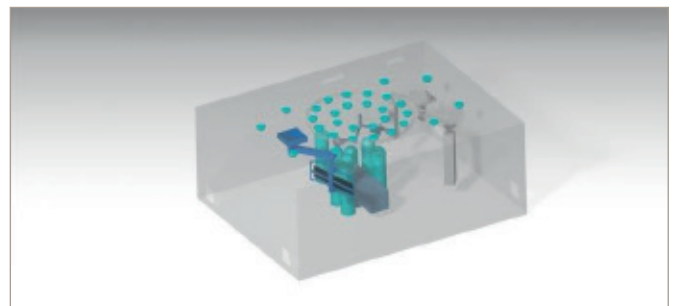


Abbildung 1: CAD-Modell des Forschungs-OP

Der Forschungs-OP an der Ostbayerischen Technischen Hochschule in Weiden wird mit einem innovativen Lüftungskonzept aus Schweden betrieben, welches einen temperaturkontrollierten directionalen Airflow generiert. Dabei strömt Luft durch halbkugelförmige Einlässe von oben in den OP. Die Temperatur der Einlässe in den beiden Mittelkreisen ist um 2 Kelvin kühler als außen. Erkennbar sind drei Bereiche, in denen unterschiedliche Luftvolumina mit unterschiedlicher Temperatur in den Operationssaal einfließen. Der Innenkreis (B1), der Außenkreis sowie der Randbereich (B3), wobei der Außenkreis nochmals unterteilt ist (B2.1 & B2.2).

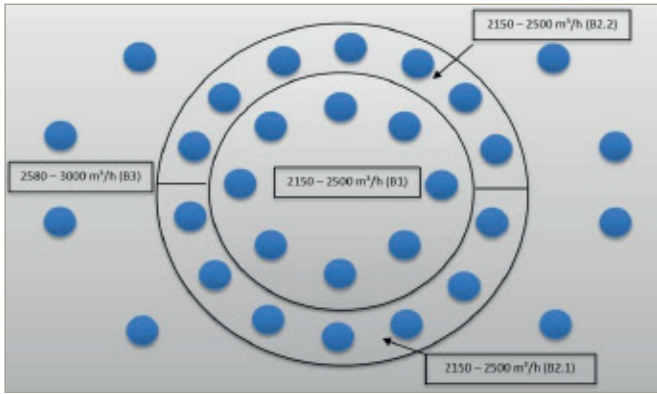


Abbildung 2: Vereinfachte Darstellung der einfallenden Luftvolumenströme des OP-Deckenfeldes

Verifizierung der Simulation mit Star-CCM+ durch experimentelle Untersuchungen

Für die CFD-Simulation wurde das κ -Epsilon-Modell verwendet. Ausgewählte Simulationsergebnisse werden nachfolgend dargestellt. Zur Verifizierung der CFD-Simulation wurden sowohl Luftgeschwindigkeits- als auch Temperaturmessungen im Forschungs-OP der Hochschule durchgeführt. Nachfolgend sind die Messpunkte im OP-Saal aufgeführt.

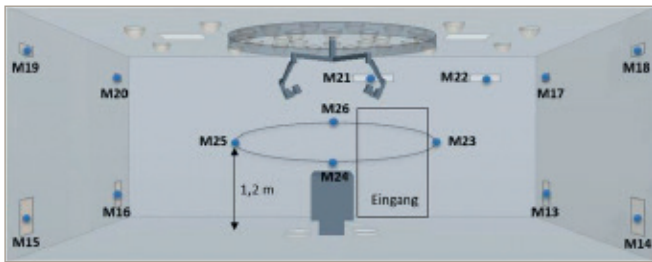


Abbildung 3: Position der Messpunkte im OP-Saal

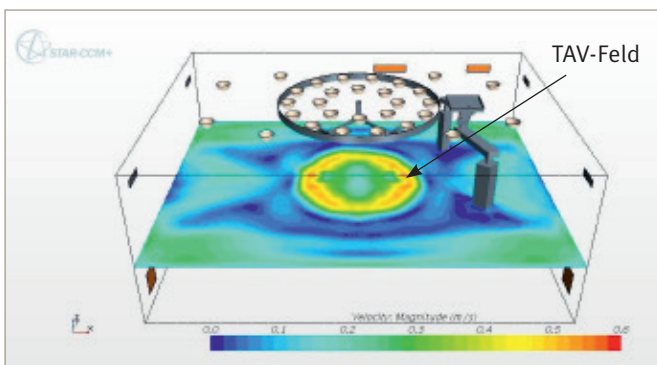


Abbildung 4: Simulationsergebnisse für die Strömungsgeschwindigkeit

Simulation:	Messung:
Luftgeschwindigkeit in m/s	Luftgeschwindigkeit in m/s
TAV-Feld: 0,450	TAV-Feld: 0,420
Abweichung von ca. 7 %	

Abbildung 5: Vergleichstabelle zur Strömungsgeschwindigkeit

Dabei wurde ersichtlich, dass die in der Simulation berechnete Luftgeschwindigkeit von 0,450 m/s mit den Messwerten von 0,420 m/s nahezu identisch ist. Der

Vergleich der simulierten und der gemessenen Temperaturverteilung zeigt ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung. Basierend auf diesen Erkenntnissen konnten umfangreiche Grundsatzuntersuchungen und Parameterstudien durchgeführt werden.

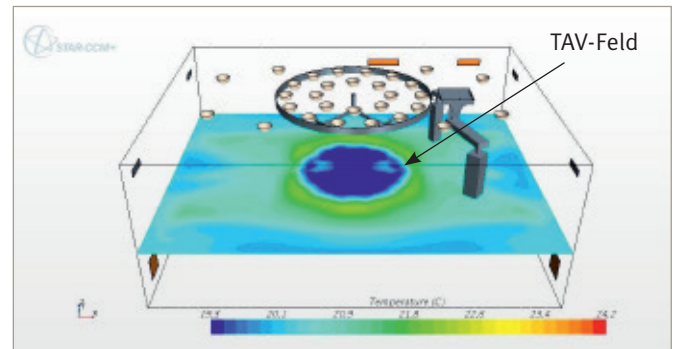


Abbildung 6: Temperaturverteilung

Simulation:	Messung:
Temperatur in °C	Temperatur in °C
TAV-Feld: 21,8	TAV-Feld: 21,4
Abweichung von ca. 2 %	

Abbildung 7: Vergleichstabelle zur Temperaturverteilung

Neben einer Globalbewertung der Strömungs- und Temperaturverteilung wurden auch Detailuntersuchungen zum Einfluss der apparativen Ausstattung im OP-Saal durchgeführt. Exemplarisch wird hierzu das nachfolgende Strömungsfeld dargestellt, in dem Turbulenzen neben dem OP-Tisch erkennbar sind, welche von der TAV-Strömung überlagert wird. Diese Überlagerung verhindert das Aufsteigen von Keimen in den patientennahen Bereich. Konkrete Strömungsvisualisierungen unter Verwendung von Nebel untermauern dieses Ergebnis.

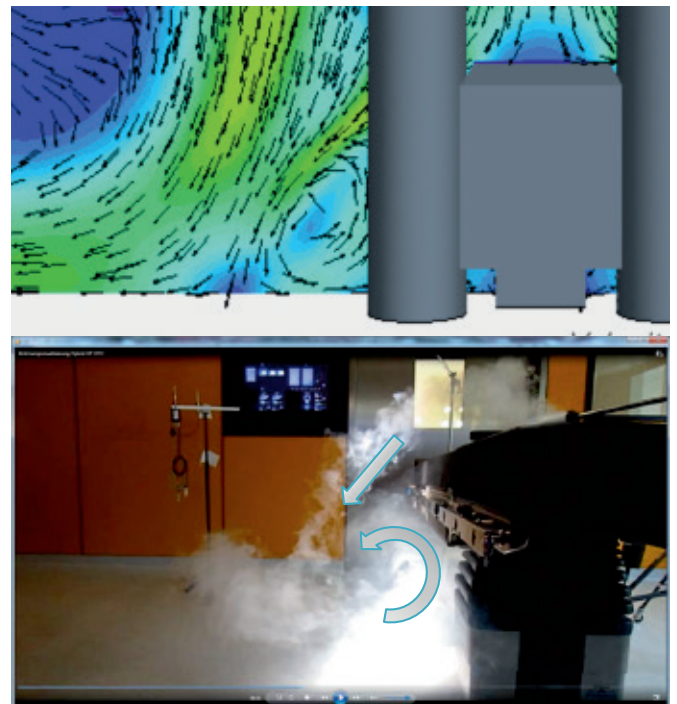


Abbildung 8: Vergleich von der Strömungsvisualisierung (unten) mit der Simulation im Forschungs-OP (oben)

Schlussfolgerung

Die Ergebnisse der CFD-Simulation wurden durch umfangreiche Messungen der Strömungsgeschwindigkeit und Temperaturverteilung verifiziert. Basierend auf den Globaluntersuchungen wurde im Detail der Einfluss der apparativen Ausstattung mittels CFD analysiert. Es konnte herausgearbeitet werden, dass medizintechnische Geräte (Röntgen-C-Bogen, OP-Lampen, etc.), welche sich direkt unter dem TAV-Feld befinden, ein erhöhtes Risiko für die Verbreitung der Keime darstellen, sofern die Medizinprodukte bereits keimbelastet sind. Bei der Umströmung der Körper entstehen zusätzliche Turbulenzgebiete, die letztlich bewirken, dass kontaminierte Luft aus dem äußeren Raumbereich in den Schutzbereich gelangen kann. Die Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen zur Keimbelastung werden in einem nachfolgenden Bericht präsentiert.

Durch den Einsatz der CFD-Simulation können zuverlässige globale und lokale Aussagen über die Strömungs- und Temperaturverteilung im OP-Saal gemacht werden. Es können die optimalen Lüftungstechnischen Parameter herausgearbeitet und Optimierungspotenziale bei der medizingerätetechnischen Ausstattung identifiziert und Verbesserungsmaßnahmen empfohlen werden.

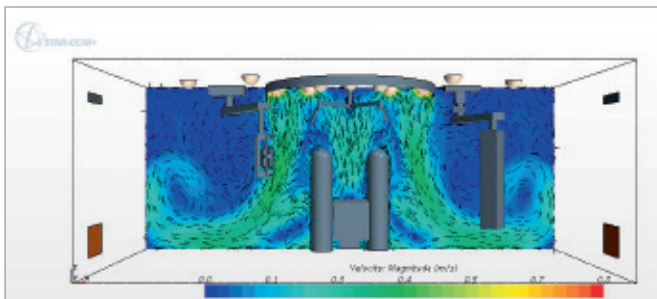


Abbildung 9: CFD-Simulation des Hybrid-OPs mit einer temperaturkontrollierten, direktionalen Luftströmung

Die Ergebnisse aus den CFD-Simulationen verdeutlichen, dass die vorgestellten Lüftungssysteme ein Schritt in die richtige Richtung sind. Allerdings zeigen sie auch, dass die Lüftungstechnik nur im Zusammenspiel mit einer strömungsoptimierten Geräteausstattung und optimierten Arbeitsabläufen im OP-Saal effizient funktionieren kann.

Referenzen

- [1] Robert Koch-Institut, *Krankenhaushygiene Basisdaten stationärer Krankenhausversorgung in Deutschland – nosokomiale Infektionen*, Epidemiologisches Bulletin Nr. 36, 13.09.2010
- [2] Rüdiger Külpmann, Kurt Hildebrand, *OP-Lüftungssysteme im Vergleich*, GI – Gebäude Technik | Innenraum-Klima, Vol. 134, No. 01, pp. 12 – 29, 2013
- [3] CD-adapco (2014), *STAR-CCM+ User Guide*

Kontakt:



Benjamin Rußwurm, B.Eng.

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen
Studiengang Medizintechnik
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

b.russwurm@oth-aw.de



Reinhold Hartwich, B.Eng.

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen
Studiengang Medizintechnik
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

r.hartwich@oth-aw.de



Prof. Dr. Franz Magerl

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen
Dekan
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

f.magerl@oth-aw.de



Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen
Studiengangsleiter und Studienfachberater
im Studiengang Medizintechnik
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

c.bulitta@oth-aw.de

