

Abschlussbericht

Horw, 30. Juni 2012

Seite 1/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

KTI-Projekt 10058.1 PFLS-LS

Impressum

Auftraggeber	Bundesamt für Berufsbildung und Technologie BBT Förderagentur für Innovationen KTI
Auftragnehmer	Hochschule Luzern Technik & Architektur Zentrum für Integrale Gebäudetechnik ZIG Technikumstrasse 21 CH-6048 Horw
Verfasser	Prof. K. Hildebrand HSLU T&A Florian Brzezinski HSLU T&A Prof. Dr. R. Külpmann HSLU T&A Martin Lagler ZHAW Serge Mattli HSLU T&A Prof. Urs-Peter Menti HSLU T&A Iwan Plüss HSLU T&A Martin Schneider ZHAW Dr. Benoit Sicre HSLU T&A Prof. Dr. Frank Tillenkamp ZHAW Dr. Peter Vogel INNIUS GTD GmbH Stefan Weigel INNIUS GTD GmbH
Version/Datum	30. Juni 2012
SAP-Nr.	112 04 05
Dateiname	d_20121010_GIG II_Schlussbericht.docx

Zusammenfassung

Beim ersten KTI-Projekt „Gebäudetechnik im Gesundheitswesen“ (GiG) konnten die Forschungsergebnisse erhebliche Wissenslücken über Möglichkeiten und Grenzen von Lüftungskonzepten für OP-Räume schliessen. Die daraus abgeleiteten Verbesserungen bei den Konzepten und Komponenten haben den Markt stark beeinflusst. Gleichzeitig hat sich auch gezeigt, dass ein erheblicher, weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht. Im Rahmen des KTI-Projektes „GiG II“ sollen zum einen die bisher gültigen Ergebnisse für OP-Raumneubauten mittels ergänzender Versuche auf allgemeingültige Umsetzbarkeit untersucht werden. Benötigt werden vom Markt speziell verbesserte Grundlagen zur Umsetzung im Bereich der Umbauten und Neukonfigurationen von OP-Räumen. Zum anderen verlangen die bisherigen historisch-technisch bedingten Entwicklungen im OP-Raum über Instrumente, Geräte, medizintechnische Operationsmethoden und den Veränderungen in der Anästhesie/Narkose nach einer kompletten interdisziplinären Neukonzeption des OP-Raumes unter den Aspekten Ergonomie, Hygiene, Ökonomie, Ökologie. Die Entwicklung eines integrierten Operationssaales, der primär für die breite Anwendung (universelle Raumnutzung) von endoskopischen/minimalinvasiven Eingriffen entwickelt wird ist daher ein weiterer wichtiger Projektgegenstand.

Bei Sofortmassnahmen oder Umstellung auf die offene Operation müssen die Raumfunktionen entsprechend angepasst werden können. Weiterhin sind raumfüllende medizintechnische Geräte, Apparate und Leuchten in jeweils zu entwickelnden Konzeptionen strömungstechnisch zu verbessern oder Möglichkeiten zu entwickeln, dass sie unter Beibehaltung ihrer Nutzungsabsicht aus dem direkten OP-Feld eliminiert werden können.

Neben Verbesserungen im Bereich des eigentlichen Operationsraumes sind mobile und dezentrale Lüftungskonzepte für Isolierzimmer (nötig zur Behandlung von Patienten mit SARS, Vogelgrippe, Tuberkulose etc., aber auch für den privaten Gebrauch) zu entwickeln und ein Standardprüfverfahren verbindlich zu definieren.

Zunehmend besteht auch der Bedarf zur temporären und dezentralen Nachrüstung von Kühlmöglichkeiten für Räume mit erhöhten lufthygienischen Anforderungen. Bei den derzeit am Markt angebotenen Geräten bestehen Mängel hinsichtlich ihrer lufthygienischen Eignung. Die Zusammenstellung und Prüfung der erforderlichen technischen Merkmale zur Anwendung in diesen Räumen ist ebenfalls Projektgegenstand.

Ein Hauptziel der am Projekt beteiligten Industriepartner ist folgerichtig, ihre Produkte weiter zu optimieren oder neu zu gestalten. Damit verbessern sie ihre Wettbewerbstauglichkeit und schaffen Arbeitsplätze im Zuliefersektor des Gesundheitswesens bei gleichzeitiger Kostensenkung.

Schließlich besteht ein wesentlicher Projektgegenstand in der Intensivierung des Wissenstransfers für die unterschiedlichen Berufsgruppen: Architekten und Planer, Komponentenlieferanten und Anlagenerrichter, Mess- und Prüffirmen, Betreiber, Nutzer für Räume des Gesundheitswesens.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 4/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Das Gesamtprojekt ist daher in fünf Teilprojekte strukturiert:

- Teilprojekt 1:** Raumluftechnik und Medizintechnik für OP-Neubau und Sanierung
- Teilprojekt 2:** Prüfausrüstungen und Betriebsoptimierung bei OP-Abteilungen
- Teilprojekt 3:** Standardprüfverfahren für mobile Raumlufreinigungsgeräte
- Teilprojekt 4:** Einsatz von Raumlufströmungssimulationen (CFD)
- Teilprojekt 5:** Wissenstransfer

Die schon im ersten KTI-Projekt aufgeführten wirtschaftlichen Ziele seitens der Spitäler und Industriepartner sowie die entsprechenden volkswirtschaftlichen Ziele werden auch mit dem hier bearbeiteten Projekt „GIG II“ konsequent weiter verfolgt. Dies kommt auch durch die weitere Zusammenarbeit mit den bisherigen Projektpartnern und durch den Gewinn neuer Partner zum Ausdruck. Während die Projektpartner beim ersten KTI-Projekt überwiegend aus dem Bereich der Gebäudetechnik und der Messtechnik kamen, sind die neuen Projektpartner vermehrt aus dem Bereich der Betreiber und der Medizintechnik.

TP1: Raumluftechnik und Medizintechnik für OP-Neubau und Sanierung

Aus den Ergebnissen vom GiG I-Vorhaben konnten die optimalen Systemmerkmale für ein TAV-Lüftungskonzept festgestellt werden. Damit wurden 11 weitere Versuchsreihen im Versuchs-OP-Raum der HSLU und teilweise in ausgeführten OP-Räumen mit veränderter Raumgeometrie, anderen Abströmbedingungen, Strömungsschürzenlängen und praxisüblichen Musterlasten durchgeführt. Alle Versuche zeigten, dass das im GiG I ermittelte Ausströmprofil vom TAV-Feld als Differentialflow-Profil unter allen betriebsüblichen Lastvarianten noch eine deutlich bessere Luftreinheit im Schutzbereich ermöglicht als bei einer Mischlufströmung.

Untersucht wurden u.a. der Einfluss von periodischer Türöffnung und Zulufttemperaturanhebung während der OP (resp. Schutzgradmessung) sowie medizintechnischer Einrichtungen wie ein C-Bogen, Patientenwärmesysteme und eingeschwenkte Deckenversorgungseinheiten. Die Ergebnisse zeigen, dass als einzige hochrelevante Störquelle nur noch die geometrische Form der verwendeten OP-Leuchten verbleibt. Sie sollten unbedingt strömungsgünstig gestaltet sein.

Für Deckenversorgungseinheiten, die von aussen in den Schutzbereich eingeschwenkt werden, wurde eine optimierte Form von Ableitblenden entwickelt. Sie sind sehr kostengünstig, einfach nachrüstbar und vermindern das Einströmen von belasteter Luft aus dem Raumhintergrund in den Schutzbereich über die Deckenversorgungsarme.

Es zeigte sich auch, dass schon kleine Veränderungen der Ausrichtung von ungünstig geformten OP-Leuchten zu nennenswerten Verbesserungen der Umströmungswirkung und damit Schutzgraden führen kann, ohne dass dadurch die Tiefenausleuchtung von OP-Feldern verschlechtert wird. Daher wird die Schulung von OP-Personal zum Grundverhalten von OP-Lüftungskonzepten als sehr hilfreich angesehen.

Neben einer verbesserten Schutzwirkung vom sterilen Bereich im OP führt eine TAV-Lüftung auch zu erheblich schnellerer Abfuhr von Schadgasen (z.B. chirurgischer Rauch) im Atmungsbereich vom OP-Team im Vergleich zur Mischlüftung. Hier zeigten die Versuchsergebnisse zur Erholzeitmessung eine Verbesserung der TAV-Lüftung um den Faktor bis zu 10 gegenüber üblich ausgelegter Mischlüftung.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 5/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Es wurde auch ein Schichtlüftungskonzept detailliert untersucht. Die Ergebnisse zur Schutzwirkung zeigten, dass es besser als Mischlüftung ist (niedrigere Belastung im Schutzbereich), aber die Wirksamkeit einer gut funktionierenden TAV-Lüftung nicht erreichen kann.

Aufgrund der gefundenen Ergebnisse konnten die optimalen Systemmerkmale für ein TAV-Lüftungskonzept noch weiter präzisiert und reduziert werden. Insgesamt besteht für ein gut funktionierendes TAV-Lüftungskonzept nur noch erheblicher Abstimmungsbedarf hinsichtlich der verwendeten OP-Leuchten und weniger für andere medizintechnische Einrichtungen.

TP2: Prüfausrüstungen und Betriebsoptimierung bei OP-Abteilungen

Bei den Prüfausrüstungen zur Bestimmung der Schutzgrade und Erholzeiten von OP-Lüftungskonzepten bestand nur noch wenig Forschungsbedarf. Vielmehr sollte der OP-Labor mit seiner Ausstattung zu Vergleichsmessungen mit kommerziell gefertigten Messtechniken dienen können. Daher wurde die Schutzgradmesstechnik vom OP-Versuchsraum noch langzeitstabiler gestaltet.

Das von einem Projektpartner schon beim ersten Teil F&E-Vorhaben GiG entwickelte Aerosolverteils- und Verdünnungssystem wurde im OP-Versuchsraum umfassend validiert. Dabei zeigte sich eine sehr gute Betriebsstabilität und nutzerfreundliche Handhabung der Ausstattung.

Ein weiterer Projektpartner hat ein System zur Partikelgenerierung und Aufgabe für die Durchführung von Schutzgradmessungen entwickelt und Vergleichsmessungen im Versuchs-OP durchgeführt. Nach einigen Optimierungsarbeiten konnten sehr gute Übereinstimmungen erzielt werden. Dieses Gerät eignet sich darüber hinaus auch zur Kalibrierung von optischen Partikelzählern und wird seit 2011 vertrieben.

Bei der Überprüfung zum Einfluss von einem Patientendummy als weiterer Bestandteil der Musterlastanordnung zeigte sich, dass er nur erforderlich ist, wenn die Schutzgrade durch schlechte OP-Leuchten ohnehin schon den unteren Zielwert von $SG = 2$ erreicht haben. Dann kann es zu einer weiteren Verschlechterung der gemessenen Schutzgrade kommen, weil der Partikelmessort noch weiter in das Leegebiet hinter geometrisch ungünstig geformten OP-Leuchten reicht.

Durch die entstandenen Kontakte zu Krankenhausbetreibern, Hygienikern und Normungsvertretern wurden Erfahrungen zur Betriebsoptimierung gesammelt und mit eigenen Erfahrungen bzw. Versuchen verglichen. Insgesamt können zwei wesentliche Optimierungsempfehlungen gegeben werden, die die nächtliche Anlagenabschaltung und Höhe des Aussenluftstromes betreffen.

TP3: Standardprüfverfahren für mobile Raumlufreinigungsgeräte

Mobile Raumlufreinigungsgeräte werden kommerziell in den verschiedensten technischen Varianten und Preisen angeboten. Derzeit existieren keine vereinheitlichten Anforderungen und kein Prüfverfahren für die Reinigungseffizienz. Interessierte Käufer haben weder technische noch wirtschaftliche Vergleichsmöglichkeiten.

Die Ziele des Teilprojektes 3 sind:

- Entwicklung eines Standard-Prüfverfahrens für mobile Luftreinigungsgeräte
- Aufzeigen der Leistungsgrenzen solcher Geräte in Abhängigkeit von der Geräteklasse (Vereinheitlichen der Anforderungskriterien für den Nutzer), z.B. Klasse A: medizinische Anwendungen in Arztzentren, Patientenzimmern, Isolierzimmern und

Horw, 30. Juni 2012

Seite 6/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Klasse B zur Anwendung im privaten Bereich für Allergiker, Arbeitsplatz, Geschäftsräume

- Definition eines Prüfraums, um später an der Hochschule Luzern solche Prüfungen als Dienstleistung durchführen zu können.
- Erarbeitung der Grundlagen für die Beantragung einer Norm für Raumluft-Reinigungsgeräte und deren Leistungen und Prüfungen.

Bei der Entwicklung von Standardprüfverfahren sind die unterschiedlichen Anforderungen für den medizinischen Einsatz (in lüftungstechnisch nicht oder unzureichend ausgestatteten Zimmern für infektiöse und nicht infektiöse abwehrgeschwächte Patienten) und den privaten Bereich zu berücksichtigen.

Das reproduzierbare Standardprüfverfahren soll einen direkten Vergleich und neben der Leistungsprüfung bestehender Geräte eine Optimierung der Leistungsfähigkeit von Neu- und Weiterentwicklungen ermöglichen.

Das Raumluftreinigungsgerät muss als System verstanden bzw. betrachtet werden. Dies ist speziell im Hinblick auf die Prüfgrößen und deren Interpretation zu berücksichtigen. Der Filter kann nur über die Erholzeit auf seine Wirksamkeit geprüft werden. Grund dafür ist, dass die Gerätehersteller oft keine Filterprüfzertifikate nach den üblichen Normen besitzen, trotz EU-Normen im Filterbereich (EN 779).

Die Prüfmessungen erfolgen bei Nennluftmenge. Diese „Nennluftmenge“ ist anzugeben und vom Hersteller zu deklarieren. Bei der Erholzeit-Messung wird die Partikelgrösse 0,3 – 0.5 Mikrometer ausgewertet.

Die Messung erfolgt mit einem neuen Filter und mit einem elektrostatisch „entladenen“ Filter. Die Messung wird erneut im elektrostatisch „beladenen“ Zustand durchgeführt um die Langzeitwirkung des Filters zu erproben. Diese Messmethodik wurde erarbeitet.

Mit Hilfe des Projektpartners Fa. Palas, spezialisiert auf Partikelmessgeräte und Staubmessungen - ist die pragmatische Lösung mit einem "Bestäubungsmechanismus" definiert worden. Das Gerät wird mit einer definierten Menge Staub in einer definierten Zeitperiode belastet. Dadurch wird der Filter elektrostatisch "entladen" und muss sich in der effektiven mechanischen Staubabscheidung beweisen.

Der Lieferant muss sicherstellen bzw. garantieren können, dass sein Gerät immer die angegebene Klasse (z.B. A1, B1, A2, etc.) einhalten kann. Entsprechend muss die Luftleistung und die Filterverschmutzung (Druckverlust) am Raumluftreinigungsgerät angezeigt und somit kontrollierbar sein (Signal: Akustisch, Anzeige Delta-p, Lampe o.ä.).

Die vorliegende Basis-Richtlinie wird dem Branchenverband SWKI und VDI zur Verfügung gestellt um eine rechtlich formal korrektes und von der Branche akzeptiertes Regelwerk zu erstellen.

TP4:

Als Resultat aus dem GiG I kam heraus, dass man das Planungstool CFD für den Einsatz im Operationssaal gut einsetzen kann. Doch waren die Rechenzeiten für Schutzgradbestimmung extrem lang. Das Hauptziel des GiG II Teilprojekt 4 (Luftströmungssimulationen) bestand darin, die Rechenzeiten bei genügend / gleich bleibender Genauigkeit der Simulationsresultate reduzieren zu können.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 7/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Zu diesem Zweck wurde eine Parameterstudie mit unterschiedlichen Simulationsmodellen durchgeführt. Mit dem Resultate dass man die Luftströmungssimulationen mit genügender Genauigkeit aufgrund der neuesten Forschungsergebnissen innert ein bis zwei Tagen berechnen kann. Das in der Studie erarbeitete Wissen wurde in einer „Best practice guideline“ dokumentiert und kann für alle weiteren Luftströmungssimulationen verwendet werden.

In weiteren Teilaufgaben wurde spezifische Fragen wie etwa das Thema chirurgischer Rauch und das Strömungsverhalten von OP-Leuchten untersucht.

TP5: Wissenstransfer

Verschiedenste Veröffentlichungen und Vorträge zum Projekt wurden erstellt bzw. an verschiedenen Orten im In- und Ausland gehalten.

Zur Veranschaulichung der Wirkung einer turbulenzarmen Verdrängungsluft auf den Partikeleintrag in die Schutzzone eines OP-Raums wurde außerhalb des Projekts ein OP-Modell angefertigt. Dieses Modell wurde im Rahmen verschiedener Veranstaltungen (z.B. 19. Europa Forum in Luzern) ausgestellt.

Bei der internationalen Normungsarbeit CEN TC 156 WG 13 „Ventilation in Hospitals“ sind zwei Personen aus dem SIA vertreten. Damit sind wir aktiv am Geschehen der internationalen Normen-erarbeitung Eins zu Eins beteiligt.

Die Situation bei den Krankenhausinfektionen wird derzeit immer wieder insbesondere in Deutschland (schätzungsweise 15'000 Tote pro Jahr) in der Öffentlichkeit und von der Politik stark thematisiert. Insofern finden auch Massnahmen zur Verbesserung der Lufthygiene in OP-Räumen zunehmend in Europa stärkere Beachtung. Entsprechende Anfragen an der Hochschule sind zu verzeichnen!

Die Ziele das Wissen weiter zu geben sind angeschoben und fassen langsam in der Branche. Hier gilt es weiterhin hartnäckig am Thema und am Zielpublikum weiter zu arbeiten.

Die sehr vielen und sehr guten Arbeiten sollten in einem wissenschaftlich durchgängigen Bericht aufgearbeitet werden können – D.h. ein Buch das sowohl als Informationslektüre wie auch als Lehrbuch seinen Dienst erweisen könnte. Das Wissen ist generiert – die Umsetzung eines solchen Buches verlangt einen grossen Zeitaufwand mit entsprechenden Kosten für die Erarbeitung der Texte, der Bilder und Graphiken etc. Die Kosten belaufen sich um die 300 kFr.

Inhaltsverzeichnis

Impressum.....	2
Zusammenfassung.....	3
Inhaltsverzeichnis	8
1. Einführung.....	10
1.1. Ausgangslage.....	10
1.2. Projektziele.....	10
2. Teilprojekt 1: Raumluftechnik und Medizintechnik für OP-Neubau und Sanierung.....	12
2.1. Zielsetzung.....	12
2.2. Versuchstechnische Rahmenbedingungen	12
2.3. Untersuchung 1, TAV-Lüftung: Einfluss der Schürzenlänge.....	16
2.4. Untersuchung 2, TAV-Lüftung: Einfluss Zulufttemperaturniveau und -änderung.....	18
2.5. Untersuchung 3, TAV-Lüftung: Einfluss von Raumgeometrie und Überströmverhältnissen.....	20
2.6. Untersuchung 4, TAV-Lüftung: Einfluss OP-Leuchten-Form, -Position und Musterlasten ..	22
2.7. Untersuchung 5: TAV-Lüftung: Einfluss von Deckenversorgungseinheiten.....	26
2.8. Untersuchung 6, TAV-Lüftung: Einfluss von C-Bogen auf Schutzwirkung	33
2.9. Untersuchung 7, TAV-Lüftung: Einfluss periodischer Türöffnung beim OP-Raum	36
2.10. Untersuchung 8, Einfluss von Patienten-Wärmesystemen.....	39
2.11. Untersuchung 10: Ausspülzeiten bei Mischlüftung und TAV-Lüftung.....	42
2.12. Untersuchung 11: Schutzwirkung bei Schichtlüftung.....	44
2.13. Systemmerkmale vom „optimalen TAV-Lüftungskonzept nach „GiG II“	50
3. Teilprojekt 2: Prüfausrüstungen, Betrieb bei OP-Abteilungen.....	51
3.1. Zielsetzung.....	51
3.2. Untersuchung 1, Mischlüftung: Einfluss von Musterlasten bei der Erholzeit-Bestimmung ..	51
3.3. Untersuchung 2, TAV-Lüftung: Einfluss von Patientendummy und Partikelauflageort	53
3.4. Untersuchung 3: Validierung eines kommerziell hergestellten Partikelverteils-Systems	56
3.5. Untersuchung 4: Prüfung eines kommerziell hergestellten Partikelverteils-Systems.....	58
3.6. Betriebsoptimierung bei OP-Abteilungen.....	60
4. Teilprojekt 3: Standardprüfverfahren für mobile Luftreinigungsgeräte	62
4.1. Einleitung:	62
4.2. Zielsetzung.....	62
4.3. Methodische Vorgehensweise; Untersuchungsfragen, Vorgehen.....	65

Horw, 30. Juni 2012

Seite 9/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

4.4. Ergebnisse.....	67
4.5. Schlussfolgerung, Zusammenfassung.....	69
5. Teilprojekt Einsatz von Raumluftströmungssimulationen (CFD).....	71
5.1. Zielsetzung.....	71
5.2. Vorgehensweise.....	71
5.3. CFD-Simulationen zur Beurteilung der Strömungsverhältnisse und Schutzgrade in Operationssälen - Charakterisierung der Einflüsse auf die Partikelverteilungen und Optimierung der Modellierungsansätze.....	71
5.4. Untersuchungen zur Gefährdung des Operationsteams durch entstehenden chirurgischem Rauch.....	74
5.5. Teilprojekt 4: Anwendung / Weiterentwicklung Planungstool CFD (Luftströmungssimulationen) – Bearbeitung konkreter Fragestellungen mittels CFD- Simulationen.....	75
5.6. Strömungsanalyse der OP-Leuchten im Differentialflow.....	75
6. Teilprojekt 5: Wissenstransfer.....	78
6.1. Zielsetzung.....	78
6.2. Methodische Vorgehensweise.....	78
7. Literaturverzeichnis.....	80
8. Abbildungsverzeichnis.....	81
9. Tabellenverzeichnis.....	83
10. Anhang.....	84
10.1. Anhang 1: Publikationsliste.....	85
10.2. Anhang 2: Prüfrichtlinie für mobile Raumlufreinigungsgeräte.....	87
10.3. Anhang 3: Teilbericht: Optimierung der Strömungssimulationen für OP Räume.....	88
10.4. Anhang 4: Teilbericht: Bearbeitung konkreter Fragestellungen.....	89
10.5. Anhang 5: Teilbericht: CFD Strömungssimulationen OP Lampen.....	90

Horw, 30. Juni 2012

Seite 10/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

1. Einführung

1.1. Ausgangslage

Beim ersten KTI-Projekt „Gebäudetechnik im Gesundheitswesen“ (GiG) konnten die Forschungsergebnisse erhebliche Wissenslücken über Möglichkeiten und Grenzen von Lüftungskonzepten für OP-Räume schliessen. Die daraus abgeleiteten Verbesserungen bei den Konzepten und Komponenten haben den Markt stark beeinflusst. Gleichzeitig hat sich auch gezeigt, dass ein erheblicher, weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht. Im Rahmen des KTI-Projektes „GiG II“ sollen zum einen die bisher gültigen Ergebnisse für OP-Raumneubauten mittels ergänzender Versuche auf allgemeingültige Umsetzbarkeit untersucht werden. Benötigt werden vom Markt speziell verbesserte Grundlagen zur Umsetzung im Bereich der Umbauten und Neu-konfigurationen von OP-Räumen. Zum anderen verlangen die bisherigen historisch-technisch bedingten Entwicklungen im OP-Raum über Instrumente, Geräte, medizintechnische Operationsmethoden und den Veränderungen in der Anästhesie/ Narkose nach einer kompletten interdisziplinären Neukonzeption des OP-Raumes unter den Aspekten Ergonomie, Hygiene, Ökonomie, Ökologie. Die Entwicklung eines integrierten Operationssaales, der primär für die breite Anwendung (universelle Raumnutzung) von endoskopischen/ minimalinvasiven Eingriffen entwickelt wird ist daher ein weiterer wichtiger Projektgegenstand.

Bei Sofortmassnahmen oder Umstellung auf die offene Operation müssen die Raumfunktionen entsprechend angepasst werden können. Weiterhin sind raumfüllende medizintechnische Geräte, Apparate und Leuchten in jeweils zu entwickelnden Konzeptionen strömungstechnisch zu verbessern oder Möglichkeiten zu entwickeln, dass sie unter Beibehaltung ihrer Nutzungsabsicht aus dem direkten OP-Feld eliminiert werden können.

Neben Verbesserungen im Bereich des eigentlichen Operationsraumes sind mobile und dezentrale Lüftungskonzepte für Isolierzimmer (nötig zur Behandlung von Patienten mit SARS, Vogelgrippe, Tuberkulose etc., aber auch für den privaten Gebrauch) zu entwickeln und ein Standardprüfverfahren verbindlich zu definieren.

Zunehmend besteht auch der Bedarf zur temporären und dezentralen Nachrüstung von Kühlmöglichkeiten für Räume mit erhöhten lufthygienischen Anforderungen. Bei den derzeit am Markt angebotenen Geräten bestehen Mängel hinsichtlich ihrer lufthygienischen Eignung. Die Zusammenstellung und Prüfung der erforderlichen technischen Merkmale zur Anwendung in diesen Räumen ist ebenfalls Projektgegenstand.

1.2. Projektziele

Ein Hauptziel der am Projekt beteiligten Industriepartner ist folgerichtig, ihre Produkte weiter zu optimieren oder neu zu gestalten. Damit verbessern sie ihre Wettbewerbstauglichkeit und schaffen Arbeitsplätze im Zuliefersektor des Gesundheitswesens bei gleichzeitiger Kostensenkung.

Schließlich besteht ein wesentlicher Projektgegenstand in der Intensivierung des Wissenstransfers für die unterschiedlichen Berufsgruppen: Architekten und Planer, Komponentenlieferanten und Anlagenerrichter, Mess- und Prüffirmen, Betreiber, Nutzer für Räume des Gesundheitswesens.

Das Gesamtprojekt ist daher in fünf Teilprojekte strukturiert:

Teilprojekt 1: Raumluftechnik und Medizintechnik für OP-Neubau und Sanierung

Horw, 30. Juni 2012

Seite 11/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

- Teilprojekt 2:** Prüfausrüstungen und Betriebsoptimierung bei OP-Abteilungen
- Teilprojekt 3:** Standardprüfverfahren für mobile Raumlufreinigungsgeräte
- Teilprojekt 4:** Einsatz von Raumluftströmungssimulationen (CFD)
- Teilprojekt 5:** Wissenstransfer

Die schon im ersten KTI-Projekt aufgeführten wirtschaftlichen Ziele seitens der Spitäler und Industriepartner sowie die entsprechenden volkswirtschaftlichen Ziele werden auch mit dem hier bearbeiteten Projekt „GIG II“ konsequent weiter verfolgt. Dies kommt auch durch die weitere Zusammenarbeit mit den bisherigen Projektpartnern und durch den Gewinn neuer Partner zum Ausdruck. Während die Projektpartner beim ersten KTI-Projekt überwiegend aus dem Bereich der Gebäudetechnik und der Messtechnik kamen, sind die neuen Projektpartner vermehrt aus dem Bereich der Betreiber und der Medizintechnik.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 12/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

2. Teilprojekt 1: Raumluftechnik und Medizintechnik für OP-Neubau und Sanierung

2.1. Zielsetzung

Während im ersten Teil des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens GiG I die Entwicklung eines verbesserten Lüftungskonzeptes für OP-Räume mit Zuluftdeckenfeldern (TAV-Lüftung) im Vordergrund stand, lag der Schwerpunkt vom Projekt GiG II-Teilprojekt 1 in der genauen Überprüfung der Wirksamkeit des neuen Konzeptes unter praxisrelevanten Bedingungen und ggf. in der weiteren Anpassung des verbesserten TAV-Lüftungskonzeptes. Insbesondere sollten die Auswirkungen von medizintechnischen Einrichtungen und baulichen Varianten von OP-Räumen auf die Schutzwirkung im Schutzbereich festgestellt werden. Auch wenn sich beim TAV-Lüftungskonzept eine Verschlechterung der Schutzwirkung einstellte, sollte ermittelt werden, ob noch bessere Luftqualität im Schutzbereich verbleibt, als bei OP-Mischlüftung oder Schichtlüftung. Zudem war es das Ziel, für das „optimierte TAV-Lüftungskonzept“ die sicher notwendigen gestalterischen und betrieblichen Mindestbedingungen zu ermitteln, um wenige, aber unverzichtbare Anforderungen an medizintechnische Geräte und baulichen Verhältnisse zu stellen, um die Funktionsfähigkeit der Lüftung zu sichern.

2.2. Versuchstechnische Rahmenbedingungen

2.2.1. Labor-OP-Raum mit TAV-Lüftung

Die systematischen Untersuchungen wurden im Versuchs-OP-Raum an der HSLU durchgeführt. Der Raum hat Innenmasse von L x B x H: 7,2 x 6,5 x 3,2 m.

Seine Raumwände und die Deckenhöhe lassen sich durch individuelle Abspannungen verkleinern.

Luftabströmungen (Umluft-, Überströmfassungen) befinden sich an den oberen und unteren Raumwänden und an der Decke. Sie sind versuchsabhängig zu öffnen und zu verschliessen.

Ein TAV-Deckenfeld mit einer waagrecht installierten H13-Filterebene befindet sich in der Deckenmitte als rechteckiger Durchlass mit der maximalen Abmessung 3,2 x 3,2 m² und einem maximalen Zuluftvolumenstrom von ca. 10.500 m³/h. Sein Ausströmprofil konnte durch Austausch des Gewebevlieses verändert werden. Aus dem Forschungsvorhaben GIG I ging als Neuentwicklung der sogenannte „Differentialflow“ mit einem Zweizonen-Ausströmfeld hervor. Es besteht aus einem Kernfeld (2 x 1 m²), in dem die Zuluftgeschwindigkeit etwa doppelt so hoch ist wie im übrigen Randfeld (siehe Abbildung 1). Vergleichsuntersuchungen wurden bedarfsweise mit einem Gleichstromfeld durchgeführt. Hier besteht das Gewebevlies aus einer einheitlichen Bespannung und bewirkt eine überall weitgehend gleiche Ausströmgeschwindigkeit. Dieses Konzept ist noch in der Mehrheit der Bestandsanlagen anzutreffen. Die Einstellbarkeit des Zuluftvolumenstromes erlaubt es, das eine Veränderung der Ausströmprofile nicht zu einer Veränderung des Volumenstromes führte. Der energetische Aufwand für das Lüftungssystem ist dann gleichbleibend.

Das Zuluftdeckenfeld konnte mit verschiedenen langen umlaufenden Schürzen ausgestattet werden.

Die Differenzen von Zuluft- und Abluftvolumenströmen wurde versuchsabhängig variiert.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 13/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

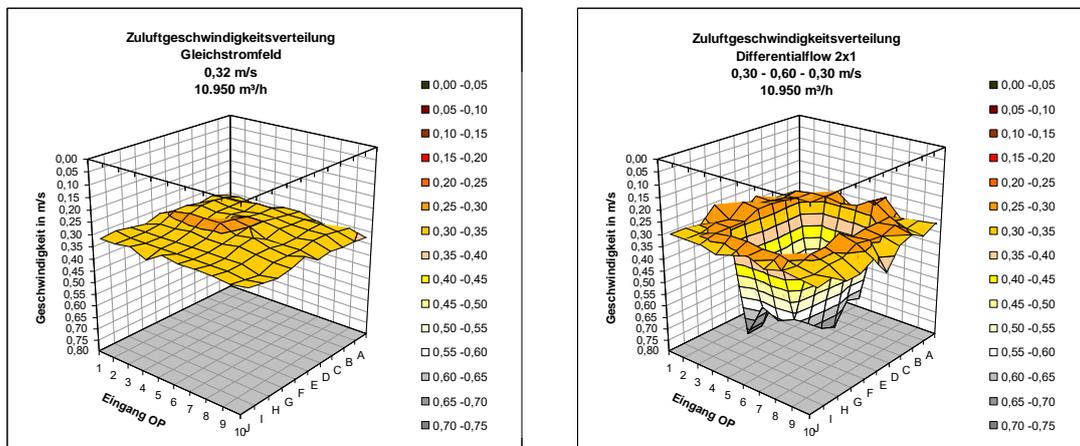
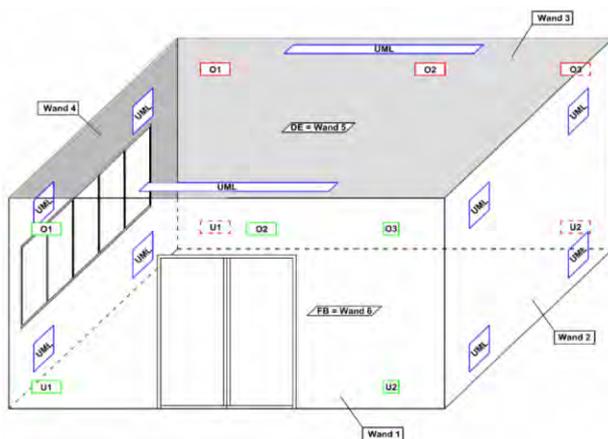


Abbildung 1: Strömungsprofil beim Gleichstromfeld und w'' -Feld (Werte beispielhaft)



OP-Innenmaße (L x B x H): 7,20m x 6,50m x 3,20m
TAV-Gewebeverteiler: 3,20m x 3,20m

Varianten Überström- und Umluftöffnungen:

Wand 1+3: je 3+2 Überströmöffnungen: O 1-3, U1-2

Wand 2+4: je 4+4 Umluftöffnungen: UML

Decke: 2 Umluftöffnungen: UML

Abbildung 2: Versuchs-OP-Raum (HSLU), Aufbau, Hauptabmessungen und Position von Öffnungen

2.2.2. Systemmerkmale vom „optimalen TAV-Lüftungskonzept“ nach „G G I“

Aus den Ergebnissen vom Vorhaben GiG I haben sich für ein strömungstechnisch optimales OP-Raum TAV-Lüftungskonzept folgende 5 Systemmerkmale ergeben:

- TAV-Feld: mind. $3 \times 3 \text{ m}^2$, Austrittsprofil „Differentialflow“, d.h. Kerngebiet (ca. $2 \times 1 \text{ m}^2$) mit ca. doppelt so hoher Austrittsgeschwindigkeit als beim umlaufenden Randgebiet. Austrittsgeschwindigkeit beim Kernfeld mind. 0.35 m/s.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 14/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

- Umlaufende Strömungsschürze mit einer Länge von ca. 1 m ab Deckenunterkante.
- Abströmöffnungen für den Aussenluftanteil am Zuluftstrom: gleichmässig in Deckennähe.
- Abströmöffnungen für Umluftstrom: gleichmässig in Fussbodennähe.
- 2 OP-Leuchten in strömungsgünstiger Bauform (luftdurchlässig gestaltet).

Die Abluftöffnungen lagen im oberen Raumteil an zwei sich gegenüberliegenden Wänden. 4 Umluft-Fassungen waren in den unteren Raumecken angeordnet.

Obwohl die OP-Leuchten streng genommen nicht zum Lüftungskonzept gehören, ist die Kenntnis von ihren aerodynamischen Eigenschaften im Zuluftstrom von grosser Bedeutung auf die erreichbaren Schutzgraden. Beim optimalen TAV-Lüftungskonzept kamen OP-Leuchten zur Anwendung, die besonders strömungsgünstig geformt sind [Admeco, 2012]. Sie stellen eine wesentliche Voraussetzung zum Erreichen von guten Schutzgraden dar, wie sich eindeutig aus den Untersuchungen beim Vorhaben GiG I und bei anderen Forschungen zeigte.

Bei den GiG II-Versuchen mit TAV-Lüftung wurde zunächst das hier beschriebene Konzept verwendet und im Text kurz als „optimales TAV-Lüftungskonzept“ bezeichnet. Davon abweichende Varianten werden benannt.

2.2.3. Labor-OP-Raum mit Mischlüftung oder Schichtlüftung

Durch Umbau der OP-Raum-Decke konnte das TAV-Feld verschlossen und 6 gleich grosse deckenbündig eingebaute Drallauslässe mit endständigen H13 Filtern in Betrieb genommen werden. Sie waren auf einen Zuluftstrom bis 3600 m³/h ausgelegt. Die Abströmöffnungen befanden sich an den Wänden 1 und 3 im oberen Bereich (Abbildung 3).

Zur Gestaltung einer Schichtlüftung im OP-Raum wurden 4 ca. 1.0 m hohe Zuluftdurchlässe mit endständigen H13 Filtern in den 4 Raumecken angeordnet und die Abluft über die Deckendurchlässe geführt. Dieses System wurde mit einem Gesamtvolumenstrom bis 2900 m³/h betrieben.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 15/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

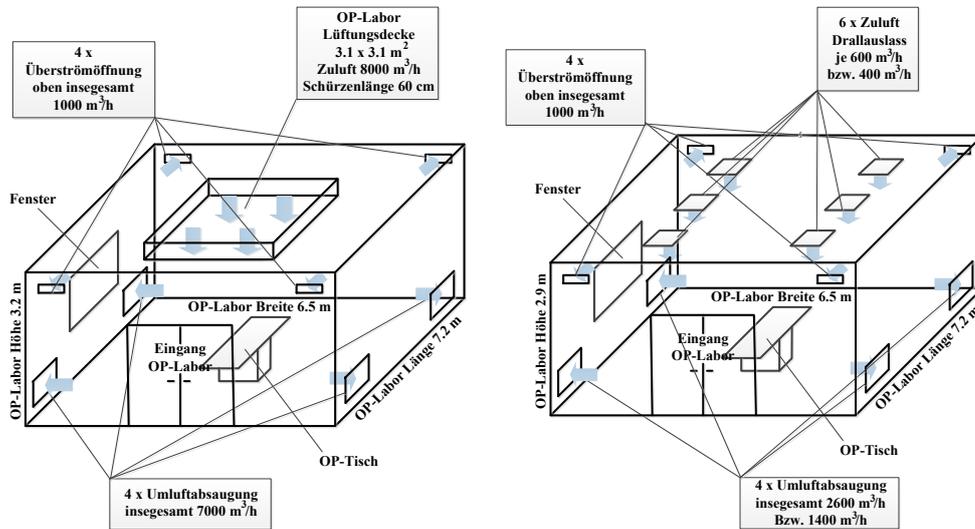


Abbildung 3: Versuchs-OP-Raum (HSLU), Anordnung der Luftdurchlässe bei Verdrängungslüftung (links) und Mischlüftung (rechts) (Volumenströme beispielhaft)

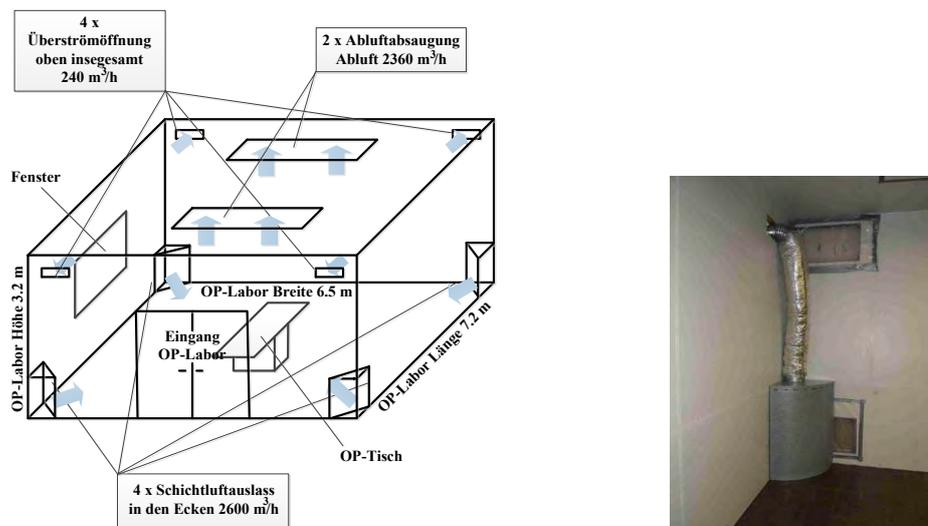


Abbildung 4: Versuchs-OP-Raum (HSLU), Anordnung der Luftdurchlässe bei SchichtQuelleHüftung, Quelleluft-Eckauslass (Volumenströme beispielhaft)

2.2.4. Musterlasten

Als Musterlasten im Schutzbereich kamen grundsätzlich der OP-Tisch, 4 Dummies als OP-Team, je ein Dummy als Anästhesieperson und –gerät, sowie zwei OP-Leuchten in der Ausrichtung zur Anwendung, wie sie in den Regelwerken SWKI 99-3 [SWKI 99-3, 2003] und DIN 1946-4 [DIN 1946-4, 2008] beschrieben sind. Davon abweichende Anordnungen sind bei den jeweiligen Versuchen beschrieben. Diese Lasten und ihre Anordnung im Schutzbereich haben sich als grösste Lüftungstechnische Herausforderung herausgestellt (GiG I- Ergebnis).

Horw, 30. Juni 2012

Seite 16/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

2.2.5. Schutzgradmesstechnik

Die Bestimmung der Schutzgrade im Schutzbereich erfolgte mit der Partikelauflagetechnik, die ebenfalls im GiG-I Projekt detailliert beschrieben ist. Das Verfahren hat zudem in die Richtlinien SWKI 99-3 und DIN 1946-4 normativ Eingang gefunden.

Vor Beginn der Schutzgradmessungen wurden die Filter auf Dichtsitz und ihre Leckfreiheit festgestellt. Es zeigte sich, dass keine Partikel $\geq 0,3 \mu\text{m}$ durch die Filter durchtraten.

Bei der Bestimmung der Partikelkonzentration wurden daher Partikel $\geq 0,3 \mu\text{m}$ berücksichtigt. Als Aerosol kam Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat der Firma Topas zum Einsatz. Der Partikeleintrag wurde an jedem Messpunkt mindestens 15-mal mit je einer Minute Messdauer ermittelt. Die ersten fünf Messungen wurden i.d.R. verworfen. Alle Messwerte wurden auf eine geringe Schwankungsbreite überprüft und zur Mittelwertbildung und Schutzgradbestimmung verwendet. Der schlechteste (zahlenmässig kleinste) Schutzgrad kennzeichnet die erreichte Schutzwirkung.

2.3. Untersuchung 1, TAV-Lüftung: Einfluss der Schürzenlänge

2.3.1. Zusammenfassung

Strömungstechnisch sind längere Schürzen am TAV-Feld von Vorteil, weil sie ein frühzeitiges Aufweiten und damit Abschwächen der Verdrängungsströmung verhindern können. Häufig sollen jedoch Deckenversorgungseinheiten zur Anwendung kommen, deren Arme aus statischen Gründen schon dicht unterhalb der Decke beginnen müssen und daher kurze Strömungsschürzen erfordern. Das oben beschriebene „optimierte TAV-Lüftungskonzept“ wurde daher mit verschiedenen langen Strömungsschürzen untersucht, um festzustellen, welche Auswirkung sie auf die Schutzgrade im Schutzbereich haben. Es zeigte sich, dass sich nur bei 20 cm langen Strömungsschürzen die Randzonen im Schutzbereich verschlechtern, sie aber noch über dem in DIN 1946-4 geforderten Wert von $\text{SG} > 2$ verbleiben.

2.3.2. Untersuchungskonzept

Das „optimierte TAV-Lüftungskonzept“ wurde nacheinander mit einer 1.0 m langen bzw. 0.2 m langen umlaufenden Strömungsschürze ausgestattet und die Schutzgrade bei Musterlastanordnung auf dem OP-Tisch bestimmt. Die Versuche erfolgten bei ca. $9200 \text{ m}^3/\text{h}$ Zuluftstrom.

2.3.3. Versuchsumfang

Es wurden drei Versuchsreihen gefahren, jeweils mit Schutzgradmessungen nach den Angaben gemäss DIN 1946-4/ SWKI 99-3. Dabei waren die 6 Partikel-Ausströmer abwechselnd am Rand des Schutzbereiches („externe Musterlastanordnung“) bzw. die mittleren beiden zwischen den beiden OP-Team-Dummies angeordnet („interne Musterlastanordnung“). Die Versuchsreihe 3 (siehe nachfolgendes Diagramm) erfolgte mit einer 1.0 m langen Strömungsschürze. Bei der Versuchsreihe 1 wurde die kurze Schürze untersucht und die Musterlast auch um 180° gedreht und mit Variation der OP-Leuchten Positionen. Bei der Versuchsreihe 2 wurden die beiden mittleren Ausströmer in 1.7 m Höhe verschoben, um ein möglichen Lufteintrag schon in dieser Höhe in den Schutzbereich zu markieren, siehe Abbildung 5.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 17/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II



Abbildung 5: Versuche mit TAV-Lüftung, Variation der Schürzenlänge, Partikel-Ausströmer gemäss DIN 1946-4/ SWKI 99-3 auf dem Fussboden, b d „I d “, b w. b k S chü zen auch in 1.7 m Höhe.

2.3.4. Ergebnisse

Eine Übersicht der wesentlichen Ergebnisse ist in Abbildung 6 dargestellt. Sie lassen erkennen, dass die Schutzgrade bei langen Strömungsschürzen optimal sind. Bei kurzen Schürzen reduzieren sich die Werte an der Randzone des OP-Tisches, verbleiben aber noch auf einem hohen Niveau von $SG > 3$. Bei Anhebung der mittleren Ausströmer innerhalb des Schutzbereiches auf 1.7 m Höhe (Atembereich vom OP-Team) reduzieren sich die Schutzgradwerte nur geringfügig gegenüber einer Partikel ausströmung vom Fussboden her. Daraus ist zu schliessen, dass die Anordnung der Ausströmer auf dem Fussboden repräsentativ ist, um die relevanten Verbindungen von Raumluft aus dem umhintergrund in den Schutzbereich „zu markieren“ (Deckungsgleich mit einer diesbezüglichen Versuchsreihe im Vorhaben GiG I).

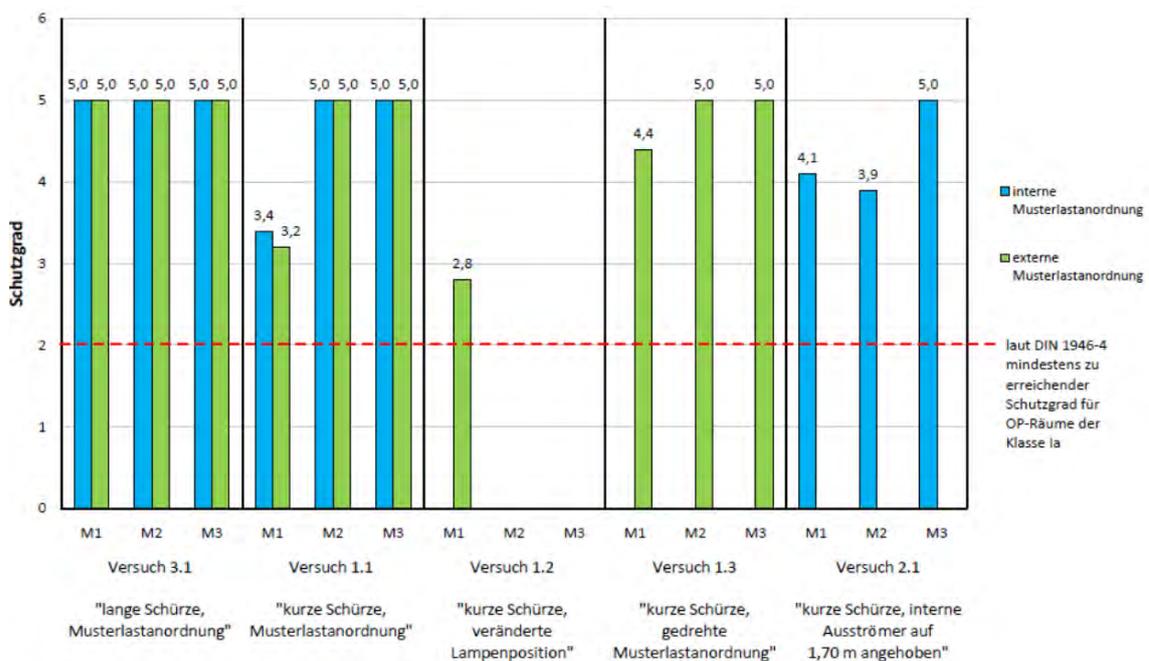


Abbildung 6: Schutzgrade bei TAV Lüftung mit 1.0 m bzw. 0.2 m langen Strömungsschürzen

Horw, 30. Juni 2012

Seite 18/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

2.3.5. Schlussfolgerungen

Das „optimierte TAV-Lüftungskonzept“ kann auch mit kurzen Strömungsschürzen betrieben werden, solange keine weiteren Massnahmen dazu kommen, die eine Instabilität oder Verhinderung der abwärts gerichteten Verdrängungsströmung verursachen. Hierzu zählen insbesondere strömungsgünstig geformte OP-Leuchten. Der Einfluss von weiteren Massnahmen bei kurzen Schürzen ist Gegenstand von weiteren Untersuchungen.

2.4. Untersuchung 2, TAV-Lüftung: Einfluss Zulufttemperaturniveau und -änderung

2.4.1. Zusammenfassung

Immer wieder besteht beim OP-Betrieb der Wunsch, die Raumtemperatur während der OP anzuheben. Bisher konnte diesem Wunsch aus strömungstechnischer Sicht nicht entsprochen werden, weil geheizte Zuluft die abwärts gerichtete Verdrängungswirkung verhindern kann. Beim entwickelten Differentialflow-Profil beträgt die Strömungsgeschwindigkeit des Kernfeldes jedoch mindestens 0.35 m/s, ist also erheblich höher und damit kräftiger als bei Gleichstromprofilen mit gleichem Zuluftvolumenstrom. Folglich wurden experimentelle Versuche durchgeführt, bei der während einer Schutzgradmessung die Zulufttemperatur in periodischen Abständen angehoben und wieder abgesenkt wurde. Es zeigte sich, dass bei dem „optimierten TAV-Strömungskonzept“ weder bei langen Strömungsschürzen (1.0 m ab Decke) noch bei kurzen Schürzen (0.2 m von Decke) die guten Schutzgrade nachhaltig beeinflusst wurden. Insgesamt dauert ein Raumaufheizvorgang um 1 K bei TAV-Lüftung wegen der hohen Zuluftvolumenströme (hier untersucht: ca. 9000 m³/h) nur wenige Minuten, ehe die Ablufttemperatur wieder gleiche und dann lastbedingt wieder höhere Temperaturen hat als die zuvor angehobene Zulufttemperatur.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Labor-OP mit langen Strömungsschürzen bei Zulufttemperaturen von 29 bzw. 18 °C betrieben. Dabei war die Hallentemperatur, in der der OP steht, unverändert bei ca. 22°C. Auf die gemessenen Schutzgrade bei Musterlastanordnung und geschlossener OP-Tür hatten beide Temperaturniveaus keinen Einfluss.

2.4.2. Untersuchungskonzept

Im Labor-OP-Raum erfolgten kontinuierliche Schutzgradmessungen mit dem „optimierten TAV-Strömungskonzept“ und Musterlasten nach DIN/SWKI. Die Untersuchungen bei verändertem OP-Raumtemperaturniveaus wurden ohne Türöffnung während der Messungen, also als statische Betrachtung durchgeführt. Sicher ist von Störungen durch Türöffnung auszugehen. Diese Untersuchungen wurden aber separat durchgeführt.

Bei der Feststellung des Einflusses von Raumaufheizung oder Kühlung während der Schutzgradmessung wurde die Zulufttemperatur 2-mal um je 1 K angehoben und wieder abgesenkt.

2.4.3. Versuchsumfang

Die Versuchsreihen zum Temperatureinfluss vom „optimierten TAV-Lüftungskonzept“ wurden bei Zuluftströmen von ca. 9.500 m³/h durchgeführt. Die statische Betrachtung der Auswirkung von hoch- bzw. niedertemperaturierten OP-Räumen (29° bzw. 18°C) erfolgte mit 1.0 m langen Strömungsschürzen um das TAV-Feld.

Die dynamischen Aufheiz- und Abkühlversuche wurden mit langen (1.0 m) und kurzen (0.2 m) Schürzen durchgeführt. Während der Schutzgradmessungen an allen drei Stellen auf dem OP-Tisch erfolgte die Temperaturänderung in je 2-mal 1 K Stufen. Sie vollzogen sich je Versuchsreihe (lange/kurze Schürze) in Schritten von 5 bzw. 10 Minuten.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 19/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

2.4.4. Ergebnisse

Bei der statischen Betrachtung des Einflusses von hoch- bzw. niedrig temperierten OP-Räumen zeigten sich praktisch keine Veränderungen bei den guten Schutzgraden, die mit dem optimierten TAV-Lüftungskonzept erreichbar sind, siehe Abbildung 7.

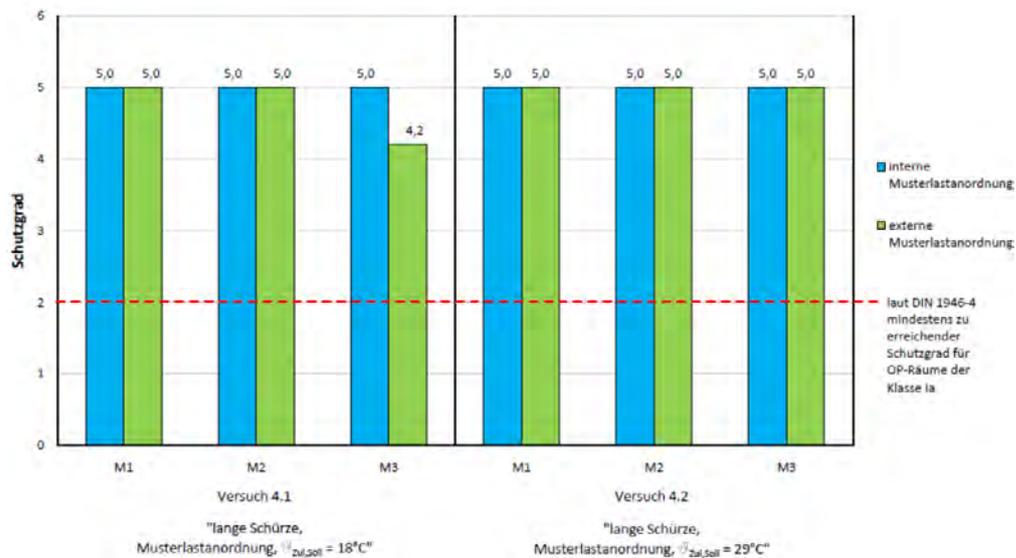


Abbildung 7: Schutzgrade bei niedriger bzw. hochtemperierten OP-Räumen mit TAV Lüftung (Schürzenlänge 1.0 m)

Versuche mit langer Strömungsschürze (1.0 m von der Decke): Bei den dynamischen Versuchen mit Veränderung der Zulufttemperatur während der Schutzgradmessungen zeigte praktisch keine der drei Messpunkte auf dem OP-Tisch eine Veränderung. Sie bleiben während der Versuchsdauer von mehr als 4 Stunden äusserst stabil auf hohem Niveau. Die Verläufe sind aus Abbildung 8 zu erkennen.

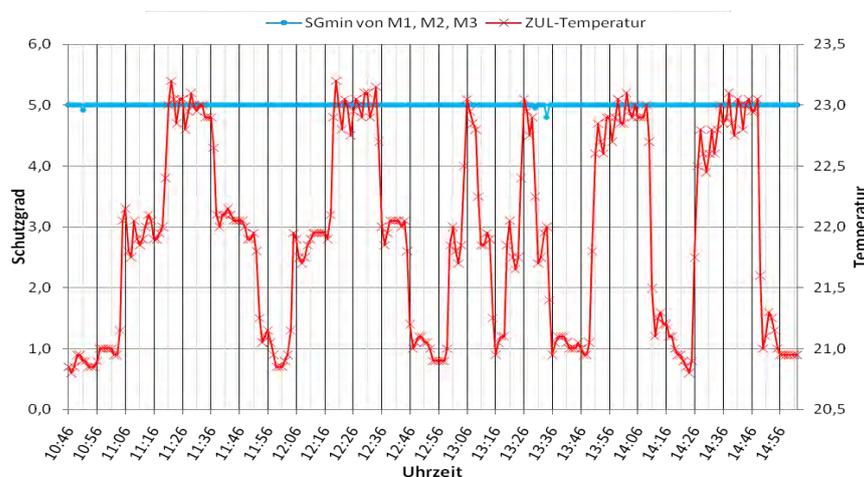


Abbildung 8: Schutzgrade auf dem OP-Tisch bei periodischer Änderung der Zulufttemperatur (10 min Schritte), Versuche mit langer Strömungsschürze (1.0 m von der Decke) und „optimiertem TAV-S

Horw, 30. Juni 2012

Seite 20/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Auch bei der Versuchsreihe mit kurzen Strömungsschürzen (0.2 m Länge) verändern sich die Schutzgrade auf dem OP-Tisch nur kurzzeitig (siehe Abbildung 9). Sie erreichen dabei kein lufthygienisch geringes Niveau.

Während der Langzeitmessung von 3 Stunden musste der OP betreten werden. Dabei erzeugte die Störf Wirkung von im Raumhintergrund laufenden Personen die grösste Reduktion der Schutzgrade im Schutzbereich. Aber auch hierbei verbleiben die Schutzgrade auf einem Niveau von über 2, siehe Abbildung 9.

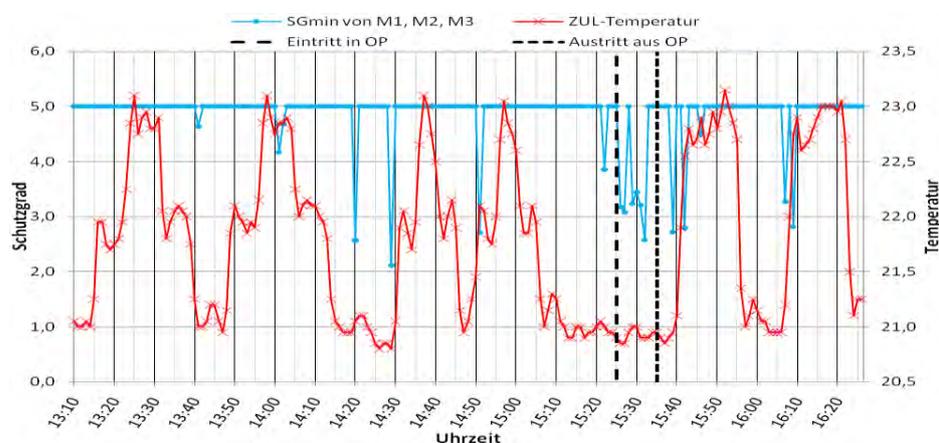


Abbildung 9: Schutzgrade auf dem OP-Tisch bei periodischer Änderung der Zulufttemperatur (10 min Schritte)
Versuche mit kurzer Strömungsschürze (0.2 m von der Decke) und optimiertem TAV-Lüftungskonzept

2.5. Untersuchung 3, TAV-Lüftung: Einfluss von Raumgeometrie und Überströmverhältnissen

2.5.1. Zusammenfassung

Bei der Sanierung von OP-Räumen sind häufig kleinere Raumgrössen und ungünstigere Lagen der Abströmöffnungen anzutreffen. Zur Ermittlung dieser Einflüsse auf die Schutzwirkung von TAV-Lüftungskonzepten wurde der Labor-OP-Raum auf die Abmessungen L x B x H: 7.1 x 6.0 x 2.9 m verkleinert und zusätzlich die Abströmung des Zuluftüberschusses auf eine Raumseite über der OP-Eingangstür reduziert und höher als üblich eingestellt (3500 statt 1200 m³/h). Ansonsten waren die Merkmale des untersuchten TAV-Lüftungskonzeptes gleich wie beim „optimalen TAV-Lüftungskonzept. Die Länge der umlaufenden Strömungsschürze betrug 0.2 m. Es kamen strömungsoptimierte OP-Leuchten zum Einsatz.

Aus den Versuchen hat sich ergeben, dass an allen drei Messpunkten auf dem OP-Tisch bei der in der DIN 1946-4 beschriebenen Musterlastanordnung Schutzgrade von 4.6 – 5.0 erreicht wurden. Die Schutzwirkung des untersuchten OP-Raumes betrug demnach 4.6 (niedrigster Wert der ermittelten lokalen Schutzgrade). Der in der DIN 1946-4 angegebene Zielwert für OP-Räume der Raumklasse Ia, Schutzwirkung ≥ 2 , ist demnach mit einem Differentialflow-TAV-Konzept auch bei verkleinerten Raumgrössen und einseitiger Überströmung zu erreichen.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 21/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

2.5.2. Untersuchungskonzept

Die Raumverkleinerung wurde symmetrisch um das TAV-Feld vorgenommen und die Raumdecke mit Hilfe einer Zwischendecke auf 2.9 m über Fussboden abgehängt. Die Umluftöffnungen im OP-Raum befanden sich weiterhin an allen 4 Raumecken im unteren Bereich. Der Aussenluftstrom im Zuluftstrom verliess der OP-Raum über zwei in Deckennähe angeordnete Überströmöffnungen an der Raumeingangsseite (meistens Raumseite zum Patientenflur). Der Zuluftstrom betrug $9500 \text{ m}^3/\text{h}$, der Umluftvolumenstrom $6000 \text{ m}^3/\text{h}$ und der überströmende Aussenluftstrom folglich $3500 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Länge der umlaufenden Strömungsschürze betrug 0.2 m von der Unterkante der Decke. Die Messungen wurden mit einer OP-Leuchten-Kombination vom Typ ADMECO Lux LED 3SL und 5 SL durchgeführt. Der Versuchsraum ist in Abbildung 10 skizziert.

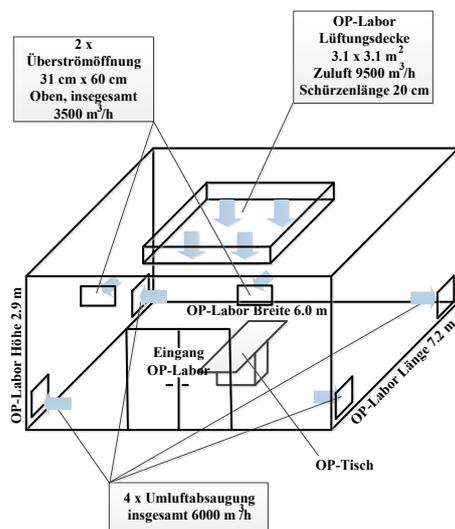


Abbildung 10: OP-Versuchsraum mit reduzierter Raumgrösse und einseitig angeordneten Überströmöffnungen

2.5.3. Versuchsumfang

Als Raumlasten wurde die Musterlast nach SWKI 99-3/DIN 1946/4 verwendet und die in diesen Regelwerken angegebenen Schutzgradmessungen durchgeführt, wobei sich in den Vorversuchen zeigte, dass sich ein reduzierender Effekt auf die Schutzgrade nur bei der Simulation von „Innenlast“ ergab und die Versuchsreihen in der Folge meistens auf diese Untersuchungen beschränkt wurden.

2.5.4. Ergebnisse

In der Versuchsmatrix Tabelle 1 sind die Messergebnisse dargestellt.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 22/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Tabelle 1: Versuchsmatrix: „ k OP, Ab “ mit Darstellung der Ergebnisse

Versuchsreihe 1: DIN Empfehlung, 2: Einfluss einseitige Abströmung Zuluftdecke: Differentialflowfeld 2x1 m ² , 4 x Umluft unten, Zuluftvolumenstrom 9.500 m ³ /h, Zulufttemperatur 20°C Thermische Raumlasten und Lastenanordnung bei allen Versuchen nach DIN 1946-4 (OP-Personal-Dummies, Anästhesiegerätewagen-Dummy, Raumhintergrundbeleuchtung)																			
Versuch-Nr.	OP-Leuchtenart	OP-Leuchten Anordnung	Anordnung thermische Lasten	Zuluftvolumenstrom [m ³ /h]	Umluftvolumenstrom [m ³ /h]	Volumenstrom Überströmung [m ³ /h]	Überströmöffnungen	Überströmöffnung L x B [cm]	überströmung Wand Nr.	Differenzdruck OP-Raum zum HLK Labor [Pa]	Schürzenlänge von UK Decke [cm]	Schutzgrad bei Aussenlasteintrag			Schutzgrad bei Innenlasteintrag			Instrumententisch M4	Schutzwirkung
												M1	M2	M3	M1	M2	M3		
1.1	opt	DIN	DIN	9'500	8'300	1'200	4x oben	20/20	1+3	3	20	-	-	-	5.0	5.0	5.0	-	5.0
1.2	opt	DIN	DIN	9'500	8'300	1'200	2x oben	20/20	1	8	20	-	-	-	5.0	5.0	5.0	-	5.0
2.1	opt	DIN	DIN	9'500	6'000	3'500	2x oben	60/31	1	7	20	5.0	5.0	5.0	4.6	5.0	5.0	-	4.6

Bei den Vorversuchen 1.1 und 1.2 wurde zunächst geprüft, ob allein die verminderte Raumgrösse einen Einfluss auf die Schutzgrade hat, die aus den bisherigen Forschungen bekannt sind. Hier betrug der Überströmungsvolumenstrom 1200 m³/h. Die Überströmorte befanden sich beim Versuch 1.1 noch symmetrisch auf zwei gegenüberliegenden Raumseiten und beim Versuch 1.2 nur an einer Wand. Da bei beiden Versuchen die Schutzgrade allesamt Werte von SG = 5 erreichten und damit die gleichen waren wie beim unveränderten OP-Laborraum ist der Beweis erbracht, dass die Reduktion der Raumhöhe von bisher 3.2 m auf 2.9 m, die Grundflächenverringerung um ca. 3.6 m² und die Veränderung der Überströmorte bei dem nach DIN empfohlenen Volumenstrom keine negativen Auswirkungen auf die TAV-Strömung haben.

Der Versuch 2.1 bestand dann aus einseitiger Abströmung des Aussenluftanteils mit einem Volumenstrom von 3500 m³/h. Die Messergebnisse zeigten nur am Messpunkt M1 mit SG = 4.6 geringfügig niedriger Ergebnisse als zuvor.

2.5.5. Schlussfolgerungen

Selbst verkleinerte OP-Räume und einseitige Überströmungen führen nicht zu wesentlich niedrigen Schutzgraden im Schutzbereich unter der TAV-Decke mit Differentialflow und gleichmässig unten angeordneten Umluftöffnungen. Es kann davon ausgegangen werden, dass eine Schutzwirkung gemäss DIN 1946-4 von mindestens 2 noch erreichbar ist und die lufthygienischen Erfordernisse seitens der DIN erfüllt werden. Auch dieses Ergebnis ist mit strömungsoptimierten OP-Leuchten erreicht worden.

2.6. Untersuchung 4, TAV-Lüftung: Einfluss OP-Leuchten-Form, -Position und Musterlasten

2.6.1. Zusammenfassung

Nachdem das TAV-Konzept selbst in verkleinerten OP-Räumen bei Musterlasten nach SWKI/DIN betriebsstabil funktionierte wurden die Untersuchungen im verkleinerten Raum um realitätsnahe Musterlasten und um verschiedene OP-Leuchtenformen und Positionen erweitert.

Es zeigte sich, dass eine signifikante Verschlechterung der Schutzgrade nur durch strömungsunünstige OP-Leuchten erreicht werden kann, nicht aber durch die Variation von

Horw, 30. Juni 2012

Seite 23/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Musterlasten und Positionen von strömungsgünstig geformten OP-Leuchten. Bei strömungsungünstig geformten OP-Leuchten ist sogar eine Luftqualität auf dem OP-Tisch möglich, die noch schlechter ist als Mischluftqualität (negativer Schutzgrade). Bei derartigen Leuchten wirken sich die grossen Nachlaufgebiete hinter den Leuchten entsprechend aus.

2.6.2. Untersuchungskonzept

Ausgehend vom verkleinerten OP-Raum und einer einseitigen Überströmung (1.200 bzw. 3.500 m³/h) wurden nacheinander die Formen der OP-Leuchten und ihre Positionen über dem OP-Tisch verändert. Weiterhin wurde die Musterlastanordnung nach DIN/SWKI und eine praxisnahe Anordnung untersucht. Als Ergebnisse dienten die ermittelten Schutzgrade an den lufthygienisch relevanten Punkten auf dem OP-Tisch (mindestens Tischmitte) und auf dem Äusseren der beiden am Fussende vom OP-Tisch aufgestellten Instrumententische.

2.6.3. Versuchsumfang

Variation OP-Leuchten-Form und Position

In Versuchsreihe 2 (Tabelle 2) entsprachen die Musterlasten den Angaben nach SWKI99-3/ DIN 1946-4. Bei den Versuchen 2.3 bis 2.5 wurden die OP-Leuchten abweichend zur SWKI/DIN nahe über M2 (OP-Tischmitte) positioniert. Messpunkt M2 steht für den Wundbereich. Um zudem den strömungstechnischen Einfluss anderer OP-Leuchten Formen zu untersuchen wurden die verwendeten (strömungsgünstigen) Admeco OP-Leuchten mit verschiedenen grossen, runden Platten abgedeckt. Dies sollte typischen satellitenförmigen OP-Leuchten nahe kommen. Die runden Abdeckungen hatten einen Durchmesser von 73 cm (Versuch Nr. 2.4 „gross“) bzw. 39 cm (Versuch Nr. 2.5 „klein“). Verschiedene Positionen zur Ausleuchtung des Messpunktes M2 wurden untersucht (Tabelle 2).

Simulation von praxisnaher Lastanordnung

Die Messungen der Versuchsreihen 3 und 4 wurden mit einer praxisnahen Lastenanordnung durchgeführt (Abbildung 11 und Abbildung 12): Der OP-Tisch wurde dazu an den Rand des Schutzfeldes verschoben und der Kopfbereich mit einem Anästhesietuch vom Schutzbereich abgetrennt. Das Anästhesietuch begann 63 cm in Verlängerung der OP-Schürze-Unterkante. Die OP-Personal Dummies wurden mit der neuen Tischanordnung verschoben. Weiterhin erfolgte das Hinzufügen von zwei Instrumententischen und einem Patienten-Dummy (100 W) auf dem OP-Tisch. Die Partikel erfassungsöffnung M2 beim Patientendummy war eben zur Patientendummy-Oberfläche eingelassen (siehe Abbildung 12). Im Raumhintergrund wurde eine zusätzliche Wärmelast von 2 kW installiert. Die OP-Leuchten waren bei Versuchsreihe 3 entsprechend Musterlastanordnung positioniert.

Bei Versuchsreihe 4 wurde der Aufbau zusätzlich um einen mobilen C-Bogen ergänzt. Der C-Bogen war direkt über Messpunkt M2 positioniert. Dies ist sowohl eine praxisnahe als auch eine strömungstechnisch ungünstige Positionierung. Der C-Bogen hatte eine rechteckige Kopfabdeckung, um strömungstechnisch ungünstigere Bauformen von C-Bögen nachzuempfinden (Abbildung 12).

Horw, 30. Juni 2012

Seite 24/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

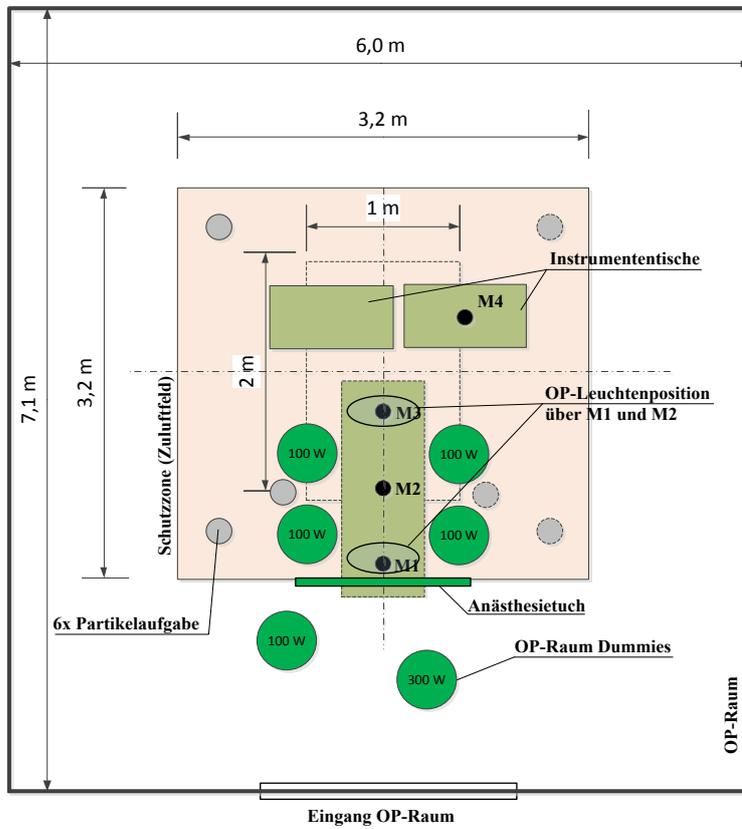


Abbildung 11: Schnittplan des OP-Raums



Abbildung 12: C-Bogen-Röntgenanlage (links), rechteckiges C-Bogen-Kopfteil (rechts)

Horw, 30. Juni 2012

Seite 25/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Tabelle 2: Versuche mit Variation von Überströmung, OP-Leuchtenformen, -positionen, Musterlasten im Schutzbereich

Versuchsreihe 1: "DIN Empfehlung", 2: "Einfluss OP-Leuchtenform", 3: "Einfluss Türöffnung", 4: "Einfluss C-Bogen" Zuluftdecke 3.2 x 3.2 m ² : Differentialflowfeld 2 x 1 m ² , 4 x Umluft unten, Zuluftvolumenstrom 9.500 m ³ /h, Zulufttemperatur 20°C Thermische Raumlaster bei allen Versuchen mindestens nach DIN 1946-4 (OP-Personal-Dummies, Anästhesiegerätewagen-Dummy, Raumhintergrundbeleuchtung)																					
Versuch-Nr.	OP-Leuchtenart	OP-Leuchten Anordnung	Anordnung thermische Lasten	C-Bogen	Zuluftvolumenstrom [m ³ /h]	Umluftvolumenstrom [m ³ /h]	Volumenstrom Überströmung [m ³ /h]	Überströmöffnungen	Überströmöffnung L x B [cm]	überströmung Wand Nr.	Differenzdruck OP-Raum zum HLK Labor [Pa]	Schürzenlänge von UK Decke [cm]	Schutzgrad bei Aussenlasteintrag			Schutzgrad bei Innenlasteintrag			Instrumententisch M4	Schutzwirkung	
													M1	M2	M3	M1	M2	M3			
1.1	opt	DIN	DIN	-	9'500	8'300	1'200	4x oben	20/20	1+3	3	20	-	-	-	5.0	5.0	5.0	-	5.0	
1.2	opt	DIN	DIN	-	9'500	8'300	1'200	2x oben	20/20	1	8	20	-	-	-	5.0	5.0	5.0	-	5.0	
2.1	opt	DIN	DIN	-	9'500	6'000	3'500	2x oben	60/31	1	7	20	5.0	5.0	5.0	4.6	5.0	5.0	-	4.6	
2.2	gross	DIN	DIN	-	9'500	6'000	3'500	2x oben	60/31	1	6	20	3.4	3.5	5.0	2.1	1.5	5.0	-	1.5	
2.3	opt	über M2	DIN	-	9'500	6'000	3'500	2x oben	60/31	1	6	20	-	-	-	5.0	5.0	4.7	-	4.7	
2.4	gross	über M2	DIN	-	9'500	6'000	3'500	2x oben	60/31	1	6	20	-	-	-	-0.1	-0.2	-0.2	-	-0.2	
2.5	klein	über M2	DIN	-	9'500	6'000	3'500	2x oben	60/31	1	6	20	-	-	-	3.1	3.2	1.8	-	1.8	
2.6	gross	über M2	DIN	-	9'500	6'000	3'500	2x oben	60/31	1	6	20	Erholzeit: 3 min								
3.1	opt	DIN	praxis	-	9'500	6'000	3'500	2x oben	60/31	1	6	20	-	-	-	-	5.0	-	2.6	-	
3.2	opt	DIN	praxis	-	9'500	6'000	3'500	2x oben	22/30	1	30	20	-	-	-	-	5.0	-	2.6	-	
4.1	opt	M1/ M3	praxis	X	9'500	6'000	3'500	2x oben	60/31	1	6	20	-	-	-	-	3.2	-	-	-	
5.1	gross	über M2	praxis	-	9'500	6'000	3'500	2x oben	22/30	1	30	20	Erholzeit: 2 min								

Wand Nr. 1: Wand Eingang OP-Raum
 Wand Nr. 3: Wand gegenüber Eingang OP-Raum
OP-Leuchtenart
 opt: offene OP-Leuchte: 3 bzw. 5 Einzelleuchten
 gross: geschlossene OP-Leuchte, rund d = 73 cm
 klein: geschlossene OP-Leuchte, rund d = 39 cm
OP-Leuchten Anordnung:
 DIN: Die OP-Leuchte sind nach DIN 1946-4 positioniert.
 M2: Beide OP-Leuchten sind nebeneinander über Messpunkt M2 positioniert.
 M1/ M3: Eine OP-Leuchte ist über Messpunkt M1 positioniert, die andere OP-Leuchte ist über Messpunkt M3 positioniert.
Anordnung thermische Lasten:
 DIN: Musterlastenanordnung nach DIN 1946-4
 praxis: Praxisnaher Aufbau, OP-Tisch mit OP-Team Dummies an den Rand der Schutzzone verschoben, Anästhesie ausserhalb vom Schutzbereich, Zusätzlich Patientend-Dummy auf dem OP-Tisch, Anästhesietisch, 2 x Instrumententisch, zusätzliche Wärmelast im Raumhintergrund: 2 kW

2.6.4. Ergebnisse

In Versuchsreihe 2 (V2.1-V2.5) ist der Einfluss der OP-Leuchten Form und Position erkennbar (Abbildung 13). Selbst beim Versuch mit strömungsgünstigen OP-Leuchten über Messpunkt M2 positioniert (V2.3) verbleiben die Schutzgrade bei 4.7-5.0. Das ist praktisch unverändert gegenüber der Musterlastanordnung nach DIN 1946-4 bei der die Leuchten über den OP-Team-Dummies statt über der Wunde angeordnet sind.

Durch das Abdecken beider OP-Leuchten mit einer Platte vom Durchmesser d = 39 cm und weiterhin Position über der Tischmitte (über M2) reduzieren sich die Schutzgrade auf 1.8 - 3.2 (V2.5) und bei einem Plattendurchmesser von d = 73 cm und Position über M2 ergaben sich Schutzgrade von -0.1 bis -0.2 (Versuch 2.4), also schlechter als Mischluftqualität (SG = 0 bei 10.000 m³/h Zuluftstrom).

Horw, 30. Juni 2012

Seite 26/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

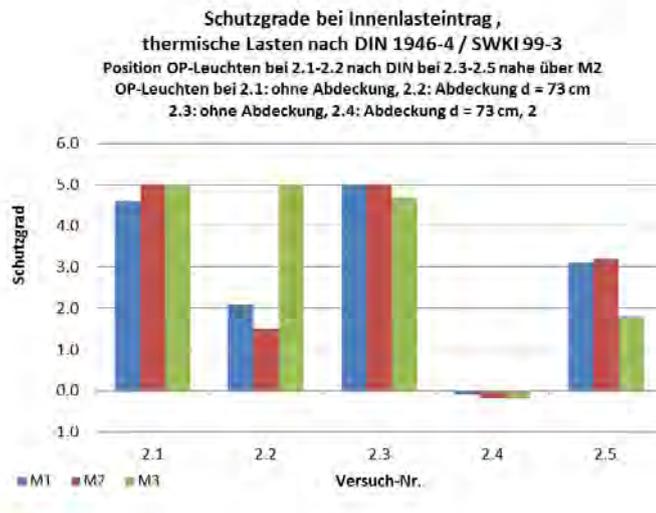


Abbildung 13: Schutzgrade bei Innenlasteintrag, Variation OP-Leuchtenform und -position, Versuchsmerkmale siehe Tab. 2.

Aus dem Vergleich der Schutzgradergebnisse für die Versuchsreihen 3 und 4 mit denen der Reihe 2 ist erkennbar, dass kein signifikanter Einfluss bei Veränderung der Musterlaständerung in Richtung mehr Praxisnähe entsteht, solange strömungsgünstig geformte OP-Leuchten verwendet werden.

2.6.5. Schlussfolgerungen

Die Versuche haben gezeigt, dass sich auch in kleinen OP-Räumen mit strömungsgünstig geformten OP-Leuchten ausreichend gute Schutzwirkungen (DIN 1946-4 Raumklasse 1a: SW >2) erreichen lassen. Praxisübliche Musterlastanordnungen führen gegenüber der Musterlastanordnung nach DIN/SWKI nur zu unwesentlich veränderten Schutzgraden.

Es zeigte sich, dass im Vergleich zu Mischlüftung-Systemen noch um 2 -3 log-Stufen bessere Luftreinheiten im Schutzbereich erreicht werden können.

2.7. Untersuchung 5: TAV-Lüftung: Einfluss von Deckenversorgungseinheiten

2.7.1. Zusammenfassung

Die Wirksamkeit eines Zuluftdeckenfeldes kann beeinträchtigt werden, wenn in Deckennähe die Aufhängungsarme von medizintechnischen Geräten eine Verbindung von aussen in den Schutzbereich herstellen, wie dies bei Deckenversorgungseinheiten (DVE) in der Regel der Fall ist. Über sie kann eine Luftstromverbindung vom Aussenraum in den Schutzbereich erfolgen. Zudem können an DVE angehängte Geräte Leegebiete im Nachlauf der Geräte verursachen und unreine Luft aus dem fussbodennahen Bereich „heraufsaugen“. Zur Überprüfung dieser beiden Beeinträchtigungen wurden beim „optimalen TAV-Lüftungskonzept“ systematische Positions- und Formuntersuchungen mit DVE-Armen durchgeführt. Es konnte festgestellt werden, dass sich mit Hilfe von kleinen strömungstechnischen Verbesserungen die zuvor signifikante Beeinträchtigung erheblich reduzieren liess. Die Versuche wurden mit strömungstechnisch optimierten OP-Leuchten und verschiedenen langen Strömungsschürzen durchgeführt.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 27/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

2.7.2. Untersuchungskonzept

Die Veränderungen der Schutzgrade auf dem OP-Tisch und auf einem am Fussende aufgestellten Instrumententisch durch DVE wurden messtechnisch ermittelt. Von einer Deckenversorgungseinheit ist zunächst der Versorgungsarm von aerodynamischer Bedeutung, da über seine Unterkante eine Strömungsverbindung zwischen dem Schutzbereich und Aussenbereich entstehen kann. Weiterhin ist die aerodynamische Grösse des Objektes, welches an der DVE hängt, von Einfluss. Für die Untersuchungen wurden nacheinander zwei Varianten von DVE-Armen ohne Anhängemodell von unterschiedlicher geometrischer Armgrösse verwendet (Abbildung 14). Ein Arm verband den Aussen- und Schutzbereich jeweils über die Längsseite des Schutzbereiches. Die untersuchten DVE-Arm-Positionen A1, A2 und A3 sind aus Abbildung 15 erkennbar, ebenso der zusätzliche Messpunkt M4 auf dem Instrumententisch am Fussende vom OP-Tisch.

2.7.3. Versuchsumfang

Insgesamt wurden 14 Versuche bzw. Versuchsreihen durchgeführt (siehe Tabelle 3 bis Tabelle 5). Bei allen Versuchen mit DVE blieb der Zuluftstrom mit $8'000 \text{ m}^3/\text{h}$ und das Ausströmprofil als Differentialflow gleich. Aus den ersten Versuchen konnte festgestellt werden, dass sich die grössten Veränderungen bei den Schutzgraden bei einer Partikelauflage gemäss „Innenlasteintrag“ nach DIN 1946-4/SWKI 99-3 zeigten, so dass die meisten Untersuchungen mit dieser Partikelauflage durchgeführt wurden. Nachdem eine signifikante Verschlechterung bei den Schutzgraden festgestellt wurde, erfolgten Versuche mit Strömungsableitelementen (Blende) in verschiedenen Formen und an verschiedenen Positionen am DVE-Arm. Sie sollten eine Unterbrechung der Einströmung von Fremdluft in den Schutzbereich über die Unterseiten der DVE-Arme ermöglichen (Abbildung 14). Weitere Untersuchungen bezogen sich auf die Auswirkung von verschieden langen, umlaufenden Strömungsschürzen auf die Schutzgrade.

2.7.4. Ergebnisse

Zunächst wurde der Einfluss der DVE-Arme „gross“ und „klein“ bei verschiedener Positionierung A1-A3 bei einer 0.6 m langen umlaufenden Strömungsschürze untersucht. Bei allen Positionen war kein gravierender Einfluss auf den Schutzgrad festzustellen ($SG \approx 5$). Die minimale Schutzwirkung lag bei 4.7. Auch beim Einsatz des DVE-Armes „klein“ wurde durchgängig eine Schutzwirkung von 5.0 erzielt. Bei der Versuchsreihe mit Geräte-Dummy am DVE-Arm wurde ebenfalls keinen Einfluss auf die Schutzwirkung bei Punkt M4 festgestellt.

Damit der Einfluss des DVE-Armes „gross“ auf den Instrumententisch im Fussbereich getestet werden konnte, wurde der zusätzliche Messpunkt M4 auf dem Instrumententisch benutzt. Die Schutzgradmessung bei Punkt M4 ergab den $SG = 2.6$. Der DVE-Arm hatte aber keinen Einfluss auf die Schutzwirkung bei M4, wie eine Kontrollmessung ohne DVE-Arm mit einer minimalen Schutzwirkung von 2.0 bestätigte, sondern der beginnende Schutzbereichsrandeffekt.

Ohne umlaufende Schürze verschlechterten sich die Schutzgrade auf ca. 3 unter Einfluss des grossen DVE-Armes beim Punkt M1 auf dem OP-Tisch und der Armposition A2 (Versuch 11.3). Für diese Position wurde zusätzlich der Einfluss vom Geräte-Dummy am DVE-Arm untersucht und die Wirkung einer Blende am DVE-Arm, die die Kurzschlussströmung zwischen Aussen- und Schutzbereich unterbrechen sollte (Abbildung 14). Dabei befand sich der Geräte-Dummy auf verschiedenen Achsenhöhen über dem Boden (Versuchsreihen 13 und 14). Mit der Blende konnte der zuvor verschlechterte Schutzgrad von ca. 2.4 auf ca. bis zu 4.6 verbessert werden (Abbildung 16, Abbildung 14). Dabei kommt es auf eine umlaufende Blende an und auf ihre Position am Rand des Schutzbereiches (wirksam als Verlängerung der Strömungsschürze).

Horw, 30. Juni 2012

Seite 28/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

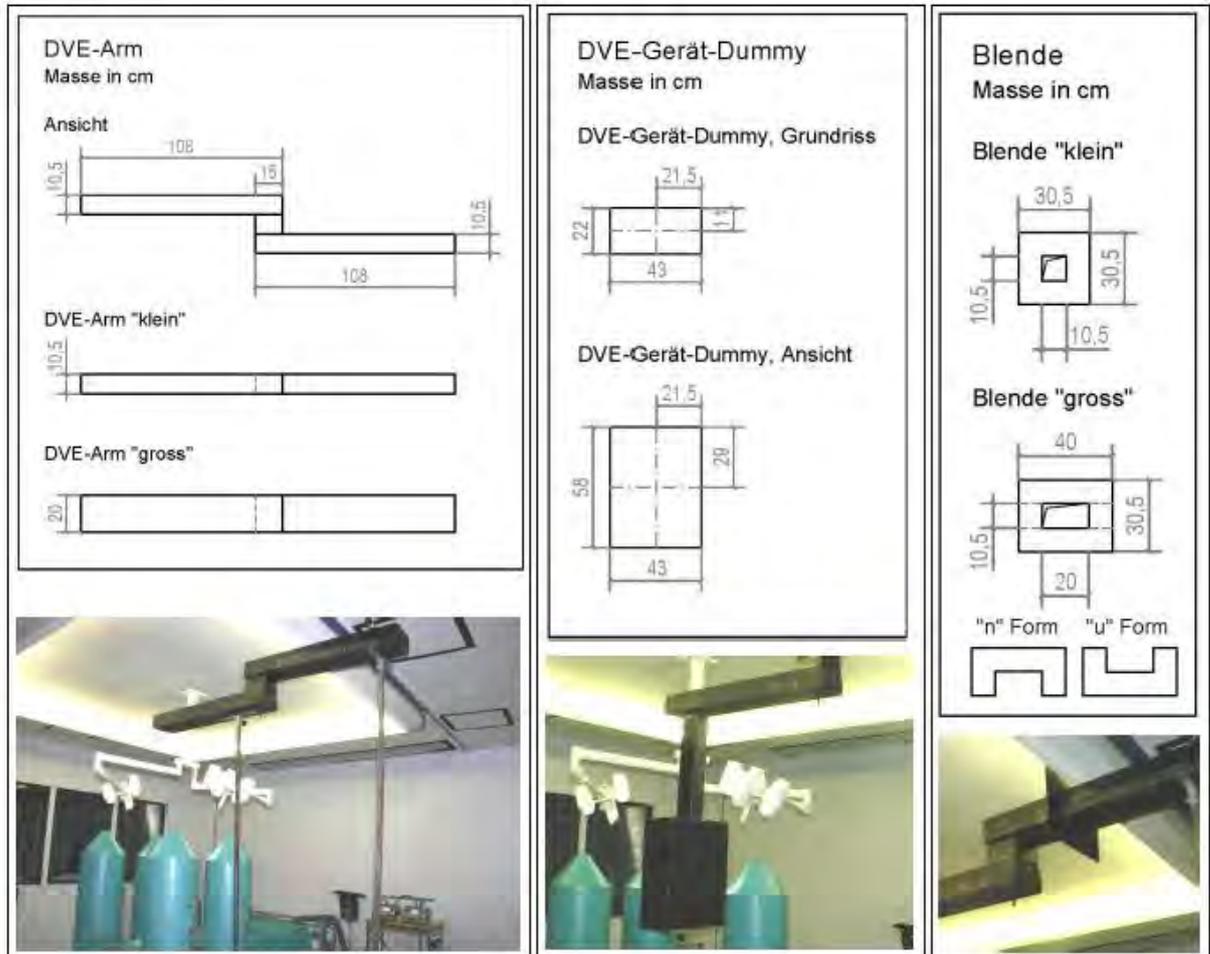


Abbildung 14: untersuchte DVE-Arme, Geräte-Dummy, Blende

Horw, 30. Juni 2012

Seite 29/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

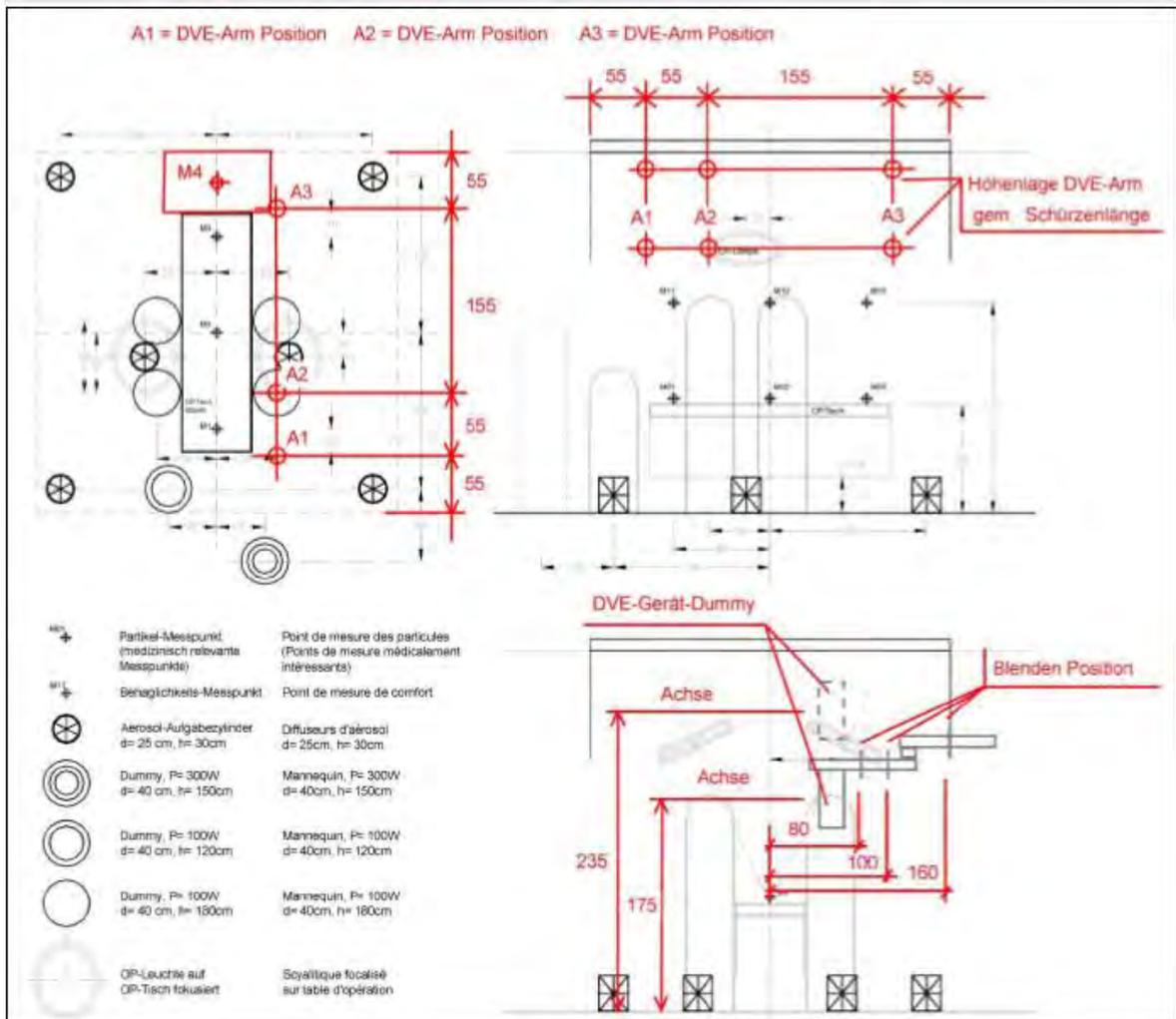


Abbildung 15: Positionen der DVE-Arme

Horw, 30. Juni 2012

Seite 30/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Tabelle 3: Versuchsmatrix mit Darstellung der Ergebnisse: Messungen mit DVE

VR 1, Vergleichsversuch																								
Versuche mit Homogenflowfeld 4 x Umluft unten, 4 x Overflow oben																								
Versuchsreihe	Versuch-Nr.	Datum	Thermische Last Lastanordnung: DIN / SWKI			TAV Volumenstrom [m ³ /h]	Schürze [cm]	DVE-Arm	Position DVE-Arm	Blende, Abstand zur Mitte OP-Tisch [cm]	Blenden Form	DVE-Gerät-Dummy, Achse ü. Bo. [cm]	Instrumententisch	Fuss-Bereich	"Toul 300" Fuss-Bereich	Position "Toul 300"	Innenlast nach SWKI 99-3	Aussenlast nach SWKI 99-3	Schutzgrad					Schutzwirkung
			OP- Personal- Dummies	Anästhesie- Gerät- Dummy	OP- Leuchten														M1	M2	M3	M4	M5	
1	1.1	14.03.11.	X	X	X	9'500	60	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	0.8	1.2	1.5	-	-	0.8	
VR 2, Vergleichsversuch																								
Versuche mit Differentialflowfeld 2x1 m 4 x Umluft unten, 4 x Overflow oben																								
Versuchsreihe	Versuch-Nr.	Datum	Thermische Last Lastanordnung: DIN / SWKI			TAV Volumenstrom [m ³ /h]	Schürze [cm]	DVE-Arm	Position DVE-Arm	Blende, Abstand zur Mitte OP-Tisch [cm]	Blenden Form	DVE-Gerät-Dummy, Achse ü. Bo. [cm]	Instrumententisch	Fuss-Bereich	"Toul 300" Fuss-Bereich	Position "Toul 300"	Innenlast nach SWKI 99-3	Aussenlast nach SWKI 99-3	Schutzgrad					Schutzwirkung
			OP- Personal- Dummies	Anästhesie- Gerät- Dummy	OP- Leuchten														M1	M2	M3	M4	M5	
2	2.1	15.03.11.	X	X	X	8'000	60	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	5.0	5.0	5.0	-	-	5.0	
	2.2	15.03.11.	X	X	X	9'500	60	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	5.0	5.0	5.0	-	-	5.0	
VR 3, DVE-Arm "gross": Musterlastanordnung 1																								
Versuche mit Differentialflow 2x1 m 4 x Umluft unten, 4 x Overflow oben																								
Versuchsreihe	Versuch-Nr.	Datum	Thermische Last Lastanordnung: DIN / SWKI			TAV Volumenstrom [m ³ /h]	Schürze [cm]	DVE-Arm	Position DVE-Arm	Blende, Abstand zur Mitte OP-Tisch [cm]	Blenden Form	DVE-Gerät-Dummy, Achse ü. Bo. [cm]	Instrumententisch	Fuss-Bereich	"Toul 300" Fuss-Bereich	Position "Toul 300"	Innenlast nach SWKI 99-3	Aussenlast nach SWKI 99-3	Schutzgrad					Schutzwirkung
			OP- Personal- Dummies	Anästhesie- Gerät- Dummy	OP- Leuchten														M1	M2	M3	M4	M5	
3	3.1	28.03.11.	X	X	X	8'000	60	gross	A1	-	-	-	-	-	-	X	-	5.0	5.0	5.0	-	-	5.0	
	3.2	28.03.11.	X	X	X	8'000	60	gross	A2	-	-	-	-	-	-	X	-	2.6	5.0	5.0	-	-	2.6	
	3.3	28.03.11.	X	X	X	8'000	60	gross	A3	-	-	-	-	-	-	X	-	5.0	5.0	5.0	-	-	5.0	
VR 4, DVE-Arm "gross": Musterlastanordnung 2																								
Versuche mit Differentialflow 2x1 m 4 x Umluft unten, 4 x Overflow oben																								
Versuchsreihe	Versuch-Nr.	Datum	Thermische Last Lastanordnung: DIN / SWKI			TAV Volumenstrom [m ³ /h]	Schürze [cm]	DVE-Arm	Position DVE-Arm	Blende, Abstand zur Mitte OP-Tisch [cm]	Blenden Form	DVE-Gerät-Dummy, Achse ü. Bo. [cm]	Instrumententisch	Fuss-Bereich	"Toul 300" Fuss-Bereich	Position "Toul 300"	Innenlast nach SWKI 99-3	Aussenlast nach SWKI 99-3	Schutzgrad					Schutzwirkung
			OP- Personal- Dummies	Anästhesie- Gerät- Dummy	OP- Leuchten														M1	M2	M3	M4	M5	
4	4.1	29.03.11.	X	X	X	8'000	60	gross	A2	-	-	-	-	-	-	X	-	4.7	5.0	5.0	-	-	4.7	
VR 5, DVE-Arm "gross": auf Instrumententisch																								
Versuche mit Differentialflow 2x1 m 4 x Umluft unten, 4 x Overflow oben																								
Versuchsreihe	Versuch-Nr.	Datum	Thermische Last Lastanordnung: DIN / SWKI			TAV Volumenstrom [m ³ /h]	Schürze [cm]	DVE-Arm	Position DVE-Arm	Blende, Abstand zur Mitte OP-Tisch [cm]	Blenden Form	DVE-Gerät-Dummy, Achse ü. Bo. [cm]	Instrumententisch	Fuss-Bereich	"Toul 300" Fuss-Bereich	Position "Toul 300"	Innenlast nach SWKI 99-3	Aussenlast nach SWKI 99-3	Schutzgrad					Schutzwirkung
			OP- Personal- Dummies	Anästhesie- Gerät- Dummy	OP- Leuchten														M1	M2	M3	M4	M5	
5	5.1	29.03.11.	X	X	X	8'000	60	gross	A3	-	-	-	X	-	-	X	-	5.0	5.0	5.0	2.6	-	2.6	

Horw, 30. Juni 2012

Seite 31/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Tabelle 4: Versuchsmatrix mit Darstellung der Ergebnisse: Messungen mit DVE

VR 6, DVE-Arm "klein"																						
Versuche mit Differentialflow 2x1m 4 x Umluft unten, 4 x Overflow oben																						
Versuchsreihe	Versuch-Nr.	Datum	Thermische Last Lastanordnung: DIN / SWKI			TAV Volumenstrom [m ³ /h]	Schürze [cm]	DVE-Arm	Position DVE-Arm	Blende, Abstand zur Mitte OP-Tisch [cm]	Blenden Form	DVE-Gerät-Dummy, Achse ü. Bo. [cm]	Instrumententisch Fuss-Bereich	"Touil 300" Fuss-Bereich	Position "Touil 300" Innenlast nach SWKI 99-3 Aussenlast nach SWKI 99-3	Schutzgrad					Schutzwirkung	
			OP- Personal- Dummies	Anästhesie- Gerät- Dummy	OP- Leuchten											M1	M2	M3	M4	M5		
6	6.1	29.03.11.	X	X	X	8'000	60	klein	A1	-	-	-	-	-	X	5.0	5.0	5.0	-	-	5.0	
	6.2	29.03.11.	X	X	X	8'000	60	klein	A2	-	-	-	-	-	X	5.0	5.0	5.0	-	-	5.0	
	6.3	29.03.11.	X	X	X	8'000	60	klein	A3	-	-	-	-	-	X	5.0	5.0	5.0	-	-	5.0	
VR 7, DVE-Arm "klein": mit Instrumententisch																						
Versuche mit Differentialflow 2x1 m 4 x Umluft unten, 4 x Overflow oben																						
Versuchsreihe	Versuch-Nr.	Datum	Thermische Last Lastanordnung: DIN / SWKI			TAV Volumenstrom [m ³ /h]	Schürze [cm]	DVE-Arm	Position DVE-Arm	Blende, Abstand zur Mitte OP-Tisch [cm]	Blenden Form	DVE-Gerät-Dummy, Achse ü. Bo. [cm]	Instrumententisch Fuss-Bereich	"Touil 300" Fuss-Bereich	Position "Touil 300" Innenlast nach SWKI 99-3 Aussenlast nach SWKI 99-3	Schutzgrad					Schutzwirkung	
			OP- Personal- Dummies	Anästhesie- Gerät- Dummy	OP- Leuchten											M1	M2	M3	M4	M5		
7	7.1	29.03.11.	X	X	X	8'000	60	klein	A3	-	-	X	-	-	X	5.0	5.0	5.0	2.1	-	2.1	
VR 8, DVE-Arm "gross": mit Instrumententisch, M4																						
Versuche mit Differentialflow 2x1m 4 x Umluft unten, 4 x Overflow oben																						
Versuchsreihe	Versuch-Nr.	Datum	Thermische Last Lastanordnung: DIN / SWKI			TAV Volumenstrom [m ³ /h]	Schürze [cm]	DVE-Arm	Position DVE-Arm	Blende, Abstand zur Mitte OP-Tisch [cm]	Blenden Form	DVE-Gerät-Dummy, Achse ü. Bo. [cm]	Instrumententisch Fuss-Bereich	"Touil 300" Fuss-Bereich	Position "Touil 300" Innenlast nach SWKI 99-3 Aussenlast nach SWKI 99-3	Schutzgrad					Schutzwirkung	
			OP- Personal- Dummies	Anästhesie- Gerät- Dummy	OP- Leuchten											M1	M2	M3	M4	M5		
8	8.1	04.04.11.	X	X	X	8'000	60	gross	A3	-	-	X	-	-	X	-	-	-	-	2.1	-	2.1
	8.2	04.04.11.	X	X	X	8'000	60	gross	A3	80	□	X	-	-	X	-	-	-	-	2.0	-	2.0
	8.3	04.04.11.	X	X	X	8'000	60	gross	A3	100	□	X	-	-	X	-	-	-	-	2.1	-	2.1
	8.4	04.04.11.	X	X	X	8'000	60	-	A3	-	-	X	-	-	X	-	-	-	-	2.0	-	2.0
VR 9, DVE-Arm "gross": mit DVE-Gerät-Dummy																						
Versuche mit Differentialflow 2x1 m 4 x Umluft unten, 4 x Overflow oben																						
Versuchsreihe	Versuch-Nr.	Datum	Thermische Last Lastanordnung: DIN / SWKI			TAV Volumenstrom [m ³ /h]	Schürze [cm]	DVE-Arm	Position DVE-Arm	Blende, Abstand zur Mitte OP-Tisch [cm]	Blenden Form	DVE-Gerät-Dummy, Achse ü. Bo. [cm]	Instrumententisch Fuss-Bereich	"Touil 300" Fuss-Bereich	Position "Touil 300" Innenlast nach SWKI 99-3 Aussenlast nach SWKI 99-3	Schutzgrad					Schutzwirkung	
			OP- Personal- Dummies	Anästhesie- Gerät- Dummy	OP- Leuchten											M1	M2	M3	M4	M5		
9	9.1	04.04.11.	X	X	X	8'000	60	gross	A1	-	-	175	-	-	X	5.0	5.0	5.0	-	-	5.0	
	9.2	04.04.11.	X (-1)	X	X	8'000	60	gross	A2	-	-	175	-	-	X	5.0	5.0	5.0	-	-	5.0	
	9.3	04.04.11.	X	X	X	8'000	60	gross	A3	-	-	175	X	-	X	5.0	5.0	5.0	2.0	-	2.0	

Horw, 30. Juni 2012

Seite 32/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Tabelle 5: Versuchsmatrix mit Darstellung der Ergebnisse: Messungen mit DVE

VR 11, DVE-Arm "gross": ohne Schürze																							
Versuche mit Differentialflow 2x1 m 4 x Umluft unten, 4 x Overflow oben																							
Versuchsreihe	Versuch-Nr.	Datum	Thermische Last Lastanordnung: DIN / SWKI			TAV Volumenstrom [m³/h]	Schürze [cm]	DVE-Arm	Position DVE-Arm	Blende, Abstand zur Mitte OP-Tisch [cm]	Blenden Form	DVE-Gerät-Dummy, Achse ü. Bo. [cm]	Instrumententisch Fuss-Bereich	"Toul 300" Fuss-Bereich	Position "Toul 300"	Innenlast nach SWKI 99-3	Aussenlast nach SWKI 99-3	Schutzgrad					Schutzwirkung
			OP- Personal- Dummies	Anästhesie- Gerät- Dummy	OP- Leuchten													M1	M2	M3	M4	M5	
11	11.1	19.04.11.	X	X	X	8'000	0	-	-	-	-	-	X	-	-	X	-	5.0	5.0	5.0	2.0	-	2.0
	11.2	19.04.11.	X	X	X	8'000	0	gross	A1	-	-	-	X	-	-	X	-	5.0	5.0	5.0	2.7	-	2.7
	11.3	19.04.11.	X	X	X	8'000	0	gross	A2	-	-	-	X	-	-	X	-	3.6	5.0	5.0	2.3	-	2.3
	11.4	19.04.11.	X	X	X	8'000	0	gross	A3	-	-	-	X	-	-	X	-	4.9	5.0	5.0	2.3	-	2.3
VR 12, DVE-Arm "klein": ohne Schürze																							
Versuche mit Differentialflow 2x1 m 4 x Umluft unten, 4 x Overflow oben																							
Versuchsreihe	Versuch-Nr.	Datum	Thermische Last Lastanordnung: DIN / SWKI			TAV Volumenstrom [m³/h]	Schürze [cm]	DVE-Arm	Position DVE-Arm	Blende, Abstand zur Mitte OP-Tisch [cm]	Blenden Form	DVE-Gerät-Dummy, Achse ü. Bo. [cm]	Instrumententisch Fuss-Bereich	"Toul 300" Fuss-Bereich	Position "Toul 300"	Innenlast nach SWKI 99-3	Aussenlast nach SWKI 99-3	Schutzgrad					Schutzwirkung
			OP- Personal- Dummies	Anästhesie- Gerät- Dummy	OP- Leuchten													M1	M2	M3	M4	M5	
12	12.1	26.04.11.	X	X	X	8'000	0	klein	A1	-	-	-	X	-	-	X	-	5.0	5.0	5.0	2.7	-	2.7
	12.2	26.04.11.	X	X	X	8'000	0	klein	A2	-	-	-	X	-	-	X	-	5.0	5.0	5.0	2.1	-	2.1
	12.3	26.04.11.	X	X	X	8'000	0	klein	A3	-	-	-	X	-	-	X	-	5.0	5.0	5.0	2.1	-	2.1
VR 13, DVE-Arm "gross": ohne Schürze, mit DVE-Gerät-Dummy 235 cm ü. Bo. und Blende																							
Versuche mit Differentialflow 2x1 m 4 x Umluft unten, 4 x Overflow oben																							
Versuchsreihe	Versuch-Nr.	Datum	Thermische Last Lastanordnung: DIN / SWKI			TAV Volumenstrom [m³/h]	Schürze [cm]	DVE-Arm	Position DVE-Arm	Blende, Abstand zur Mitte OP-Tisch [cm]	Blenden Form	DVE-Gerät-Dummy, Achse ü. Bo. [cm]	Instrumententisch Fuss-Bereich	"Toul 300" Fuss-Bereich	Position "Toul 300"	Innenlast nach SWKI 99-3	Aussenlast nach SWKI 99-3	Schutzgrad					Schutzwirkung
			OP- Personal- Dummies	Anästhesie- Gerät- Dummy	OP- Leuchten													M1	M2	M3	M4	M5	
13	13.1	26.04.11.	X	X	X	8'000	0	gross	A2	80	<input type="checkbox"/>	-	X	-	-	X	-	3.7	-	-	-	-	3.7
	13.2	26.04.11.	X	X	X	8'000	0	gross	A2	100	<input type="checkbox"/>	-	X	-	-	X	-	3.6	-	-	-	-	3.6
	13.3	09.05.11.	X	X	X	8'000	0	gross	A2	160	<input type="checkbox"/>	-	X	-	-	X	-	3.9	-	-	-	-	3.9
	13.4	26.04.11.	X (-1)	X	X	8'000	0	gross	A2	-	<input type="checkbox"/>	235	X	-	-	X	-	2.4	-	-	-	-	2.4
	13.5	02.05.11.	X (-1)	X	X	8'000	0	gross	A2	80	<input type="checkbox"/>	235	X	-	-	X	-	3.2	-	-	-	-	3.2
	13.6	02.05.11.	X (-1)	X	X	8'000	0	gross	A2	100	<input type="checkbox"/>	235	X	-	-	X	-	2.9	-	-	-	-	2.9
	13.7	03.05.11.	X (-1)	X	X	8'000	0	gross	A2	160	<input type="checkbox"/>	235	X	-	-	X	-	4.1	-	-	-	-	4.1
	13.8	03.05.11.	X (-1)	X	X	8'000	0	gross	A2	160	<input type="checkbox"/>	235	X	-	-	X	-	3.6	-	-	-	-	3.6
	13.9	03.05.11.	X (-1)	X	X	8'000	0	gross	A2	160	<input type="checkbox"/>	235	X	-	-	X	-	2.7	-	-	-	-	2.7
VR 14, DVE-Arm "gross": ohne Schürze, mit DVE-Gerät-Dummy 175 cm ü. Bo. und Blende																							
Versuche mit Differentialflow 2x1 m 4 x Umluft unten, 4 x Overflow oben																							
Versuchsreihe	Versuch-Nr.	Datum	Thermische Last Lastanordnung: DIN / SWKI			TAV Volumenstrom [m³/h]	Schürze [cm]	DVE-Arm	Position DVE-Arm	Blende, Abstand zur Mitte OP-Tisch [cm]	Blenden Form	DVE-Gerät-Dummy, Achse ü. Bo. [cm]	Instrumententisch Fuss-Bereich	"Toul 300" Fuss-Bereich	Position "Toul 300"	Innenlast nach SWKI 99-3	Aussenlast nach SWKI 99-3	Schutzgrad					Schutzwirkung
			OP- Personal- Dummies	Anästhesie- Gerät- Dummy	OP- Leuchten													M1	M2	M3	M4	M5	
14	14.1	09.05.11.	X	X	X	8'000	0	gross	A1	-	<input type="checkbox"/>	175	X	-	X	X	-	5.0	5.0	5.0	2.0	-	2.0
	14.2	03.05.11.	X (-1)	X	X	8'000	0	gross	A2	-	<input type="checkbox"/>	175	X	-	X	X	-	2.8	5.0	5.0	2.1	-	2.1
	14.3	03.05.11.	X (-1)	X	X	8'000	0	gross	A2	160	<input type="checkbox"/>	175	X	-	X	X	-	4.6	-	-	-	-	4.6
	14.4	09.05.11.	X	X	X	8'000	0	gross	A3	-	<input type="checkbox"/>	175	X	-	X	X	-	5.0	5.0	5.0	2.0	-	2.0
	14.5	10.05.11.	X (-1)	X	X	8'000	0	gross	A2	80	<input type="checkbox"/>	175	X	-	X	X	-	3.1	-	-	-	-	3.1
	14.6	10.05.11.	X (-1)	X	X	8'000	0	gross	A2	100	<input type="checkbox"/>	175	X	-	X	X	-	2.6	-	-	-	-	2.6

Horw, 30. Juni 2012

Seite 33/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

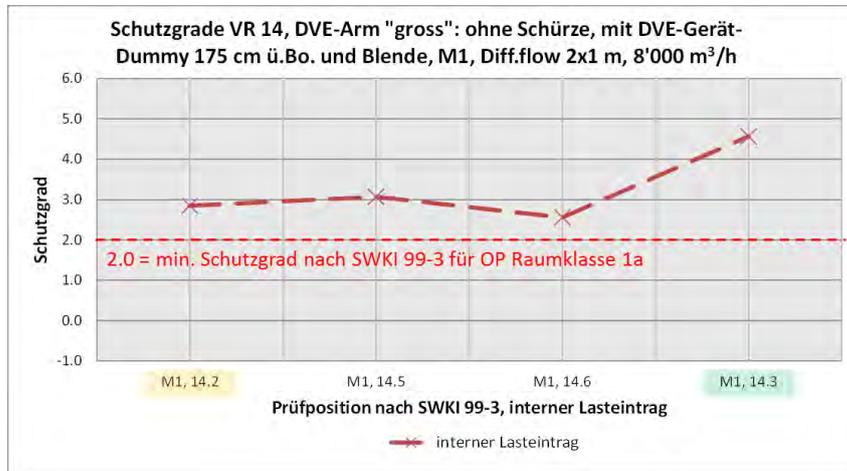


Abbildung 16: Einfluss einer DVE auf den Schutzgrad bei M1, Position DVE: OP-Tisch Kopfbereich

2.7.5. Schlussfolgerungen

Insgesamt kann festgestellt werden, dass Deckenversorgungseinheiten bei einer TAV-Decke mit Differentialflow-Profil und strömungsgünstigen OP-Leuchten keine erhebliche Verschlechterung der Schutzgrade bewirken. Dieses Ergebnis gilt näherungsweise unabhängig von der Schürzenlänge am Deckenfeld, wenn die Umluftfassungen in Fussbodennähe gleichmässig absaugend angeordnet sind.

2.8. Untersuchung 6, TAV-Lüftung: Einfluss von C-Bogen auf Schutzwirkung

2.8.1. Zusammenfassung

Ein C-Bogen-Hersteller hat dem ZIG für eine begrenzte Zeit einen mobilen C-Bogen für die Untersuchung der Veränderung der Luftqualität im Schutzbereich in OP-Räumen mit TAV-Decken zur Verfügung gestellt. Dazu wurden in Abstimmung mit Medizinern praxisübliche Anordnungen für Operationen mit dem C-Bogen besprochen und versuchstechnisch nachgestellt. Insgesamt konnten 12 Versuche durchgeführt werden, wobei sich zeitlich bedingt die Schutzgradmessungen auf lufthygienisch relevante Messorte beschränkten. Die Ergebnisse zeigen, dass im Bereich unter dem C-Bogen (vermeintlicher Wundbereich) und auf Instrumententischen, die in Fussnähe am OP-Tisch angeordnet sind, keine signifikanten Verschlechterungen der Luftreinheit auftreten. Wiederum gelten diese Ergebnisse für das oben beschriebene „optimale TAV-Lüftungskonzept“.

2.8.2. Untersuchungskonzept

Der zur Verfügung gestellte mobile C-Bogen ist aus Abbildung 17 erkennbar. Dabei wurde das runde Kopfteil versuchsweise um ein grösseres und eckig gestaltetes Kopfteil verändert. Die Anordnung der Musterlasten, wie OP-Tisch mit Patienten-Dummy, OP-Team-Dummies, C-Bogen, Instrumententische, Anästhesiebereich, wurde mit Medizinern besprochen und nach praxisüblichen Gesichtspunkten für Operationen mit dem C-Bogen angeordnet (siehe Abbildung 17). Das aufgehängte Anästhesietuch befand sich in Verlängerung zur Abströmkante der Strömungsschürze. Bei einigen Versuchen wurde zusätzlich eine Heizquelle im Raumhintergrund aufgestellt (Simulation einer Herz-Lungenmaschine oder anderen Wärmequelle).

Es kam das oben beschriebene „optimale TAV-Lüftungskonzept“ zur Anwendung mit folgenden Merkmalen: TAV-Decke, 3.2 x 3.2 m². Strömungsprofil: Differentialflow, Kernfeld: 2 x 1 m².

Horw, 30. Juni 2012

Seite 34/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Zuluftvolumenstrom: 8000 m³/h, Abluftvolumenstrom: 1200 m³/h, Überströmung oben, Umluftabsaugung unten, umlaufende Strömungsschürzen mit einer Länge von 60 cm ab Unterkante Decke, strömungsgünstig geformte OP-Leuchten: je 1 x Admeco LED 3 bzw. -LED 5.

Die Schutzgradmessungen wurden gemäss der Angaben in DIN 1946/4 bzw. SWKI 99-3 durchgeführt, jedoch mit Anpassung an die aussermittige Anordnung der Musterlast im Schutzbereich. Zudem wurden die OP-Leuchten jeweils so angeordnet, dass sie den Bereich unterhalb vom C-Bogen (vermeintlichen Wundbereich) ausleuchten konnten (Abbildung 17).

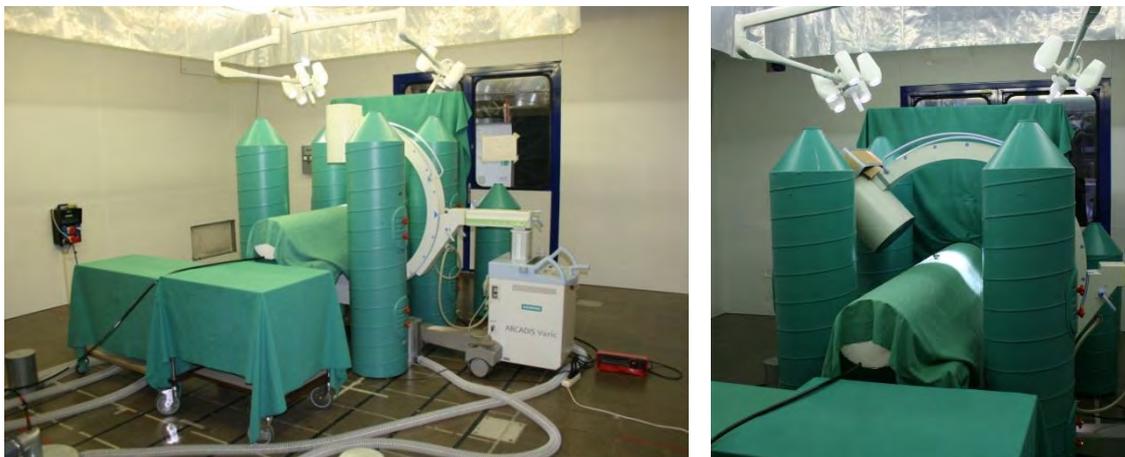


Abbildung 17: Versuchsaufbau mit C-Bogen und thermischer Last im Raumhintergrund

2.8.3. Versuchsumfang

Insgesamt konnten 12 Versuche durchgeführt werden, wobei sich zeitlich bedingt der Hauptfokus auf lufthygienisch relevante Messpunkte (hauptsächlich M2 und auf den Instrumententischen) beschränkte. Dabei war der Absaugort der Partikel im Messpunkt 2 eben zur Patienten-Dummy-Oberfläche. Variiert wurden der Umfang der Musterlast und die Positionen des C-Bogen und seine Kopfform.

2.8.4. Ergebnisse

In Tabelle 6 sind die durchgeführten Messungen dokumentiert. Die erreichten Schutzgrade sind als Übersichtsergebnis in Abbildung 19 erkennbar.

Zunächst wurde nur der Einfluss des C-Bogens alleine untersucht, wenn er zusätzlich zur Musterlastanordnung nach DIN/SWKI in der Mitte des OP-Tisches angeordnet ist (Versuch 0). Hier ergab sich ein minimaler Schutzgrad von 3,1 auf der Tischmitte, also direkt unterhalb des (hier runden) C-Bogen-Kopfteils.

Die weiteren Versuche wurden mit dem Patientendummy, Anästhesietuch, Instrumententischen und teilweise mit einer Heizquelle im Raumhintergrund durchgeführt. Variiert wurden zudem der Durchleuchtungswinkel des C-Bogens sowie die geometrische Gestaltung des Kopfteils (rund, eckig), der von der Verdrängungsströmung umströmt werden muss.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 35/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Insgesamt verblieben die Schutzgrade immer deutlich über 2 (Kleinster Wert: 2,4, Versuch 4) und damit über dem Niveau, dass bisher von Hygienikern als gutes und zu erreichendes Niveau angesehen wird (entsprechende Angabe in DIN 1946/4).

Tabelle 6: Versuche im Labor-OP-Raum mit Differentialflow, Nachstellung: Operation mit C-Bogen

Versuchsmatrix für Messungen mit C-Bogen: SIREMOBIL Compact L (Siemens)																		
Versuche mit TAV: 3,2 x 3,2m ² , Differentialflowfeld: 2x1 m ²																		
4 x Umluft unten, 4 x Overflow oben, Überströmung: 1200 m ³ /h																		
Versuch 0: DIN/ SWKI-Musterlast ergänzt mit C-Bogen + 2 Dummies verschoben. Versuch 1-12: "Praxisnaher Aufbau"																		
Versuch-Nr.	Bild-Nr.	Musterlasten:						TAV Volumenstrom [m ³ /h]	Schürzlänge ab Decke [cm]	C-Bogen - Winkel aus Senkrechter	C-Bogen-Kopfform	Partikelquellort	Schutzgrade OP-Tisch			Schutzwirkung	Schutzgrade Instrumententische	
		5 OP-Personal-Dummies	Anästhesie-Gerät-Dummy und A-Tuch	OP-Leuchten Position	Patienten Dummy	Instrumententisch	Wärme-last Raum-hintergrund						M1	M2	M3		M4	M5
0	0-1	X	ohne Tuch	DIN/SWKI	-	-	-	8'000	60	0°	R	X	3.8	3.1	5.0	3.1	-	-
1	1-1	X	X	DIN/SWKI	X	X	-	8'000	60	0°	R	X*	-	2.9	-	2.9	-	-
2	2-1	X	X	DIN/SWKI	X	X	-	8'000	60	0°	R	X*	-	2.7	-	2.7	-	-
3	3-1	X	X	DIN/SWKI	X	X	-	8'000	60	0°	E	X*	-	2.6	-	2.6	-	-
4	4-1	X	X	über M1/M3	X	X	-	8'000	60	0°	E	X*	-	2.4	-	2.4	-	-
5	5-1	X	X	über M1/M3	X	X	-	8'000	60	0°	R	X*	2.6	2.7	3.7	2.6	5.0	5.0
6	6-1	X	X	über M1/M3	X	X	-	8'000	60	ca 45°	R	X*	-	3.5	-	3.5	-	-
7	7-1	X	X	über M1/M3	X	X	-	8'000	60	ca 45°	E	X*	-	3.7	-	3.7	-	-
8	8-1	X	X	DIN/SWKI	X	X	-	8'000	60	ca 45°	E	X*	-	3.9	-	3.9	-	-
9	9-1	X	X	DIN/SWKI	X	X	-	8'000	60	ca 45°	R	X*	-	3.6	-	3.6	-	-
10	10-1	X	X	DIN/SWKI	X	X	ca. 900 W	8'000	60	0°	R	X*	-	2.8	-	2.8	-	-
11	11-1	X	X	DIN/SWKI	X	X	ca. 2 kW	8'000	60	0°	R	X*	-	3.0	-	3.0	-	-
12	12-1	X	X	über M1/M3	-	X	-	8'000	60	0°	R	X*	2.9	2.7	5.0	2.7	-	-

Erklärungen:
R: Rund, E: Eckig, X*: mittlere Partikelausströmer gegenüber DIN/SWKI-Positionen in Nähe der OP-Dummies verschoben
Versuch 2-12: OP-Leuchten auf M2 ausgerichtet

Horw, 30. Juni 2012

Seite 36/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

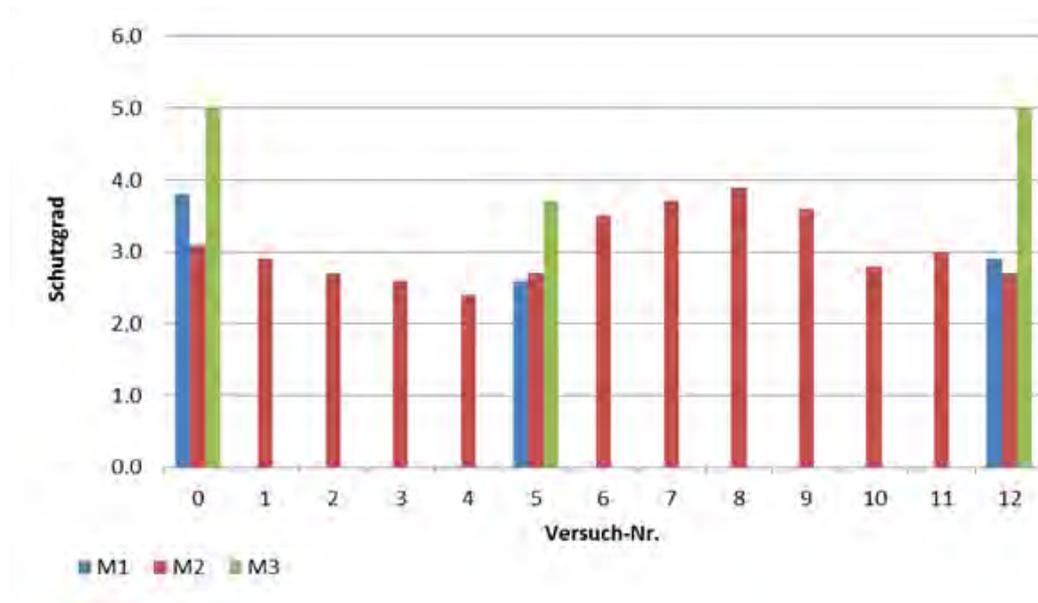


Abbildung 18: TAV-Versuche mit C-Bogen, praxisnahen Musterlasten und verschiedene OP-Leuchten-Positionen, siehe Tab. 6.

2.8.5. Schlussfolgerungen

Die untersuchte TAV-Lüftung (Differentialflow) ist in der Lage, die Verdrängungswirkung eines praxisnah angeordneten mobilen C-Bogens so zu reduzieren, dass auf den lufthygienisch relevanten Punkten im Schutzbereich noch gute Schutzwirkungen erhalten bleiben ($SG > 2$).

Zudem wird die Reinheit der Luft auf Instrumententischen nicht durch Installationen am OP-Tisch beeinflusst, wenn sie sich selbst noch im Schutzbereich befinden.

Es zeigte sich auch kein signifikanter Einfluss der geometrischen Art des Kopfteils vom C-Bogen oder seiner Drehungsposition.

Die Ergebnisse sind von der Versuchsanordnung abhängig und nicht alle Messpunkte im Schutzbereich konnten aus zeitlichen Gründen untersucht werden. Die eindeutige Tendenz der Messergebnisse lässt aber die Vermutung zu, dass der Einfluss eines mobilen C-Bogens keine signifikanten Störungen im Schutzbereich zur Folge hat. Wesentlich ist dabei allerdings wieder, dass alle lufthygienisch zu schützenden Gegenstände im Kerngebiet des Schutzbereiches liegen und strömungsgünstig geformte OP-Leuchten zur Anwendung kommen.

2.9. Untersuchung 7, TAV-Lüftung: Einfluss periodischer Türöffnung beim OP-Raum

2.9.1. Zusammenfassung

Aus informellen Quellen (Literaturstelle nicht bekannt) ist bekannt, dass während einer Operation im Durchschnitt alle drei Minuten die OP-Tür geöffnet wird und damit eine Verbindung zwischen dem OP-Raum mit höchsten Anforderungen an die Luftqualität und den angrenzenden Räumen mit niedrigeren Anforderungen entsteht.

Versuchstechnisch wurde im Labor dieser Einfluss während laufender Schutzgradmessungen quantifiziert. Eine Versuchsreihe fand bei einseitiger Überströmung eines hohen Zuluftüberschusses von $3.500 \text{ m}^3/\text{h}$ und der Anordnung von praxisüblichen Raumlasten statt (Abbildung 19). Bei einer anderen Versuchsreihe wurde der OP-Raum nach den Angaben in DIN

Horw, 30. Juni 2012

Seite 37/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

1946-4 betrieben. Es zeigte sich, dass bei beiden Betriebsweisen der Einfluss einer Türöffnung nur geringfügig ist und sich in einer kurzzeitigen Verschlechterung der Schutzgrad an der türabgewandten Seite vom OP-Tisch zeigt.

2.9.2. Untersuchungskonzept

Die vollständige Schiebe-Türöffnung erfolgte alle drei Minuten für 30 Sekunden. Insgesamt betrug die Versuchsdauer ca. 30 min. Dabei wurden die Schutzgrade bei Innenlasteintrag an den Messpunkten OP-Tischmitte (M2) und auf dem Instrumententisch (M4) kontinuierlich ermittelt.

2.9.3. Versuchsumfang

Es wurden Versuche mit praxisnaher Musterlastanordnung und mit der Musterlast nach DIN 1946-4/SWKI 99-3 durchgeführt. Während der Versuche mit praxisnaher Lastanordnung waren die strömungsgünstig geformten OP-Leuchten über Messpunkt M1 (Kopfbereich) und Messpunkte M3 (Fussende) positioniert. Zudem erfolgte die Überströmung vom Zuluftüberschuss mit $3.500 \text{ m}^3/\text{h}$ nur auf der Türseite vom OP-Raum.

2.9.4. Ergebnisse

Mit periodischer Türöffnung (alle drei Minuten für 30 Sekunden) ergab sich bei Versuchen mit praxisnaher Musterlast am Punkt M2 (OP-Tischmitte) ein Schutzgrad von 5.0. Dieser Schutzgrad war abgesehen von einem Ausreisser über die gesamte Versuchszeit konstant. Am Messpunkt M4 (Instrumententisch) wurde eine Schwankung des Schutzgrades über die Zeit von 2.0 bis 4.5 festgestellt. Dies war allerdings auch ohne Türöffnung der Fall und kann darauf zurückgeführt werden, dass der Messpunkt bereits am Rand vom Schutzbereich lag. Im Durchschnitt lagen die Schutzgrade an Messpunkt M4 bei periodischer Türöffnung bei 2.5 (6 Pa Raumüberdruck) und 2.7 (30 Pa Raumüberdruck) und damit auf dem gleichen Niveau wie bei den Messungen ohne Türöffnung.

Bei den Versuchen mit Türöffnung und Musterlastanordnung nach DIN/SWKI zeigten sich auf dem OP-Tisch ähnliche Ergebnisse. Auch hier blieben die Schutzgrade über dem DIN-relevanten Wert von $SG > 2$, wobei sich hier der Schutzgrad auf dem OP-Tischrand verschlechterte, der am nächsten zur Tür lag. Dieses Ergebnis ist mit dem Fehlen vom Anästhesietuch zu erklären. Diese Versuche wurden mit Über- und Untertemperatur vom OP-Raum gegenüber seiner Umgebung durchgeführt. Bei Untertemperatur und sehr langer Türöffnungszeit (90 s) „erholen“ sich die Schutzgrade auf dem OP-Tisch nur sehr langsam, verbleiben aber auf einem hohen Niveau.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 38/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

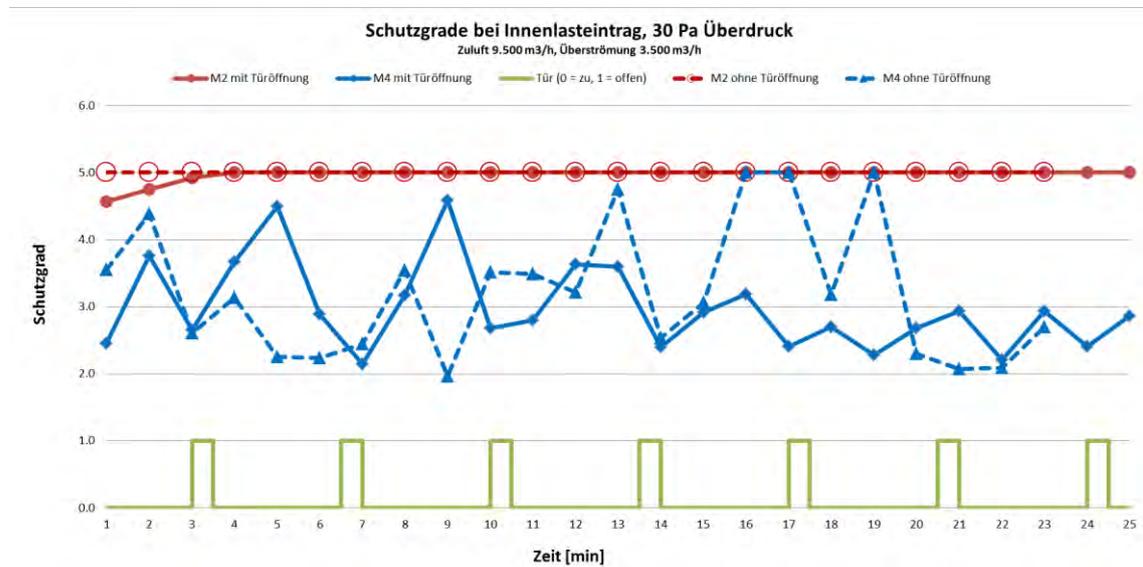


Abbildung 19: Schutzgrade bei praxisnaher Musterlast mit und ohne periodischer Türöffnung, Raumüberdruck 30 Pa

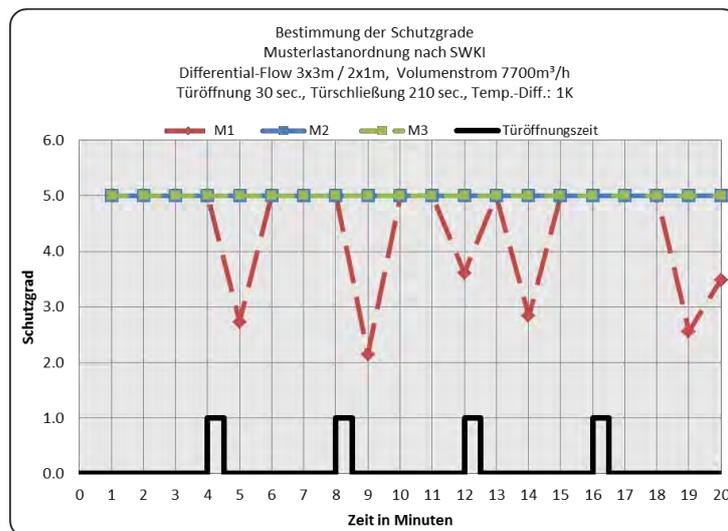


Abbildung 20: Schutzgrade bei Musterlast nach DIN 1946-4/SWKI 99-3 mit periodischer Türöffnung und OP-Übertemperatur gegenüber seiner Umgebung

Horw, 30. Juni 2012

Seite 39/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

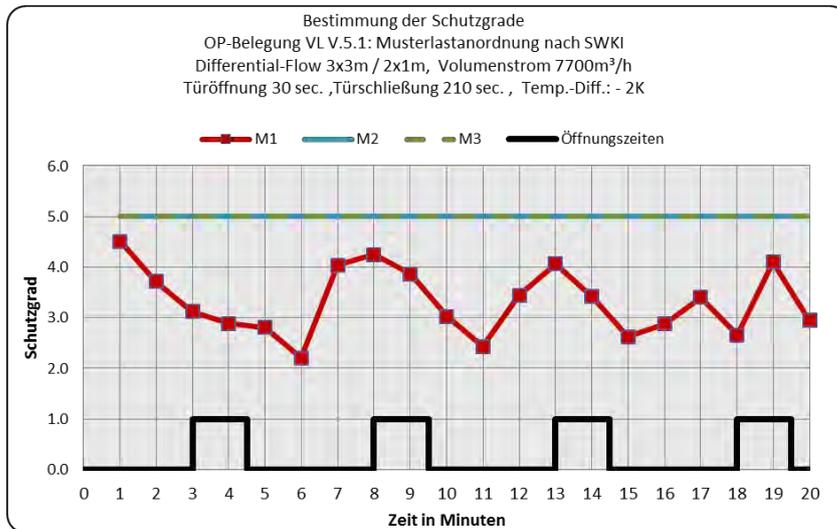


Abbildung 21: Schutzgrade bei Musterlast nach DIN 1946-4/ Swki 99-3 mit periodischer Türöffnung und OP-Untertemperatur gegenüber seiner Umgebung

2.9.5. Schlussfolgerungen

Die Versuche zeigten, dass die Schutzwirkung beim „optimierten TAV-Lüftungskonzept“ auch bei periodischer OP-Türöffnung noch das Niveau von >2.0 erreicht.

2.10. Untersuchung 8, Einfluss von Patienten-Wärmesystemen

Zusammenfassung

Bei Patienten-Wärmesystemen sind aus lufthygienischer Sicht zwei Grundvarianten zu unterscheiden: Beheizung mit Austritt von gefilterter Warmluft aus einer Patienten-Unterlage (im Folgenden „Warmluftheizsystem“ genannt) und elektrisch oder mit erwärmtem Wasser beheizte Unterlagen (im Folgenden „Warmflächenheizsystem“ genannt).

Es war unklar, ob sie die optimierte TAV-Lüftung negativ beeinflussen können. Im Rahmen der Abnahme eines umgerüsteten OP-Raumes mit einer TAV-Decke wurde zunächst ein Warmluftheizsystem untersucht. Dabei zeigten sich keine Verschlechterungen der Schutzgrade gegenüber den bei der Abnahme mit DIN/SWKI-Musterlast ermittelten Schutzgraden auf dem OP-Tisch. Im Labor-OP-Raum wurde zudem ein Warmflächenheizsystem unter praxisnahen Musterlastaufstellungen untersucht. Auch hier blieben die ermittelten Schutzgrade teilweise deutlich über dem Niveau von SG > 2. Dabei waren die niedrigsten Schutzgrade auf die bei den Versuchen verwendeten strömungsgünstigen OP-Leuchten zurück zu führen und nicht auf das Beheizungssystem.

Untersuchungskonzept

Nach der Abnahme eines OP-Raumes in einem Krankenhaus in den Niederlanden wurde die DIN/SWKI-Musterlastanordnung um ein Warmluftheizsystem für Unterlegdecken, einen Patienten und Anästhesietuch erweitert (Abbildung 22). Aus zeitlichen Gründen erfolgte nur eine Messung

Horw, 30. Juni 2012

Seite 40/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

der Schutzgrade für den Punkt M2 (OP-Tischmitte). Das TAV-Lüftungskonzept hatte die Merkmale: TAV-Decke: 3.2 x 3,2 m, Zuluftstrom: 7.900 m³/h, Differentialflow, Kernfeld mit ca. 1 K niedrigerer Zulufttemperatur als Randzone, Schürzenlänge ca. 5 cm, 2 OP-Leuchten mit strömungsundurchlässiger Kreisfläche, ca. 60 cm .

Im Labor OP-Raum wurde die DIN/SWKI-Musterlast ebenfalls um einen Patientendummy und ein Anästhesietuch erweitert. Als strömungstechnisches Äquivalent für ein Warmflächenheizsystem erfolgte die Patientendummy-Beheizung mit 200 W statt 100 W (siehe Abbildung 23).



Abbildung 22: Versuchsaufbau zur Schutzgradbestimmung bei Betrieb von einem Warmluftheizsystem zur Patientenwarmhaltung



Abbildung 23: Versuchsaufbau zur Schutzgradbestimmung bei Betrieb eines Warmflächenheizsystems zur Patientenwarmhaltung, simuliert durch eine hohe Beheizung vom Patientendummy (200 W).

Versuchsumfang

Das „optimierte TAV-Lüftungskonzept“ im Labor-OP hatte einem Zuluftvolumenstrom von 7.700m³/h und die umlaufende Schürze eine Länge von 20 cm.

Im Labor-Versuch wurden die installierten strömungsgünstigen OP-Leuchten mit und ohne Abdeckung einer grossen Platte (Durchmesser 73 bzw. 37 cm) betrieben, um den zusätzlichen Einfluss der OP-Leuchten Form festzustellen.

Ergebnisse

Die graphische Darstellung für alle untersuchten Patienten-Wärmesysteme ist in Abbildung 24 dargestellt. Für das Patienten-Wärmesystem mit Warmluftbetrieb (Modell 635) ergaben sich aus den Messungen im Krankenhaus-OP-Raum Schutzgrade auf Tischmitte (M2) von > 3. Das Heizsystem für den Oberkörper (Modell 522) erreichte noch höhere Werte.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 41/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Weiterhin ist zu erkennen, dass auch das im Labor nachgestellte Warmflächenheizsystem ein Niveau von $SG > 2$ übersteigt. Dabei ergeben sich die niedrigsten Werte für den OP-Betrieb mit stark strömungsungünstigen OP-Leuchten (Abdeckungsdurchmesser 70 cm).

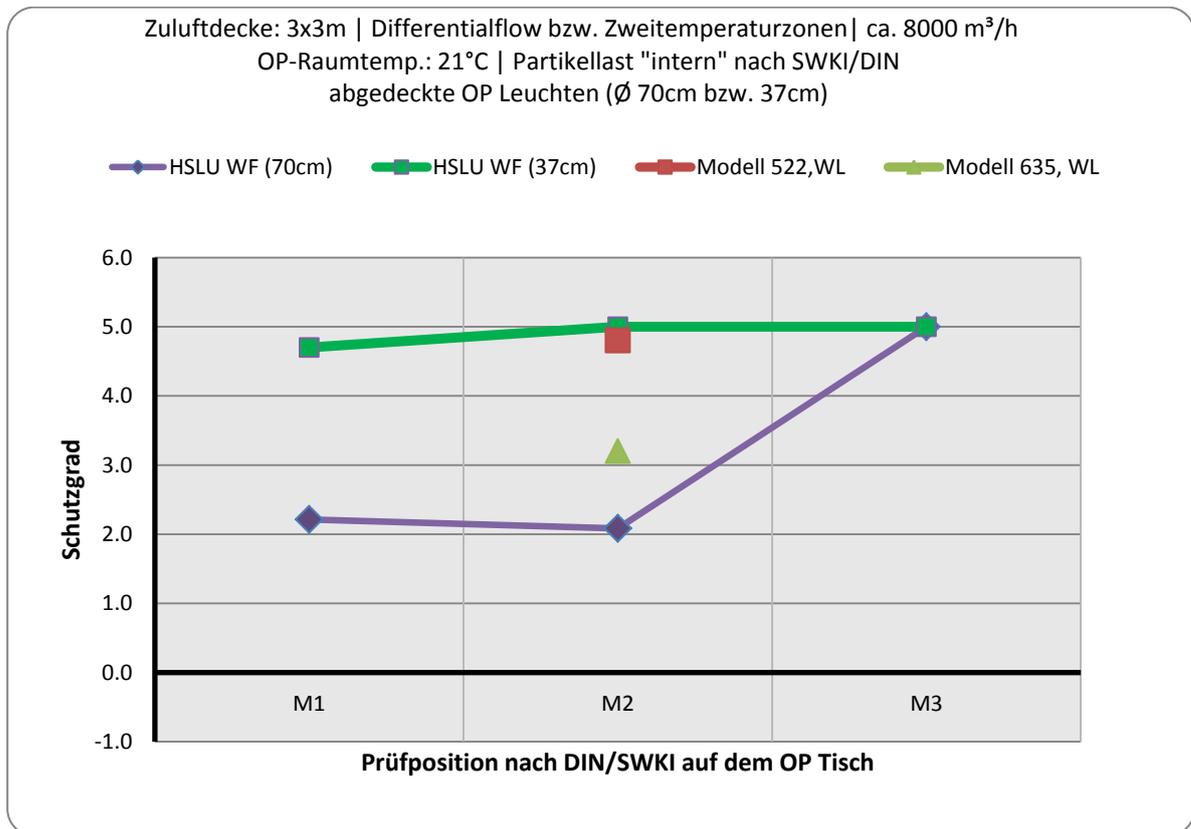


Abbildung 24: Schutzgrade bei TAV-Lüftung mit praxisnaher Musterlast und Patienten-Wärmesystem. Feldmessungen: Warmluftsystem (WL), Labormessungen: Warmflächensystem (WF) und Variation der OP-Leuchtengrösse (Leuchtenflächendurchmesser)

Schlussfolgerungen

Patienten-Wärmesysteme können keine Verschlechterungen der Schutzwirkung bei „optimierten TAV-Lüftungskonzepten“ verursachen.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 42/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

2.11. Untersuchung 10: Ausspülzeiten bei Mischlüftung und TAV-Lüftung

Zusammenfassung

Insbesondere für das Personal in OP-Räumen ist es von grosser Bedeutung, dass chirurgischer Rauch gut abgesaugt wird, da er gesundheitsgefährlich sein kann. Eine Absaugung ist nicht immer vollständig möglich, sodass der schnellen Verdünnung von chirurgischem Rauch durch das OP-Lüftungskonzept grosse Bedeutung zukommt. Die Verdünnungseffizienz von Lüftungskonzepten kann durch die sogenannte Erholzeit festgestellt werden, um eine Raumbelastung auf 1 % vom Anfangswert zu reduzieren. Diese Versuche wurden im Labor-OP-Raum durchgeführt, bei dem eine Mischlüftung mit Drallauslässen bzw. eine „optimierte TAV-Lüftung“ installiert war. Es zeigte sich, dass die Erholzeit bei TAV-Lüftung erheblich niedriger war als bei Mischlüftung. Das wird einerseits durch die Verdrängungs- statt Mischwirkung der Luft im Schutzbereich bei TAV-Lüftung erreicht und andererseits durch den viel höheren Umluftstrom als bei Mischlüftung, der durch die H 13 Filtrierung in der Regel alle gesundheitsgefährlichen Partikel abgeschieden kann.

Untersuchungskonzept

Im Labor-OP-Raum wurde der Partikelgenerator jeweils so eingestellt, bis sich auf dem OP-Tisch eine so hohe Partikelkonzentration einstellte, dass 1 % von diesem Wert noch deutlich über dem Niveau der Konzentration lag, die sich im OP ohne Betrieb der Partikelquelle einstellte (Sicherung des unteren Messbereiches). Während bei Mischlüftung der Konzentrationsanstieg nur von der eingestellten Partikelquellstärke abhängt, mussten bei dem optimierten TAV-Lüftungskonzept die installierten strömungsgünstigen OP-Leuchten über den Messpunkt M2 gestellt und strömungsundurchlässig abgedeckt werden, um die Partikelkonzentration auf dem OP-Tisch ansteigen zu lassen. Nach Erreichen von entsprechend hohen Partikelkonzentrationen auf dem OP-Tisch (Messpunkt 2) wurde der Partikelgeneration gestoppt und die Zeit ermittelt, um auf den 1 % Wert der Anfangskonzentration zu kommen.

Ausgewertet wurden Partikel ab einer Grösse von 0,3 μm nachdem nachgewiesen wurde, dass ab dieser Fraktion praktisch keine Penetration mehr durch die Filter erfolgte.

Versuchsumfang

Die Versuche wurden jeweils mit Volumenströmen für praxisübliche Auslegungen durchgeführt: bei Mischlüftung 2.400 m^3/h (ausgeführter OP), 3.600 m^3/h (OP-Labor) und bei TAV-Lüftung im OP-Labor mit 9.600 m^3/h .

Ergebnisse

In Abbildung 25 sind die Ergebnisse für einen OP-Raum mit Mischlüftung mit einer 12 fachen Luftwechselrate (2.400 m^3/h) im Vergleich zu den Ergebnissen für einen Raum mit TAV-Lüftung und 71 fache Luftwechselrate dargestellt. Hierbei ist die Luftwechselrate als das Verhältnis von Zuluftvolumenstrom zum Raumvolumen definiert. Es ergeben sich Erholzeiten von 20 bzw. 2 Minuten.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 43/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

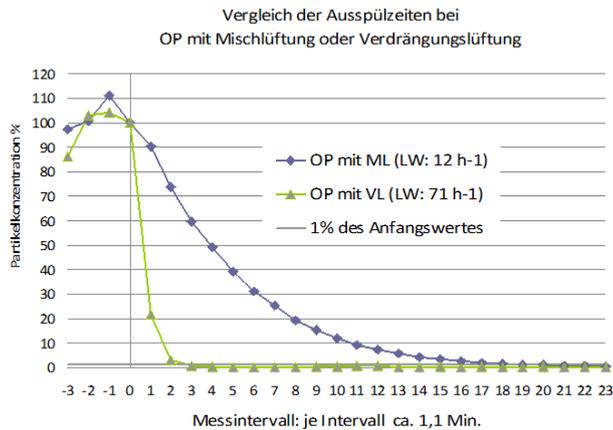


Abbildung 25: Erholzeiten von Luftverunreinigungen im Schutzbereich bei Mischlüftung und TAV-Lüftung (Beispielfälle). Die Verunreinigung des Schutzbereiches wurde bei TAV-Lüftung durch strömungsungünstig geformte OP-Leuchten provoziert.

Abbildung 25 zeigt die Partikelkonzentration im Messpunkt M2 über dem zeitlichen Verlauf im leeren Labor-OP-Raum bei Mischlüftung beim Volumenstrom von $3.600 \text{ m}^3/\text{h}$. Zusätzlich ist im Bild der theoretische Verlauf der Erholzeit bei idealer Mischlüftung und $3.600 \text{ m}^3/\text{h}$ gemäss Gleichung 1 dargestellt (siehe [SIA 382-1, 2007]).

$$C_{\text{RAL},t} = C_{\text{RAL},0} * e^{(-q_{\text{ZUL}} / V_{\text{R}} * t)}$$

Gl. 1

mit:

- $C_{\text{RAL},t}$: Konzentration im Raum zur Zeit t
- $C_{\text{RAL},0}$: Konzentration im Raum zur Zeit t = 0
- q_{ZUL} : Zuluftstrom
- V_{R} : Raumvolumen
- t : Zeit

Der Verlauf der Kurvenzüge ist fast deckungsgleich, woraus geschlossen werden kann, dass im untersuchten Labor-OP-Raum praktisch eine ideale Mischlüftung vorlag.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 44/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

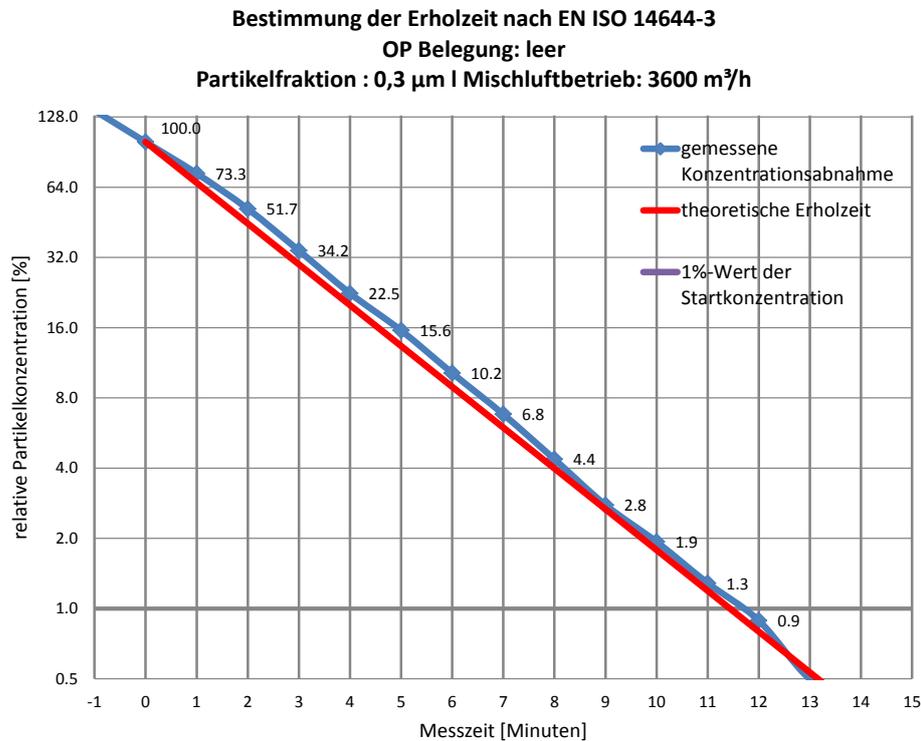


Abbildung 26: Gemessene und berechnete Erholzeiten bei OP mit Mischlüftung, Luftwechselzahl LW = 35 h⁻¹

Schlussfolgerungen

Verglichen mit den Erholzeiten bei Mischlüftung, die bei üblichen Auslegungen 15 – 20 Minuten betragen, können die Ausspülzeiten bei TAV-Lüftung konzeptbedingt nur ein Zehntel davon sein. Bei optimierter TAV-Lüftung mit strömungsgünstig geformten OP-Leuchten kann das OP-Team im Schutzbereich schon absolut mit niedrigeren Luftbelastungen rechnen, wie die guten Schutzgrad-Werte aus den schon beschriebenen Messungen zeigen.

2.12. Untersuchung 11: Schutzwirkung bei Schichtlüftung

Zusammenfassung

Während es bei Mischlüftung nur möglich ist, überall eine einheitliche Luftqualität im Raum zu erhalten, kann durch Schichtlüftung in der Aufenthaltszone eine bessere Luftqualität und niedrigere Raumlufttemperatur erreicht werden, wenn man die Zuluft erdbodennah, impulsarm und gefiltert in den Raum einbringt. Ein derartiges Lüftungskonzept wurde im Labor-OP-Raum experimentell untersucht, um vergleichbare Ergebnisse mit anderen Lüftungskonzepten zu erhalten.

Raumseitig bestand das Lüftungssystem aus vier bodenständigen ¼ - kreisförmigen Raumeckauslässen mit H13-Filtern und mit zweiseitig angeordneten, deckennahen Abluftöffnungen

Horw, 30. Juni 2012

Seite 45/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

(Zuluftstrom bis $2900 \text{ m}^3/\text{h}$). Zur Bestimmung der Wirksamkeit der Luftschichtung wurden die Partikelausströmer entgegen der üblichen bodenständigen Anordnung in eine Höhe von 2 m versetzt, um so abwärts gerichtete, also vermeintlich belastete Luftströme zu markieren. Der Verbleib der Ausströmer auf dem Erdboden würde die „saubere“ Zuluft aus den Durchlässen markieren und somit keine vergleichbaren Ergebnisse liefern. Es zeigte sich, dass die so erreichten Schutzgrade den Wert von 2 erreichten. Die Schichtlüftung kann also noch ca. 100 fach bessere Luftqualität auf dem OP-Tisch erreichen als Mischlüftung mit gleichem Zuluftstrom.

Im Vergleich zur TAV-Lüftung sind jedoch auch die möglichen Verunreinigungsquellen in der Aufenthaltszone zu berücksichtigen. Partikelmessungen auf dem OP-Tisch ohne den Betrieb des Partikelgenerators ergaben Schutzgradwerte von 3 – 4. Die gefilterte Zuluft aus den Luftdurchlässen erfuhr demnach beim Strömen über den Boden eine geringe Verunreinigung.

Bekanntlich ist Schichtlüftung empfindlich gegen lufttechnische Verbindungen mit angrenzenden Räumen, wenn diese eine andere Temperatur aufweisen. Der diesbezüglich durchgeführte Versuch mit periodischen Türöffnungen ergab, dass sich die Schutzgrade auf dem OP-Tisch von 2 auf 1 verschlechterten.

Untersuchungskonzept

Beim Labor-OP-Raum wurde die TAV-Decke verschlossen und vier bodenständige $\frac{1}{4}$ - kreisförmige Raumeckauslässe mit H13-Filtern installiert und an das Lüftungssystem angeschlossen. Die Abluftöffnungen in der Decke bestanden aus zwei länglichen Öffnungen.

Die Musterlastanordnung nach DIN/SWKI wurde beibehalten und strömungsgünstige OP-Leuchten verwendet. Die 6 Partikelausströmer wurden in eine Höhe von 2 m über Fussboden versetzt, wobei die Anordnung der Simulation von „Lasteintrag von aussen“ gemäss DIN/SWKI entsprach.

In Abbildung 27 ist der Gesamtaufbau zu erkennen.

Versuchsumfang

Die Versuche wurden mit einem Zuluftstrom von 2600 und $2900 \text{ m}^3/\text{h}$ durchgeführt, wobei der überströmende Luftstrom jeweils $240 \text{ m}^3/\text{h}$ betrug. Die thermischen Raumlasten ergaben sich aus den Wärmeabgaben der installierten Musterlasten. Bei einem Versuch mit 4 weiteren Dummies, aufgestellt im Raumhintergrund, betrug die Gesamtlast 2.180 W.

Die Versuchsreihen beinhalteten die Variation des Zuluftstromes, der Ausströmerorte (erdbodennah, in 2 m Höhe), thermischen Last und die Messung des Einflusses von Türöffnungen.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 46/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II



Abbildung 27: Versuchsaufbau beim OP-Lüftungskonzept „Schichtlüftung“ mit hochgestellten Partikel ausströmern.

Ergebnisse

Zunächst sind in Abbildung 28 die für Schichtlüftungen charakteristischen Temperaturen im Raum dargestellt. Die zeitlichen Verläufe zeigen zunächst einen ausreichenden Beharrungszustand bei den Messungen. Aus der Lage der Temperatur für die Aerosolquelle ist gezeigt, dass sie isotherm bezogen auf ihre Höhenlage freigesetzt wurde (keine thermische Beeinflussung). Die übrigen Linien zeigen die für Schichtlüftung typische Temperaturdifferenz zwischen der Zuluft und Abluft.

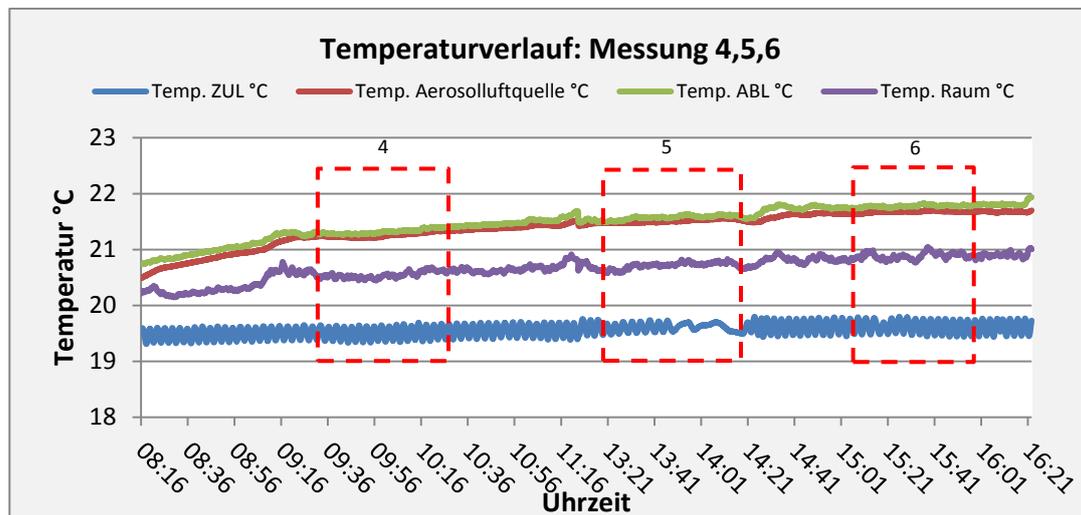


Abbildung 28: Charakteristische Temperaturen bei Schichtlüftung: Lage, zeitlicher Verlauf bei den Versuchen

Abbildung 29 zeigt den Verlauf der Schutzgrade bei Schichtlüftung über der Raumhöhe und hochgestellten Ausströmern. Folglich sind die Werte im oberen Raumbereich am niedrigsten und steigen mit zunehmender Nähe zum „Frischluffsee“ in Fussbodennähe. Sie verbleiben bei diesem Versuch bei ca. 1.7 in der Höhe vom OP-Tisch. Daraus kann abgeleitet werden, dass es durch

Horw, 30. Juni 2012

Seite 47/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Rückströmungen von belasteter Raumluft aus dem oberen Bereich zu einer Verunreinigung der gefilterten Zuluft bis auf OP-Tisch-Niveau kommt. Analoge Ergebnisse zeigten sich bei allen anderen Versuchen mit Variation des Zuluftstromes, der Raumlast und der Drehung der Musterlastanordnung um 90°.

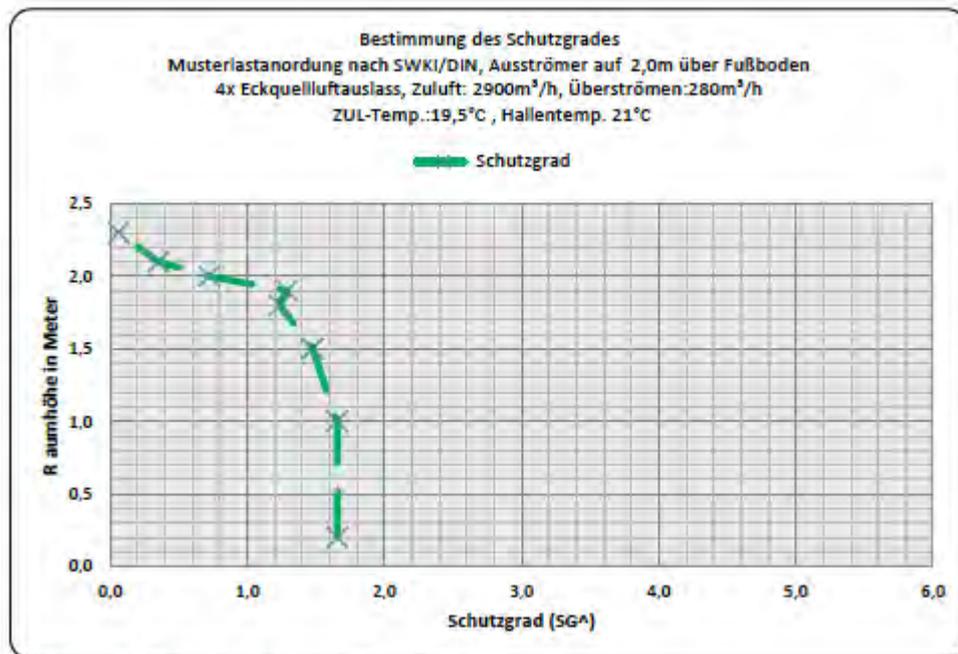


Abbildung 38: Konzentration über die Raumhöhe

Abbildung 29: Schutzgrade über der Raumhöhe bei Schichtlüftung und Partikelquellenaufgabe in 2 m Raumhöhe.

Diese Ergebnisse entsprachen auch den Beobachtungen von Strömungsvisualisierungen aus denen zu erkennen war, dass sich das Übergangsgebiet vom partikelarmen Zuluftgebiet zum partikelstark belasteten darüber liegenden Gebiet nach unten verschiebt, wenn die Summe der Auftriebsvolumenströme steigt und/oder der Zuluftstrom sinkt.

Abbildung 30 zeigt eine Gesamtübersicht der Schutzgrade auf dem OP-Tisch für Mischlüftung und Schichtlüftung. Die unterschiedlichen Lagen der Schutzgrade (Linienverbindung zur besseren Lesbarkeit) ergeben sich aus der Variation der Partikelaufgaben (Orte und Stärken). Wendet man das Verfahren zur Schutzgradbestimmung nach DIN/SWKI an (Partikel ausströmung vom Fussboden aus), liegen die Schutzgrade bei beiden Lüftungskonzepten unter Null, da die Zuluftströme geringer sind als beim Norm-Referenzfall (10.000 m³/h), der bei der Schutzgradbestimmung zugrunde gelegt ist. Markiert man durch Anhebung der Ausströmer nur die abwärtsgerichtete Raumluft bei Schichtlüftung, ergeben sich Schutzgrade von 2. Ohne Markierung der Raumluft durch eine aufgeprägte Partikelquelle wird die gefilterte Zuluft beim Aufströmen in den OP-Tischbereich noch mit Partikeln aus dem Raum belastet. Dies führte zu einem Schutzgrad von ca. 3,5.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 48/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

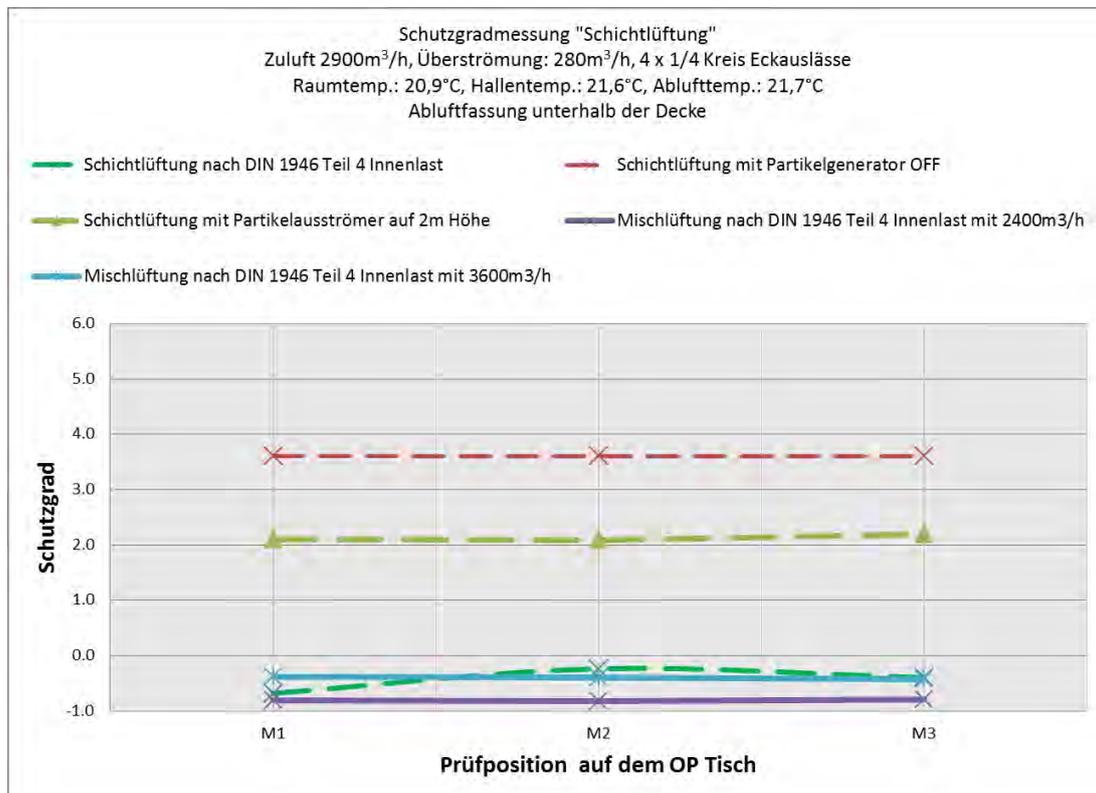


Abbildung 30: Schutzgrade auf dem OP-Tisch bei Variation der Partikelquelle bei Schichtlüftung und Mischlüftung

Bei der Ausstattung des OP-Raumes mit Schichtlüftung wurde auch ein Versuch mit periodischer (Schiebe-)Türöffnung durchgeführt, siehe dazu die Ergebnisse in Abbildung 31. Aus dem Verlauf der Schutzgrade bei der Anordnung der Partikelauströmer in 2 m Raumhöhe ist zu erkennen, dass sich dabei der Schutzgrad auf dem OP-Tisch an der türabgewandten Seite (Messpunkt 3, Fussende) am stärksten veränderte. Diese Beeinflussung ist erklärbar mit dem Ausbreitungsverhalten der bei Türöffnung in den OP einströmenden Hallenluft, die zunächst erdbodennah bis zur gegenüberliegenden Raumseite strömt und dann dort in grösserer Höhe zurück in Richtung OP-Tisch fliesst. Dadurch sinkt der Schutzgrad von bisher knapp 2 auf ca. 1 am Fussende des OP-Tisches ab.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 49/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

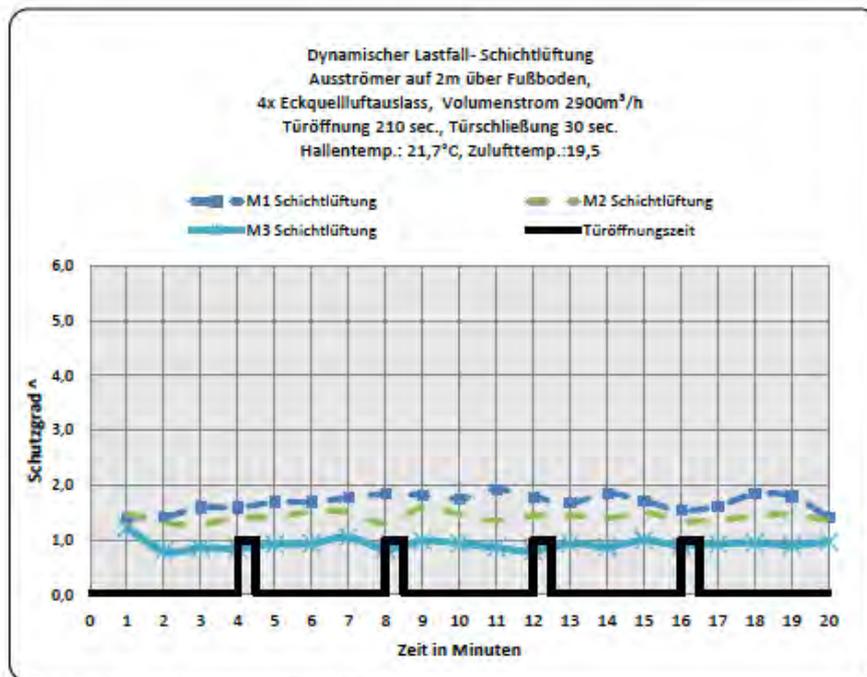


Abbildung 43: Türöffnungsversuch bei Schichtlüftung

Abbildung 31: Schichtlüftung: Schutzgradbeeinträchtigung auf dem OP-Tisch durch periodische Türöffnungen

Schlussfolgerungen

Die Versuche des Labor-OP-Raumes mit Schichtlüftung zeigten, dass eine gegenüber der Mischlüftung deutlich verbesserte Luftqualität auf OP-Tischhöhe zu erreichen ist. Voraussetzung ist allerdings, dass im praktischen Betrieb keine Luftverschmutzungen im unteren Raum bis Tischhöhe generiert werden. Die können bei Schichtlüftung nicht sicher aus dem Schutzbereich herausgehalten werden. Das ist nur mit einer optimierten TAV-Lüftung möglich. Ein Vorteil der Schichtlüftung ist zudem, dass sie keine Leegebiete an umströmten Gegenständen erzeugen kann, was wiederum ein negatives Merkmal der TAV-Lüftung ist. Strömungstechnisch ungünstig geformte OP-Leuchten können daher eine gute TAV-Lüftung zunichtemachen, während eine Schichtlüftung unabhängig von der Art der OP-Leuchtenform funktioniert. Sie kann wiederum keine Zuluftqualität im Schutzbereich vom Niveau einer guten TAV-Lüftung erreichen.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 50/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

2.13. Sy k „ p TAV-Lü k p ch „G G II“

Im Kap. 2.2.2 wurden die strömungstechnisch optimalen Systemmerkmale für einen OP-Raum mit TAV-Lüftungskonzept zusammengetragen, die sich aus dem ersten Forschungsvorhaben GiG I ergeben haben. Diese Merkmale sind aufgrund der Erkenntnisse aus dem Vorhaben GiG II nun wie folgt verbesserbar (Hinweis: Die Erkenntnisse vom TP 2 sind hier ebenfalls schon berücksichtigt):

Ein TAV-Lüftungskonzept für OP-Räume zeichnet sich durch folgende Hauptmerkmale aus:

- TAV-Feld: mind. $3 \times 3 \text{ m}^2$, Ausstr mprofil „Differentialfow“, d.h. Kerngebiet (z.B. $2 \times 1 \text{ m}^2$) mit ca. doppelt so hoher Austrittsgeschwindigkeit als beim umlaufenden Randgebiet. Austrittsgeschwindigkeit beim Kernfeld mind. 0.35 m/s. Während der Luftstrom vom Kerngebiet die Aufgabe der Ausspülung des zentralen OP-Gebietes erfüllt sorgt die gefilterte Zuluft aus dem Randgebiet für eine minimale Verringerung der Schutzbereichsgrösse.
- Umlaufende Strömungsschürze mit einer Länge von ca. 0,2 m - 0,4 m ab Deckenunterkante. Grössere Schürzenlängen sind in der Regel erforderlich, wenn die Umluft (Rückluft) in Deckennähe statt in Fussbodennähe abgesaugt wird.
- Abströmöffnungen für den Aussenluftanteil am Zuluftstrom in Deckennähe, vorzugsweise auf zwei gegenüberliegenden Seiten.
- Abströmöffnungen für Umluftstrom: gleichmässig in Fussbodennähe an zwei sich gegenüber liegenden Wänden.
- OP-Leuchten mit nachgewiesener strömungsgünstiger Bauform (luftdurchlässig gestaltet).
- Deckenversorgungseinheiten sind vorzugsweise mit einer Strömungsblende am Eintrittsort zum Schutzbereich auszustatten, um den Luftverbindungsweg vom Aussenbereich in den Schutzbereich zu minimieren.

Der Einfluss der zur Anwendung kommenden OP-Leuchten ist noch erheblich, da derzeit noch sehr wenig Hersteller strömungsgünstige OP-Leuchten anbieten.

Bei dem oben beschriebenen TAV-Lüftungskonzept ist der Einfluss von medizintechnischen Geräten, wie in den Schutzbereich einschwenkbare Deckenversorgungseinheiten und bodenständige C-Bögen, so gering geworden, dass noch eine gute Schutzwirkung (SW) erreicht werden kann ($SW \geq 2$).

Der viel höhere Lüftungsvolumenstrom beim TAV-System gegenüber einer Mischlüftung führt zu einer insgesamt niedrigeren Konzentration von Luftverunreinigungen. Prinzipiell ist dadurch auch der Schutz von Material, dass nicht mehr im Schutzbereich steht, höher als bei einer Mischlüftung.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 51/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

3. Teilprojekt 2: Prüfausrüstungen, Betrieb bei OP-Abteilungen

3.1. Zielsetzung

Hauptziele beim Teilprojekt 2 waren zum einen die Überprüfung von Teilaspekten zum Prüfverfahren und zu Prüfausrüstungen für die Schutzgradbestimmung sowie die Herstellung einer sehr genauen und langzeitstabilen Partikelauflageausrüstung, um sie als Referenzanlage für gewerblich hergestellte Systeme verwenden zu können.

Zum anderen sollte das in der Projektlaufzeit gesammelte Wissen und die Betriebserfahrungen zusammen getragen werden, um Hinweise für die Betriebsoptimierung von Lüftungs- und Heizungsanlagen bei OP-Abteilungen zu dokumentieren.

3.2. Untersuchung 1, Mischlüftung: Einfluss von Musterlasten bei der Erholzeit-Bestimmung

3.2.1. Zusammenfassung

Bei der Bestimmung der Erholzeiten bei OP-Räumen mit Mischlüftung wurden Versuche mit und ohne Anwesenheit von grossvolumigen, mobilen Teilen im Raum durchgeführt. Dabei zeigte sich erwartungsgemäss, dass sich die Erholzeiten verringern, wenn das Raumvolumen durch individuelle Bauteile verkleinert wird. Die Raumreduktion betrug z.B. durch die Installation von 9 Dummies ca. 3 % und bewirkte eine Zeitreduktion von 19 %. Bei der Bestimmung der Erholzeiten als gültige Raum-Lüftungskenngrösse ist demnach darauf zu achten, dass keine mobilen Bauteile im Raum verbleiben.

3.2.2. Untersuchungskonzept

Im Labor-OP mit Mischlüftung wurden die Erholzeiten im leeren und im mit vielen Musterlasten gefüllten Raum ermittelt. Aus dem Vergleich der Zeiten konnte auf den Einfluss der Musterlasten geschlossen werden. Wegen der Raumauffüllung wirken sie sich verkürzend auf die Erholzeit aus. In Abbildung 32 ist der Labor-OP-Raum mit hoher Musterlastdichte zu erkennen. Die Messungen erfolgten unter Beachtung der Angaben in [EN 14644-3, 2006].



Abbildung 32: OP-Raum mit Mischlüftung und hoher Musterlastbelegung

Horw, 30. Juni 2012

Seite 52/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

3.2.3. Versuchsumfang

Es wurden Versuche mit einem Zuluftstrom von 3.600 m³/h (entspricht LW 25) ohne und mit hoher Musterlastausstattung durchgeführt.

3.2.4. Ergebnisse

Abbildung 33 zeigt den Verlauf der Konzentrationsabnahmen für den leeren und gefüllten OP-Raum und es ist zu erkennen, dass sich die Erholzeiten deutlich verringern, wenn das Raumvolumen durch Musterlasten verkleinert wird. Hier betrug die Raumreduktion durch 8 Dummies und einem Anästhesiegeräte-Dummy ca. 3 % (3 m³/140 m³). Sie bewirkte eine Zeitreduktion von 19 %. ((14 - 11,4)min/14 min).

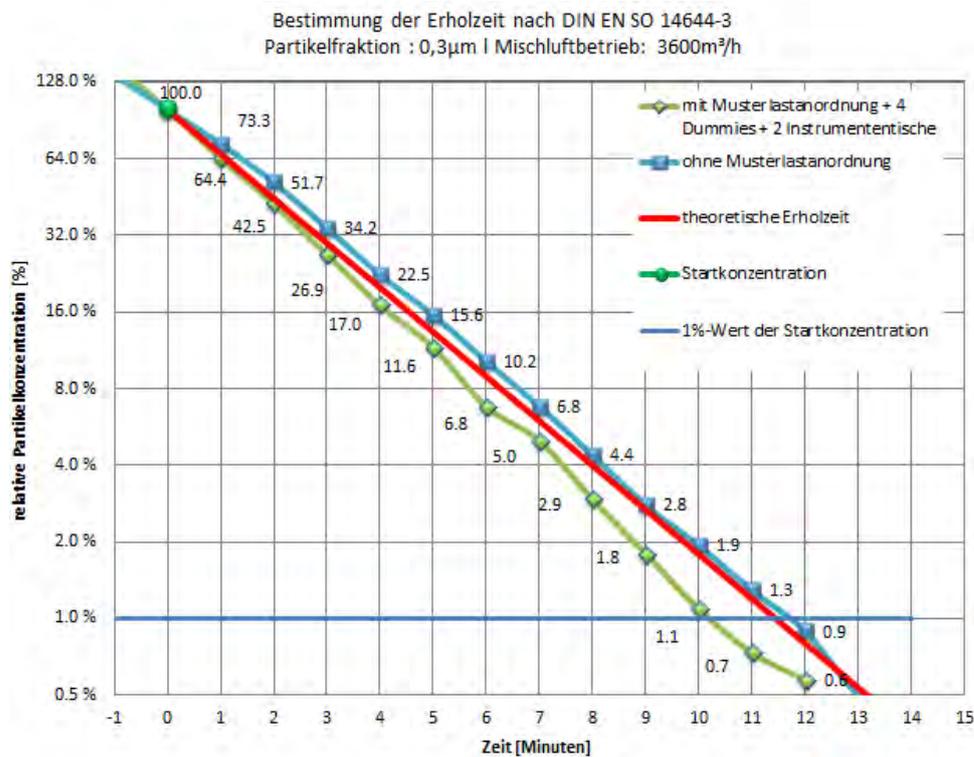


Abbildung 33: OP-Raum mit Mischlüftung: Erholzeiten für leeren und mit Musterlasten gefüllten OP-Raum

3.2.5. Schlussfolgerungen

Bei der Bestimmung der Erholzeiten im Rahmen der Abnahme von OP-Räumen mit Mischlüftung ist es wesentlich, dass sich keine zusätzlichen grossvolumigen Gegenstände als die festinstallierten im Raum befinden.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 53/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

3.3. Untersuchung 2, TAV-Lüftung: Einfluss von Patientendummy und Partikelauflageort

3.3.1. Zusammenfassung

Immer wieder wird bei der Erläuterung des Abnahmeverfahrens gefragt, ob ein Patientendummy einen Einfluss auf die Messergebnisse hat und ob eine Reduktion des messtechnischen Aufwandes durch Verminderung der 6 Partikelauströmer auf einen, der unter dem OP-Tisch angeordnet ist, möglich ist. Aus den hierzu durchgeführten Versuchsreihen ist erkennbar, dass ein Patientendummy so lange keinen Einfluss auf die Messergebnisse hat, wie die TAV-Strömung eine stabile Verdrängungswirkung aufweist, indem strömungsgünstige OP-Leuchten verwendet werden.

Wenn sich durch ungünstige OP-Leuchten niedrige Schutzgrade ergeben (d.h. hoher Partikeleintrag in den Schutzbereich) verschlechtern sich die Messwerte durch „Anheben“ der Partikelmesssonde in Richtung der Nachlaufgebiete der OP-Leuchten durch den aufliegenden Patientendummy noch weiter. Zudem zeigte sich, dass es dann unerheblich ist, ob nur zwei Partikelauströmer in die Nähe der OP-Dummies versetzt sind (wie beim DIN/SWKI-Prüfverfahren angegeben) oder sich alle 6 unter dem OP-Tisch befinden.

3.3.2. Untersuchungskonzept

Je höher sich der Messpunkt zur Absaugung der Partikel im Schutzbereich befindet, je höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass er sich im Nachlaufgebiet von OP-Leuchten befindet, wo erhöhte Partikelkonzentrationen vorliegen. Daher ist eine Verschlechterung der Schutzgradwerte möglich, wenn sich ein Patienten-Dummy auf dem OP-Tisch befindet. Denn durch ihn werden die Messpunkte angehoben.

Alle Versuche wurden mit einer aufgeständerten Saugöffnung für die Partikelzählung durchgeführt, die sich jeweils ca. 10 cm über der Tisch- bzw. Patienten-Dummy-Oberfläche befand.

Der Patientendummy hatte eine Heizleistung von 100 W. Er wurde mit einem OP-Tuch abgedeckt.

Die OP-Leuchten wurden nach Position und Form variiert.

Auch die umlaufenden Schürzen wiesen versuchsweise verschiedene Längen auf.

Die Partikelauströmer wurden zunächst gemäss DIN/SWKI „Innenlast“ positioniert und im Weiteren alle unter den OP-Tisch verschoben (s. Abbildung 34). Damit sollte geprüft werden, ob eine Veränderung der Schutzgrade erfolgt, wenn eine noch höhere Partikellastquelle im Inneren vom Schutzbereich generiert wird.

Der Zuluftstrom beim „optimierten TAV-Lüftungskonzept“ betrug bei allen Versuchen $7.700 \text{ m}^3/\text{h}$.

3.3.3. Versuchsumfang

(Versuchsreihe „VL2“): Zunächst wurde der Einfluss vom Patientendummy zusätzlich zur sonst unveränderten DIN/SWKI-Musterlastanordnung untersucht. Dabei wurden strömungsgünstig OP-Leuchten verwendet, nicht abgedeckt und befanden sich seitlich am Tisch über den OP-Dummies (wie bei der Musterlastanordnung vorgesehen). Bei aufgelegtem Patientendummy wurde die Schürzenlänge von 1 m auf 0,4 m variiert.

(Versuchsreihe „VL3“): Bei dieser Versuchsreihe erfolgte das wiederum fallweise das Auflegen des Patienten-Dummy, eine Variation der Schürzenlänge: 1,0m, 0,4m und 0,2 m und eine Variation der Partikelauströmer-Positionen. Sie variierte von der Anordnung gemäss DIN/SWKI „intern“ (= zwei Ausströmer in der Nähe der OP-Team-Dummies) bis zur Anordnung von allen 6 Partikelauströmern unter den OP-Tisch. Bei dieser Versuchsreihe waren zudem die OP-Leuchten

Horw, 30. Juni 2012

Seite 54/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

über die Position M2 (Tisch-Mitte) verschoben und mit einer Platte (37 cm Durchmesser) abgedeckt, um sie strömungsgünstig zu machen. Damit sollte ein grosses Nachlaufgebiet unter den OP-Leuchten provoziert werden.

3.3.4. Ergebnisse

Die festgestellten Schutzgrade für die Versuchsreihe VL2: Abnahmeverfahren nach DIN/SWKI mit/ohne Patienten-Dummy, strömungsgünstige OP-Leuchten und Variation der Schürzenlänge sind in Abbildung 34 dargestellt.

Zu erkennen ist, dass der Patienten-Dummy keinen Einfluss auf die Schutzgrade hat, wenn das TAV-Feld mit einer kurzen Strömungsschürze betrieben wird. Ist die Strömungsschürze hingegen so lang, dass die OP-Leuchten noch in ihrem Bereich liegen, werden offensichtlich die Nachlaufgebiete hinter den Leuchten verstärkt, wodurch sich die Schutzgrade auf Patienten-Dummy-Niveau vom Wert SG = 5 auf den Wert SG = 3 verschlechtern.

Die grosse Schürzenlänge bewirkt demnach eine spätere Möglichkeit der Kernströmung zur Richtungsänderung zu den Seiten. Dadurch werden die Nachlaufgebiete unnötig verlängert.

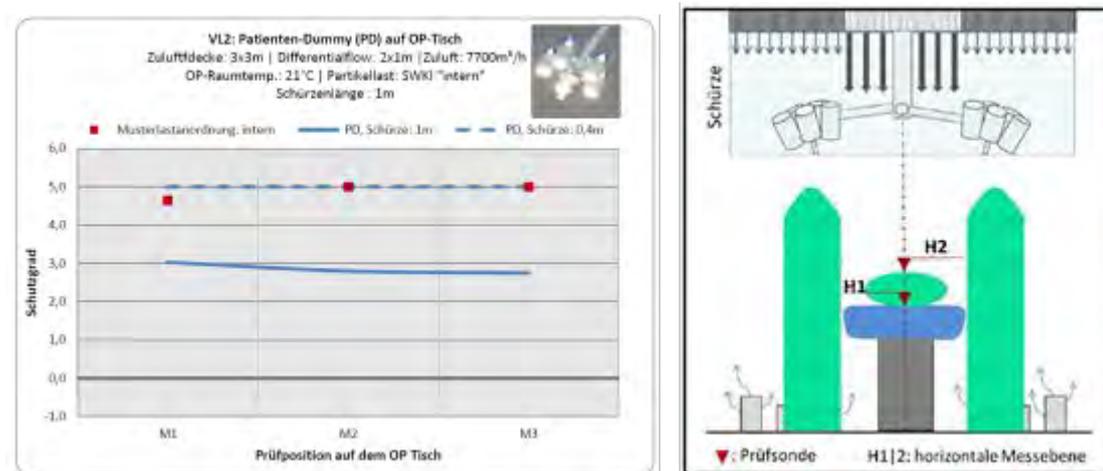


Abbildung 34: Schutzgrade nach DIN/SWKI ohne und mit Patienten-Dummy und verschiedenen Schürzenlängen

Ähnliche Ergebnisse zeigen die Schutzgradmessungen der Versuchsreihe VL3: mit/ohne Patienten-Dummy, strömungsgünstig geformten OP-Leuchten über M2 und Variation der Schürzenlänge. Die Versuchsmatrix ist in Abbildung 35 aufgeführt und die Ergebnisse in Abbildung 36 dargestellt.

Hier ist zu erkennen, dass die Schutzgrade bei Versuchen ohne OP-Dummy durchweg von hohem Niveau sind und sich nur bei Verlängerung der Strömungsschürze verschlechtern. Zusätzlich werden bei langer Strömungsschürze die Schutzgrade graduell schlechter, wenn alle Partikelströmer unter dem OP-Tisch angeordnet sind, statt nur 2 im Schutzbereich.

Verlagert sich durch das Auflegen vom Patienten-Dummy der Partikelmessort in das Nachlaufgebiet der OP-Leuchten, sind die Schutzgrade allesamt schlecht. Dann ist auch kein Einfluss mehr zu erkennen von der Länge der Strömungsschürze oder der Art der Partikelauflage.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 55/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Versuchsmatrix				Randbedingungen: Zuluftdecke: 3.2 x 3.2 m ² , Differenzialflow: 2 x 1m ² , Zuluft: 7700m ³ /h strömungstechnisch geschlossene OP-Leuchten über M2
Versuchsnummer	Patienten-Dummy [x] ja [-] nein	Schürzenlänge [m]	Lastaufgabeort	
Lastaufgabeort: [i]:gemäss DIN/SWKI intern [u]: alle Ausströmer unter OP-Tisch				- Variation der Schürzenlänge: 0.2 - 0.4 - 1.0m - Partikellasteintrag: gemäss DIN/SWKI "intern" bzw. alle Ausströmer unter OP-Tisch 
N°3.1	-	0.2	i	
N°3.2	-	0.2	u	
N°3.3	-	0.4	i	
N°3.4	-	0.4	u	
N°3.5	-	1	i	
N°3.6	-	1	u	
N°3.7	x	0.2	i	
N°3.8	x	0.2	u	
N°3.9	x	0.4	i	
N°3.10	x	0.4	u	
N°3.11	x	1	i	
N°3.12	x	1	u	

Abbildung 35: Versuche mit Variation von Patienten-Dummy, Schürzenlänge und Partikellastaufgabeort

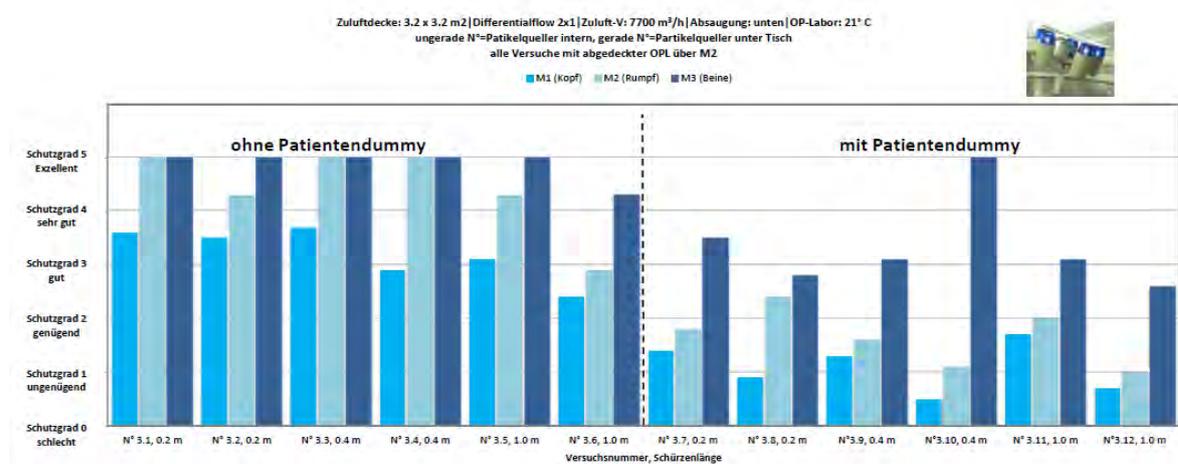
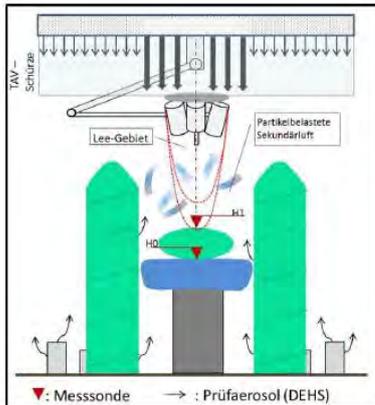


Abbildung 36: Versuchsergebnisse ohne und mit Patienten-Dummy sowie Variation von Schürzenlänge und Partikellastaufgabeort

Horw, 30. Juni 2012

Seite 56/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II



3.3.5. Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich ein „optimiertes TAV-Lüftungskonzept“ neben den in Kapitel 2.2.2 aufgeführten Merkmalen durch kurze Strömungsschürzen auszeichnet (geringer als 0,4 m).

Bei gleichzeitig installierten strömungsgünstigen OP-Leuchten kann der versuchstechnische Aufwand für die Abnahme der Systeme ohne Patientendummy, also nach den Angaben gemäss DIN 1946-4/SWKI 99-3 durchgeführt werden.

Will man jedoch den Einfluss von langen Strömungsschürzen und strömungungünstigen OP-Leuchten ermitteln, sollten sich die Messsonden auf dem OP-Tisch in einer Höhe von ca. 40 cm über der Tischebene befinden oder ein Patientendummy installiert sein.

3.4. Untersuchung 3: Validierung eines kommerziell hergestellten Partikelverteil-Systems

3.4.1. Zusammenfassung

Das von einem Projektpartner schon beim ersten Teil F&E-Vorhaben GiG entwickelte Aerosolverteil- und Verdünnungssystem wurde im OP-Versuchsraum umfassend validiert. Dabei zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung der Gerätemerkmale mit den Erfordernissen für eine zuverlässige und langzeitstabile Erzeugung, Verteilung und Messung der Partikelquellstärke zur Durchführung von Schutzgradmessungen nach DIN 1946-4, Anhang C. neben der Normenkonformität wurde das Gerät auf nutzerfreundliche Handhabung und einfachen mobilen Einsatz abgestimmt.

3.4.2. Untersuchungskonzept

Die Aufgabe vom Aerosolverteil- und Verdünnungssystem ist das Messen und Überwachen einer vorgegebenen Partikelproduktionsrate (Quellstärke) und die gleichmässige Verteilung des Aerosols auf 6 Ausströmer. Dazu ist der von einem Aerosolgenerator erzeugte Partikelstrom mit partikelfreier Luft ideal zu mischen und der so erhaltene Misch-Aerosolstrom gleichmässig auf die angeschlossenen Ausströmer zu verteilen. Zudem ist zur Systemeinstellung die Entnahme einer Misch-Aerosolprobe erforderlich. Das untersuchte Gerät (ADD 536, Fa. Topas) verfügt zudem über eine eingebaute Verdünnungsstufe, um die Misch-Aerosolprobe direkt an einen Partikelzähler

Horw, 30. Juni 2012

Seite 57/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

anschliessen zu können. Für die Validierung des Gerätes ergibt sich dann ein Ermittlungsbedarf von Einzelvolumenströmen und Partikelkonzentrationen wie sie in Abbildung 37 dargestellt sind. Die Werte und Betriebsstabilitäten sind mit den Erfordernissen gemäss DIN 1946-4 für die Durchführung einer Abnahme nach der Schutzgradmethode zu vergleichen.

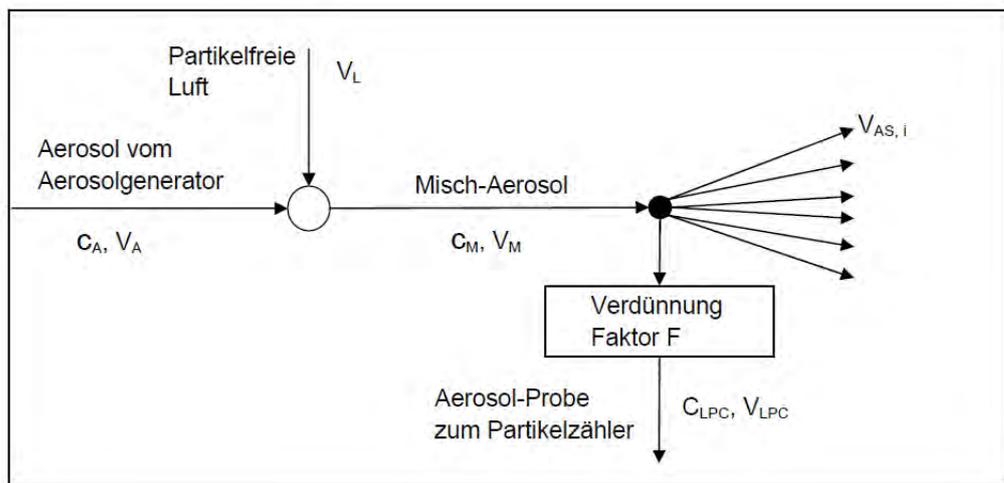


Abbildung 37: Partikelbilanz ADD 536: Volumenströme V und Konzentrationen c

3.4.3. Versuchsumfang

Die Validierung des ADD 536 wurde anhand der folgenden Merkmale vorgenommen:

- Gleichmäßigkeit der Verteilung des Aerosolvolumenstroms auf die 6 Ausströmer
- Impulsanteil der Ausströmung aus den Ausströmern zur Strömung in der Umgebung
- Übereinstimmung des Volumenstromes an partikelfreier Verdünnungsluft mit dem nominalen Wert (Angabe im Kalibrierzertifikat)
- Übereinstimmung des Verdünnungsfaktors der geräteinternen Verdünnung mit dem nominalen Wert (Angabe im Kalibrierzertifikat)
- Zeitliche Konstanz des Verdünnungsfaktors F der internen Verdünnung.

3.4.4. Ergebnisse

Die Ergebnisse sind detailliert im Validierungsbericht vom 26. 01. 2010 dargestellt [/lit/](#).

Insgesamt konnte nachgewiesen werden, dass alle relevanten Merkmale vom Gerät den Erfordernissen für eine betriebsstabile Erzeugung und Verteilung eines Partikel-Quellstromes zur Durchführung einer Schutzgradmessung nach Anhang C der DIN 1946-4 erreicht werden.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 58/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II



Abbildung 38: Topas ADD 536 mit Schläuchen und Ausströmern

3.4.5. Schlussfolgerungen

Für die wirtschaftliche und verifizierbare hygienische Abnahme von OP-Räumen nach der Schutzgradmethode ist der kommerzielle Erwerb von mobilen und validierten Geräten für die Erzeugung und Verteilung vom Partikelquellstrom erforderlich. Das untersuchte Gerät eignet dazu in vollem Umfang.

3.5. Untersuchung 4: Prüfung eines kommerziell hergestellten Partikelverteilsystems

3.5.1. Zusammenfassung

Während der Bearbeitung des Forschungsvorhabens hat ein weiterer Projektpartner ein Partikelauflage-System für kommerzielle Vermarktungszwecke hergestellt und im Labor-OP-Raum prüfen lassen. Das System erfüllt die Bedingungen, die in DIN 1946-4 / SWKI 99-3 aufgeführt sind und ist zudem für eine besonders gleichmässige Partikelauströmung an allen 6 Ausströmern optimiert. Damit kann es zusätzlich für die gleichzeitige Kalibrierung von Partikelzählern verwendet werden.

3.5.2. Untersuchungskonzept

Das für Forschungszwecke im Rahmen von GiG I gebaute Partikelauflage-System kennzeichnet sich durch ein genaue und langzeitstabile Betriebsweise aus. Es wurde diesbezüglich bei seiner Herstellung umfassend getestet und kann daher für Vergleichsmessungen verwendet werden.

Als Lüftungskonzept für vergleichende Versuche wurde ein Gleichströmungsprofil beim TAV-Auslass gewählt und mit einem Volumenstrom von $7.700 \text{ m}^3/\text{h}$ betrieben. Für diese Betriebsweise war aus den Versuchen bekannt, dass es zu Schutzgraden auf dem OP-Tisch von ca. 1.0 führt und die Partikelkonzentration auf dem OP-Tisch ohne grosse Schwankungen ist.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 59/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Das entwickelte Aerosolverteilsystem besteht im Wesentlichen aus dem Aerosolverteiler, in dem das Aerosol in der erforderlichen Konzentration hergestellt wird und an dem die sechs Aerosolaufgabezylinder angeschlossen sind.

3.5.3. Versuchsumfang

Bei dem neuen System wurde zunächst die Langzeitstabilität der Partikelgeneration geprüft und im Weiteren die gleichmässige Ausströmung von jedem der 6 Einzelausströmer. Danach erfolgte bei der eingestellten Betriebsweise für den Gleichstrom-TAV die Schutzgradbestimmung abwechselnd mit dem HSLU-System und dem neu entwickelten System.

3.5.4. Ergebnisse

Mit einem handelsüblichen, aber hochwertigen Aerosolgenerator und einem volumenstromstabilen Kleinventilator für den Mischvolumenstrom erreichte der Quellpartikelstrom des Systems eine Toleranz von +/- 5 % und eine Gleichmässigkeit bei den sechs Ausströmern von +/- 5 %. Die Schutzgradbestimmung im Labor-OP-Raum nach DIN/SWKI mit Simulation von „Innenlasteintrag“ mit einem Gleichstromprofil-TAV-Auslass bei 7.700 m³/h Zuluftstrom ergab einen Unterschied von ca. 10% im Vergleich zum System der Hochschule Luzern.

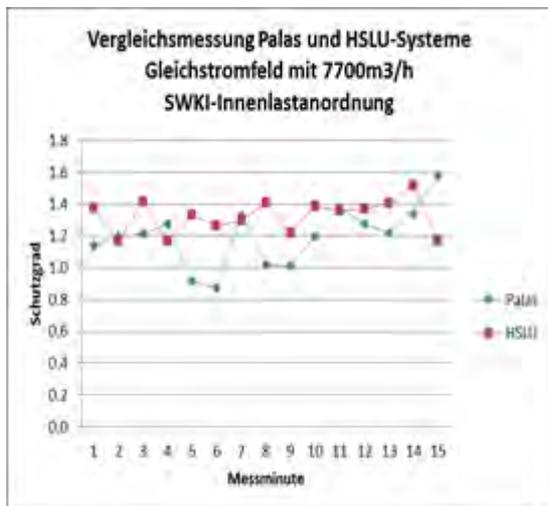


Abbildung 39: Vergleich der Schutzgrade bei Verwendung von zwei verschiedenen Partikelauflage-Systemen

Horw, 30. Juni 2012

Seite 60/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

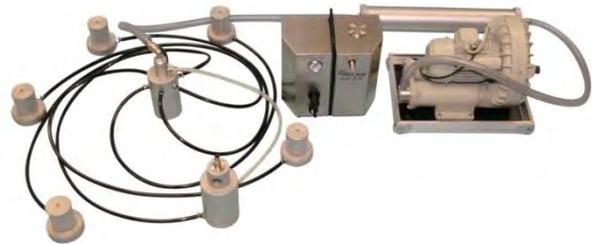


Abbildung 40: Aerosolverteilsystem HSLU (links, im Bild vorne rechts: Partikelkonzentrationsprüfung bei einem Ausströmer), Gerät des Projektpartners (rechts)

3.5.5. Schlussfolgerungen

Aufgrund der zunehmenden Anzahl von Abnahmemessungen von OP-Räumen nach der Schutzgradmethode bieten nunmehr zwei Hersteller Aerosolverteilsysteme an, die eine Vergleichsmessung mit dem Gerät der HSLU erfolgreich bestanden haben.

3.6. Betriebsoptimierung bei OP-Abteilungen

Die Forschungsvorhaben GiG I und GiG II umfassten eine Gesamtlaufzeit von ca. 6 Jahren. Einige Teilergebnisse können als Vorschläge für die Betriebsoptimierung von OP-Abteilungen dienen. Durch umfangreichen Informationsaustausch mit Betreibern, Planern und Wissenschaftlern bei ausgeführten Projekten, Normungs- und Verbandstätigkeiten wurden ebenfalls Informationen zum effizienten Betrieb von OP-Abteilungen gesammelt. Sie werden im Folgenden zusammenfassend als Empfehlungen formuliert.

3.6.1. Höhe des Aussenluftstromes für OP-Räume und Abteilungen

Der in der SWKI 99-3 angegebene Aussenluftstrom von (mindestens) 800 m³/h ergab sich auch aus der Feststellung, dass die gasförmigen Belastungen in OP-Räumen durch Änderung der Narkoseverfahren geringer wurden. In der letzten Zeit sind aber die Raumkühllasten und gasförmigen Belastungen durch chirurgischen Rauch gestiegen. Daher wird empfohlen, den Wert als erforderlichen Mindestwert zu überprüfen und ggf. anzuheben. Durch die verbesserten Leistungsfähigkeiten der heutigen Wärmerückgewinnungssysteme und die Einsparabsicht von Jahreskältearbeit durch Verhinderung von unnötig niedrigen Taupunkttemperaturen bei der Kühlung von niedrigen Aussenluftströmen sind mit der Anhebung vom Aussenluftstrom energetische Einsparungen zu erwarten und objektabhängig durch eine Jahressimulation überprüfbar.

3.6.2. Nächtliche Anlagenabschaltung

Schon in der österreichischen Norm für die Auslegung und den Betrieb von OP-Lüftungsanlagen (Ö-Norm H 6020: Lüftungstechnische Anlagen für medizinisch genutzte Räume. 2007-2) gültig seit 2006, ist die Empfehlung zur nächtlichen Abschaltung der Lüftungsanlagen für OP-Räume

Horw, 30. Juni 2012

Seite 61/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

enthalten. Bis heute sind den Berichtsverfassern keinerlei Erhöhungen der Infektionsraten oder bakteriellen Belastungen in österreichischen OP-Räumen durch diese Umsetzung bekannt geworden.

Von einem Deutschen Hygieneinstitut, das mehr als 100 Krankenhäuser betreut, wird ebenfalls die Empfehlung ausgesprochen, nicht genutzte OP-Anlagen nachts aus zu schalten, anstatt sie auf reduziertem Betrieb zu halten [Thalmayr, 2012] .

Auch im Rahmen der Bearbeitung des GIG-Forschungsvorhabens wurden nach längeren Betriebspausen im Labor-OP-Raum spätestens 2 Stunden nach der Wiederinbetriebnahme keine erhöhten Partikelzahlen bei Schutzgradmessungen oder beim Abscannen vom Luftdurchlass mehr gemessen.

Daher wird die Empfehlung gegeben, Lüftungsanlagen von solchen OP-Räumen nachts auszuschalten, bei denen sichergestellt ist, dass sie durch den Weiterbetrieb von benachbarten OP-Räumen nicht durch Überströmung von belasteter Luft belastet werden können. Der Schutz des inaktiven OP-Raumes sollte durch die weiterhin vorhandene Überströmung der Luft aus dem Sterilflur ausreichen.

Die erforderliche Zeit nach Wiederinbetriebnahme bis OP-Freigabe ist durch einen Versuch mit fortlaufender Bestimmung der Schutzgrade nach Wiedereinschaltung festzustellen.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 62/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

4. Teilprojekt 3: Standardprüfverfahren für mobile Luftreinigungsgeräte

4.1. Einleitung:

Die Luftbelastung mit Feinstaub in Innenräumen ist für viele Menschen ein gesundheitsbelastender Faktor in ihrem Leben. Viele der betroffenen Menschen suchen Mittel und Wege sich zu schützen und so ihr Handicap in den Griff zu bekommen.

Nebst den Menschen, die sich täglich im privaten Bereich damit auseinandersetzen müssen sind in Krankenhäuser stationären Patienten mit Tuberkulose, Sars, Vogelgrippe etc. Hier verlangt die Situation dieser Menschen einen behutsamen Umgang mit dem Patienten und dem Personal.

Eine der naheliegenden Lösungen ist die Verwendung von einem mobilen Raumlufreinigungsgerät. Je nach Anwendung muss die Leistung dieser Geräte „größer“ oder weniger „gross“ sein.

Die Leistung für den Kunden / Patienten liegt vor allem darin, dass möglichst viele Partikel, die als Wirte von luftgetragenen Keimen zu verstehen sind, aus der Luft ausfiltert werden können.

Im Grundsatz sind die Faktoren Aufreinigungsleistung (Wirkungsgrad) der eingesetzten Filter, Schallemissionen des Gerätes (Lärmbelastung im Raum) und Raumlufgeschwindigkeiten (Zugluft für den Kunden) von zentraler Bedeutung. Alle anderen Funktionen von solchen Geräten wie Geschmackstoffe zuführen, Befeuchten der Luft etc. haben in der Regel einen negativen Einfluss auf die grundlegende Anforderungen den Kunden vor „schlechter“ Luft zu schützen.

Auf dem Weltmarkt gibt es unzählige verschiedene Raumlufreinigungsgeräte, für die es jedoch kein einheitliches Prüfverfahren gibt. Um gewährleisten zu können, dass Geräte zum Einsatz kommen, die für den schutzbedürftigen Menschen geeignet sind, muss ein einheitliches Prüfverfahren vorgegeben werden. Dieses sollte es dem Geräteanwender ermöglichen, ein für den jeweiligen Anwendungsbereich / Anwendungsfall geeignetes Gerät auszuwählen.

Mit der vorliegenden „Prüfrichtlinie von mobilen Raumlufreinigungsgeräten“ leisten wir den Beitrag einer reproduzierbaren, zielgerichtete Möglichkeit Geräte in ihren Leistungen zu deklarieren und damit mit anderen Geräten zu vergleichen.

Das Basisdokument (Annex TP 3; Standardprüfverfahren für mobile Raumlufreinigungsgeräte) ist erstellt und kann nun im Rahmen der Normenarbeit als Regelwerk fertig gestellt werden.

Diese vorliegende Basis-Richtlinie beschreibt ein reproduzierbares Prüfverfahren für mobile und leicht montierbare / demontierbare Raumlufreinigungsgeräte, welche in privaten oder öffentlichen Räumen zur Anwendung kommen. Anhand der Prüfkenngrößen lassen sich die Geräte klassifizieren und ermöglichen es dem Geräteanwender, für den jeweiligen Anwendungsfall ein geeignetes Gerät auszuwählen. Als Grundlage für die Entwicklung des Prüfverfahrens dienten verschiedene Normen und Regelwerke, wissenschaftliche Untersuchungen sowie Erfahrungswerte von Fachleuten aus dem klimatechnischen Berufsfeld sowie dem medizinischen Umfeld.

4.2. Zielsetzung

Mobile Raumlufreinigungsgeräte werden kommerziell in den verschiedensten technischen Varianten und Preisen angeboten. Derzeit existieren keine vereinheitlichten Anforderungen und kein Prüfverfahren für die Reinigungseffizienz. Interessierte Käufer haben weder technische noch wirtschaftliche Vergleichsmöglichkeiten.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 63/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Die Ziele des Teilprojektes 3 sind:

- Entwicklung eines Standard-Prüfverfahrens für mobile Luftreinigungsgeräte
- Aufzeigen der Leistungsgrenzen solcher Geräte in Abhängigkeit von der Gerätekategorie (Vereinheitlichen der Anforderungskriterien für den Nutzer), z.B. Klasse A: medizinische Anwendungen in Arztzentren, Patientenzimmern, Isolierzimmern und Klasse B zur Anwendung im privaten Bereich für Allergiker, Arbeitsplatz, Geschäftsräume
- Definition eines Prüfraums, um später an der Hochschule Luzern solche Prüfungen als Dienstleistung durchführen zu können.
- Erarbeitung der Grundlagen für die Beantragung einer Norm für Raumluft-Reinigungsgeräte und deren Leistungen und Prüfungen.

Bei der Entwicklung von Standardprüfverfahren sind die unterschiedlichen Anforderungen für den medizinischen Einsatz (in lüftungstechnisch nicht oder unzureichend ausgestatteten Zimmern für infektiöse und nicht infektiöse abwehrgeschwächte Patienten) und den privaten Bereich zu berücksichtigen.

Das reproduzierbare Standardprüfverfahren soll einen direkten Vergleich und neben der Leistungsprüfung bestehender Geräte eine Optimierung der Leistungsfähigkeit von Neu- und Weiterentwicklungen ermöglichen.

Das Raumluftreinigungsgerät muss als System verstanden bzw. betrachtet werden. Dies ist speziell im Hinblick auf die Prüfgrößen und deren Interpretation zu berücksichtigen. Der Filter kann nur über die Erholzeit auf seine Wirksamkeit geprüft werden. Grund dafür ist, dass die Gerätehersteller oft keine Filterprüfzertifikate nach den üblichen Normen besitzen, trotz EU-Normen im Filterbereich (s. [EN 779, 2009]).

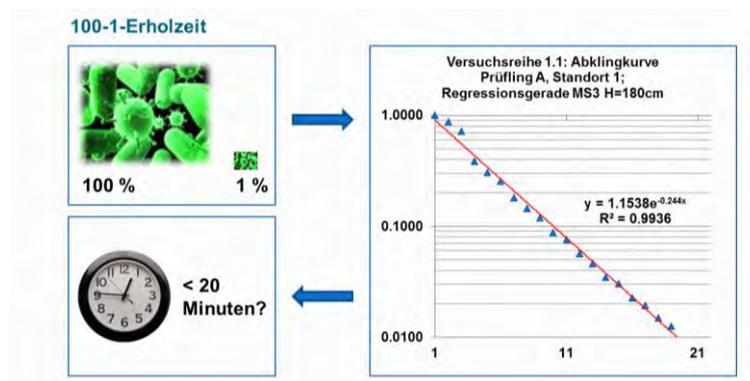


Abbildung 41: Erholzeitsmessung

Die Prüfmessungen erfolgen bei Nennluftmenge. Diese „Nennluftmenge“ ist anzugeben und vom Hersteller zu deklarieren. Bei der Erholzeit-Messung wird die Partikelgröße 0,3 – 0,5 Mikrometer ausgewertet.

Die Messung erfolgt mit einem neuen Filter und mit einem elektrostatisch „entladenen“ Filter. Die Messung wird erneut im elektrostatisch „beladenen“ Zustand durchgeführt um die Langzeitwirkung des Filters zu erproben. Diese Messmethodik wurde erarbeitet.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 64/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

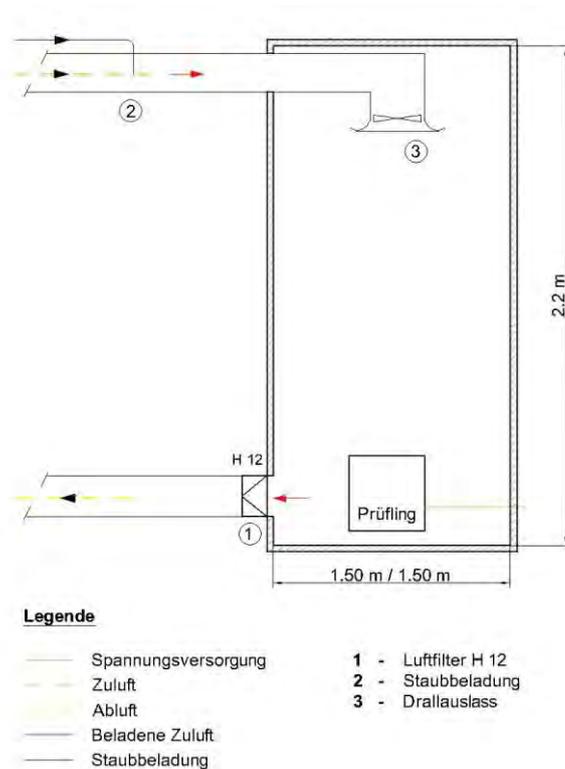


Abbildung 42: Standardprüfanordnung für die Filterbeladung

Mit Hilfe des Projektpartners Fa. Palas, spezialisiert auf Partikelmessgeräte und Staubmessungen - ist die pragmatische Lösung mit einem "Bestäubungsmechanismus" definiert worden. Das Gerät wird mit einer definierten Menge Staub in einer definierten Zeitperiode belastet. Dadurch wird der Filter elektrostatisch "entladen" und muss sich in der effektiven mechanischen Staubabscheidung beweisen.

Der Lieferant muss sicherstellen bzw. garantieren können, dass sein Gerät immer die angegebene Klasse (z.B. A1, B1, A2, etc.) einhalten kann. Entsprechend muss die Luftleistung und die Filterverschmutzung (Druckverlust) am UML angezeigt (Signal: Akustisch, Anzeige Delta-p, Lampe o.ä.) und somit kontrollierbar sein.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 65/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Prüfstelle _____; Firma _____; Prüfdatum: _____

Prüfformular zur Prüfrichtlinie für mobile Raumlufthereinigungsgeräte

Prüfkenngrößen:

Nr.	Kriterium	Geräteklassen / Richtwert									Ermittelte Werte	Bemerkungen	
		A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3			
P.1	Neue Filter 100:1-Erholzeit	$t_{0,01} \leq 20$ Minuten			$t_{0,01} \leq 30$ Minuten			$t_{0,01} > 40$ Minuten			100:1-Erholzeit bei Ventilatorstufe Q_{vol} (m^3/h) 100:1-Erholzeit [min] $t_{0,01}$	Neustufe M 1 M 2 M 3	
P.2	Entladene Filter 100:1-Erholzeit bei entladener Filtereinheit	$t_{0,01} \leq 20$ Minuten			$t_{0,01} \leq 30$ Minuten			$t_{0,01} > 40$ Minuten			100:1-Erholzeit bei Ventilatorstufe Q_{vol} (m^3/h) 100:1-Erholzeit [min] $t_{0,01}$	Neustufe M 1 M 2 M 3	
P.3	Beladene Filter 100:1-Erholzeit bei beladener Filtereinheit	$t_{0,01} \leq 20$ Minuten			$t_{0,01} \leq 30$ Minuten			$t_{0,01} > 40$ Minuten			100:1-Erholzeit bei Ventilatorstufe Q_{vol} (m^3/h) 100:1-Erholzeit [min] $t_{0,01}$	Neustufe M 1 M 2 M 3	
P.4	Schallemission (im Neuzustand) $L_{p,A,1000}$ [dB(A)]	≤ 28	≤ 35	≤ 40	≤ 28	≤ 35	≤ 40	≤ 35	≤ 40	≤ 45	theoretischer Schalldruckpegel nach VDI 2081 $L_{p,A,1000}$ in dB(A) Zuschlag Tonhaltigkeit (K): _____ dB(A) Relevanter Schalldruckpegel inkl. Zuschlag Tonhaltigkeit ($L_{p,A,1000}$): _____ dB(A)		
P.5	Raumluftgeschwindigkeit (im Neuzustand) V_{1000} [m/s]	0.15	0.15	0.2	0.15	0.2	0.2	0.2	0.25	0.25	Luftgeschwindigkeit im oberen Messbereich bei der Ventilatorstufe Q_{vol} (m^3/h) Luftgeschwindigkeit [m/s] v_{1000}	M 4.1 M 4.2 M 4.3 M 4.4	
Das Gerät entspricht somit der Geräteklasse:													

Seite 6 von 6

Abbildung 43: Prüfformular Seite 6, Prüfkenngrößen

Die vorliegende Basis-Richtlinie wird dem Branchenverband SWKI und VDI zur Verfügung gestellt um eine rechtlich formal korrektes und von der Branche abgestütztes Regelwerk zu erstellen.

4.3. Methodische Vorgehensweise; Untersuchungsfragen, Vorgehen

Grundsätzlich sind die Resultate TP 3 im Annex TP3: *Standardprüfverfahren für mobile Raumlufthereinigungsgeräte* dargestellt.

Die Vorgehensweise ist nachfolgend dargestellt. Es sind verschiedene Arbeitspakete und Fragestellungen formuliert worden im Projektteam – sinnvoll gegliedert und unterteilt und entsprechend abgearbeitet.

4.3.1. Fragestellungen/Arbeitspakete

AP 1: Inhalt

Vorgehen:

- Definition des Prüfverfahrens
- Definition von Raumbedarf und Herstellung des Raumes
- Experimentelle Untersuchungen
- Formulierung des/der Prüfverfahren

Teilergebnisse:

Horw, 30. Juni 2012

Seite 66/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

- Prüfverfahren und erforderliche Messtechnik sind definiert

Meilenstein: der Prüfraum ist vorhanden und das Prüfverfahren ist definiert

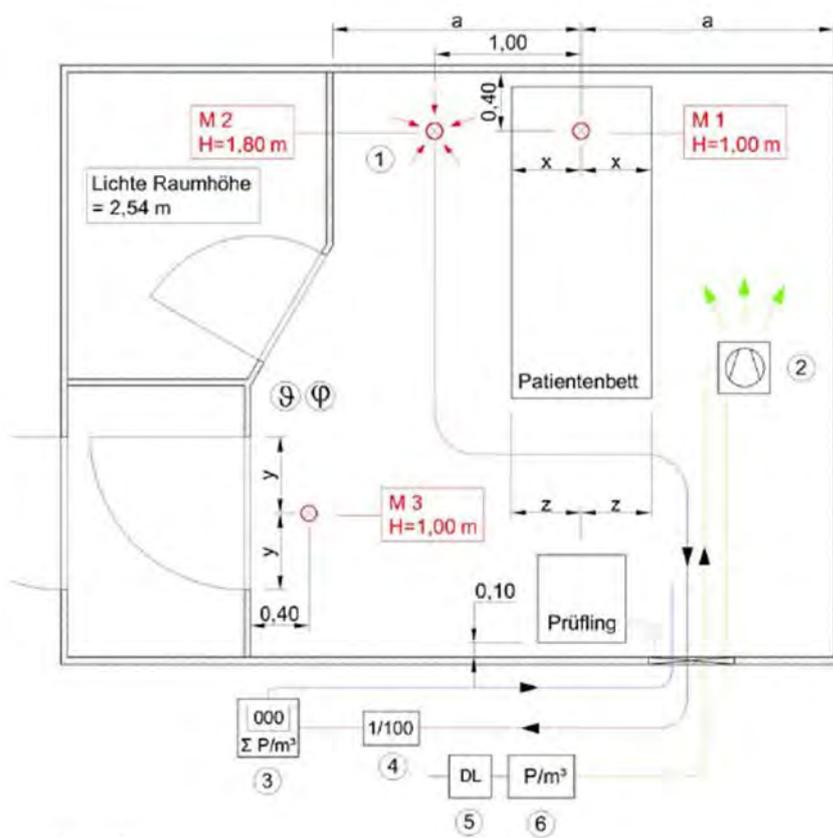


Abbildung 44: Prüfraum, Prinzipschema Standardprüfanordnung des Patientenbettes, der Messgeräte und des Zubehörs, sowie der Lage der Messstellen

AP 2: Leistungsfähigkeit von Raumlufthereinigungsgeräten

Für Anwendungsklassen A, B, C

Vorgehen:

- Untersuchung von verschiedenen kommerziellen Umlufthereinigungsgeräten

Teilergebnisse:

- Versuchsberichte
- Empfehlungen für die Möglichkeiten und Grenzen der Geräte

Meilenstein: Die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Umlufthereinigungsgeräte ist bewertet

Horw, 30. Juni 2012

Seite 67/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Klasse	100:1 Erholzeit Neuer Filter	100:1 Erholzeit Entladener Filter	100:1 Erholzeit Beladener Filter	Schallemission	Raumluft- geschwindigkeit
	$T_{0,01}$ [min.]	$T_{0,01}$ [min.]	$T_{0,01}$ [min.]	$L_{p,A,max}$ [dB(A)]	$v_{L,PRR}$ [m/s]
A1	≤ 20	≤ 20	≤ 20	≤ 28	< 0.15
A2	≤ 20	≤ 20	≤ 20	≤ 35	< 0.15
A3	≤ 20	≤ 20	≤ 20	≤ 40	< 0.2
B1	≤ 30	≤ 30	≤ 30	≤ 28	< 0.15
B2	≤ 30	≤ 30	≤ 30	≤ 35	< 0.2
B3	≤ 30	≤ 30	≤ 30	≤ 40	< 0.2
C1	≤ 40	≤ 40	≤ 40	≤ 35	< 0.2
C2	≤ 40	≤ 40	≤ 40	≤ 40	< 0.25
C3	≤ 40	≤ 40	≤ 40	≤ 45	< 0.25

Abbildung 45: Klassifizierungskriterien

AP 3: Vorbereitungsarbeiten für eine Norm (Regelwerk)

Vorgehen:

- Formulierung einer Bedarfsanmeldung
- Marktrecherche für Interessenlage
- Textvorschlag für die Hauptinhalte

Teilergebnisse:

- Eine Norm wird beantragt (SIA, SWKI, VDI)

Meilenstein: Ein Regelwerk wird beantragt

AP 4: Dokumentation und Berichterstattung TP 3

Meilenstein Informationen für den Wissenstransfer sind erstellt Versuchsraum, Messtechnik...

CFD-Tools, Validierungsverfahren...

4.4. Ergebnisse

AP 1 bis AP 4 konnten sukzessive bearbeitet und zu befriedigenden Resultaten geführt werden.

Die Resultate sind in dem Regelwerk Standard-Prüfverfahrens für mobile Luftreinigungsgeräte schlüssig auf 43 Seiten dargestellt. Diese befindet sich im Annex TP3 und ist in wie folgt gegliedert (Hauptkapitel):

Standard-Prüfverfahrens für mobile Raumluftreinigungsgeräte

Inhaltsverzeichnis des Basis-Regelwerkes

Horw, 30. Juni 2012

Seite 68/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

VORWORT

EINLEITUNG

SYMBOLS UND ABKÜRZUNGEN

1. GELTUNGSBEREICH / ANWENDUNG
2. VERWEISUNGEN AUF ANDERE TECHNISCHE REGELWERKE
3. PRÜFUMFANG
4. BEGRIFFE UND DEFINITIONEN
5. GERÄTEKENNGRÖSSEN
6. PRÜFKENNGRÖSSEN
7. PRÜFEINRICHTUNGEN UND PRÜFMITTEL
8. PRÜFVERFAHREN
9. PRÜFBERICHT
10. KLASSIFIZIERUNG
- A 1. MUSTER PRÜFFORMULAR
- A 2. SCHALLEMISSION

4.4.1. Diskussion

Für die Erarbeitung des Regelwerkes musste sorgfältig auf die geltenden nationalen und internationalen Normen geachtet und wo immer möglich mitberücksichtigt werden. Normative „Lücken“ mussten erkannt werden. Die Herausforderung die normativen Lücken aufzuspüren und ergänzend zu definieren haben wir mit dem vorliegenden Basis-Prüfverfahren erreicht.

Die Methodik, wie dargestellt in dem Basis-Prüfverfahren, ist reproduzierbar und im Labor an der Hochschule Luzern Technik & Architektur geprüft und erfolgreich getestet.

Eine wichtige und grosse Herausforderung in diesem Bereich ist die Prüfsequenz der „künstlichen Alterung“ der Filter bzw. der Geräte als System.

Das Gerät muss als System verstanden bzw. betrachtet werden. Dies ist speziell im Hinblick auf die Prüfgrössen und deren Interpretation zu berücksichtigen. Der Filter kann nur über die Erholzeit auf seine Wirksamkeit geprüft werden. Grund dafür ist, dass die Gerätehersteller oft keine Filterprüfzertifikate nach den üblichen Normen besitzen, trotz EU-Normen im Filterbereich (EN 779).

Der Effort zum Thema Filtertest / Filterlangzeittest ist erfolgreich abgeschlossen. Dieser Test soll sowohl in den Kosten wie auch im Aufwand für den Auftraggeber angemessen und damit bezahlbar sein.

Die Prüfmessungen erfolgen bei Nennluftmenge. Diese „Nennluftmenge“ ist anzugeben und vom Hersteller zu deklarieren. Bei der Erholzeit-Messung wird die Partikelgrösse 0,3 – 0.5 Mikrometer ausgewertet.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 69/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Die Messung erfolgt mit einem neuen Filter und mit einem elektrostatisch „entladenen“ Filter. Die Messung wird erneut im elektrostatisch „beladenen“ Zustand durchgeführt um die Langzeitwirkung des Filters zu erproben. Diese Messmethodik wurde erarbeitet.

Mit Hilfe des Projektpartners „Palas“, spezialisiert auf Partikelmessgeräte und Staubmessungen - ist die pragmatische Lösung mit einem "Bestäubungsmechanismus" erarbeitet worden. Das zu prüfende Gerät wird mit einer definierten Menge Staub in einer definierten Zeitperiode belastet. (siehe auch Bild 1: Abbildung 3: Standardprüfanordnung für die Filterbeladung). Dadurch wird der Filter elektrostatisch "entladen" und muss sich in der effektiven mechanischen Staubabscheidung beweisen.

Der Lieferant muss sicherstellen können, dass sein Gerät immer die angegebene Klasse (z.B. A1, B1, A2, etc.) einhalten kann. Entsprechend müssen die Luftleistung und die Filterverschmutzung (Druckverlust) am Raumlufthereinigungsgerät angezeigt und somit kontrollierbar sein.

Mit der in der Richtlinie unter dem Kapitel 7. (7.1.4. Prüfanordnung Filterbeladung) dargestellten Verfahren haben wir einen komplett neuen Weg beschritten, der dem praktischen Laborversuch sehr gut Stand gehalten hat.

Das Regelwerk Standard-Prüfverfahrens für mobile Luftreinigungsgeräte hat bereits heute einen Stand erreicht, der eine verlässliche Prüfung und Klassierung von Raumlufthereinigungsgeräten ermöglicht.

Die Richtlinie ist inhaltlich fertig und kann dem Branchenverband SWKI und VDI zur Verfügung gestellt werden um eine rechtlich formal korrektes und von der Branche akzeptierte Regelwerk zu erstellen.

4.5. Schlussfolgerung, Zusammenfassung

Mobile Raumlufthereinigungsgeräte werden kommerziell in den verschiedensten technischen Varianten und Preisen angeboten. Derzeit existieren keine vereinheitlichten Anforderungen und kein Prüfverfahren für die Reinigungseffizienz. Interessierte Käufer haben weder technische noch wirtschaftliche Vergleichsmöglichkeiten.

Die Ziele des Teilprojektes 3 sind:

- Entwicklung eines Standard-Prüfverfahrens für mobile Luftreinigungsgeräte
- Aufzeigen der Leistungsgrenzen solcher Geräte in Abhängigkeit von der Geräteklasse (Vereinheitlichen der Anforderungskriterien für den Nutzer), z.B. Klasse A: medizinische Anwendungen in Arztzentren, Patientenzimmern, Isolierzimmern und Klasse B zur Anwendung im privaten Bereich für Allergiker, Arbeitsplatz, Geschäftsräume
- Definition eines Prüfraums, um später an der Hochschule Luzern solche Prüfungen als Dienstleistung durchführen zu können.
- Erarbeitung der Grundlagen für die Beantragung einer Norm für Raumlufthereinigungsgeräte und deren Leistungen und Prüfungen.

Bei der Entwicklung von Standardprüfverfahren sind die unterschiedlichen Anforderungen für den medizinischen Einsatz (in lüftungstechnisch nicht oder unzureichend ausgestatteten Zimmern für infektiöse und nicht infektiöse abwehrgeschwächte Patienten) und den privaten Bereich zu berücksichtigen.

Das reproduzierbare Standardprüfverfahren soll einen direkten Vergleich und neben der Leistungsprüfung bestehender Geräte eine Optimierung der Leistungsfähigkeit von Neu- und Weiterentwicklungen ermöglichen.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 70/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Das Raumlufreinigungsgerät muss als System verstanden bzw. betrachtet werden. Dies ist speziell im Hinblick auf die Prüfgrößen und deren Interpretation zu berücksichtigen. Der Filter kann nur über die Erholzeit auf seine Wirksamkeit geprüft werden. Grund dafür ist, dass die Gerätehersteller oft keine Filterprüfzertifikate nach den üblichen Normen besitzen, trotz EU-Normen im Filterbereich (EN 779).

Die Prüfmessungen erfolgen bei Nennluftmenge. Diese „Nennluftmenge“ ist anzugeben und vom Hersteller zu deklarieren. Bei der Erholzeit-Messung wird die Partikelgröße 0,3 – 0,5 Mikrometer ausgewertet.

Die Messung erfolgt mit einem neuen Filter und mit einem elektrostatisch „entladenen“ Filter. Die Messung wird erneut im elektrostatisch „beladenen“ Zustand durchgeführt um die Langzeitwirkung des Filters zu erproben. Diese Messmethodik wurde erarbeitet.

Mit Hilfe des Projektpartners Fa. Palas, spezialisiert auf Partikelmessgeräte und Staubmessungen - ist die pragmatische Lösung mit einem "Bestäubungsmechanismus" definiert worden. Das Gerät wird mit einer definierten Menge Staub in einer definierten Zeitperiode belastet. Dadurch wird der Filter elektrostatisch "entladen" und muss sich in der effektiven mechanischen Staubabscheidung beweisen.

Der Lieferant muss sicherstellen bzw. garantieren können, dass sein Gerät immer die angegebene Klasse (z.B. A1, B1, A2, etc.) einhalten kann. Entsprechend muss die Luftleistung und die Filterverschmutzung (Druckverlust) am Raumlufreinigungsgerät angezeigt und somit kontrollierbar sein (Signal: Akustisch, Anzeige Delta-p, Lampe o.ä.).

Die vorliegende Basis-Richtlinie wird dem Branchenverband SWKI und VDI zur Verfügung gestellt um eine rechtlich formal korrektes und von der Branche akzeptiertes Regelwerk zu erstellen.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 71/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

5. Teilprojekt 4:

5.1. Zielsetzung

- Weiterentwickeln der Einsatzmöglichkeiten von CFD in der Konzeption und Planung von Operationssälen.
- Reduktion der Rechenzeiten bei genügender Resultatgenauigkeit und damit wirtschaftliche Anwendbarkeit von CFD in der OP-Planung.
- Skizzieren / Entwickeln einer vereinfachten Anwendbarkeit von CFD-Tools im Sinne einer „vertical application“ mit einfacher Nutzerführung.
- Einsatz von Luftströmungssimulationen (CFD) zur Beantwortung konkreter Fragestellungen aus den übrigen Teilprojekten.

5.2. Vorgehensweise

Die Bearbeitung der im Teilprojekt gestellten Fragestellung wurde wie folgt zwischen den Teams / Partner bearbeitet:

Thema		
Weiterentwicklung Tool Reduktion der Rechenzeit Vereinfachen der Anwendbarkeit	Innius GTD	
Konkrete Fragestellungen		zhaw / HSLU

In den untenstehenden Kapiteln haben wir eine Zusammenfassung der in den Teilprojekten bearbeiteten Pakete. Die ausführlichen Berichte sind im Anhang zu finden.

5.3. CFD-Simulationen zur Beurteilung der Strömungsverhältnisse und Schutzgrade in Operationssälen - Charakterisierung der Einflüsse auf die Partikelverteilungen und Optimierung der Modellierungsansätze

5.3.1. Ausgangslage

CFD - Simulationen werden in der Gebäudetechnik sowohl im Brandschutz als auch für die Bewertung des Raumklimas und der thermischen Behaglichkeit immer mehr eingesetzt. Um die Simulationstechniken auch für den Nachweis der Schutzwirkung in der OP -Planung mit hinreichender Sicherheit einsetzen zu können, wurde deren Anwendung bereits in dem Projekt „Gebäudetechnik im Gesundheitswesen“ untersucht. In diesen Untersuchungen standen vor allem die Verifizierung von Messergebnissen und die Nachbildung der grundsätzlichen Strömungsverhältnisse im Vordergrund. Ausgehend von den bisherigen CFD - Analysen wurden in dem Projekt „Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II“ diese Untersuchungen weitergeführt und deren Einsatz optimiert. Zielsetzung war vor allem durch geeignete Wahl der mathematischen, physikalischen und numerischen Ansätze sowie der Randbedingungen eine merkliche Reduzierung der Rechenzeiten bei weiter gegebener Übertragbarkeit der Ergebnisse.

5.3.2. Vorgehen

Im ersten Schritt wurden die Simulationen mit Messungen und den Ansätzen des GiG I validiert sowie die grundsätzlichen Strömungsverhältnisse und Einflussgrößen charakterisiert. Ausgehend

von diesen Einflüssen wurden in den weiterführenden Untersuchungen die Anwendungen unterschiedlicher Turbulenzmodelle, die zeitliche und räumliche Diskretisierung sowie die Modellierung des Wärmeeintrages variiert. Die mit diesen Ansätzen erzielten Ergebnisse wurden dann auf von den Grundlagenuntersuchungen abweichende Randbedingungen überführt (z. B. geänderter Zu- und Abluft; Vergleich kompakter und aerodynamisch optimierter OP - Lampen) und mit Messungen verglichen. Abschließend wurde mit den erarbeiteten Ansätzen und Optimierungen ein Best - Practice - Guideline erstellt.

5.3.3. Einfluss der Randbedingungen

Die Simulationen haben aufgezeigt, dass neben den Umströmungen und Ablösungen an den OP - Lampen vor allem die Auftriebseffekte an Personen und thermischen Komponenten um den OP - Tisch einen hohen Einfluss auf die Strömung im Schutzbereich haben. Die sich einstellende Auftriebsströmung sowie der damit induzierte Partikeltransport bestimmen maßgeblich den Schutzgrad auf dem Operationstisch. Davon ausgehend ist die Modellierung des Wärmeeintrages an den Oberflächen von entscheidender Bedeutung für das Ergebnis.

5.3.4. Einfluss der Turbulenzmodellierung

Als zweites wesentliches Ergebnis hat die Turbulenzmodellierung maßgeblichen Einfluss auf die Beschreibung des Strömungsfeldes. Die Standardformulierungen des $k - \epsilon$ - Modells haben gegenüber dem SST $k - \omega$ - Modell stark dämpfende Eigenschaften in der Raumströmung aufgezeigt. Ursache ist unter anderem eine unzureichende Berechnung der wandnahen Strömungen mit dem $k - \epsilon$ - Modell. Dadurch wird der Wärmeübergang zu gering bestimmt und die Auftriebsströmung kann sich nicht in realem Maße ausbilden.

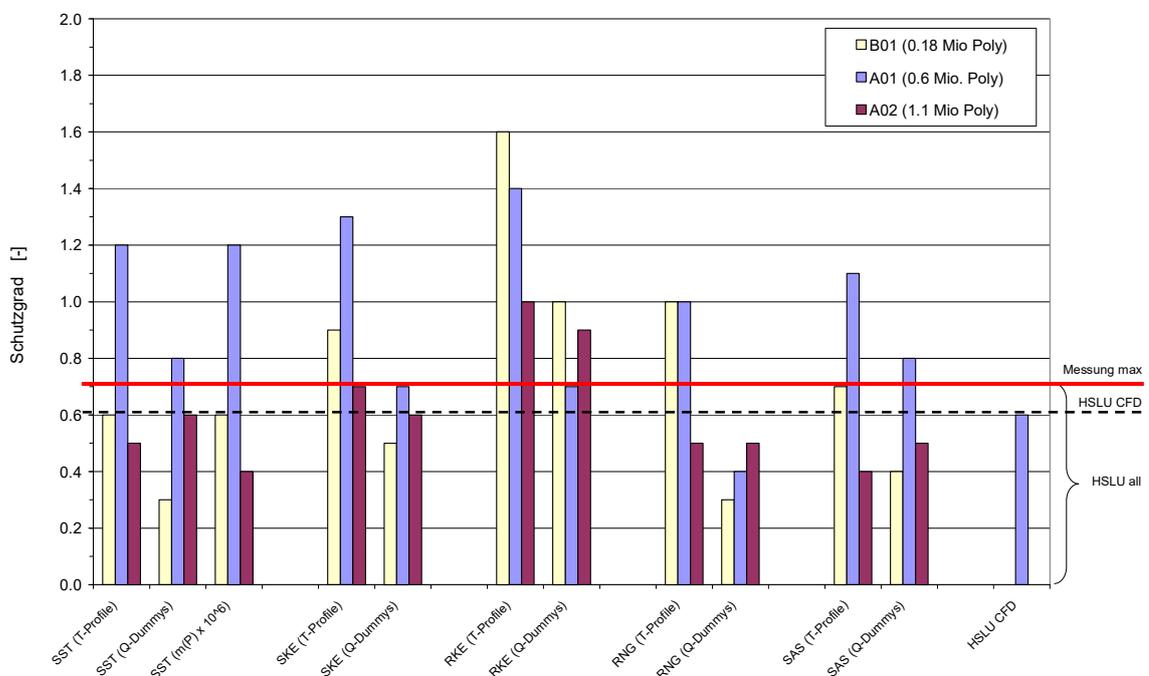


Abbildung 46 Einfluss der Turbulenzmodellierung und der Randbedingungen

5.3.5. Einfluss des Zeitschrittweite

Die Zeitschrittweite hat in den Ergebnissen der Untersuchungen dagegen nur einen untergeordneten Einfluss aufgezeigt. Bei einer größeren zeitlichen Auflösung werden zwar einzelne Strömungseffekte nur gedämpft wiedergegeben, die allgemeinen Strömungsverhältnisse werden jedoch ausreichend aufgelöst. Die Partikelverteilungen und Schutzgrade erzielen, in Anbetracht der deutlich geringeren Rechenzeiten, unter Berücksichtigung einer geeigneten Modellierung der Wärmeeintrages und der Auftriebsströmungen sehr gute Ergebnisse. Die Notwendigkeit einer feinen zeitlichen Auflösung nimmt mit einer dominanten Grundströmung über dem OP - Tisch weiter ab.

5.3.6. Reduktion der Rechenzeit

Mit den oben beschriebenen CFD - Studien und den gewählten Ansätzen und Modellierungen konnten die Rechenzeiten der Simulationen deutlich reduziert werden. Insbesondere Vergleichsstudien unterschiedlicher Konzepte, Nutzungs- und Stellszenarien sowie der Einfluss von Einbauten können mit den gewählten Ansätzen gut und in einer überschaubaren Zeit durchgeführt werden. In Abhängigkeit der erforderlichen Tiefe der Ergebnisse wurden die Rechenzeiten auf eine Skala von Stunden bis wenige Tage reduziert.

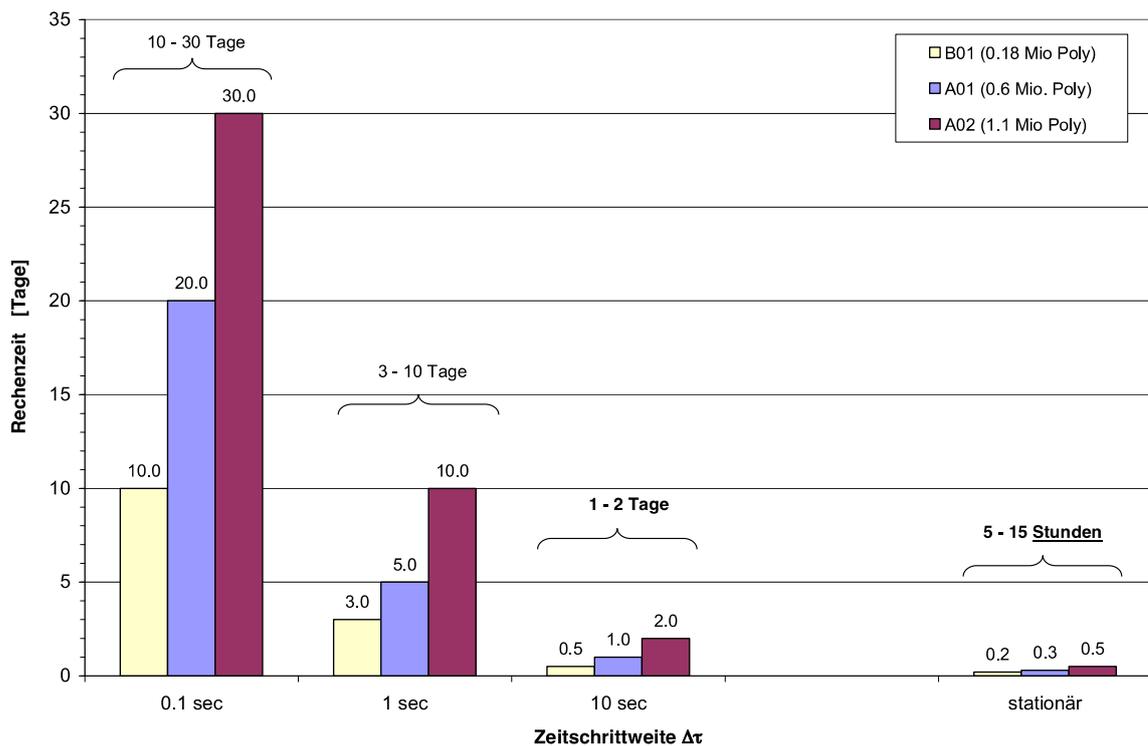


Abbildung 47: Einfluss der untersuchten Varianten auf die benötigten Rechenzeit

5.4. Untersuchungen zur Gefährdung des Operationsteams durch entstehenden on chirurgischem Rauch

5.4.1. Ausgangslage

Durch das Forschungsprojekt *Gebäudetechnik im Gesundheitswesen I* (GIG I) konnten viele Unklarheiten und Vorurteile bezüglich Notwendigkeit und Wirksamkeit von lufttechnischen Schutzkonzepten, mit ihren Investitions- und Betriebskosten bei integraler Betrachtung, beseitigt werden. Die daraus abgeleiteten Optimierungen bei den Konzepten und Komponenten haben den Markt schon stark beeinflusst. Gleichzeitig hat sich auch gezeigt, dass ein erheblicher, weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht. Im Rahmen des neuen KTI-Projekts GIG II werden zum einen die bisher gültigen Ergebnisse für OP-Raum-Neubauten mittels ergänzender Versuche auf allgemeingültige Umsetzbarkeit untersucht. Benötigt werden vom Markt vor allem verbesserte Grundlagen zur Umsetzung im Bereich der Umbauten und Neukonfigurationen von OP-Räumen. Zum anderen verlangen die bisherigen historisch-technisch bedingten Entwicklungen im OP-Raum über Instrumente, Geräte, medizinische Einrichtungen und Operationsmethoden sowie den Veränderungen in der Anästhesie/Narkose nach einer kompletten interdisziplinären Neukonzeption des OP-Raumes unter den Aspekten Ergonomie, Hygiene, Ökonomie und Ökologie.

Im Speziellen ist auch die Konzeption hinsichtlich der Personensicherheit des OP-Teams zu überdenken und zu prüfen sowie die Wirksamkeit von Absaugeinrichtungen für chirurgischen Rauch. Chirurgischer Rauch entsteht bei einer Vielzahl von Operationen und ist häufig gesundheitsschädlich. Er ist daher möglichst effizient abzusaugen. Die heute angewendeten Verfahren sind hinsichtlich ihrer Wirksamkeit noch kaum überprüft worden.

5.4.2. Projektziele

Ziel des Arbeitspaketes war es, durch Strömungssimulationen im Computational Fluid Dynamics (CFD) Aussagen über die Konzentration des chirurgischen Rauchs im Kopfbereich des OP-Teams machen zu können. Hierfür wurden verschiedene Strömungsmodelle aufgebaut und mit unterschiedlichen Randbedingungen und Parametern gefüttert, damit die wichtigsten Einflussfaktoren und ihre Wirkung aufgezeigt werden konnten.

5.4.3. Erkenntnisse und Resultate

Aus den Arbeiten konnten die folgenden Erkenntnisse und Resultate gewonnen werden:

- Der chirurgische Rauch lässt sich im CFD ausreichend genau simulieren
- Sind keine strömungsrelevanten Hindernisse wie Dummys und OP-Leuchten im Bereich des Differential-Flow angeordnet, so strömt der chirurgische Rauch der OP-Tischoberfläche entlang und nachher in Richtung Bodenbereich, ohne auch nur in die Nähe des Kopfbereiches des OP-Teams zu kommen
- Unter Berücksichtigung der strömungsrelevanten Hindernisse, im Speziellen der Standard OP-Leuchten, steigt der chirurgische Rauch bis hin zum Kopfbereich des OP-Teams und erreicht dort Spitzenwerte bei der Rauchkonzentration von 3×10^{-5} [-]
- Durch den Einbau von strömungsoptimierten OP-Leuchten kann die Konzentration des chirurgischen Rauchs im Kopfbereich des OP-Teams bis um das 10-fache gesenkt werden
- Generell sind die Rauchkonzentration im Kopfbereich relativ gering, das heisst in über 90 % aller Fälle kleiner als $1,5 \times 10^{-5}$ [-]

Horw, 30. Juni 2012

Seite 75/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

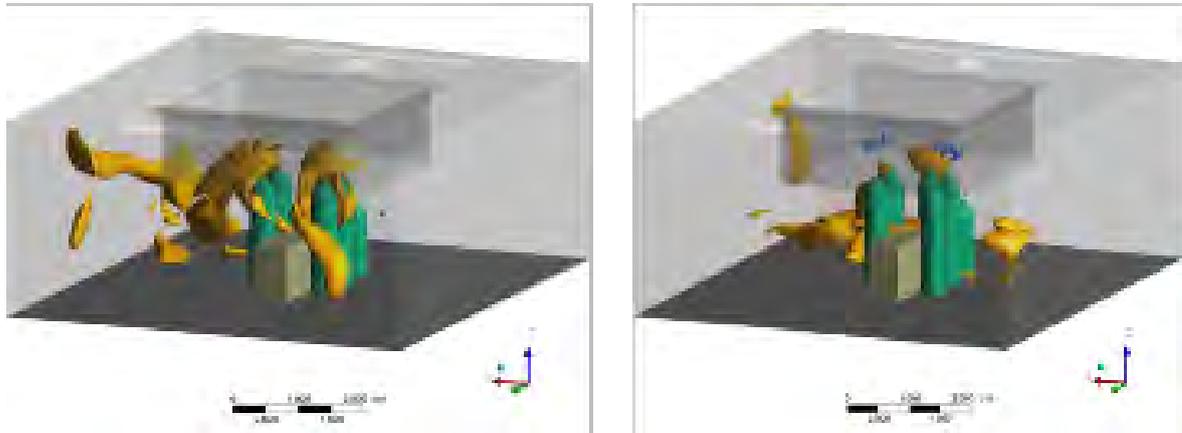


Abbildung 48 Rauchausbreitung mit unterschiedlichen OP-Leuchten in Abhängigkeit der Zeit (Zeitpunkt = 60 s, Konzentrationsgrenze = 1×10^{-5} [-])

5.4.4. Fazit

Die in diesem Projekt erarbeiteten Erkenntnisse und Resultate sind hinreichend genau um erste Aussagen und Tendenzen bezüglich der Rauchausbreitung sowie der Rauchkonzentrationen im OP-Raum, insbesondere im Kopfbereich des OP-Teams, machen zu können. Es konnten aber bei weitem nicht alle möglichen Randbedingungen und Konfigurationen simuliert werden, welche eine endgültige Aussage über die Sicherheit des OP-Teams erlauben würden. Dafür bräuchte es weiterführende Arbeiten im Bereich der Untersuchungen des chirurgischen Rauchs sowie Expertenaussagen in Bezug auf die Gefährdung des OP-Teams durch die vorherrschenden Rauchkonzentrationen.

5.5. Teilprojekt 4: Anwendung / Weiterentwicklung Planungstool CFD (Luftströmungssimulationen) – Bearbeitung konkreter Fragestellungen mittels CFD-Simulationen

(S. Kap. 10.4, Anhang 4)

5.6. Strömungsanalyse der OP-Leuchten im Differentialflow

Die Versorgung des Operationssaals mit sauberer Luft erfolgt gewöhnlich über ein in der Decke installiertes Zuluft-Deckenfeld, um das Eindringen luftgetragener Bakterien in die Wunde zu verhindern. Bei solchen Zuluft-Deckenfeldern handelt es sich um Anlagen mit laminarer Abwärtsströmung. (Turbulenzarme Verdrängungsströmung) Die Operationsleuchten sind üblicherweise zwischen dieser Abwärtsströmungsanlage und dem Patienten auf dem Operationstische angebracht. Sie können daher zu einer deutlichen Störung der Luftströmung in der näheren Umgebung des Operationstisches führen. [1]

Bei der nachfolgenden Untersuchung soll der Unterschied zwischen einer Tellerlampe und einer Zylinderlampe auf die Abwärtsströmung aufgezeigt werden.

5.6.1. Zielsetzung

Es soll eine Aussage gemacht werden können über die Störung des Strömungsgeschwindigkeitsprofils in der Abwärtsströmung durch die Operationsleuchten.

Folgende konkrete Frage soll zusätzlich noch beantwortet werden:

Horw, 30. Juni 2012

Seite 76/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Trifft die Aussage zu, dass die Strecke der Strömungsbeeinflussung nach den Tellerleuchten fünfmal den Durchmesser der jeweiligen Tellerleuchte beträgt?

5.6.2. Methodische Vorgehensweise

Für die Untersuchung wird zur Vereinfachung lediglich der Bereich unter dem Zuluft-Deckenfeld modelliert. Hierbei wird die Induktion der angrenzenden Raumluft nicht berücksichtigt. Da es sich um eine isolierte Betrachtung der Operationsleuchten handelt wird kein Operationstisch und kein Boden im Modell berücksichtigt. Damit sich die Strömung ideal verhalten kann ist die Raumhöhe auf 10 Meter angesetzt. Zur Validierung des Modelles wird zuerst eine Variante Simuliert bei welcher keine störenden Leuchten in der Strömung vorhanden sind.

Die Simulation wird mit dem CFD Programm ANSYS 12.1 durchgeführt. Hierfür wird zuerst der „Luftkanal“ welcher dem Raum unter dem Zuluft-Deckenfeld entspricht geometrisch modelliert. Danach wird für je eine Version mit Tellerlampe und Zylinderlampe erstellt.

5.6.3. Schlussfolgerung

Anhand der Simulationsresultate mit den vereinfachten Rahmenbedingungen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Bei den Zylinderleuchten tritt im Vergleich zu den Tellerleuchten fast keine unerwünschte Rückströmung auf.
- Die Zylinderleuchten beeinflussen das Strömungsgeschwindigkeitsprofil weniger ausgeprägt als die Tellerleuchten. Dafür wird das Geschwindigkeitsprofil jedoch bei den Zylinderleuchten länger beeinflusst.
- Die Strömung unter den Zylinderleuchten ist aus obigen Gründen turbulenzarmer als bei den Tellerleuchten. Womit die Zylinderleuchten eine bessere turbulenzarme Verdrängungsströmung gewährleisten.
- Die Aussage, dass sich die Strömungsbeeinflussung nach einer Strecke von fünfmal dem Durchmesser der Tellerleuchte beruhigt ist widerlegt. Die grössten Unregelmässigkeiten sind jedoch nach dieser Strecke verschwunden.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 77/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

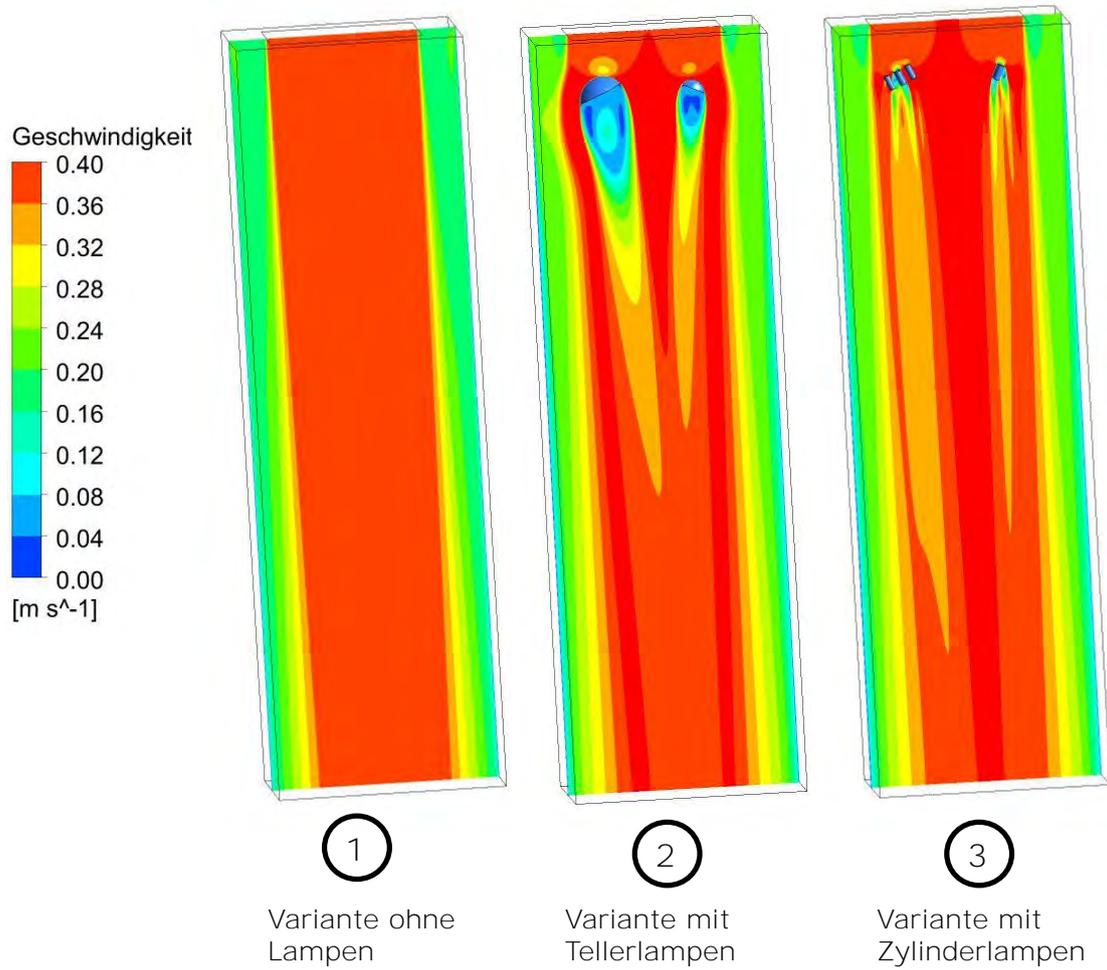


Abbildung 49: Geschwindigkeitsverteilung mit Differentialflow bei den drei untersichten Varianten

Horw, 30. Juni 2012

Seite 78/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

6. Teilprojekt 5: Wissenstransfer

6.1. Zielsetzung

Die Ziele für das Teilprojekt 5 Wissenstransfer sind:

- Umsetzen der gewonnenen Erkenntnisse in Planungs- und Produktdokumentationen
- Entwicklung und Durchführung von Weiterbildungsveranstaltungen für die unterschiedlichen Berufsgruppen: Architekten und Planer, Komponentenlieferanten und Anlagenerrichter, Mess- und Prüffirmen, Betreiber, Nutzer.
- Durchführung praktischer Unterweisungen für Mitarbeiter von Messfirmen
- Best practice guideline für CFD-Simulationen

6.2. Methodische Vorgehensweise

Für das Umsetzen der gewonnenen Erkenntnisse in Planungs- und Produktdokumentationen wurden Planungs- und Informationsunterlagen von den Forschungs- und Industriepartnern erstellt. Es handelt sich dabei sowohl um interne Projektberichte, als auch um Produktbeschreibungen und Verkaufsunterlagen. Darüber hinaus wurden Projektergebnisse im Rahmen von Fachveranstaltungen dem Fachpublikum präsentiert oder in Fachzeitschriften publiziert (s. Publikationsliste in Anhang 1: Publikationsliste, S. 85). Zu dem Prüfrelement für mobile Umluftreinigungsgeräte (s. Teilprojekt 3) wurden Vulgarisierungsartikel publiziert ([ZIG Newsletter, 2012], [Haustech, 2012]).

Darüber hinaus wurden Führungen für Interessenten (z.B. Kunden von Industriepartnern) im Labor organisiert, mit Präsentation der Prüfanordnung und Demonstration der Messung. Im Rahmen der internationalen SWKI-Hygienetagung 2011 in Luzern wurde eine Laborführung angeboten. Darüber wurde umfangreich in Fachzeitschriften im In- und Ausland berichtet. Eine 4 minütige Reportage für die Schweizer Fernsehendung *10 vor 10* zum Thema aseptische Luft in OP-Räumen wurde zum Teil im OP-Labor der Hochschule Luzern – Technik & Architektur gedreht ([SF, 2010]).

Schulungen im Umfeld der Zulassung von OP-Räumen der Klasse 1a nach SWKI 99-3/DIN 1946-4 (mit als Schwerpunkt, die Schutzgradmessung) wurden vorbereitet und mit Projektexternen durchgeführt. Zur Zielgruppe gehören Architekten und Planer, Komponentenlieferanten und Anlagenerrichter, Mess- und Prüffirmen, Betreiber, etc. Die Inhalte und Dauer der Schulung sind sehr unterschiedlich, abhängig vom Bedarf des Kunden. Es kann sich dabei sowohl um eine reine Demonstration, wie die Messung abläuft, bis hin zur Untersuchung in realem Massstab von konkreten Fragestellungen (z.B. die Sanierung eines OP-Raums mit komplizierter Raumgeometrie) handeln. Abhängig des Komplexitätsgrades der Fragestellung wurden einige dieser Schulungen ausserhalb des GiG-Projektes, als normale Schulungsaufträge an die Hochschule, durchgeführt.

Für Messfirmen wurde ein spezielles Schulungsangebot entwickelt. Im Fokus steht die Anwendung der Schutzgradmessung nach SWKI/DIN 1946-4. Eine solche Schulung dauert i.d.R. 2 Tage und ist folgend strukturiert:

- 1 Tag Theorie zu der Norm (Entstehung, Motivation, Anwendungsbereich, Inhalte, Prinzip, Allgemein zur verwendeten Messtechnik) und Besichtigung des Labors mit Erläuterungen zu der Messanordnung.
- 1 Tag Übung: Versuchsaufbau, Inbetriebnahme der Messtechnik, Schutzgradmessung, Datenauswertung, Ergebnisinterpretation.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 79/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Im Teilprojekt 4 wurde auf Basis der durchgeführten Variantenstudie eine "BEST - PRACTICE - GUIDELINE" für CFD Simulationen im OP Bereich erstellt. Die GUIDELINE ist in folgende Punkte gegliedert:

- Geometriemodell
- Netzgenerierung
- Physikalische Modelle
- Randbedingungen
- Kontrollgrössen
- Berechnungsdurchlauf
- Auswertung Schutzgrad

Nähere Details sind dem Kapitel 10.3 *Anhang 3: Teilbericht: Optimierung der Strömungssimulationen* für OP Räume zu entnehmen.

7. Literaturverzeichnis

- [Admeco, 2012] Admeco AG: Admeco LUX-LED, <http://www.admeco.ch/de/Produkte/ADMECO-Lux/ADMECO-Lux-stromungsoptimierte-Operationsleuchten.html>, Letzter Abruf: 23.05.2012
- [DIN 1946-4, 2008] Deutsches Institut für Normung: DIN 1946-4, Raumluftechnische Anlagen in Gebäuden und Räumen des Gesundheitswesens; Norm; Beuth Verlag; Berlin; 2008
- [EN 14644-3, 2006] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 14644, Reinräume und zugehörige Reinraumbereiche - Teil 3: Prüfverfahren; Norm, Deutsche Ausgabe; Beuth Verlag; Berlin; 2006
- [Zoon et al., 2009] Zoon, W.A.C., Heijden, M.G.M. van der, Hensen, J.L.M. and Loomans, M.G.L.C.: Influence of the shape of surgical lights on the disturbance of the airflow. Proceedings ROOMVENT 2009, pp. 451-458, 2009
- [OENORM H 6020, 2007] Austrian Standards Institute: Lüftungstechnische Anlagen für medizinisch genutzte Räume - Projektierung, Errichtung, Betrieb, Instandhaltung, technische und hygienische Kontrollen; Norm, Wien; 2007
- [SIA 382-1, 2007] Schweizerischer ingenieur-und architektenverein: SIA 382-1, Lüftungs- und Klimaanlagen - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen; Norm, SIA Verlag; Zürich, 2007
- [SWKI 99-3, 2003] Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieuren: Richtlinie 99-3, Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlagen in Spitalbauten (Planung, Bau, Betrieb); Richtlinie; Schönbühl, 2003
- [EN 779, 2009] Deutsches Institut für Normung: EN 779, Partikel-Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik - Bestimmung der Filterleistung; Norm, deutsche Ausgabe; Beuth Verlag; Berlin; 2009
- [Haustech, 2012] Sicre, B., Külpmann, R., Hildebrand K., Plüss, I.: Gebäudetechnik im Gesundheitswesen GiG; Haustech, Ausgabe 5, S. 45; Axel Springer Schweiz AG; Zürich; 2012
- [ZIG Newsletter, 2012] Sicre, B., Hildebrand K.: Prüfverfahren für mobile Raumlufreinigungsgeräte; ZIG Newsletter; Ausgabe 1, S. 2, Hochschule Luzern – Technik & Architektur; Luzern; 2012
- [SF, 2010] Weber, P.: Keimfreie Operationssäle, Schweizer Fernsehen. Sendung 10 vor 10 vom 5.05.2010. Video abrufbar unter: <http://www.videoportal.sf.tv/video?id=828e9b4b-bd5b-41b4-b656-a4d348538ae1>. Zuletzt abgerufen: April 2012.

[Thalmayr, 2012] Thalmayr, M.: Sparen ohne Qualitätsverlust. KMA, 2-2012, Seite 82. ,
[http://www.kma-
online.de/kmamagazin/id__26582__action__download](http://www.kma-online.de/kmamagazin/id__26582__action__download), 2012

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Strömungsprofil beim Gleichstromfeld und beim „Differentialflow“-Feld (Werte beispielhaft)	13
Abbildung 2: Versuchs-OP-Raum (HSLU), Aufbau, Hauptabmessungen und Position von Öffnungen	13
Abbildung 3: Versuchs-OP-Raum (HSLU), Anordnung der Luftdurchlässe bei Verdrängungslüftung (links) und Mischlüftung (rechts) (Volumenströme beispielhaft)	15
Abbildung 4: Versuchs-OP-Raum (HSLU), Anordnung der Luftdurchlässe bei Schichtlüftung, Eckauslass (Volumenströme beispielhaft)	15
Abbildung 5: Versuche mit TAV-Lüftung, Variation der Schürzenlänge, Partikel-Ausströmer gemäss DIN 1946-4/ SWKI 99-3 auf dem Fussboden („Innenlastanordnung“), bzw. bei kurzen Strömungsschürzen auch in 1.7 m Höhe.....	17
Abbildung 6: Schutzgrade bei TAV Lüftung mit 1.0 m bzw. 0.2 m langen Strömungsschürzen.....	17
Abbildung 7: Schutzgrade bei niedriger bzw. hochtemperierten OP-Räumen mit TAV Lüftung (Schürzenlänge 1.0 m).....	19
Abbildung 8: Schutzgrade auf dem OP-Tisch bei periodischer Änderung der Zulufttemperatur (10 min Schritte), Versuche mit langer Strömungsschürze (1.0 m von der Decke) und „optimiertem TAV-Strömungskonzept“	19
Abbildung 9: Schutzgrade auf dem OP-Tisch bei periodischer Änderung der Zulufttemperatur (10 min Schritte) Versuche mit kurzer Strömungsschürze (0.2 m von der Decke) und optimiertem TAV-Lüftungskonzept.....	20
Abbildung 10: OP-Versuchsraum mit reduzierter Raumgrösse und einseitig angeordneten Überströmöffnungen	21
Abbildung 11: Schematische Darstellung „praxisnahe Lastanordnung“ (ohne Massstab)	24
Abbildung 12 „praxisnahe Lastanordnung“ (links), rechteckiges C-Bogen-Kopfteil (rechts)	24
Abbildung 13: Schutzgrade bei Innenlasteintrag, Variation OP-Leuchtenform und -position, Versuchsmerkmale siehe Tab. 2.	26
Abbildung 14: untersuchte DVE-Arme, Geräte-Dummy, Blende	28
Abbildung 15: Positionen der DVE-Arme	29
Abbildung 16: Einfluss einer DVE auf den Schutzgrad bei M1, Position DVE: OP-Tisch Kopfbereich	33
Abbildung 17: Versuchsaufbau mit C-Bogen und thermischer Last im Raumhintergrund	34
Abbildung 18: TAV-Versuche mit C-Bogen, praxisnahen Musterlasten und verschiedene OP-Leuchten-Positionen, siehe Tab. 6.....	36

Horw, 30. Juni 2012

Seite 82/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Abbildung 19: Schutzgrade bei praxisnaher Musterlast mit und ohne periodischer Türöffnung, Raumüberdruck 30 Pa	38
Abbildung 20: Schutzgrade bei Musterlast nach DIN 1946-4/SWKI 99-3 mit periodischer Türöffnung und OP-Übertemperatur gegenüber seiner Umgebung	38
Abbildung 21: Schutzgrade bei Musterlast nach DIN 1946-4/ Swki 99-3 mit periodischer Türöffnung und OP-Untertemperatur gegenüber seiner Umgebung	39
Abbildung 22: Versuchsaufbau zur Schutzgradbestimmung bei Betrieb von einem Warmluftheizsystem zur Patientenwarmhaltung	40
Abbildung 23: Versuchsaufbau zur Schutzgradbestimmung bei Betrieb eines Warmflächenheizsystems zur Patientenwarmhaltung, simuliert durch eine hohe Beheizung vom Patientendummy (200 W)	40
Abbildung 24: Schutzgrade bei TAV-Lüftung mit praxisnaher Musterlast und Patienten-Wärmesystem.Feldmessungen: Warmluftsystem (WL), Labormessungen: Warmflächensystem (WF) und Variation der OP-Leuchtengrösse (Leuchtenflächendurchmesser)	41
Abbildung 25: Erholzeiten von Luftverunreinigungen im Schutzbereich bei Mischlüftung und TAV-Lüftung (Beispielfälle). Die Verunreinigung des Schutzbereiches wurde bei TAV-Lüftung durch strömungsungünstig geformte OP-Leuchten provoziert	43
Abbildung 26: Gemessene und berechnete Erholzeiten bei OP mit Mischlüftung, Luftwechselzahl $LW = 35 \text{ h}^{-1}$	44
Abbildung 27: Versuchsaufbau beim OP-Lüftungskonzept „Schichtlüftung“ mit hochgestellten Partikelauströmern	46
Abbildung 28: Charakteristische Temperaturen bei Schichtlüftung: Lage, zeitlicher Verlauf bei den Versuchen	46
Abbildung 29: Schutzgrade über der Raumhöhe bei Schichtlüftung und Partikelquellenaufgabe in 2 m Raumhöhe	47
Abbildung 30: Schutzgrade auf dem OP-Tisch bei Variation der Partikelquelle bei Schichtlüftung und Mischlüftung	48
Abbildung 31: Schichtlüftung: Schutzgradbeeinträchtigung auf dem OP-Tisch durch periodische Türöffnungen	49
Abbildung 32: OP-Raum mit Mischlüftung und hoher Musterlastbelegung	51
Abbildung 33: OP-Raum mit Mischlüftung: Erholzeiten für leeren und mit Musterlasten gefüllten OP-Raum	52
Abbildung 34: Schutzgrade nach DIN/SWKI ohne und mit Patienten-Dummy und verschiedenen Schürzenlängen	54
Abbildung 35: Versuche mit Variation von Patienten-Dummy, Schürzenlänge und Partikellastaufgabeort	55
Abbildung 36: Versuchsergebnisse ohne und mit Patienten-Dummy sowie Variation von Schürzenlänge und Partikellastaufgabeort	55
Abbildung 37: Partikelbilanz ADD 536: Volumenströme V und Konzentrationen c	57
Abbildung 38: Topas ADD 536 mit Schläuchen und Ausströmern	58

Horw, 30. Juni 2012

Seite 83/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Abbildung 39: Vergleich der Schutzgrade bei Verwendung von zwei verschiedenen Partikelauflage-Systemen	59
Abbildung 40: Aerosolverteilsystem HSLU (links, im Bild vorne rechts: Partikelkonzentrationsprüfung bei einem Ausströmer), Gerät des Projektpartners (rechts)	60
Abbildung 41: Erhozeitsmessung	63
Abbildung 42: Standardprüfanordnung für die Filterbeladung	64
Abbildung 43: Prüfformular Seite 6, Prüfkenngrößen	65
Abbildung 44: Prüfraum, Prinzipschema Standardprüfanordnung des Patientenbettes, der Messgeräte und des Zubehörs, sowie der Lage der Messstellen.....	66
Abbildung 45: Klassifizierungskriterien	67
Abbildung 46 Einfluss der Turbulenzmodellierung und der Randbedingungen	72
Abbildung 47: Einfluss der untersuchten Varianten auf die benötigten Rechenzeit	73
Abbildung 48 Rauchausbreitung mit unterschiedlichen OP–Leuchten in Abhängigkeit der Zeit (Zeitpunkt = 60 s, Konzentrationsgrenze = 1×10^{-5} [-])	75
Abbildung 49: Geschwindigkeitsverteilung mit Differentialflow bei den drei untersichten Varianten	77

9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Versuchsmatrix „verkleinerter OP, einseitige Abstr mung“ mit Darstellung der Ergebnisse.....	22
Tabelle 2: Versuche mit Variation von Überströmung, OP-Leuchtenformen, -positionen, Musterlasten im Schutzbereich.....	25
Tabelle 3: Versuchsmatrix mit Darstellung der Ergebnisse: Messungen mit DVE	30
Tabelle 4: Versuchsmatrix mit Darstellung der Ergebnisse: Messungen mit DVE	31
Tabelle 5: Versuchsmatrix mit Darstellung der Ergebnisse: Messungen mit DVE	32
Tabelle 6: Versuche im Labor-OP-Raum mit Differentialflow, Nachstellung: Operation mit C-Bogen.....	35

Horw, 30. Juni 2012

Seite 84/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

10. Anhang

Horw, 30. Juni 2012

Seite 85/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

10.1. Anhang 1: Publikationsliste

Name, Vorname	Publikationstitel bzw. Vortragstitel	Publikationsorgan bzw. Vortragort
Jahr 2009		
Külpmann, Hildebrand, Lüderitz, Sturny	Möglichkeiten und Grenzen von turbulenzarmer Verdrängungsströmung in Operationsräumen - Ein Zwischenbericht	Jahrestagung des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins (DKV)
Kurt Hildebrand	Effiziente Gebäudetechnik im Gesundheitswesen	4. Haustech Planertag Zürich Kongresshaus
Benoit Sicre	"GiG" - Building Services Engineering in Health Care	Ventilation 2009, Zürich, Schweiz, 20.10.2009
Jahr 2010		
R. Külpmann, K. Hildebrand, P. Sturny	Raumlufttechnik in OP-Abteilungen – Empfehlungen zur Anwendung der DIN 1946-4	WGKT-Tagung: September 2010, Hannover
Pascal Sturny	Méthode de qualification des salles d'opération en Suisse	Salles Propres, le magazine de la maîtrise de la contamination, Ausgabe 68, 2010
Pascal Sturny	Determining the positions and movements of operating staff and lights during prosthetics operations and their influences on the particle contamination simulated and analyzed in an operating room lab.	REHVA Clima 2010 conference, Antalya
Knochen, Hübner, Below, Assadian, Külpmann, Hildebrand, et al	Einfluss der Fussbodendesinfektion auf die mikrobielle und partikuläre Belastung der Raumluft in Augen-OP-Räumen mit Verdrängungslüftungsbereichen.	Klin Monatsbl Augenheilkd 2010, 227: 871-878
Mölter L, Hildebrand K, Külpmann R	Gesunde Luft – Bestimmung der Schutzwirkung von Belüftungssystemen in Operationssälen.	Reinraumtechnik 04/2010
Kurt Hildebrand	Building Technology in Health Care "GiG"	REHVA Clima 2010 conference, Antalya
Neue Luzerner Zeitung	Luzerner schaffen saubere OP-Luft	Neue Luzerner Zeitung, 8. Juni 2010
R. Külpmann, K. Hildebrand, P. Sturny	Leserbrief zum KRINKO-Kommentar	CCI

Horw, 30. Juni 2012

Seite 86/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Jahr 2011		
K. Hildebrand, R. Külpmann, St. Bolliger, A. Gadiant	Bessere Aerodynamik in modernen OP- Räumen	Spektrum GebäudeTechnik - SGT 5/2011
Kurt Hildebrand, Rüdiger Külpmann	Gute Lüftung im OP – neue Forschungsergebnisse von der Hochschule Luzern	Schweizer Hygienetagung Luzern 2011
Rüdiger Külpmann	Zur Wirksamkeit von OP-Lüftung unter typischen Praxisbedingungen.	Vortrag, IHS-Fachtagung, 6. Mai 2011, Nottwil
Rüdiger Külpmann	Forced-Air Warming Does Not Worsen Air Quality in Laminar flow Operating Rooms	Anesthesia & Analgesia, International Anesthesia Research Society. (im Druck)
Rüdiger Külpmann , Axel Kramer	Raumlufttechnische Anlagen	Krankenhaus und Praxishygiene. 2. Auflage. Urban und Fischer Verlag
Jahr 2012		
Benoit Sicre, Kurt Hildebrand, Rüdiger Külpmann, Pascal Sturny	Recommandations pour les systèmes aérauliques	Salles Propres, le magazine de la maîtrise de la contamination, Ausgabe 79, April 2012
Benoit Sicre, Rüdiger Külpmann, Kurt Hildebrand, Iwan Plüss	Gebäudetechnik im Gesundheitswesen GiG	Haustech 2012, Extrabeilage HSLU

Horw, 30. Juni 2012

Seite 87/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

10.2. Anhang 2: Prüfrichtlinie für mobile Raumlufreinigungsgeräte

Prüfrichtlinie für mobile Raumluftreinigungsgeräte

Herausgeber:

**Hochschule Luzern, Technik & Architektur
Zentrum für Integrale Gebäudetechnik**

Datum: 10.7.2012

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	5
EINLEITUNG	6
SYMBOLE UND ABKÜRZUNGEN	7
1. GELTUNGSBEREICH / ANWENDUNG	9
1.1. GERÄTE	9
2. VERWEISUNGEN AUF ANDERE TECHNISCHE REGELWERKE	10
2.1. RICHTLINIEN	10
2.2. NORMEN	11
3. PRÜFUMFANG	13
4. BEGRIFFE UND DEFINITIONEN	14
4.1. BEGRIFFE	14
4.1.1. 100:1 Erholzeit.....	14
4.1.2. Aerosol.....	14
4.1.3. Aerosolgenerator.....	14
4.1.4. Molekularfilter	14
4.1.5. Staubbeladener Filter.....	14
4.1.6. Dispergiervolumenstrom	14
4.1.7. Dosierkonstanz	14
4.1.8. Druckluft	14
4.1.9. Elektrostatisch entladener Filter	14
4.1.10. Flüssigkeitsvernebler.....	14
4.1.11. HEPA- und ULPA-Filter	14
4.1.12. IPA-Vapor Konditionierung (IPA; Isopropanol).....	14
4.1.13. Kombifilter	15
4.1.14. Mobile Raumlufreinigungsgeräte	15
4.1.15. Nachhallzeit	15
4.1.16. Nennluftmenge.....	15
4.1.17. Neuer Filter.....	15
4.1.18. Optisches Aerosolspektrometer	15
4.1.19. Optischer Partikelzähler.....	15
4.1.20. OAS und OPC Gerätekenngrossen.....	15
4.1.20.1. Grössenauflösungsvermögen R	15
4.1.20.2. Klassifiziergenauigkeit \mathcal{E}	15
4.1.20.3. Koinzidenz.....	15
4.1.20.4. Maximal messbare Partikelkonzentration $C_{n,max}$	16
4.1.20.5. Zählwirkungsgrad η	16
4.1.21. Partikel	16
4.1.22. Partikelgrösse	16
4.1.23. Partikelkonzentration	16
4.1.24. Partikuläre Filter	16
4.1.25. Polydispers.....	16
4.1.26. Prüfaerosol.....	16
4.1.27. Prüfpartikelkonzentration.....	16

4.1.28.	<i>Raumhöhe bzw. lichte Raumhöhe</i>	16
4.1.29.	<i>Reingas</i>	16
4.1.30.	<i>Richtfaktor Q</i>	16
4.1.31.	<i>Rohgas</i>	17
4.1.32.	<i>Schalldruckpegel</i>	17
4.1.33.	<i>Schallleistungspegel</i>	17
4.1.34.	<i>Standzeit</i>	17
4.1.35.	<i>Staub</i>	17
4.1.36.	<i>Staubbelastung</i>	17
4.1.37.	<i>Staubdispergierer</i>	17
4.1.38.	<i>Testpartikelkonzentration</i>	17
4.1.39.	<i>Tonhaltigkeit</i>	17
4.1.40.	<i>Tonzuschlag</i>	17
4.1.41.	<i>Umgebungspartikelkonzentration</i>	17
4.1.42.	<i>Verdünnungssystem</i>	18
4.1.43.	<i>Vermischungsventilator</i>	18
5.	GERÄTEKENNGRÖSSEN	19
5.1.	LUFTFILTER	19
5.2.	FILTERWECHSEL	19
5.2.1.	<i>Filtereigenschaften</i>	19
5.2.2.	<i>Filterwechsel</i>	19
5.3.	LUFTWECHSEL IM RAUM	20
5.4.	LEISTUNGS-AUFNAHME DES GERÄTES	20
5.5.	LUFTEINTRITT UND LUFTAustrITT	20
5.6.	BEDIENBARKEIT.....	20
5.7.	WARTUNG	20
5.8.	GERÄTESICHERHEIT	20
5.9.	OPTISCHE UND AKUSTISCHE ANSPRÜCHE	20
5.10.	GERÄTEAUFSTELLUNG	21
6.	PRÜFKENNGRÖSSEN	22
6.1.	100:1 ERHOLZEIT	22
6.1.1.	<i>100:1 Erholzeit mit neuem Filter</i>	22
6.1.2.	<i>100:1 Erholzeit mit elektrostatisch entladene[m] Filter</i>	22
6.1.3.	<i>100:1 Erholzeit mit staubbeladene[m] Filter</i>	22
6.2.	SCHALLEMISSIONEN DES GERÄTES	22
6.3.	BEHAGLICHKEITSRELEVANTE RAUMLUFTGESCHWINDIGKEIT	22
7.	PRÜFEINRICHTUNGEN UND PRÜFMITTEL	23
7.1.	PRÜFEINRICHTUNGEN.....	23
7.1.1.	<i>Prüfraum</i>	23
7.1.2.	<i>Positionierung des Prüflings</i>	24
7.1.3.	<i>Prüfanordnung zur Ermittlung der 100:1-Erholzeit</i>	25
7.1.4.	<i>Prüfanordnung Filterbelastung</i>	26
7.1.5.	<i>Standardprüfanordnung Luftgeschwindigkeit</i>	27
7.1.6.	<i>Ermittlung des Schallleistungspegels</i>	27
7.2.	ANFORDERUNGEN AN DIE PRÜFMITTEL	27
7.2.1.	<i>100:1 Erholzeitmessung</i>	27
7.2.1.1.	<i>Flüssigkeitsvernebler</i>	27

7.2.1.2.	Verdünnungssysteme.....	27
7.2.1.3.	Optischer Partikelzähler (OPC)	28
7.2.2.	Filterbeladung.....	28
7.2.2.1.	Staubdispergierer	28
7.2.2.2.	Prüfstaub	28
7.2.3.	Schallmessung.....	28
7.2.4.	Luftgeschwindigkeit.....	28
7.2.5.	Leistungsbedarf.....	28
8.	PRÜFVERFAHREN	29
8.1.	ALLGEMEINES	29
8.2.	MESSUNG DES VOLUMENSTROMES	29
8.3.	LUFTWECHSELZAHL	29
8.4.	LEISTUNGS-AUFNAHME DES GERÄTES	29
8.5.	ERMITTLUNG DER 100:1-ERHOLZEIT BEIM GERÄTEZUSTAND „FILTER NEU“	29
8.5.1.	Versuchsbedingungen.....	29
8.5.2.	Prüfung	30
8.5.3.	Auswertung.....	30
8.6.	ERMITTLUNG DER 100:1-ERHOLZEIT BEIM GERÄTEZUSTAND „FILTER ELEKTROSTATISCH ENTLADEN“	30
8.6.1.	Filterentladung.....	30
8.6.2.	Messung der 100:1-Erholzeit mit elektrostatisch entladene Filter	30
8.7.	ERMITTLUNG DER 100:1-ERHOLZEIT BEI STAUBBELADENEM FILTER.....	30
8.7.1.	Filterbeladung.....	30
8.7.2.	Messung der 100:1-Erholzeit bei staubbeladenem Filter.....	31
8.8.	SCHALLEMISSION	31
8.8.1.	Schalldruckpegel	31
8.8.2.	Zuschlag Tonhaltigkeit	31
8.8.3.	Relevante Schallemission	32
8.9.	RAUMLUFTGESCHWINDIGKEIT.....	32
9.	PRÜFBERICHT.....	33
10.	KLASSIFIZIERUNG.....	34
10.1.	KLASSIFIZIERUNGSKRITERIEN	34
A 1.	MUSTER PRÜFFORMULAR.....	35
A 2.	SCHALLEMISSION.....	42
A 2.1.	BERECHNUNG DER ÄQUIVALENTEN SCHALLABSORPTIONSFLÄCHE MIT VDI 2081 WERTEN ..	42
A 2.2.	RICHTFAKTOR Q	42
A 2.3.	ABSTAND D.....	43

Vorwort

Die Luftbelastung mit Mikroorganismen, allergenen Belastungsträgern und Feinstaub in Innenräumen ist für viele Menschen ein gesundheitsgefährdender Faktor. Nach Mitteln und Wegen zum Schutz wird gesucht.

Neben den Anwendungen im privaten Umfeld betrifft die Thematik stationäre Patienten mit luftübertragbaren Infektionskrankheiten und mit geschwächter Immunabwehr. Hier steht der Patienten- und Personalschutz gleichermaßen im Vordergrund.

Eine der naheliegenden Lösungen ist die Verwendung von mobilen Raumlufreinigungsgeräten, mit einer anwendungsspezifischen Leistung.

Die Leistung dieser Geräte ist dadurch definiert, wie viele potenziell gesundheitsschädigende Partikel in einer bestimmten Zeit aus der Raumluft ausfiltriert werden können.

Von Bedeutung für den Anwender sind der Platzbedarf und die Bedienbarkeit des Gerätes, der Wirkungsgrad der eingesetzten Filter, die Schallemission des Gerätes (Lärmbelastung im Raum) und die Raumlufgeschwindigkeiten (Zugluft). Alle anderen Funktionen bisher marktüblicher solcher Geräte wie zuführen von Geruchsstoffen, Befeuchten mit keimhaltigem Wasser, unregelmäßige Ozonisierung der Luft etc. haben nicht selten einen negativen Einfluss auf die Gesundheit der betroffenen Menschen.

Auf dem Markt gibt es unzählige verschiedene Luftreinigungsgeräte, für die es jedoch kein einheitliches Prüfverfahren der Leistungsfähigkeit gibt. Um möglichst objektiv beurteilen zu können, dass Geräte zum Einsatz kommen, die für schutzbedürftige Personen geeignet sind, ist ein einheitliches Prüfverfahren erforderlich. Dieses sollte dem Geräteanwender ermöglichen, ein für den jeweiligen Anwendungsbereich / Anwendungsfall geeignetes Gerät auswählen zu können.

Mit der nachfolgenden Prüfrichtlinie für mobile Raumlufreinigungsgeräte soll ein Beitrag zu einem reproduzierbaren, zielgerichteten Prüfverfahren geleistet werden.

Einleitung

Diese Richtlinie beschreibt ein reproduzierbares Prüfverfahren für mobile und leicht montierbare / demontierbare Raumlufreinigungsgeräte, welche in privaten oder öffentlichen Räumen zur Anwendung kommen. Anhand der Prüfkenngrossen lassen sich die Geräte klassifizieren und ermöglichen es dem Geräteanwender, für den jeweiligen Anwendungsfall ein geeignetes Gerät auszuwählen.

Als Grundlage für die Entwicklung des Prüfverfahrens dienten verschiedene Normen und Regelwerke, wissenschaftliche Untersuchungen sowie Erfahrungswerte von Fachleuten aus dem klimatechnischen Berufsfeld sowie dem medizinischen Umfeld.

Symbole und Abkürzungen

$A_{ges,T=1}$	Äquivalente Schallabsorptionsfläche	$[m^2]$
A_{PrR}	Fläche des Prüfraums	$[m^2]$
C_m	Beladungskonzentration in der Zuluft für die Filterbeladung	$[mg/m^3_{VZUL}]$
C_n	Partikelkonzentration welche im Flüssigkeitsvernebler erzeugt werden kann	$[P/cm^3]$
$C_{n,max}$	Maximal messbare Partikelkonzentration	$[P/m^3]$
C_{Roh}	Rohluft-Partikelkonzentration	$[P/m^3]$
$C_{OPC,max}$	Maximal messbare Partikelkonzentration des Partikelzählers	$[P/m^3]$
$C_{n,um}$	Umgebungspartikelkonzentration im Prüfraum	$[P/m^3]$
$C_{n,prüf}$	Prüfaerosolkonzentration	$[P/m^3]$
d	Abstand zwischen Kopffende des Patientenbettes und Schallquelle	$[m]$
δ_g	Geometrische Standardabweichung	$[-]$
ε	Klassifiziergenauigkeit	$[%]$
K_T	Zuschlag für die Tonhaltigkeit	$[dB]$
L_W	Schalleistungspegel	$[dB]$
L_p	Schalldruckpegel	$[dB]$
$L_{p,A,VDI}$	A-bewerteter Schalldruckpegel nach VDI 2081	$[dB(A)]$
$L_{p,A,max}$	Maximaler A-bewerteter Schalldruckpegel	$[dB(A)]$
$L_{w,A,Gerät}$	A-bewerteter Gesamt Schalleistungspegel des Gerätes	$[dB(A)]$
LW	Luftwechsel	$[h^{-1}]$
η	Zählwirkungsgrad	$[%]$
$P_{el,Gerät}$	Leistungsaufnahme des Raumlufreinigers	$[W]$

R	Grössenauflösungsvermögen	[%]
$t_{0,01}$	100:1 Erholzeit	[min]
t_n	Uhrzeit beim Erreichen der 1% Konzentration	[h,min,s]
t_{100n}	Uhrzeit beim Start der 100% Messung	[h,min,s]
$T_{VDI2081}$	Nachhallzeit eines Betenzimmers nach VDI 2081	[s]
V_f	Verdünnungsfaktor der verwendeten Verdünnungsstufen	[-]
$v_{L,PrR}$	Mittlere Luftgeschwindigkeit an der Messstelle	[m/s]
V_{PrR}	Volumen des Prüfraumes	[m ³]
V_R	Volumen eines beliebigen Raumes	[m ³]
V_{UML}	Volumenstrom bei der Nennluftmenge des Gerätes	[m ³ /h]
V_{ZUL}	Zuluftvolumenstrom in die Prüfkammer bei der Staubbeladung	[m ³ /h]
W	Schallleistung	[W]
W_p	Bezugsschallleistung	[W]
Q	Richtfaktor	[-]

1. Geltungsbereich / Anwendung

1.1. Geräte

Diese Prüfrichtlinie legt die Anforderungen an die Prüfung mittels der 100:1 Erholzeit, Schallemission und Raumlufgeschwindigkeit in einem definierten Prüfraum fest. Dabei werden die Geräte als Gesamtsystem betrachtet.

Die Geräte haben im Allgemeinen folgende minimale Ausrüstung:

- Ventilator
- Luftfilter
- Steuer- oder Regeleinrichtung

Ein derartiges Gerät ist als vollständige Baugruppe zusammen mit einer zusätzlichen Filtereinheit und der Betriebsanleitung der zuständigen Prüfstelle zur Verfügung zu stellen.

Bedingt durch das Messprinzip ist diese Richtlinie nicht geeignet um das Verhalten von Luftreinigungsgeräten zu prüfen deren Wirkung ganz oder teilweise auf Ionisation und Elektrofiltern beruht.

2. Verweisungen auf andere technische Regelwerke

Die folgenden zitierten Dokumente enthalten Festlegungen, welche dieser Prüfrichtlinie zugrunde liegen. Teilweise wird im Richtlinien text direkt auf die untenstehenden Dokumente verwiesen. Bei undatierten Verweisungen ist die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokumentes anzuwenden.

2.1. Richtlinien

SWKI VA 101-01:	Klassifizierung, Testmethoden und Anwendung von Luftfiltern
SWKI VA 104-01:	Hygiene-Anforderungen an Raumluftechnische Anlagen und Geräte
SWKI 99-3:	Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage n in Spitalbauten (Planung, Bau, Betrieb)
VDI 2081, Blatt 1:	Geräuscherzeugung und Lärm minderung in Raumluftechnischen Anlagen
VDI 2081, Blatt 2:	Geräuscherzeugung und Lärm minderung in Raumluftechnischen Anlagen – Beispiele
VDI 2083 Blatt 3:	Reinraumtechnik - Messtechnik in der Reinraumluft
VDI 3491, Blatt 2:	Messen von Partikeln; Herstellungsverfahren für Prüfaerosole; Grundlagen und Übersicht
VDI 3491, Blatt 15:	Messen von Partikeln - Herstellungsverfahren für Prüfaerosole - Verdünnungssysteme mit kontinuierlichem Durchfluss
VDI 3867:	Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration und Anzahlgrößenverteilung – Grundlagen
734.26	Verordnung über elektrische Niederspannungserzeugnisse (NEV)
2006/95/EG	Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten betreffend elektrische Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen

2.2. Normen

SIA 181:	Schallschutz im Hochbau
SIA 382-1:	Lüftungs- und Klimaanlageanlagen - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen
SIA Merkblatt 2023:	Lüftung in Wohnbauten
SN EN 779:	Partikel-Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik - Bestimmung der Filterleistung
SN EN 1822-1:	Schwebstofffilter (EPA, HEPA und ULPA) – Teil1: Klas- sifikation, Leistungsprüfung, Kennzeichnung
SN EN 12831:	Heizungsanlagen in Gebäuden – Verfahren zur Be- rechnung der Norm-Heizlast
DIN EN 60529:	Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code)
DIN EN 60051-3:	Direkt wirkende anzeigende elektrische Messgeräte und ihr Zubehör; Messgeräte mit Skalenanzeige; Teil 3: Spezielle Anforderungen für Wirk- und Blindleistungs- Messgeräte
SN EN 61140+A1:	Schutz gegen elektrischen Schlag – Gemeinsame An- forderungen für Anlagen und Betriebsmittel
SN EN ISO 3741:	Akustik - Ermittlung der Schalleistungs- und Schalle- nergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmes- sungen - Hallraumverfahren der Genauigkeitsklasse 1
SN EN ISO 7730:	Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit
SN EN 13829,	Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Bestim- mung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden - Diffe- renzdruckverfahren
SN EN ISO 14644-1:	Reinräume und zugehörige Reinraumbereiche – Teil 1: Klassifizierung der Luftreinheit
EN ISO 14644-3:	Reinräume und zugehörige Reinraumbereiche – Teil 3: Prüfverfahren

IEC 60335-1:	Sicherheit elektrischer Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke – Teil 1: Allgemeine Anforderungen
IEC 60335-2-65:	Sicherheit elektrischer Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke – Teil 2 - 65: Besondere Anforderungen für Luftreinigungsgeräte
ISO 12103-1:	Strassenfahrzeuge – Prüfstaub zur Bewertung von Filtern – Teil 1: Arizona Prüfstaub
ISO 21501-1:	Bestimmung der Partikelgrößenverteilung – Optische Einzelpartikelmethode – Teil 1: Streulicht-Aerosolspektrometer
ISO 21501-4:	Bestimmung der Partikelgrößenverteilung – Partikelmessung durch Lichtstreuung an Einzelpartikeln – Teil 4: Luft-Streulichtpartikelzähler für Reinnräume
DIN 1946-4:	Raumluftechnik – Teil 4: Raumluftechnische Anlagen in Gebäuden und Räumen des Gesundheitswesens
DIN 45645-1:	Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen – Teil 1: Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft
DIN 45645-2:	Ermittlung des Beurteilungspegels am Arbeitsplatz bei Tätigkeiten unterhalb des Pegelbereiches der Gehörgefährdung
DIN 45681:	Akustik – Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen
UL 507, 9 th Ed.:	Electric Fans
CSA C22.2 No. 113-08:	Fans and Ventilators

3. Prüfumfang

Die gesamte Prüfung ist unterteilt in die Ermittlung von Prüfkenngrößen und Gerätekenngößen.

Die Prüfkenngrößen sind normativ und dienen als Entscheidungsgrundlage für die Klassifizierung der Raumlufreinigungsgeräte. Die Messungen erfolgen bei der vom Hersteller definierten Nennluftmenge. Auf Wunsch, kann der Kunde weitere Luftmengen (Ventilatorstufen) angeben, bei welchen das Gerät ausgemessen werden soll.

Die Gerätekenngößen sind informativ. Dabei werden die Gerätekenngößen gemessen oder dokumentiert und im Prüfformular aufgeführt, jedoch nicht bewertet. Diese Angaben sind rein informativ und können dem Anwender als Entscheidungshilfe dienen.

Folgende Gerätekenngößen werden aus Herstellerangaben oder durch Sichtprüfung ermittelt und bleiben unbewertet:

- Angaben zu den Filterklassen und Prüfverfahren (nach SWKI VA 101-01)
- Angaben zum Filterwechsel und zur Standzeit
- Luftwechsel welcher durch das Gerät im Prüfraum erzeugt wird
- Leistungsbedarf ganzes Gerät
- Position des Luftaustritts und des Lufteintritts am Gerät
- Bedienbarkeit durch den Anwender
- Wartungsaufwand
- Gerätesicherung
- Optische Erscheinung
- Geräteaufstellung

Die nachfolgenden Gerätekenngößen werden mittels Messungen bestimmt:

- Volumenstrom (V_{UML}) und der daraus resultierende Raumluftwechsel im Prüfraum mit neuem Filter
- Volumenstrom (V_{UML}) und der daraus resultierende Raumluftwechsel im Prüfraum mit staubbeladenem Filter
- Leistungsaufnahme mit neuem Filter
- Leistungsaufnahme mit staubbeladenem Filter

Folgende Prüfkenngrößen werden für eine Klassifizierung der Geräte gemessen und bewertet:

- 100:1 Erholzeit mit neuem Filter
- 100:1 Erholzeit mit elektrostatisch entladene Filter
- 100:1 Erholzeit mit staubbeladenem Filter
- Schallemissionen des Gerätes
- Behaglichkeitsrelevante Raumlufgeschwindigkeit

4. Begriffe und Definitionen

4.1. Begriffe

Für die Anwendung dieser Prüfrichtlinie gelten folgende Begriffe.

4.1.1. 100:1 Erholzeit

Die 100:1 Erholzeit stellt die Leistungsfähigkeit mobiler Raumlufreinigungsgeräte bezüglich der Reinigung eines bestimmten Raumvolumens innerhalb einer bestimmten Zeit dar, in der die anfängliche Prüfpartikelkonzentration auf 1% gesenkt wird. Die aufzugebende Testpartikelkonzentration muss mindestens um den Faktor 500 über der Umgebungskonzentration im Prüfraum liegen. Die 100:1 Erholzeit wird als $t_{0,01} = t_n - t_{100n}$ dargestellt.

4.1.2. Aerosol

Disperses System, dessen disperse Phase fest oder flüssig im Partikelgrößenbereich von 0,001 – 100 µm liegt und dessen umgebendes Medium gasförmig ist.

4.1.3. Aerosolgenerator

Gerät zur kontinuierlichen Erzeugung von Aerosolen mit einer bekannten und konstanten Konzentration und Größenverteilung.

4.1.4. Molekularfilter

Sind Filter die Gase abscheiden.

4.1.5. Staubbeladener Filter

Filter der gemäss Verfahren 8.7.1 mit Prüfstaub beaufschlagt wurde um eine angenommene Umweltbelastung von ca. 6 Monaten Dauerbetrieb zu simulieren.

4.1.6. Dispergiervolumenstrom

Volumenstrom, der zur pneumatischen Dispergierung von Haufwerken und Suspensionen benötigt wird.

4.1.7. Dosierkonstanz

Die Dosierkonstanz ist die Abweichung vom arithmetischen Mittelwert.

4.1.8. Druckluft

Die Druckluft zum Dispergieren von Stäuben und Flüssigkeiten sowie zum Verdünnen von Aerosolen muss öl- und staubfrei sein.

4.1.9. Elektrostatisch entladener Filter

Filter der gemäss Verfahren 4.1.12 mit Isopropylalkoholdampf konditioniert wurde um allenfalls vorhandene Ladungseffekte im Filtermedium zu eliminieren.

4.1.10. Flüssigkeitsvernebler

Flüssigkeitsvernebler sind in der VDI 3491 zum Erzeugen von Prüfaerosolen aus Flüssigkeiten beschrieben.

4.1.11. HEPA- und ULPA-Filter

HEPA- und ULPA-Filter werden nach EN1822 klassifiziert und getestet.

4.1.12. IPA-Vapor Konditionierung (IPA; Isopropanol)

Die Filtereinheiten werden für die Messung der 100:1-Erholzeit elektrostatisch entladen. Die statisch geladenen Filter werden mittels der IPA-Vapor Konditionierung gemäss Ver-

fahren 8.6.1 elektrostatisch entladen. Auch Filter, welche als „nicht geladen“ deklariert sind werden dieser Prozedur unterzogen.

4.1.13. Kombifilter

Sind Filter die Partikel und Gase abscheiden.

4.1.14. Mobile Raumlufreinigungsgeräte

Das zu prüfende Raumlufreinigungsgerät muss innerhalb kurzer Zeit montiert oder demontiert werden können. Neben am Boden stehenden oder fahrbaren Geräten gehören wand- oder deckenbefestigte Geräte explizit auch zu den mobilen Raumlufreinigungsgeräten, solange diese nicht zum festen Decken- oder Wandverbund des Raumes gehören und entsprechend schnell montier- und demontierbar sind.

4.1.15. Nachhallzeit

Mit Hilfe der Nachhallzeit T wird das Schall-Absorptionsvermögen eines Raumes beurteilt.

4.1.16. Nennluftmenge

Als Nennluftmenge gilt die Herstellerangabe.

4.1.17. Neuer Filter

Filter im Anlieferzustand wie im neuen Gerät eingebaut oder neu bzw. als Ersatz mitgeliefert.

4.1.18. Optisches Aerosolspektrometer

Optische Aerosolspektrometer (OAS) nach ISO 21501-1 können hohe Partikelkonzentrationen, Prüfaerosole, Umweltaerosole schnell und zuverlässig bezüglich der Partikelgrösse und der Partikelkonzentration messen.

4.1.19. Optischer Partikelzähler

Optische Partikelzähler (OPC) nach ISO 21501-4 können niedrige Partikelkonzentrationen in reinen Räumen schnell und zuverlässig messen. Sie arbeiten meist mit einem hohen Probenahmevolumenstrom z. B. 28,3 l/min. Im Gegensatz zu den optischen Aerosolspektrometern benötigen sie kein gutes Partikelgrössenaufklärungsvermögen und keine gute Partikelgrössenklassifizierungsgenauigkeit.

4.1.20. OAS und OPC Gerätegrössen

4.1.20.1. Grössenaufklärungsvermögen R

Das Grössenaufklärungsvermögen gibt an, welche Partikelgrössen eindeutig voneinander unterschieden werden können. Die Bestimmung des Grössenaufklärungsvermögens ist in der ISO 21501-1 und ISO 21501-4 definiert.

4.1.20.2. Klassifizierungsgenauigkeit ϵ

Inwieweit stimmt der mittlere Partikeldurchmesser mit dem tatsächlichen mittleren Durchmesser oder Referenzdurchmesser überein. Die Bestimmung der Klassifizierungsgenauigkeit ist in der ISO 21501-1 und ISO 21501-4 definiert.

4.1.20.3. Koinzidenz

Messfehler eines Partikelzählgerätes. Innerhalb des Messvolumens eines Partikelzählgerätes darf sich zu jeder Zeit nur ein Partikel befinden, da es sonst zu den so genannten Koinzidenzfehlern kommt. Dabei erfasst der Partikelzähler mehrere Partikel gleichzeitig, wodurch die Konzentration der Partikel zu niedrig und deren Durchmesser zu gross bestimmt werden. Um Fehlmessungen zu vermeiden ist die Koinzidenzgrenze $C_{n,max}$ des

jeweiligen Messgerätes zu beachten und gegebenenfalls Verdünnungsstufen zu verwenden.

4.1.20.4. Maximal messbare Partikelkonzentration $C_{n,max}$

Die maximal messbare Partikelkonzentration darf nicht überschritten werden, damit die Koinzidenzfehler vermieden werden.

4.1.20.5. Zählwirkungsgrad η

Wie viele Partikel eines Prüfaerosols werden bei bekannter Grösse und Konzentration tatsächlich gemessen. Die Bestimmung des Zählwirkungsgrades ist in der ISO 21501-1 und ISO 21501-4 definiert.

4.1.21. Partikel

Festes oder flüssiges Teilchen mit definierten physikalischen Grenzen.

Ein homogener Partikel besteht aus einem einheitlichen Stoff konstanter Dichte. Primärpartikel sind solche, die erkennbar von einer einzigen zusammenhängenden Phasengrenzfläche eingehüllt sind.

Aggregatpartikel bestehen aus aneinanderhaftenden Primärpartikeln. Agglomerate, Koagulate und Konglomerate sind im Sinne dieser Richtlinie als Beimengungen in Gasen Aggregatpartikel.

4.1.22. Partikelgrösse

Längenangabe zur Beschreibung der Grösse eines Partikels, im Allgemeinen ein Durchmesser.

4.1.23. Partikelkonzentration

Partikelförmige Beimengungen in Gasen werden mit Hilfe der Anzahl-, Volumen- und Massenkonzentration angegeben.

4.1.24. Partikuläre Filter

Sind Filter die Partikel abscheiden.

4.1.25. Polydispers

Ein Aerosol wird als polydispers bezeichnet, wenn seine Verteilungssummenfunktion eine geometrische Standardabweichung von $\delta_g > 1,5$ aufweist.

4.1.26. Prüfaerosol

Aerosol zur Kalibrierung und zur Überprüfung von Geräteeigenschaften.

4.1.27. Prüfpartikelkonzentration

Ist die Testpartikelkonzentration plus die Partikelkonzentration in der Umgebung.

4.1.28. Raumhöhe bzw. lichte Raumhöhe

Raumhöhe definiert durch die sichtbaren oberen und unteren Raumgrenzen.

4.1.29. Reingas

Als Reingas wird der aus einem Abscheider austretende, von den abzuscheidenden Stoffen weitgehend befreite Gasstrom bezeichnet.

4.1.30. Richtfaktor Q

Der Richtfaktor Q berücksichtigt die räumlichen Abstrahlungsbedingungen an der Schallquelle.

4.1.31. Rohgas

Unter Rohgas versteht man einen stoffbeladenen Gasstrom (Aerosol), der einem Abscheider mit dem Ziel einer möglichst vollständigen Abtrennung der dispersen Phase zugeführt wird.

4.1.32. Schalldruckpegel

Zur Berechnung des Schalldruckpegels L_p aus dem Schalleistungspegel L_W der Geräte benötigt man die Ausbreitungsbedingungen. (Nachhallzeit des Raumes, Grösse des Raumes und Standort der Schallquelle, Abstand zwischen Schallquelle und Messpunkt). Da beim hier angewendeten Standardprüfverfahren die Geometrie des Prüfraumes definiert ist und die Nachhallzeit nach VDI 2081 für Bettzimmer gegeben ist, kann anhand des gemessenen Schalleistungspegels direkt der Schalldruckpegel berechnet werden.

4.1.33. Schalleistungspegel

Der Schalleistungspegel L_W gibt im logarithmischen Mass die gesamte von einer Schallquelle abgestrahlte Schalleistung W zur Bezugsschalleistung W_p an. Dies ist eine von örtlichen und räumlichen Einflüssen unabhängige Grösse.

4.1.34. Standzeit

Die Standzeit oder die Lebensdauer eines Filters ergeben sich aus der Betriebszeit bis zur Erreichung des höchstzulässigen Druckverlustes. Die Standzeit hängt sehr stark von den auftretenden Staubkonzentrationen, der Staubart, der gewählten Vorfiltrierung, der Durchtrittsgeschwindigkeit und der aktiven Filterfläche ab.

4.1.35. Staub

Staub besteht aus Feststoffpartikeln.

4.1.36. Staubbeladung

Ist die vom Gerät aufgenommene Staubmenge.

4.1.37. Staubdispergierer

Staubdispergierer sind in der VDI 3491 zum Erzeugen von Prüfaerosolen mit Stäuben beschrieben.

4.1.38. Testpartikelkonzentration

Ist die im Prüfraum vorhandene Partikelkonzentration bei Messbeginn.

4.1.39. Tonhaltigkeit

Auftreten eines Tones im Geräusch, dessen Pegel den Pegel der übrigen Geräuschanteile in der Frequenzgruppe um die Tonfrequenz um weniger als den Betrag des Verdeckungsmasses unterschreitet.

4.1.40. Tonzuschlag

Korrekturgrösse zum äquivalenten Dauerschallpegel, die bei der Bildung von Beurteilungspegeln zu Berücksichtigung der besonderen Lästigkeit tonhaltiger Geräusche angewandt wird.

4.1.41. Umgebungspartikelkonzentration

Ist die Partikelkonzentration im Prüfraum bevor das Prüfaerosol zugeführt wird.

4.1.42. Verdünnungssystem

Dient zur definierten und reproduzierbaren Verdünnung von hochkonzentrierten Aerosolen zur Vermeidung der Koinzidenzfehler. Verdünnungssysteme sollten vor Ort kalibriert werden können.

4.1.43. Vermischungsventilator

Wird zur Vermischung des Prüfaerosols und der Raumluft innerhalb des Prüfraumes verwendet. Hierbei kann ein einseitig saugender Radialventilator mit vorwärts gekrümmten Schaufeln verwendet werden, welcher auf der Druckseite mit einem Prallblech ausgestattet ist. Es empfiehlt sich ein Drehzahlregler vorzuschalten, damit der Volumenstrom variiert werden kann. Der Ventilator sollte nicht zu klein dimensioniert werden damit ein genügend grosser Luftwechsel¹ erzeugt werden kann.

¹ Erfahrungsgemäss liegt der Luftwechsel beim Vermischungsventilator bei 18 h^{-1}

5. Gerätekenngrossen

Die Gerätekenngrossen beinhalten mechanische und Lüftungstechnische Eigenschaften, sowie die elektrische Effizienz des Gerätes. Diese dienen der Vergleichbarkeit der Geräte untereinander, haben jedoch keinen Einfluss auf die Klassifizierung der Geräte. Der Anwender kann die Gerätekenngrossen als weitere Entscheidungshilfe für die Auswahl verwenden.

5.1. Luftfilter

Die Prüfung der im Gerät eingebauten Filter, erfolgt in einem gesamtheitlichen Messverfahren über die 100:1 Erholzeit. Dies aufgrund der Tatsache, dass nicht alle Filter den europäischen oder schweizerischen Normen entsprechen und die Integrität (Dichtheit und Leckfreiheit) der Filter im eingebauten Zustand nur durch integrale Messung der partikelgrössenspezifischen Abscheideleistung erfolgen kann.

Die eingebauten Filter werden in ihrer Anzahl und in der vom Hersteller angegebenen Qualität aufgenommen und protokolliert. Es wird dokumentiert, ob die Filter eine der Filterklasse entsprechende Prüfzeichnung besitzen. Für Feinstaubfilter gilt die Kennzeichnung für die Prüfung nach SN/EN 779 bzw. SWKI VA 101-01 und für Schwebstofffilter die Kennzeichnung für die Prüfung nach SN/EN 1822 bzw. SWKI VA 101-01. Weiter ist eine Sichtkontrolle der Filter auf Beschädigung durch den Transport oder Einbau erforderlich.

Zusätzlich wird geprüft ob Molekularfilter im Gerät eingebaut sind. Da die Wirkung von Molekularfiltern stark von den spezifischen Eigenschaften abhängt, ist eine Prüfung nicht möglich. Falls Aktivkohle oder andere Granulate eingesetzt werden, ist das Filtermedium und dessen Gewicht anzugeben und im Prüfprotokoll festzuhalten.

5.2. Filterwechsel

5.2.1. Filtereigenschaften

Es wird geprüft ob Angaben zum Produkt, Filterklasse und Filterstandzeit sowie Angaben zur Entsorgung gebrauchter Filter am Gerät, in der Betriebs- und/oder in der Wartungsanleitung vorhanden sind.

Filterart, Filtertyp, ggf. Hersteller- oder Lieferantenkatalognummer werden dokumentiert. Beim Einsatz von Spezialfiltern (keine Standardprodukte, d.h. nicht entsprechend den vor aufgeführten Normen) muss dies angegeben werden. Dies kann sich auf die Instandhaltung sowie auf die Kosten / Wirtschaftlichkeit des Gerätes auswirken (Lebenszykluskosten). Ob es sich bei dem eingesetzten Filter um einen Standard- oder Spezialfilter handelt, wird im Prüfformular festgehalten.

5.2.2. Filterwechsel

Für den Anwender ist es wichtig zu wissen, wann er den Filter wechseln muss. Hierzu wird kontrolliert, ob das Gerät über eine Filterwechsel-Anzeige verfügt und ob auf dem Gerät ein Aufkleber vorhanden ist, auf dem der jeweilig letzte Filterwechsel protokolliert ist. Die Filterwechselanzeige ist auf die Nennluftmenge auszulegen.

Der Gerätehersteller hat in der Betriebsanleitung und, sofern als extra Dokument beigelegt, der Wartungsanleitung darzulegen wie der Filter gewechselt und entsorgt werden muss. Es ist anzugeben, ob der Filter kontaktfrei = ohne Kontamination, „kontaminationsarm“, oder mit eindeutigem Kontakt zum Filtermedium zu wechseln ist.

Für Geräte, die in Isolierzimmern für Patienten mit luftübertragbaren Infektionskrankheiten eingesetzt werden dürfen, ist eine Anleitung zur wirksamen Desinfektion des gesamten

Gerätes einschliesslich Filter/n vor der Entfernung aus dem Patientenzimmer, welches erst danach durch das medizinische Personal desinfiziert wird, erforderlich.

5.3. Luftwechsel im Raum

Die Luftwechselzahl wird wie unter Kapitel 8.3 beschrieben bestimmt. Für Geräte welche in Isolierzimmern zum Einsatz kommen sollen, ist nach SWKI 99-3 mindestens ein 12-facher Luftwechsel (bezogen auf das Gerät mit neuem Filter) nötig.

5.4. Leistungsaufnahme des Gerätes

Um eine wirtschaftliche Arbeitsweise der Raumlufthereiniger in Bezug auf den Leistungsbedarf nachzuweisen, erfolgt als Vergleichskriterium die Messung der Leistungsaufnahme. Die Leistungsaufnahme des Gerätes wird wie unter Kapitel 8.4 gemessen.

5.5. Lufteintritt und Luftaustritt

Zur schnellen Erfassung des Lüftungsprinzips des Gerätes wird die Art und Position der Raumlufffassung/en und der Auslassöffnung/en beschrieben. Zur Veranschaulichung werden im Prüfformular Skizzen oder Bilder eingefügt.

5.6. Bedienbarkeit

In dieser Gerätekenngrosse wird die Bedienung des Raumlufthereinigers beschrieben. Es ist zu prüfen, ob eine Bedienungsanleitung vom Gerätehersteller mitgeliefert wird und ob für die Gerätebedienung eine Schulung des Personals erforderlich ist. Weiter folgt eine Sicht und Funktionskontrolle, ob sich am Gerät eine Vorrichtung befindet, die verhindert, dass ein Gerät unzulässig von ungeschultem Personal, Patienten oder Kindern abgeschaltet oder verstellt werden kann.

Ein aus Sicht des Nutzers gutes Gerät ist ohne Bedienungsanleitung intuitiv bedienbar.

5.7. Wartung

Aus hygienischer und wirtschaftlicher Sicht spielt der Aufwand zur Gerätewartung eine wichtige Rolle. Eine Abschätzung des Wartungsaufwands wird vorgenommen und dokumentiert. Die Wartung umfasst z.B. Nachstellen, Schmieren, funktionserhaltendes Reinigen, Nachfüllen oder Ersetzen von Verbrauchsmitteln und planmässiges Austauschen von Verschleissteilen.

Speziell beachtet wird dabei der Aufwand für den Filterwechsel

5.8. Gerätesicherheit

Für alle Luftreiniger ist der Nachweis einer bestandenen sicherheitstechnischen Prüfung zu erbringen. Vorausgesetzt wird ein Prüfung nach IEC 60335-1, sowie nach IEC 60335-2-65. Alternativ dazu wird eine Prüfung nach amerikanischer UL-Norm UL 507, 9th Ed. ,oder der kanadischen CSA-Norm C22.2 No. 113-08 akzeptiert. Der Nachweis über das Vorliegen der notwendigen Prüfungen erfolgt anhand gültiger Zertifikate und/oder Testberichte.

5.9. Optische und akustische Ansprüche

Nicht abgedeckte leuchtende oder blinkende Lämpchen sowie Displays oder akustische Signale können zu einer Beeinträchtigung des Wohlbefindens des Anwenders führen. Daher wird geprüft, ob sich am Gerät solche Quellen in wahrnehmbarer Weise befinden.

5.10. Geräteaufstellung

Es wird festgehalten um was für eine Geräteausführung es sich beim Prüfling handelt (Bodengerät, Wandgerät, Deckengerät). Zusätzlich wird beurteilt, ob die Montage des Gerätes in Eigenleistung möglich ist, oder ob dazu Fachpersonal benötigt wird.

Weiter werden Angaben zum Handling (Rollen oder Füsse) des Gerätes dokumentiert, sowie zur Anschlusskabellänge und der Anschlusskabelart. Das Gewicht und die Abmessungen des Gerätes werden im Prüfformular unter Basisangaben festgehalten. (siehe Kapitel A 1)

6. Prüfkenngrössen

Die Prüfkenngrössen beinhalten die für die Klassifizierung relevanten mechanischen und Lüftungstechnischen Eigenschaften der Raumlufreinigungsgeräte. Anhand der Prüfkenngrössen wird die Klassifizierung der Geräte vorgenommen.

6.1. 100:1 Erholzeit

Über die Messung der 100:1 Erholzeit kann eine unter den Geräten vergleichbare Aussage gemacht werden, wie viele Partikel in einer bestimmten Zeit aus der Raumluf ausfiltriert werden können. Dieses Kriterium gilt als grundlegende Funktion der Raumlufreinigungsgeräte und wird daher geprüft und bewertet.

6.1.1. 100:1 Erholzeit mit neuem Filter

Durch die Messung der 100:1 Erholzeit mit neuem Filter wird die Leistungsfähigkeit der Raumlufreinigungsgeräte bei Neuzustand geprüft. Anhand der Prüfergebnisse kann die Klassifizierung nach Tabelle 1 vorgenommen werden.

6.1.2. 100:1 Erholzeit mit elektrostatisch entladenen Filter

Durch die Messung der 100:1 Erholzeit mit elektrostatisch entladenen Filter wird die Leistungsfähigkeit der Raumlufreinigungsgeräte mit elektrostatisch entladenen Filter geprüft. Anhand der Prüfergebnisse kann die Klassifizierung nach Tabelle 1 vorgenommen werden.

6.1.3. 100:1 Erholzeit mit staubbeladenem Filter

Durch die Messung der 100:1 Erholzeit mit staubbeladenem Filter wird die Leistungsfähigkeit der Raumlufreinigungsgeräte mit staubbeladenem Filter geprüft. Anhand der Prüfergebnisse kann die Klassifizierung nach Tabelle 1 vorgenommen werden.

6.2. Schallemissionen des Gerätes

Für die akustische Behaglichkeit des Kunden ist es von grosser Relevanz das die Geräte keine zu laute oder störende Geräusche erzeugen. Bei medizinisch genutzten Räumen beispielsweise handelt es sich um hoch lärmempfindliche Räume, da Patienten ein hohes Ruhebedürfnis haben. Dies gilt tagsüber, aber auch nachts, da die Raumlufreinigungsgeräte zur ununterbrochenen Gewährleistung keimfreier Luft ohne Unterbrechung in Betrieb sein müssen. Daher werden in dieser Richtlinie die Schallemissionen des Gerätes gemäss Kapitel 8.8 geprüft und bewertet. Anhand der Prüfergebnisse kann die Klassifizierung nach Tabelle 1 vorgenommen werden.

6.3. Behaglichkeitsrelevante Raumlufgeschwindigkeit

Um die Kunden vor unbehaglicher Zugluft zu schützen, wird die maximale Raumlufgeschwindigkeit begrenzt. Dabei wird die Raumlufgeschwindigkeit geprüft. Anhand der Prüfergebnisse kann die Klassifizierung nach Tabelle 1 vorgenommen werden.

7. Prüfeinrichtungen und Prüfmittel

7.1. Prüfeinrichtungen

7.1.1. Prüfraum

Die 100:1-Erholzeit eines Raumlufteinigungsgerätes wird auch von der Raumgrösse in dem das Gerät aufgestellt ist und seiner Anordnung im Raum beeinflusst. Zur Erzielung von reproduzierbaren Ergebnissen und repräsentativen Ergebnissen ist daher ein Prüfraum erforderlich, in dem alle Prüfungen unter gleichen Bedingungen stattfinden.

Untenstehende Mindestanforderungen muss ein Prüfraum erfüllen²:

- Der Raum muss in Bezug auf Luftdichtheit und sonstige relevante Eigenschaften so sein, dass die für die Messung der Erholzeit vorgegebene Partikelkonzentration während der Messdauer ohne Raumlufteinigungsgerät nicht zu sehr absinkt. Dazu wird eine Erholzeitmessung ohne Gerät durchgeführt, nach 20 Minuten darf die Partikelkonzentration um maximal 10% sinken.
- Allgemeinübliches Raumvolumen eines Einzelzimmers mit normaler lichter Raumhöhe
- Mindestausstattung: 1 Bett mit folienverpackter Matratze, 1 Tisch, 1 Stuhl

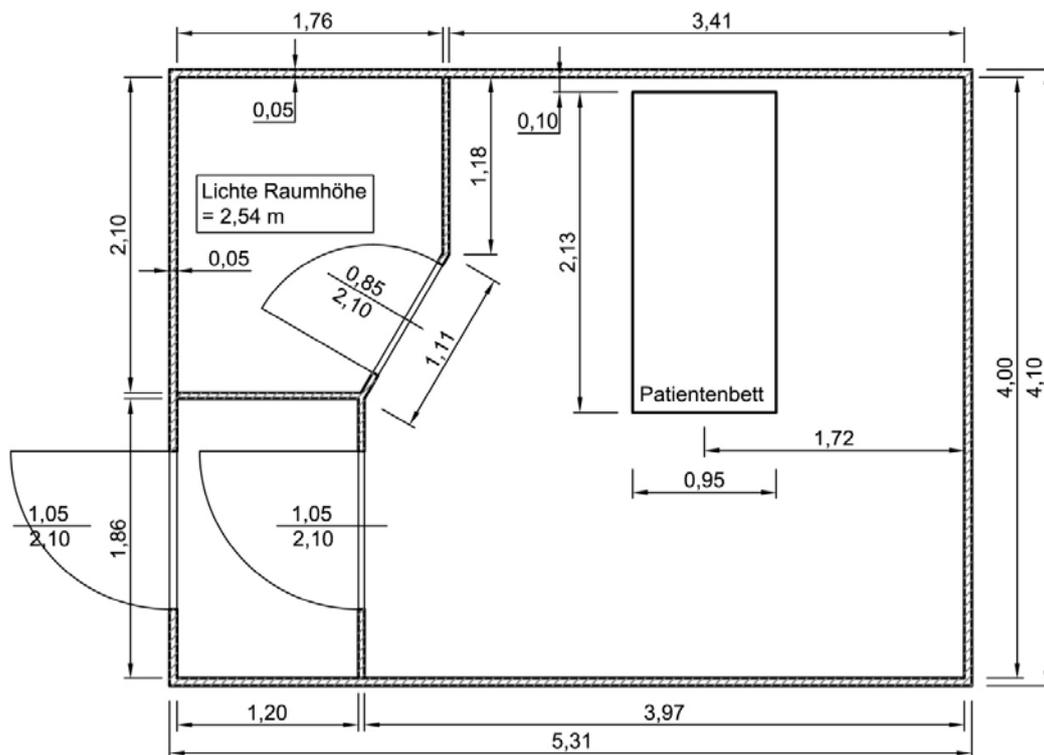


Abbildung 1: Beispiel eines Prüfraums

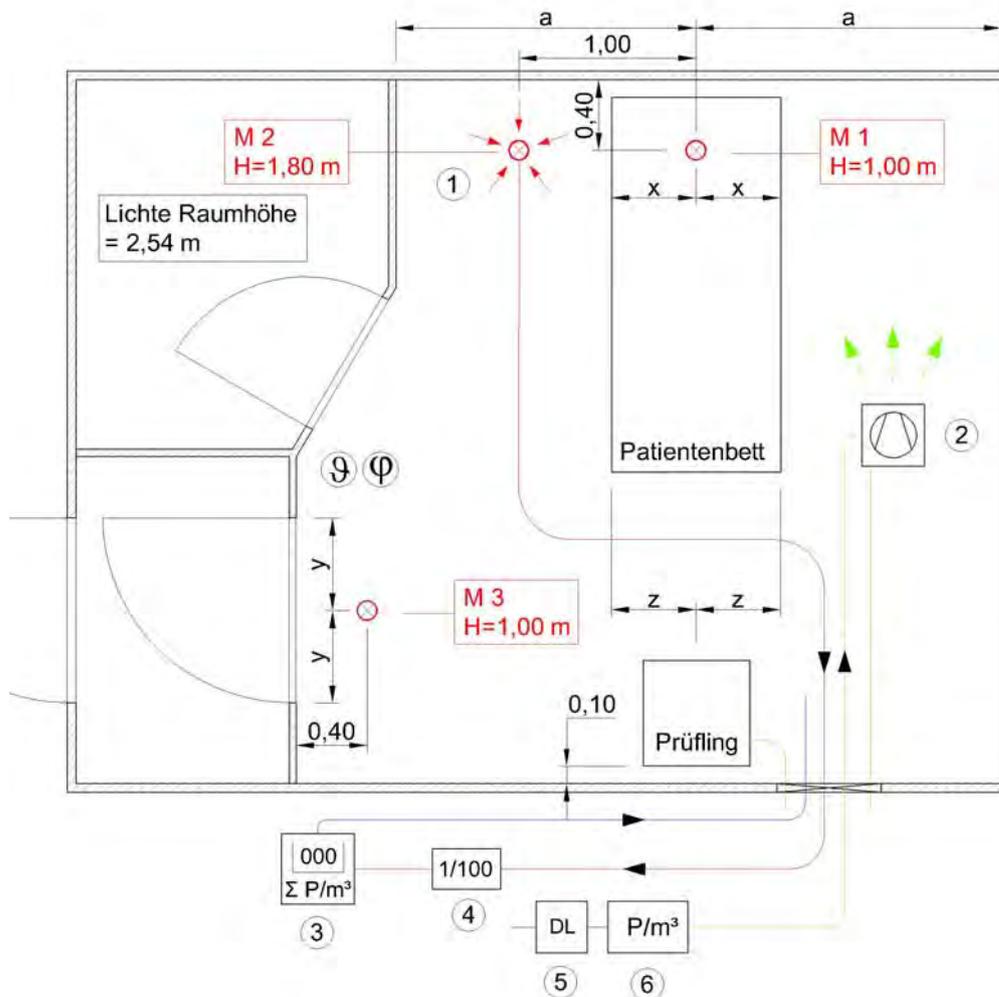
² In Anlehnung an ein allgemeines Patienten-Einzelzimmer mit der üblichen Mindest-Einrichtung

7.1.2. Positionierung des Prüflings

Die Angaben des Herstellers sind zu dokumentieren und bei der Prüfung einzuhalten, bzw. Abweichungen davon genau anzugeben. Bei unvollständigen Hersteller-Angaben oder ist eine Positionierung des Prüflings gemäss Abbildung 2 vorzunehmen.

7.1.3. Prüfanordnung zur Ermittlung der 100:1-Erholzeit

Der Prüfling und die Messstellen sind gemäss Abbildung 2 zu positionieren. Die Herstellerangaben für die Positionierung des Raumlufreinigers müssen berücksichtigt werden.



Legende

	Spannungsversorgung	1	- Sonde
	Aerosolzuführung	2	- Vermischungsventilator
	Probenahme	3	- Partikelzähler
	Abluft des Partikelzählers	4	- Verdünnungsstufe 1:100
	Messstellen für Probenahme	5	- Druckluft
	Temperaturfühler	6	- Aerosolgenerator
	Feuchtefühler		

mittels Datalogger

Abbildung 2: Prinzipschema Standardprüfanordnung des Patiententettes, der Messgeräte und des Zubehörs, sowie der Lage der Messstellen

7.1.4. Prüfanordnung Filterbeladung

Der Prüfling ist gemäss Abbildung 3 zu positionieren. Dabei wird die genaue Position nicht vorgegeben, da sich der Prüfling in vermischter staubbeladener Luft befindet.

Die Prüfkammer hat eine Grundfläche von 1.5m auf 1.5m und eine gesamte Raumhöhe von 2.2m aufzuweisen.

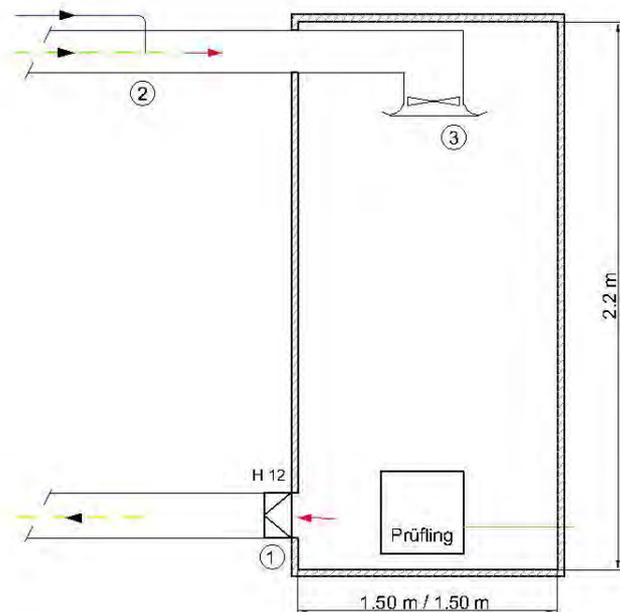
Die vor dem Eintritt staubbeladene Zuluft wird über eine hochinduktive Mischklüftung in die Prüfkammer eingebracht. Dies mit dem Ziel eine möglichst hohe Staub/Luft - Durchmischung in der Prüfkammer zu erreichen. Gleichzeitig soll die Versuchsanordnung unsensibel auf verschiedene Gerätebauformen sein.

Der Raum wird mit einem Volumenstrom (V_{ZUL}) der doppelt so gross ist wie der Nennvolumenstrom (V_{UML}) des Gerätes im Neuzustand belüftet. Die Zuluft in die Prüfkammer wird mit mindestens 30 mg/m^3 ISO 12103-1 A1 Ultrafine Prüfstaub beladen, wobei die Dosierung auch höher eingestellt werden kann womit sich dann die Dosierzeit verringert. (siehe dazu 7.2.2.1) **Der Nennwert der Dosierkonstanz darf maximal +/-15% abweichen, gemessen alle 30 Minuten über 5 Minuten. Der Mittelwert über die gesamte Messdauer darf max. +/-5% abweichen.**

Der Zuluftvolumenstrom muss auf +/-5% genau gemessen werden.

Im unteren Bereich der Prüfkammer ist die Abluftöffnung anzubringen, welche mittels eines H12 Filters zu versehen ist.

Staub welcher nicht in die Einlassöffnungen des Raumlufthereinigungsgerätes gelangt wird für die Beladung nicht berücksichtigt.



Legende

- | | |
|---|----------------------------|
|  Spannungsversorgung | 1 - Luftfilter H 12 |
|  Zuluft | 2 - Staubbeladung |
|  Abluft | 3 - Drallauslass |
|  Beladene Zuluft | |
|  Staubbeladung | |

Abbildung 3: Systemskizze Standardprüfanordnung für die Filterbeladung

7.1.5. Standardprüfanordnung Luftgeschwindigkeit

Die Messanordnung, orientiert am Bett, ist zur Messung der Raumlufthgeschwindigkeiten einzuhalten, unabhängig von der Position des Gerätes.
Die Position der Messstellen ist im Prüfbericht anzugeben.

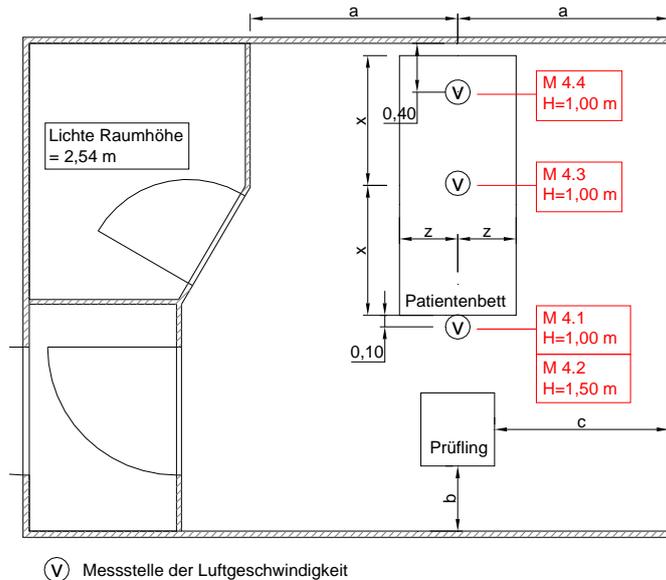


Abbildung 4: Prüfanordnung zur Ermittlung der Raumlufthgeschwindigkeit

7.1.6. Ermittlung des Schalleistungspegels

Die Messung des gerätespezifischen Schalleistungspegels hat nach dem normierten Messverfahren nach SN/EN ISO 3741 durch ein anerkanntes Prüfinstitut in einem dazu geeigneten Raum zu erfolgen.

7.2. Anforderungen an die Prüfmittel

7.2.1. 100:1 Erholzeitmessung

7.2.1.1. Flüssigkeitsvernebler

Der Flüssigkeitsvernebler zum Erzeugen des Prüfaerosols muss folgende Bedingungen erfüllen:

- Partikelgrößenbereich d_p : $\approx 0,1$ bis $2 \mu\text{m}$
- Partikelkonzentration C_n : $\approx 10^6$ bis 10^7 P/cm^3
- Dosierkonstanz: $\pm 3\%$

7.2.1.2. Verdünnungssysteme

Die Verdünnungssysteme müssen einen eindeutigen und konstanten Verdünnungsfaktor über die gesamte Messprozedur garantieren. Der Verdünnungsfaktor sollte vor Ort eindeutig bestimmt werden können.

7.2.1.3. Optischer Partikelzähler (OPC)

Gemäss der ISO 21501-4 ist der OPC spätestens alle zwölf Monaten zu kalibrieren.

Der optische Partikelzähler sollte einen Messbereich von 0,2 bis 5 µm und 8 Grössenklassen aufweisen.

Das Grössenaufklärungsvermögen und die Klassifiziergenauigkeit muss bei 0,4 µm ausreichend sein.

7.2.2. Filterbeladung

7.2.2.1. Staubdispergierer

Der Staubdispergierer zum Erzeugen des Beladungs-aerosols muss folgende Bedingungen erfüllen:

- Partikelgrössenbereich dp: $\approx 0,1$ bis $30 \mu\text{m}$
- Beladungskonzentration C_m : $30 \text{ mg/m}^3 V_{ZUL}$
- Dosierzeit: 5 h
- Dosierkonstanz: $\pm 15\%$

7.2.2.2. Prüfstaub

Es wird mit ISO 12103-1 A1 Ultrafine gearbeitet.

7.2.3. Schallmessung

Die Anforderung an die Messgeräte sind in der Norm SN/EN ISO 3741 definiert.

7.2.4. Luftgeschwindigkeit

Die Anforderung an die Messgeräte sind in der Norm EN ISO 14644-3 definiert.

7.2.5. Leistungsbedarf

Das Wattmeter für die Aufnahme des Leistungsbedarfes muss mindestens der Messgenauigkeit Klasse 2 nach DIN EN 60051-3 entsprechen.

8. Prüfverfahren

8.1. Allgemeines

Die Ermittlung der Geräte- und Prüfkenngrossen der Raumlufreiniger erfolgt bei der Nennluftmenge, die vom Hersteller definiert wird. Auf Wunsch kann der Kunde weitere Luftmengen (Ventilatorstufen) angeben, bei welchen das Gerät ausgemessen werden soll. Für jede Luftmenge wird dabei ein neues Prüfprotokoll erstellt.

8.2. Messung des Volumenstromes

Da mobile Raumlufreinigungsgeräte in ihrer Gestaltung der Luftdurchlässe stark variieren können, kann keine allgemeine messtechnische Beschreibung zur Bestimmung des Volumenstroms angegeben werden. Gegebenenfalls sind indirekte Messverfahren anzuwenden. Empfohlen wird das Nulldruck-Verfahren, da hier die Ansaug- oder Ausblasöffnungen des Gerätes mit einem beliebigen aufgeklebten Folienschlauch gefasst werden können.

8.3. Luftwechselzahl

Der Volumenstrom bei Nennluftmenge (V_{UML}) wird mit neuen und voll staubbeladenen Filtern gemäss 8.2 messtechnisch ermittelt und daraus der Luftwechsel bezogen auf die Netto-Kubatur des Prüfraumes berechnet. Für die Ermittlung der Luftwechselzahl gilt:

$$LW = \frac{\dot{V}_{UML}}{V_{PrR}} \quad [h^{-1}]$$

Formel 1: Luftwechsel im Prüfraum

Auf Wunsch des Kunden kann der Luftwechsel auch für einen beliebigen Raum berechnet werden. Dies kann für den Kunden dann von Interesse sein wenn das Gerät in Isolierzimmern eingesetzt werden soll, da nach SWKI 99-3 in Isolierzimmern mindestens ein 12-facher Luftwechsel notwendig ist.

8.4. Leistungsaufnahme des Gerätes

Zur Bestimmung des Leistungsbedarfs des Gerätes wird mit Hilfe eines Leistungsmessgerätes die Leistungsaufnahme $P_{el,Gerät}$ des mobilen Raumlufreinigers beim Nennvolumenstrom mit neuen und voll staubbeladenen Filtern gemessen.

8.5. Ermittlung der 100:1-Erholzeit beim Gerätezustand „Filter neu“

8.5.1. Versuchsbedingungen

Für die Messung der 100:1-Erholzeit ist bei der Partikelzählung die distributive Partikelgrösse von $\geq 0,3 \mu m$ bis $\leq 0,7 \mu m$ auszuwerten. Der Aerosolgenerator sollte hauptsächlich diese Partikelgrössenfraktion erzeugen.

Zuerst muss die Umgebungskonzentration ($C_{n,um}$) im Prüfraum (siehe 7.1.1) ermittelt werden.

Die anschliessend aufgegebene Testaerosolkonzentration sollte nach EN ISO 14644-3 mindestens um den Faktor 500 höher eingestellt werden als die Umgebungskonzentration. Hierbei gilt es zu beachten, dass je nach verwendetem OPC entsprechend seiner Koinzidenzgrenze verdünnt werden muss.

Der notwendige Verdünnungsfaktor wird nach Formel 2 berechnet. Um eine Koinzidenz definitiv ausschliessen zu können, ist eine um den Faktor 10 höhere Verdünnungsstufe zu verwenden.

Die Bewertung der Partikelzahlen erfolgt bei der Partikelgrösse 0,5 µm.

$$V_f = \frac{C_{Roh}}{C_{OPC,max}} \quad [-]$$

Formel 2: Berechnung des Verdünnungsfaktors

Während der Messungen sind Temperatur- und Feuchteschwankungen im Prüfraum auszuschliessen. Alle Messungen sind mit demselben Probenschlauchsystem durchzuführen.

8.5.2. Prüfung

Die Durchführung der Messungen erfolgt mindestens an den definierten Messstellen gemäss EN ISO 14644-3. (Siehe auch Abbildung 2)

Zur Minimierung von Messunsicherheiten ist die 100:1-Erholzeit an jeder Messstelle dreimal zu messen. Die Messdauer ist so einzustellen dass pro Messung mindestens 50 Partikel im relevanten Grössenbereich gezählt werden. Der Messintervall muss ≤ 1 Minute betragen. Als Ergebnis ist neben den Einzelmessungen deren arithmetischer Mittelwert zu dokumentieren.

8.5.3. Auswertung

Die Ermittlung der 100:1-Erholzeit erfolgt nach der Definition Kapitel 4.1.1. Sämtliche erfassten Rohdaten und die Berechnungsergebnisse sind im Prüfbericht aufzuführen.

8.6. Ermittlung der 100:1-Erholzeit beim Gerätezustand „Filter elektrostatisch entladen“

8.6.1. Filterentladung

Die Filter, respektive die Filtereinheiten sind zusammen mit einem ausreichenden Vorrat von flüssigem IPA bei Raumtemperatur (min. 20°C) in einem Gefäss dicht einzuschliessen. Dadurch entsteht eine gesättigte Luft-IPA-Atmosphäre³ die zur Entladung für Flachmedien innert 24h ausreicht. Es ist ein flaches Gefäss zu verwenden bzw. der IPA-Spiegel darf max. 10mm unterhalb des Gefässrandes liegen. Das Gefäss mit IPA muss oberhalb der elektrostatisch zu entladenden Filtereinheit positioniert sein.

8.6.2. Messung der 100:1-Erholzeit mit elektrostatisch entladendem Filter

Die unter Abschnitt 8.5 beschriebene Ermittlung der 100:1-Erholzeit ist erneut durchzuführen.

8.7. Ermittlung der 100:1-Erholzeit bei staubbeladenem Filter

8.7.1. Filterbeladung

Die Filterbeladung erfolgt mit dem gemäss 8.6.1 elektrostatisch entladenen Filter nach der Messung der Erholzeit gemäss 8.6.2. Die Beladung erfolgt gemäss 7.1.4.

³ **Hinweis:** Die Luft-IPA-Atmosphäre ist explosionsgefährlich und kann bei Einatmen oder Verschlucken zu Gesundheitsschäden führen. Entsprechende Vorsichtsmassnahmen sind zu treffen.

8.7.2. Messung der 100:1-Erholzeit bei staubbeladenem Filter

Die unter Abschnitt 8.5 beschriebene Ermittlung der 100:1-Erholzeit ist erneut durchzuführen.

8.8. Schallemission

8.8.1. Schalldruckpegel

Die Messung des gerätespezifischen Schalleistungspegels hat nach dem normierten Messverfahren nach SN/EN ISO 3741 durch ein anerkanntes Prüfinstitut in einem dazu geeigneten Raum zu erfolgen.

Um den gerätespezifischen Schalleistungspegel auf den zu erwartenden Schalldruckpegel beim Patienten umzurechnen werden folgende Formeln verwendet:

$$L_{p,A,VDI} = L_{w,A,Gerät} + 10 \cdot \lg \left(\frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot d^2} + \frac{4}{A_{ges,T=1}} \right) \quad [\text{dB(A)}]$$

Formel 3: Berechnung des Schalldruckpegels in Räumen nach VDI

Hierbei ist $A_{ges,T=1}$ durch die Geometrie des Standardprüfraumes und der Nachhallzeit (1.0 Sekunden) für Bettzimmer und Ruheräume nach VDI 2081 definiert (Berechnung siehe A 2.1). Weiter wurde aufgrund der gegebenen Raumgeometrie des Standardprüfraumes ein Abstand⁴ von $d \geq 3\text{m}$ definiert. Gestützt auf obige Formel variiert der Schalldruckpegel beim Patienten bei Verwendung der verschiedenen Q-Werte zwischen -0.11 dB(A) und +0.22 dB(A). Somit kann zur Vereinfachung der mittlere Q-Wert von 4 verwendet werden. (Veranschaulichung zu Q und d im Anhang unter A 2)

Gestützt auf obige Feststellungen kann der zweite Term der Formel 3 als Konstante angegeben werden. Somit ergibt sich folgende Formel zur Berechnung des Schalldruckpegels beim Patienten im Standardprüfraum.

$$L_{p,A,VDI} = L_{w,A,Gerät} - 1.66 \quad [\text{dB(A)}]$$

Formel 4: Schalldruckpegel beim Patienten im Standardprüfraum unter den definierten Konstanten bei $d \geq 3\text{m}$

Ist $d < 3\text{m}$ so ist die Berechnung nach Formel 3 mit den effektiven Werten vorzunehmen.

Weiter besteht die Möglichkeit durch die Prüfstelle den Schalldruckpegel beim Patienten für andere Raumgeometrien und Aufstellungsarten zu berechnen. Dafür müssen die spezifischen Raumdaten wie die äquivalente Absorptionsfläche, Abstand des Gerätes zum Patienten und Aufstellungsart vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt werden.

8.8.2. Zuschlag Tonhaltigkeit

Um die erhöhte Störwirkung tonhaltiger Schalle im Vergleich zu breitbandigen Schallen gleichen äquivalenten Dauerschallpegels zu berücksichtigen, wird der Zuschlag für die Tonhaltigkeit K_T nach DIN 45645 nach dem Höreindruck im Prüfraum ermittelt⁵.

Die für die Bewertung relevante Schallemission ist unter 8.8.3 definiert.

⁴ Welcher Abstand gemeint ist, wird unter Kapitel A 2.3 unter Abbildung 12 ersichtlich.

⁵ Für die Ermittlung des Zuschlages der Tonhaltigkeit gibt es zwei Verfahren. Nach Höreindruck DIN 45645 und eine objektive Erfassung des Tonzuschlages nach DIN 45681. Da das Verfahren nach DIN 45681 nicht im Schallraum erfolgen kann und die Bandbreite des Zuschlages bei beiden Verfahren zwischen +0dB und +6 dB liegt, wird in dieser Prüfrichtlinie das Verfahren nach Höreindruck angewendet.

8.8.3. Relevante Schallemission

Die für die Bewertung relevante Schallemission ist somit gemäss Formel 5 zu berechnen.

$$L_{p,A,max} = L_{w,A,VDI} + K_T \quad [dB(A)]$$

Formel 5: Zu bewertender Schalldruckpegel inklusive Tonzuschlag

8.9. Raumluftgeschwindigkeit

Die Messung der Raumluftgeschwindigkeiten erfolgt an den unter 7.1.5 angegebenen Messstellen mit einem richtungsunabhängigen Anemometer Messbereich ab 0.05 m/s. Die Positionierung des mobilen Raumlufteinigers muss angegeben werden.

9. Prüfbericht

Der Prüfbericht muss mindestens folgende Angaben enthalten:

- Name und Anschrift des Prüfunternehmens und Prüfort, falls sich dieser von der Anschrift des Prüfunternehmens unterscheidet
- **Name und Anschrift des Kunden**
- Auftragsnummer und Auftragsdatum des Kunden
- Eindeutige Kennzeichnung des Berichts (z.B. Berichtsnummer) auf jeder Seite sowie Gesamtseitenanzahl des Berichts
- Unterschrift, Bezeichnung oder gleichwertiges Kennzeichen der für den Messbereich verantwortlichen Person sowie Ausgabedatum
- Inhaltsverzeichnis, inklusive Verzeichnis der Anhänge
- Sämtliche Messungen, Untersuchungen, Messwerte und abgeleitete Ergebnisse, belegt durch die Rohdaten und die Ergebnisse von nachvollziehbaren Berechnungen
- Tabellen, Schaubilder, Skizzen bzw. Fotografien
- Erklärung zu den Messunsicherheiten
- Erklärung, dass sich die Ergebnisse nur auf die Geprüften Gegenstände beziehen
- Vergleich der Mess- und Prüfergebnisse mit den entsprechenden Soll-Vorgaben
- Zusammenfassung: Zuordnung des geprüften Gerätes zu einer Gebrauchswertklasse
- Prüfformular (nicht zwingend normatives Beispiel-Muster siehe A 1)
- Kopien der Kalibrierzertifikate aller verwendeten Messgeräte
- Verweis auf diese Prüfrichtlinie
- Eingesetzte Messgeräte mit aussagekräftigen Angaben (Typ, Hersteller, Seriennummer etc.)
- Angaben der eingestellten Betriebsparameter:
Umgebungskonzentration $C_{n,um}$: ? P/m³
Prüfaerosolkonzentration $C_{n,prüf}$: ? P/m³
Erholzeit t_n : ? min

10. Klassifizierung

10.1. Klassifizierungskriterien

Auf Basis der Prüfkenngrossen kann eine Klassifizierung der mobilen Raumlufreinigungsgeräte vorgenommen werden. Die Tabelle 1 legt die 9 Geräteklassen fest.

Klasse	100:1 Erholzeit Neuer Filter	100:1 Erholzeit elektrostatisch entladener Filter	100:1 Erholzeit Staubbeladener Filter	Schallemission	Raumluf- geschwindigkeit
	$T_{0.01}$ [min.]	$T_{0.01}$ [min.]	$T_{0.01}$ [min.]	$L_{p,A,max}$ [dB(A)]	$v_{L,PrR}$ [m/s]
A1	≤ 20	≤ 20	≤ 20	≤ 28	< 0.15
A2	≤ 20	≤ 20	≤ 20	≤ 35	< 0.15
A3	≤ 20	≤ 20	≤ 20	≤ 40	< 0.2
B1	≤ 30	≤ 30	≤ 30	≤ 28	< 0.15
B2	≤ 30	≤ 30	≤ 30	≤ 35	< 0.2
B3	≤ 30	≤ 30	≤ 30	≤ 40	< 0.2
C1	≤ 40	≤ 40	≤ 40	≤ 35	< 0.2
C2	≤ 40	≤ 40	≤ 40	≤ 40	< 0.25
C3	≤ 40	≤ 40	≤ 40	≤ 45	< 0.25

Tabelle 1: Klassifizierungskriterien

Der Grenzwert für die 100:1-Erholzeit der Klasse A wird mit weniger als 20 Minuten definiert.

Die Anforderung an die Schallemission basieren auf den Anforderungen welche in den entsprechenden SIA Normen definiert sind. (SIA 181, SIA 382/1 etc.)

Um die Patienten oder privaten Anwender vor unbehaglicher Zugluft zu schützen, wird die maximale Raumlufgeschwindigkeit in Anlehnung an die oben genannten SIA Normen bei Geräten der Klassen A1, A2 und B1 auf maximal 0.15^6 m/s begrenzt. Bei den Klassen A3, B2, B3 und C1 auf maximal 0.2 m/s und bei den Klassen C2 und C3 auf 0.25 m/s.

⁶ Bei einem Turbulenzgrad von 40% bis 45%, einer Raumlufthtemperatur im Bereich von 20°C und einem Zugluftrisiko (DR) von 15%, resultiert eine zulässige Raumlufgeschwindigkeit von 0.15 m/s.

A 1. Muster Prüfformular

Folgende Angaben werden im Prüfformular aufgeführt:

- Name und Anschrift des Prüflabors
- Prüfdatum
- Name und Anschrift des Kunden

Basisangaben des Prüflings:

- 1 Gerätebezeichnung
- 2 Geräteanwendung gemäss Herstellerangaben
- 3 Typenschild
- 4 Lage Hauptschalter
- 5 Geräteabmessungen
- 6 Gewicht
- 7 Nennluftmenge gemäss Hersteller

Gerätekenngrossen:

- G.1 Filterklassen
- G.2 Filterwechsel
- G.3 Luftwechsel im Prüfraum
- G.4 Leistungsbedarf
- G.5 Lufteintritt und Luftaustritt (Position)
- G.6 Bedienbarkeit
- G.7 Wartung
- G.8 Gerätesicherung
- G.9 Optische Ansprüche
- G.10 Geräteaufstellung

Prüfkenngrossen:

- P.1 Neue Filter, 100:1-Erholzeit
- P.2 elektrostatisch entladene Filter, 100:1-Erholzeit
- P.3 Staubbeladene Filter, 100:1-Erholzeit
- P.4 Schallemission
- P.5 Raumlufgeschwindigkeit

Prüfstelle: _____ Prüfformular zur Prüfrichtlinie für mobile Raumlufreinigungsgeräte:
Prüfling _____ : Firma _____

Prüfdatum: _____

Allgemeine Angaben und grundlegende Messungen:

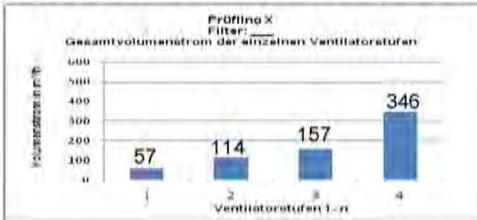
Lfd.-Nr.	Basisangaben des Prüflings: Prüfling _____, Firma _____		Bemerkungen
1	Gerätebezeichnung	Fab.-Nr.: _____; Art.-Nr.: _____	
2	Geräteanwendung	Einsatz im Gesundheitswesen: <input type="checkbox"/> (Bsp: Isolierzimmer) Einsatz im Privatbereich: <input type="checkbox"/> (Bsp: Schlafzimmer) Einsatz im öffentlichen Bereich: <input type="checkbox"/> (Bsp: Gruppenbüro)	Vom Gerätehersteller vorgesehene(r) Einsatzort(e) des Gerätes.
3	Typenschild	Spannungsversorgung: _____ Volt [V] Frequenz: _____ Herz [Hz] Leistung: _____ Watt [W]	
4	Lage Hauptschalter	_____	
5	Geräteabmessungen	Breite / Tiefe / Höhe = _____ m / _____ m / _____ m	
6	Gerätegewicht	_____ kg	
7	Nennluftmenge ($V_{UM,L}$) gemäss Hersteller (Messergebnisse der Prüfstelle)	Die Prüfung der Prüfkenngrössen erfolgt bei folgender Nennluftmenge _____ (m^3/h); was der Ventilatorstufe _____ entspricht. Diagramm der Volumenströme nach Ventilatorstufen des Prüflings:  <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; margin-top: 10px;"> Bild / Skizze des Prüflings: </div>	Die Messungen erfolgen bei der vom Hersteller definierten Nennluftmenge. Auf Wunsch kann der Kunde weitere Luftmengen (Ventilatorstufen) angeben, bei welchen das Gerät ausgemessen werden soll. (separates Prüfprotokoll)

Abbildung 5: Prüfformular Seite 1, Basisangaben

Prüfstelle: _____ Prüfformular zur Prüfrichtlinie für mobile Raumlufreinigungsgeräte:
Prüfling _____ : Firma _____

Prüfdatum: _____

Gerätekenngrossen:

Nr.	Kriterium	Richtwert/Erläuterung Kriterium	Ermittelte Werte	Bemerkungen
G.1	Filterklassen	Eingebaute Filterklasse(n): Sichtkontrolle aller eingebauten Filter auf Prüfkennzeichen für SWKI VA101-01 Kontrolle ob Molekularfilter eingebaut sind.....	_____ _____ _____ Wird ein Molekularfilter (Aktivkohle oder andere Granulate) eingesetzt? <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein Wenn ja, Filtermedium und Gewicht:	
G.2	Filterwechsel	Filtereigenschaften: Standzeit [h]..... Material /Typenbezeichnung der Filter..... Notwendigkeit von Filter-Sonderanfertigungen..... Filterwechsel: Optische Anzeige Filterwechsel..... Schutz des Personals bei Filterwechsel erforderlich?.....	_____ _____ _____ Datum des letzten Filterwechsels -- aussen am Gerät ablesbar (Platz vorgesehen): <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein Lassen sich mit überlebensfähigen Mikroorganismen oder Allergenen Stäuben beladene Filter kontaminationsarm und ungefährlich für den durchführenden wechseln <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein Wird in der Bedienungsanleitung explizit auf diese Problematik und die Entsorgung hingewiesen <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	Betriebsanzeige Filterwechsel ist auf die Nennluftmenge auszulegen

Abbildung 6: Prüfformular Seite 2, Gerätekenngrossen

Prüfstelle: _____ Prüfformular zur Prüfrichtlinie für mobile Raumlufreinigungsgeräte: _____ Prüfdatum: _____
Prüfling _____ : **Firma** _____

G.3	Luftwechsel	Erzeugbare Luftwechsel: $LW = \frac{\dot{V}_{LWL}}{V_{PrR}} \text{ [h}^{-1}\text{]}$ $V_{PrR} = \text{--- m}^3$	<p>Luftwechsel bei Nennluftmenge mit neuem Filter:</p> <table border="1" data-bbox="745 363 1348 502"> <thead> <tr> <th>Ventilatorstufe</th> <th>Volumenstrom bei Nennluftmenge</th> <th>Luftwechsel (V_{PrR}=---m³)</th> <th>Luftwechsel (V_R=---m³)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>[-]</td> <td>[m³/h]</td> <td>[h⁻¹]</td> <td>[h⁻¹]</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table> <p>Luftwechsel bei Nennluftmenge mit staubbeladenem Filter:</p> <table border="1" data-bbox="745 582 1348 721"> <thead> <tr> <th>Ventilatorstufe</th> <th>Volumenstrom bei Nennluftmenge</th> <th>Luftwechsel (V_{PrR}=---m³)</th> <th>Luftwechsel (V_R=---m³)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>[-]</td> <td>[m³/h]</td> <td>[h⁻¹]</td> <td>[h⁻¹]</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>	Ventilatorstufe	Volumenstrom bei Nennluftmenge	Luftwechsel (V _{PrR} =---m ³)	Luftwechsel (V _R =---m ³)	[-]	[m ³ /h]	[h ⁻¹]	[h ⁻¹]					Ventilatorstufe	Volumenstrom bei Nennluftmenge	Luftwechsel (V _{PrR} =---m ³)	Luftwechsel (V _R =---m ³)	[-]	[m ³ /h]	[h ⁻¹]	[h ⁻¹]					<p>V_{PrR}= Volumen Prüfraum V_R= Volumen beliebiger Raum auf Wunsch des Kunden Für Geräte welche in Isolierzimmern zum Einsatz kommen sollen, ist nach SWKI 99-3 mindestens ein 12-facher Luftwechsel nötig.</p>
Ventilatorstufe	Volumenstrom bei Nennluftmenge	Luftwechsel (V _{PrR} =---m ³)	Luftwechsel (V _R =---m ³)																									
[-]	[m ³ /h]	[h ⁻¹]	[h ⁻¹]																									
Ventilatorstufe	Volumenstrom bei Nennluftmenge	Luftwechsel (V _{PrR} =---m ³)	Luftwechsel (V _R =---m ³)																									
[-]	[m ³ /h]	[h ⁻¹]	[h ⁻¹]																									
G.4	Leistungsaufnahme des Geräts	Geräteleistungsaufnahme:	<p>Gemessener Leistungsbedarf bei Nennluftmenge mit neuem Filter:</p> <table border="1" data-bbox="745 817 1106 938"> <thead> <tr> <th>Ventilatorstufe</th> <th>Aufnahme Leistung</th> <th>Volumenstrom</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>[-]</td> <td>[W]</td> <td>[m³/h]</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table> <p>Gemessener Leistungsbedarf bei Nennluftmenge mit staubbeladenem Filter:</p> <table border="1" data-bbox="745 1037 1106 1158"> <thead> <tr> <th>Ventilatorstufe</th> <th>Aufnahme Leistung</th> <th>Volumenstrom</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>[-]</td> <td>[W]</td> <td>[m³/h]</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>	Ventilatorstufe	Aufnahme Leistung	Volumenstrom	[-]	[W]	[m ³ /h]				Ventilatorstufe	Aufnahme Leistung	Volumenstrom	[-]	[W]	[m ³ /h]										
Ventilatorstufe	Aufnahme Leistung	Volumenstrom																										
[-]	[W]	[m ³ /h]																										
Ventilatorstufe	Aufnahme Leistung	Volumenstrom																										
[-]	[W]	[m ³ /h]																										

Abbildung 7: Prüfformular Seite 3, Gerätekenngrossen

Prüfstelle: _____ Prüfformular zur Prüfrichtlinie für mobile Raumlufreinigungsgeräte: _____ Prüfdatum: _____
Prüfling _____ : **Firma** _____

G.5	Luft Eintritt und Luftaustritt	Art und Position von Luft eintritt und Luftaustritt	Luft eintritt: _____ _____ Luftaustritt: _____ _____ <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> Abbildung: Wo der Luft eintritt ist und wo befindet sich der Luftaustritt am Gerät. </div>	
G.6	Bedienbarkeit	Bedienung: Muss für geschultes Personal einfach möglich sein Bedienungsanleitung: Verständlich für technische Laien, hinreichend zur fehlerfreien Verwendung des Gerätes? Schutz vor Eingriff durch ungeschultes Personal und Kinderschutz: Abdeckung, Verriegelung,	_____ _____ _____	
G.7	Wartung	Wartungsaufwand: Einfache Wartung möglich oder muss das Gerät komplett / teilweise demontiert werden Verschleisssteile sind:	_____ _____	

Abbildung 8: Prüfformular Seite 4, Gerätekenngrossen

Prüfrichtlinie für mobile Raumlufreinigungsgeräte
Seite 40/43

Prüfstelle: _____ Prüfformular zur Prüfrichtlinie für mobile Raumlufreinigungsgeräte: _____ Prüfdatum: _____
Prüfling _____ : **Firma** _____

G.8	Gerätesicherheit	Gültiges Zertifikat oder Testbericht nach einer der nachfolgenden Normen vorhanden: IEC 60335-1 IEC 60335-2-65 UL 507, 9th Ed. CSA C22.2 No. 113-08	<hr/> <hr/> <hr/>	
G.9	Optische Ansprüche	<u>Optische Anzeige:</u> Leuchtende/Blinkenden LEDs etc. <u>Abdeckung:</u> Vorhanden/nicht vorhanden.....	<hr/> <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	
G.10	Geräte-aufstellung	Aufstellungs-ort/Montage/Mobilität:	Handelt es sich um ein: Bodengerät: <input type="checkbox"/> Wandgerät: <input type="checkbox"/> Deckengerät: <input type="checkbox"/> Montage in Eigenleistung möglich? <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein Zusätzliche Informationen: (Aufhängung, Griffe, Rollen, Anschlusskabel-länge, Kabelanschlussversion, etc.) <hr/> <hr/> <hr/>	

Abbildung 9: Prüfformular Seite 5, Gerätekenngrossen

Prüfrichtlinie für mobile Raumlufreinigungsgeräte
Seite 41/43

Prüfstelle: _____ Prüfformular zur Prüfrichtlinie für mobile Raumlufreinigungsgeräte: _____ Prüfdatum: _____
Prüfling _____: Firma _____

Prüfkenngrößen:

Nr.	Kriterium	Geräteklassen / Richtwert									Ermittelte Werte	Bemerkungen															
		A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3																	
P.1	Neue Filter 100:1-Erholzeit	$t_{0,01} \leq 20$ Minuten			$t_{0,01} \leq 30$ Minuten			$t_{0,01} > 40$ Minuten			<table border="1"> <tr> <td>100:1-Erholzeit bei Ventilatorstufe Q (m^3/h)</td> <td colspan="3">Messtabelle</td> </tr> <tr> <td></td> <td>M 1</td> <td>M 2</td> <td>M 3</td> </tr> <tr> <td>100:1-Erholzeit [min]</td> <td>$t_{0,01}$</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	100:1-Erholzeit bei Ventilatorstufe Q (m^3/h)	Messtabelle				M 1	M 2	M 3	100:1-Erholzeit [min]	$t_{0,01}$						
100:1-Erholzeit bei Ventilatorstufe Q (m^3/h)	Messtabelle																										
	M 1	M 2	M 3																								
100:1-Erholzeit [min]	$t_{0,01}$																										
P.2	Elektrostatisch entladene Filter 100:1-Erholzeit bei elektrostatisch entladener Filtereinheit	$t_{0,01} \leq 20$ Minuten			$t_{0,01} \leq 30$ Minuten			$t_{0,01} > 40$ Minuten			<table border="1"> <tr> <td>100:1-Erholzeit bei Ventilatorstufe Q (m^3/h)</td> <td colspan="3">Messtabelle</td> </tr> <tr> <td></td> <td>M 1</td> <td>M 2</td> <td>M 3</td> </tr> <tr> <td>100:1-Erholzeit [min]</td> <td>$t_{0,01}$</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	100:1-Erholzeit bei Ventilatorstufe Q (m^3/h)	Messtabelle				M 1	M 2	M 3	100:1-Erholzeit [min]	$t_{0,01}$						
100:1-Erholzeit bei Ventilatorstufe Q (m^3/h)	Messtabelle																										
	M 1	M 2	M 3																								
100:1-Erholzeit [min]	$t_{0,01}$																										
P.3	Staubbeladene Filter 100:1-Erholzeit bei staubbeladener Filtereinheit	$t_{0,01} \leq 20$ Minuten			$t_{0,01} \leq 30$ Minuten			$t_{0,01} > 40$ Minuten			<table border="1"> <tr> <td>100:1-Erholzeit bei Ventilatorstufe Q (m^3/h)</td> <td colspan="3">Messtabelle</td> </tr> <tr> <td></td> <td>M 1</td> <td>M 2</td> <td>M 3</td> </tr> <tr> <td>100:1-Erholzeit [min]</td> <td>$t_{0,01}$</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	100:1-Erholzeit bei Ventilatorstufe Q (m^3/h)	Messtabelle				M 1	M 2	M 3	100:1-Erholzeit [min]	$t_{0,01}$						
100:1-Erholzeit bei Ventilatorstufe Q (m^3/h)	Messtabelle																										
	M 1	M 2	M 3																								
100:1-Erholzeit [min]	$t_{0,01}$																										
P.4	Schallemission (Im Neuzustand) $L_{p,A,max}$ [dB(A)]	≤ 28	≤ 35	≤ 40	≤ 28	≤ 35	≤ 40	≤ 35	≤ 40	≤ 45	<table border="1"> <tr> <td>theoretischer Schalldruckpegel nach VDI 2081</td> </tr> <tr> <td>$L_{p,A,VDI}$ in dB(A)</td> </tr> <tr> <td>Zuschlag Tonhaltigkeit (K_r): _____ dB(A)</td> </tr> <tr> <td>Relevanter Schalldruckpegel inkl. Zuschlag Tonhaltigkeit ($L_{p,A,max}$): _____ dB(A)</td> </tr> </table>	theoretischer Schalldruckpegel nach VDI 2081	$L_{p,A,VDI}$ in dB(A)	Zuschlag Tonhaltigkeit (K_r): _____ dB(A)	Relevanter Schalldruckpegel inkl. Zuschlag Tonhaltigkeit ($L_{p,A,max}$): _____ dB(A)												
theoretischer Schalldruckpegel nach VDI 2081																											
$L_{p,A,VDI}$ in dB(A)																											
Zuschlag Tonhaltigkeit (K_r): _____ dB(A)																											
Relevanter Schalldruckpegel inkl. Zuschlag Tonhaltigkeit ($L_{p,A,max}$): _____ dB(A)																											
P.5	Raumlufgeschwindigkeit (Im Neuzustand) $V_{L,PR}$ [m/s]	0.15	0.15	0.2	0.15	0.2	0.2	0.2	0.25	0.25	<table border="1"> <tr> <td>Luftgeschwindigkeit an den Messstellen bei der Ventilatorstufe Q (m^3/h)</td> <td>M 4.1</td> <td>M 4.2</td> <td>M 4.3</td> <td>M 4.4</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Höhe</td> <td>Höhe</td> <td>Höhe</td> <td>Höhe</td> </tr> <tr> <td>Luftgeschwindigkeit [m/s]</td> <td>$v_{L,PR}$</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	Luftgeschwindigkeit an den Messstellen bei der Ventilatorstufe Q (m^3/h)	M 4.1	M 4.2	M 4.3	M 4.4		Höhe	Höhe	Höhe	Höhe	Luftgeschwindigkeit [m/s]	$v_{L,PR}$				
Luftgeschwindigkeit an den Messstellen bei der Ventilatorstufe Q (m^3/h)	M 4.1	M 4.2	M 4.3	M 4.4																							
	Höhe	Höhe	Höhe	Höhe																							
Luftgeschwindigkeit [m/s]	$v_{L,PR}$																										
Das Gerät entspricht somit der Geräteklasse:											(Für die Bewertung ist der ungünstigste Wert aus P.1, P.2 und P.3 repräsentativ.)																

Abbildung 10: Prüfformular Seite 6, Prüfkenngrößen

A 2. Schallemission

A 2.1. Berechnung der äquivalenten Schallabsorptionsfläche mit VDI 2081 Werten

$$A_{ges,T=1} = 0.163 \cdot \frac{V_{PrR}}{T_{VDI\ 2081}} = 0.163 \cdot \frac{38}{1} = 6.19 \quad [m^2]$$

Formel 6: Berechnung der äquivalenten Schallabsorptionsfläche nach VDI 2081

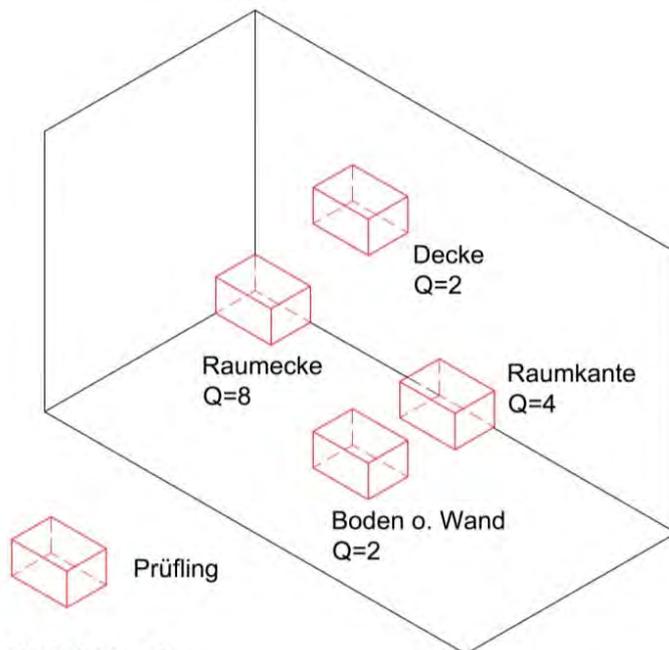
$$L_{p,A,VDI} = L_{w,A,Gerät} + 10 \cdot \lg\left(\frac{4}{4 \cdot \pi \cdot 3^2} + \frac{4}{6.19}\right) = \quad [dB(A)]$$

$$L_{p,A,VDI} = L_{w,A,Gerät} - 1.66$$

Formel 7: Berechnung der Standardformel mittels den Werten nach VDI 2081 und den Standardprüfraumbedingungen

A 2.2. Richtfaktor Q

Anhand der Positionierung des Prüflings an einer der raumangrenzenden Flächen, wird der entsprechende Richtfaktor ausgewählt.



Richtfaktor Q:

Faktor	Abstrahlung	Lage der Schallquelle
Q=1	Kugelförmig	in Raummitte
Q=2	halbkugelförmig	auf dem Boden oder Mitte der Wand
Q=4	viertelkugelförmig	an einer Raumkante
Q=8	achtelkugelförmig	in einer Raumecke

Abbildung 11: Mögliche Richtfaktoren im Abhängigkeit der Gerätepositionierung

A 2.3. Abstand d

Anhand der Positionierung des Prüflings kann ebenfalls der Abstand d ermittelt werden. Die beiden Bezugsmesspunkte für den Abstand sind dabei die Messstelle M1 nach dem Standardprüfverfahren zur Ermittlung der 100:1 Erholzeit sowie das Zentrum der Schallquelle.

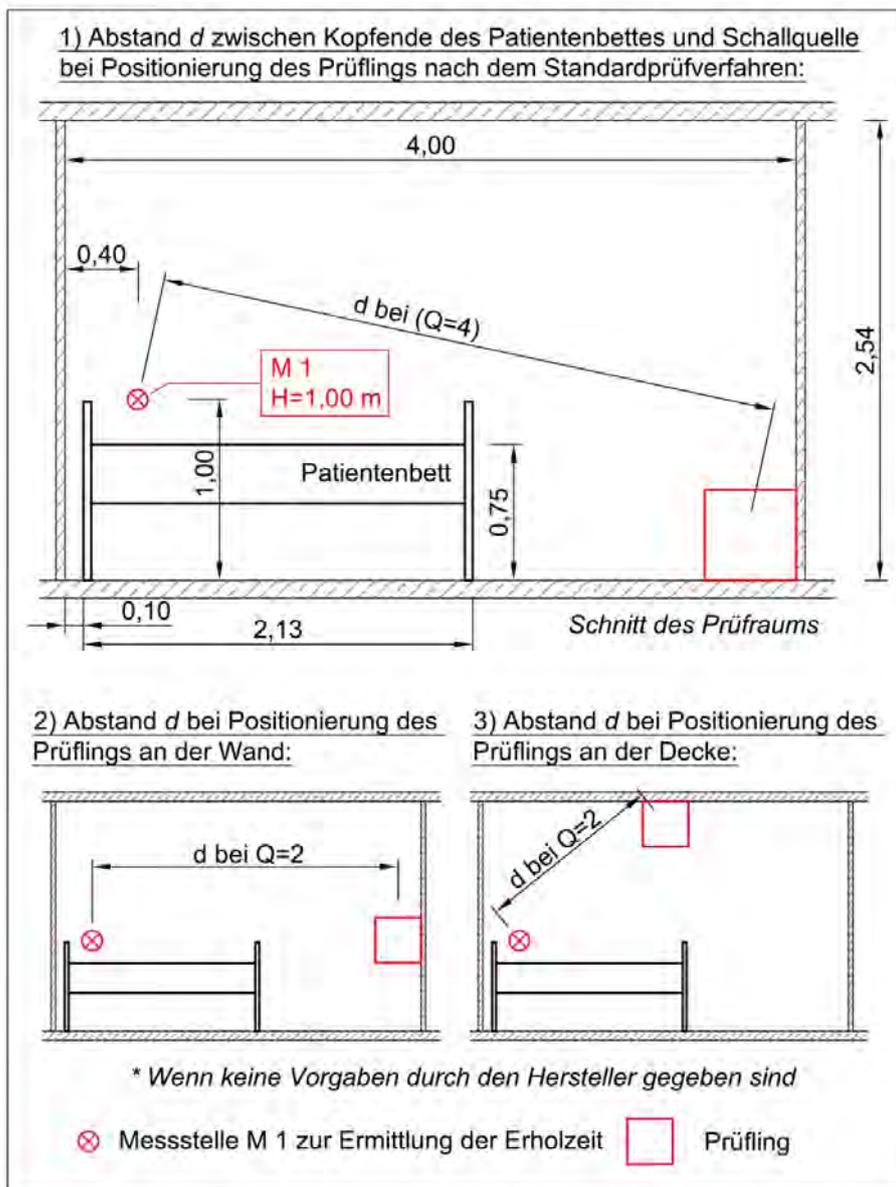


Abbildung 12: Bestimmung von Abstand d

Horw, 30. Juni 2012

Seite 88/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

10.3. Anhang 3: Teilbericht: Optimierung der Strömungssimulationen für OP Räume

Strömungssimulation

Inhalt: **Optimierung der Strömungssimulationen für OP - Räume**

Projekt: **Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II, Teilprojekt 4 - CFD**

Auftraggeber: **Bundesamt für Berufsbildung und Technologie BBT, Förderagentur für Innovation KTI**

Bearbeiter: **Herr Stefan Weigel
Herr Dr. Vogel**

Vorgang: **08040KTI2-BE001**

Datum: **13.09.2011**

INHALTSVERZEICHNIS

1	RÜCKBLICK GiG I UND ZIELSETZUNG GiG II	3
2	GRUNDLAGEN	7
2.1	GRUNDLAGEN TURBULENZMODELLIERUNG	7
2.2	ALLGEMEINE MODELLGRUNDLAGEN „STANDARD - OP“	11
2.3	AUSWERTUNGEN UND BEWERTUNGSGRÖßEN	14
2.4	VORGEHENSWEISE UND VARIANTENSTUDIEN	14
3	GRUNDSÄTZLICHE STRÖMUNGSVERHÄLTNISSE UND VERGLEICH MIT DEN ERGEBNISSEN AUS DEM PROJEKT GiG I	16
4	ERGEBNISSE FÜR DEN STANDARD OP - RAUM	20
4.1	NETZGENERIERUNG	20
4.2	WÄRMEEINTRAG	28
4.3	TURBULENZMODELLIERUNG	40
4.4	ZEITLICHE AUFLÖSUNG / ZEITSCHRITTWEITE.....	46
4.5	SCHUTZGRADMODELLIERUNG	52
4.6	ZUSAMMENFASSENDER ÜBERSICHT DER VARIANTENSTUDIEN	55
5	ÜBERFÜHREN DER ERGEBNISSE AUF ANDERE RANDBEDINGUNGEN	56
5.1	BODENNAHE ABSAUGUNG IM WANDBEREICH	56
5.2	OPTIMIERTE OP - LAMPEN UND HOMOGENE ZULUFT MIT 0,30 M/S	60
5.3	OPTIMIERTE OP - LAMPEN UND DIFFERENTIAL FLOW 2 x 2	64
5.4	OPTIMIERTE OP - LAMPEN UND DIFFERENTIAL FLOW 2 x 1.....	70
6	ZUSAMMENFASSUNG DER OPTIMIERUNGEN IN DEN CFD - SIMULATIONEN	75
6.1	INSTATIONÄRE BEWERTUNGEN	76
6.2	STATIONÄRE BEWERTUNGEN	77
7	BEST - PRACTICE - GUIDELINE	79
7.1	GEOMETRISCHES MODELL.....	79
7.2	NETZGENERIERUNG	82
7.3	PHYSIKALISCHE MODELLE	88
7.4	NOTWENDIGE RANDBEDINGUNGEN UND FREIHEITSGRADE	90
7.5	KONTROLLGRÖßEN WÄHREND DER BERECHNUNGEN	97
7.6	BERECHNUNGSDURCHLAUF	98
7.7	POSTPROCESSING UND AUSWERTUNG DER SCHUTZWIRKUNG	100
8	REFERENZEN	103

1 Rückblick GiG I und Zielsetzung GiG II

CFD - Simulationen werden mittlerweile auch in der Gebäudetechnik immer mehr eingesetzt. Ihr Vorteil liegt in der Variabilität der Randbedingungen und der einfachen Durchführbarkeit von Parameterstudien. Im Gegensatz zu Messungen sind sie unabhängig von äußeren Einflussfaktoren und frei wählbar in den zu untersuchenden Szenarien, ohne z. B. teure und aufwendige Umbauten im realen Raum vornehmen zu müssen.

Um die Simulationstechniken auch für den Nachweis der Schutzwirkung in der OP -Planung mit hinreichender Sicherheit einsetzen zu können, wurde deren Anwendung bereits in dem Projekt „Gebäudetechnik im Gesundheitswesen“ untersucht. In diesen Untersuchungen standen vor allem die Verifizierung von Messergebnissen und die Nachbildung der grundsätzlichen Strömungsverhältnisse im Vordergrund. Im zweiten Schritt wurden dann auch Studien zur Schutzwirkung in Abhängigkeit der Abluftpositionen (decken- oder bodennah) und der Raumgröße durchgeführt. Insbesondere letzterer Punkt ist, wie oben bereits beschrieben, mit Messungen nur schwer durchführbar.

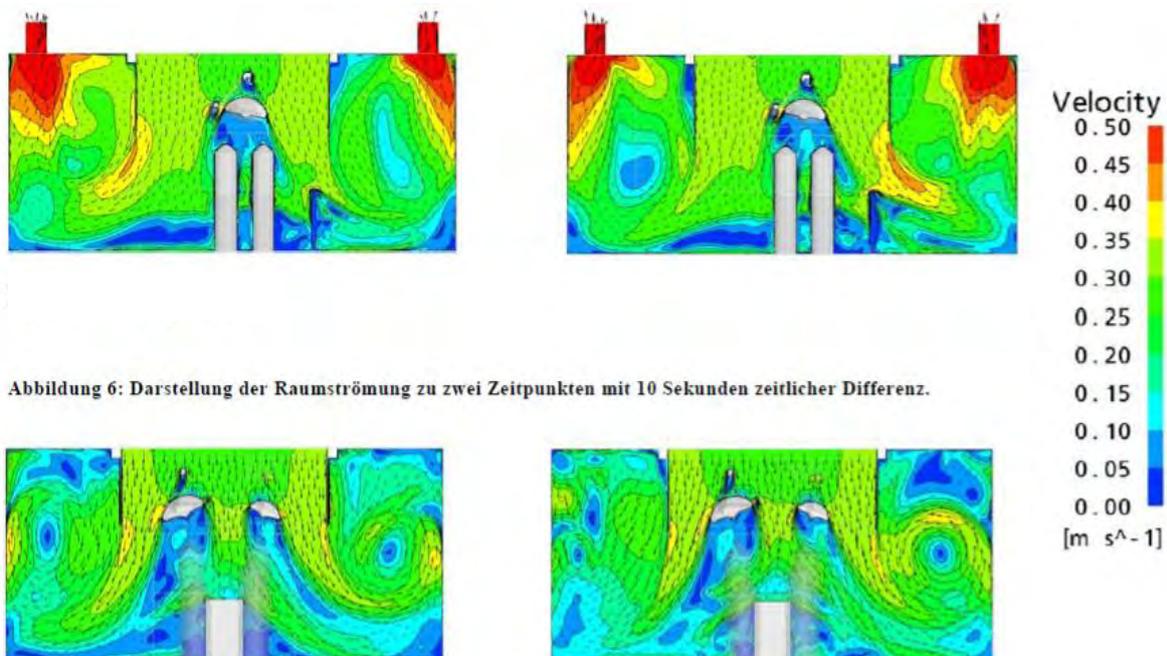


Abbildung 6: Darstellung der Raumströmung zu zwei Zeitpunkten mit 10 Sekunden zeitlicher Differenz.

Abbildung 7: Vergleich des Geschwindigkeitsfeldes zwischen grobem (links) und feinem Gitter (XZ-Ebene).

Bild 1.1: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten [m/s] für zwei Zeitpunkte (oben) und die beiden Berechnungsgitter (unten) im GiG I [1]

Die numerischen Untersuchungen im Projekt GiG I haben gezeigt, dass die Raumströmung in dem untersuchten OP - Raum stark instationär ist. Sie wurden in zwei Modellen unterschiedlicher Netzgröße durchgeführt (2 Mio. und 7 Mio. Zellen) und haben die Messergebnisse in beiden gleichermaßen nachgewiesen (siehe Bild 1.1). In den Studien des GiG I wurde das SST k - ω - Turbulenzmodell eingesetzt. Mit dem Modell wurde sowohl der instationäre Charakter der Raumströmung gut abgebildet als auch eine entsprechende, mit Messungen vergleichbare Konzentrationsverteilungen im Schutzbereich um den OP - Tisch bestimmt. Der Wärmeeintrag an den Personen / Dummies erfolgte durch ein höhenabhängiges Profil der Oberflächentemperaturen. Auch der Wärmeeintrag durch die Beleuchtung wurde anhand von Temperaturvorgaben an den Oberflächen der Bauteile und Einbauten definiert. Die Zeitschrittweite zwischen zwei Berechnungspunkten lag bei 0,1 sec. Mit diesen Ansätzen wurden zwar gute Ergebnisse erzielt, der Rechenaufwand lag jedoch für ein 30 Minuten - Intervall bei etwa 3 - 4 Wochen.

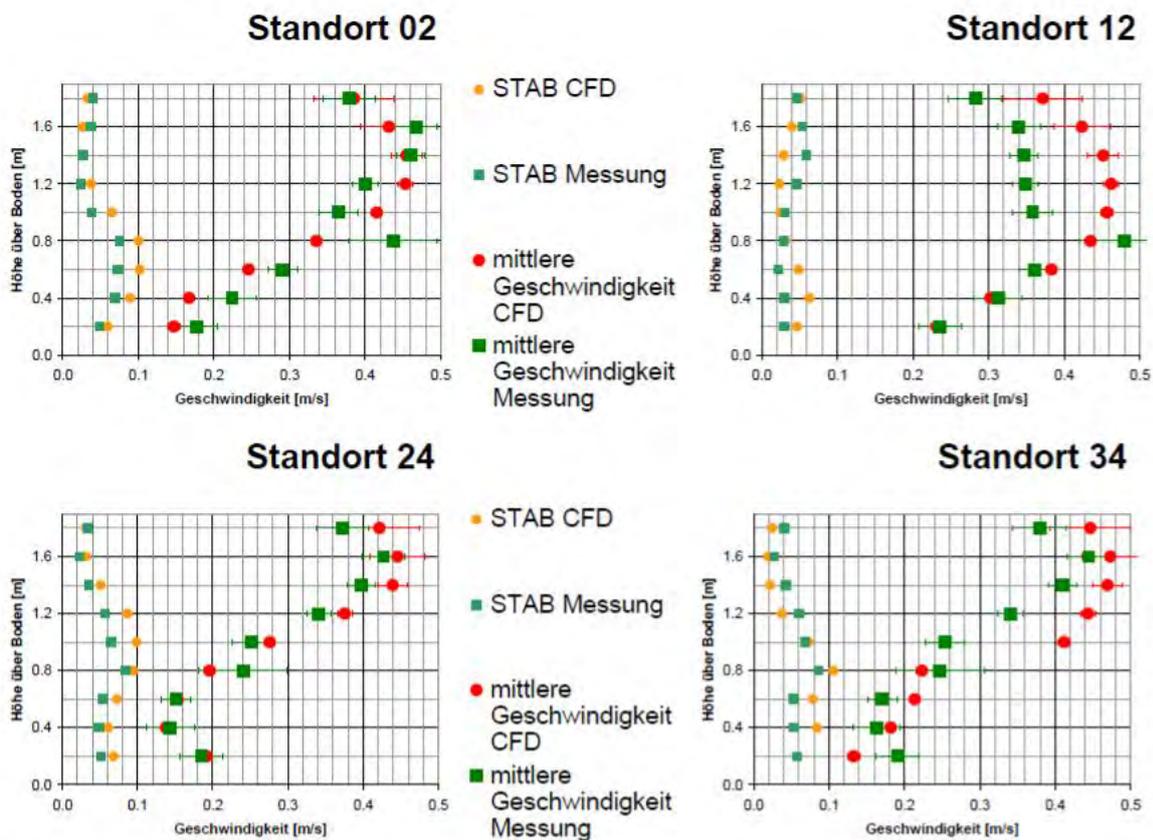


Abbildung 10 Auswertung der quantitativen Validierung

Bild 1.2: Strömungsgeschwindigkeiten [m/s] an Messpunkten um die Strömungsschürze, Vergleich zwischen CFD und Messung im GiG I [1]

Der Schutzgrad auf dem OP - Tisch (Positionen gemäß SWKI 99 - 3 bzw. VDI 2167 - 1) wurde hier in dem definierten „Standard - OP“ auf $SG = 0,6$ bestimmt [1]. In den Messungen lag er in dem Bereich zwischen 0 bis 0,7. Insofern liegt der berechnete Schutzgrad, wie auch die Auswertung nach Bild 1.3 und Bild 1.4 zeigen, innerhalb des Messbereiches. Auch die Auswertungen von Geschwindigkeitsprofilen an ausgewählten Messreihen um die Strömungsschürze gemäß Bild 1.2 zeigen zwischen den Simulationen und den Messungen ähnliche Charakteristika.

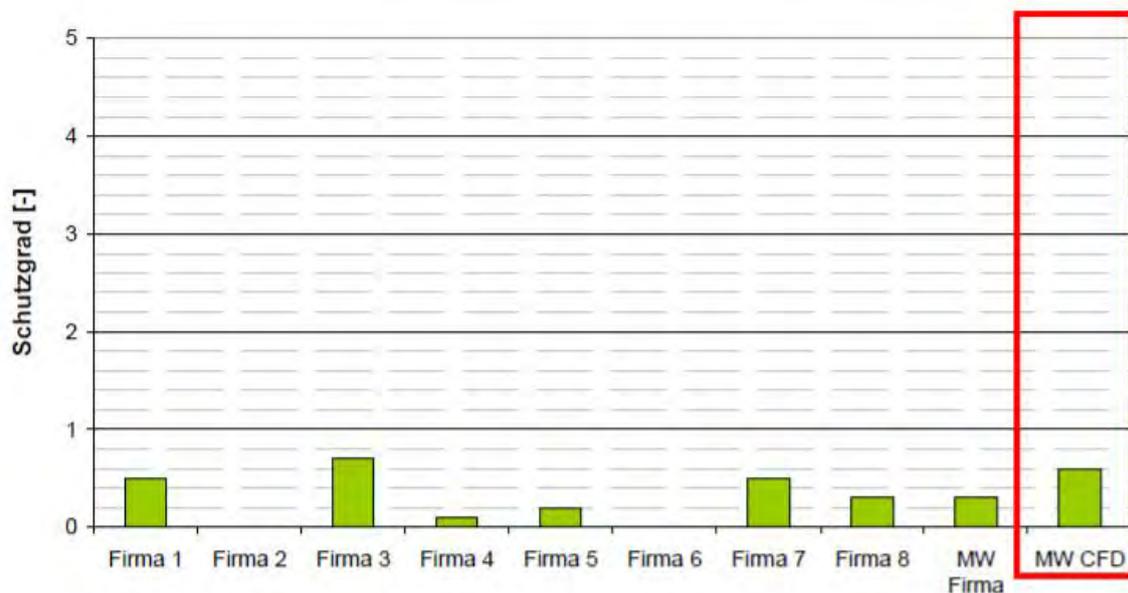


Abbildung 14: Vergleich Schutzgrad: Gemessen (8 Firmen) vs. CFD-Simulation

Bild 1.3: Vergleich des Schutzgrades verschiedener Messungen und den CFD - Simulationen im GiG I für den „Standard - OP“ [1]

Ausgehend von den bisherigen CFD - Analysen sollen in dem Projekt „Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II“ (GiG II) die Untersuchungen weitergeführt und deren Einsatz optimiert werden. Zielsetzung ist vor allem durch geeignete Wahl der mathematischen, physikalischen und numerischen Ansätze sowie der Randbedingungen eine merkliche Reduzierung der Rechenzeiten, bei weiter gegebener Übertragbarkeit der Ergebnisse. Nur wenn das erreicht werden kann und die Zeiträume zur Ergebniserzeugung in einem wirtschaftlichen Rahmen liegen, werden die CFD - Simulationen auch in der OP - Planung verbreitet Anwendung finden. Der Vorteil liegt dann neben der zunehmenden Planungssicherheit auch in der Optimierung der Luftführung und einzelner Komponenten, des Betriebsverhaltens bis hin zum Nutzverhalten durch Visualisierung der lokalen Strömungsverhältnisse und u. U. kontaminierter Bereiche.

Die Untersuchungen werden sowohl für den „Standard - OP“ durchgeführt als auch im Weiteren auf neue Szenarien überführt. Im Folgenden werden zuerst die grundsätzlichen Randbedingungen des „Standard - OP“ kurz zusammengefasst. Dann werden die Ergebnisse der Parameterstudien dargestellt und erläutert. Letztlich soll ein Best - Practice - Guideline mit den zuvor erarbeiteten Ansätzen erstellt werden.

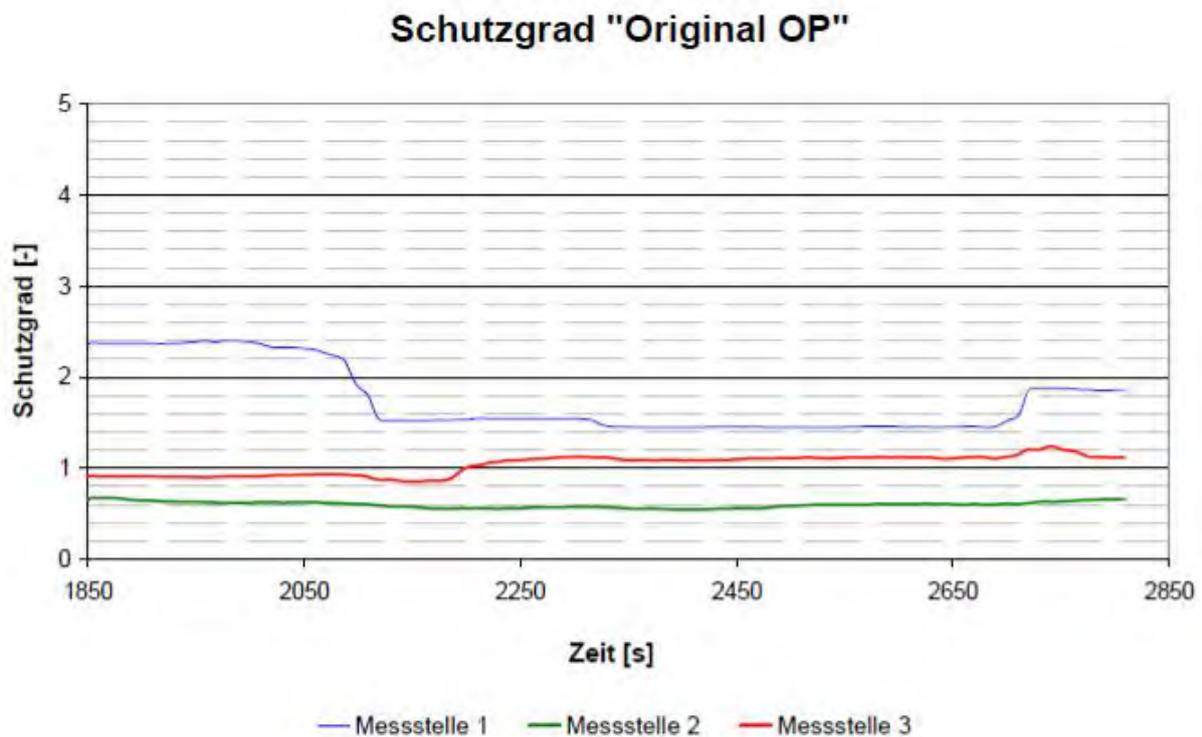


Bild 1.4: Gemittelter Schutzgrad (während jeweils 10 min), CFD - Simulationen GiG I [1]

2 Grundlagen

2.1 Grundlagen Turbulenzmodellierung

Die Beschreibung eines Strömungsfeldes erfolgt durch die Lösung der Kontinuitäts- und der Navier - Stokes - Gleichungen mit den Größen Druck und Geschwindigkeit in den drei Raumrichtungen. (Im nichtisothermen Fall kommt noch eine zusätzliche Transportgleichung für die Energie hinzu.) Dafür werden in den meisten Modellen die Momentanwerte (u_i) in einen Mittelwert (U_i) und einen Schwankungsanteil (u_i') aufgeteilt ($u_i = U_i + u_i'$). In der aus Ableitungen und Mittelungen hervorgehenden Reynolds - gemittelten Navier - Stokes - Gleichung bleibt ein Term $\overline{u_i u_j}$ der weder analytisch noch durch weitere Ableitungen gelöst werden kann. Diese so genannten Reynoldsspannungen verursachen das so genannte Schließungsproblem, an dessen Lösung die Turbulenzmodelle ansetzen.

In der Modellvorstellung erfolgt der Impulsaustausch durch gaskinetische und turbulente Prozesse, d. h. durch Kollision von Molekülen und Turbulenzballen. Dabei entstehen jeweils Spannungen, die mathematisch durch einen Reibungsterm νS_{ij} ($S_{ij} \dots$ *mittlere Scherrate*) beschrieben werden. (Bei der Kollision der Turbulenzballen entstehen die turbulente Scheinspannungen $\nu_t S_{ij}$.) Die kinematische Viskosität ν ist eine Stoffgröße, wohingegen die turbulente Viskosität ν_t im Strömungsfeld veränderlich ist und zusätzlich bestimmt werden muss. Mit diesem Modellansatz wird die direkte Lösung der Reynoldsspannungen umgangen, indem die turbulente Struktur mit einem charakteristischen Zeit- und Längenmaß beschrieben wird. Die wiederum bestimmen sich aus der turbulenten kinetischen Energie sowie der Dissipation*. Die Vereinfachung setzt die Isotropie der kleinen Skalen, also gleichförmige Turbulenz in den drei Raumrichtungen, voraus.

(*)

Die Dissipation ist die Umwandlung der Bewegungsenergie in Reibungswärme, die dann dem weiteren Prozess nicht mehr zur Verfügung steht. Mit dem Transport der Dissipation werden also die Abnahme der turbulenten kinetischen Energie und damit die Dämpfung der Strömung beschrieben.

2.1.1 Standard $k - \varepsilon$ - Modell

Die $k - \varepsilon$ - Modelle sind Zweigleichungsmodelle, die die Turbulenz mit den Transportgleichungen der turbulenten kinetischen Energie k und der Dissipation ε berechnen. Sie sind halbempirisch, da einzelne Konstanten in den Gleichungen in Messungen bestimmt werden müssen. Das Standard $k - \varepsilon$ - Modell wurde 1974 von *Launder* und *Spalding* entwickelt [7] [8]. Es setzt eine vollständig turbulente Strömung voraus. Der Einfluss der molekularen Viskosität wird in dem Standardmodell vernachlässigt. Grundlage dieser Vereinfachung ist, dass der Turbulenztransport im Wesentlichen durch die Bewegungen im Strömungsfeld stattfindet (Impulsaustausch der Turbulenzballen ist dominant gegenüber den Moleküllkollisionen). Das verdeutlicht die Einschränkungen insbesondere im wandnahen Bereich, da dort die Turbulenz abnimmt und damit einhergehend der molekulare Anteil am Impulstransport steigt. Die verwendeten Konstanten in dem Modell sind Verallgemeinerungen von Spezialfällen, die nur selten auf die jeweilige Anwendung exakt zutreffen. Weiterhin führt die strikte Formulierung mittels Konstanten zu dem Phänomen, dass unter bestimmten Bedingungen im Staupunkt einer Strömung eine Überproduktion der Turbulenz berechnet werden kann.

2.1.2 Realizable $k - \varepsilon$ - Modell

Das Realizable $k - \varepsilon$ - Modell ist aus dem Standardmodell hervorgegangen und gleicht einige seiner Unzulänglichkeiten aus. Es verwendet eine neue Gleichung für die Dissipation mit weniger Konstanten und ist deswegen freier in der Formulierung [7] [10]. Zum anderen löst es die turbulente Viskosität so, dass die Überproduktion der Turbulenz im Staupunkt verhindert wird. Deren Berechnung erfolgt mit einer zusätzlichen Variablen, die eine Funktion der Scherung, Rotation und der Turbulenz ist. So ist das Realizable $k - \varepsilon$ - Modell besonders gut für Staupunkt- und Freistrahlsströmungen geeignet. In dem OP - Saal verspricht das Modell Vorteile in der Umströmung der Lampen und in der direkten Anströmung des OP - Tisches (Staupunkt). Auch die Sekundärinduktion von Umgebungsluft in den Zuluftstrahl wird unter Umständen besser wiedergegeben. Nachteilig könnte sich die Forderung nach einer vollkommen turbulenten Strömung auswirken, da die insbesondere im Zuluft- und Schutzbereich sowie in der Wandgrenzschicht eher turbulenzarm ausgebildet ist (zumindest bis zur Umströmung der Lampen).

2.1.3 RNG k - ε - Modell

Das RNG k - ε - Modell, RNG bedeutet *Renormalisation Group*, wurde von *Yakhot* und *Orszag* entwickelt. Obwohl es ebenso ein Zweigleichungsmodell ist und je eine Gleichung für die turbulente kinetische Energie k und die Dissipation ε löst, geht es nicht aus dem Standard k - ε - Modell hervor. Die Ableitung erfolgt nicht aus den Reynolds - gemittelten Navier - Stokes - Gleichungen, sondern geht von den Momentanwerten aus [9] [11]. Trotz der abweichenden Herangehensweise besteht der Unterschied gegenüber dem Standardmodell nur in einem zusätzlichen Quellterm in der Dissipationstransportgleichung. Der wird neben der turbulenten kinetischen Energie und der Dissipation auch von der Scherrate beeinflusst und ist deshalb besser für geringere Reynoldszahlen und für die Nachbildung von Stromlinienkrümmungen geeignet. Wohlgemerkt bedeutet „besser“ hier nicht vollständig, da weiterhin eine isotrope Turbulenz vorausgesetzt wird. Neben dem zusätzlichen Term in der Dissipationsgleichung besteht ein wesentlicher Unterschied in der Bestimmung der turbulenten bzw. effektiven Viskosität. Während im Bereich hoher Reynoldszahlen die turbulente Viskosität analog dem Standard k - ε - Modell bestimmt wird, erfolgt bei kleinen Re - Zahlen ebenso die Berücksichtigung des molekularen Impulstransportes [7]. Damit ist das RNG k - ε - Modell wesentlich besser für den wandnahen Bereich geeignet.

Ausgehend von den oben beschriebenen Ansätzen kann davon ausgegangen werden, dass in den Untersuchungen des OP - Saals das Einmischen der Umgebungsluft infolge des Auftriebes an den Personen / Dummies sowie das damit einhergehende Umlenken der Strömung (Stromlinienkrümmungen) besser abgebildet werden als mit dem Standard oder dem Realizable k - ε - Modell.

2.1.4 SST k - ω - Modelle

Das ursprüngliche k - ω - Modell ist ein von *Wilcox* entwickeltes Zweigleichungssystem mit Transportgleichungen für die turbulente kinetische Energie k und die charakteristische Frequenz ω , mit der die energietragenden großskaligen Wirbel beschrieben werden (ω kann dabei aus dem Verhältnis von k und ε beschrieben werden). Ein wesentlicher Vorteil des Modells ist, dass die turbulente Viskosität bzw. das turbulente Längenmaß im Bereich niedriger Reynoldszahlen automatisch reduziert wird [7]. Durch die Dämpfung in Wandnähe werden Grenzschichteffekte besser nachgebildet. Nachteilig wirkt, dass der Übergang zwischen dem Gebieten höherer und niedriger Reynoldszahlen und damit das Strömungsfeld insgesamt stark vom Gitternetz und den Modellkonstanten abhängig sind.

In dem von *Menter* entwickelten SST $k - \omega$ -Modell (SST bedeutet *Shear - Stress - Transport*) werden die Vorteile des $k - \omega$ -Modells im wandnahen Bereich und des $k - \varepsilon$ -Modells in der freien Strömung miteinander kombiniert. Der Übergang beider Ansätze erfolgt dabei mit Hilfe einer Überlagerungsfunktion, so dass in Abhängigkeit des Wandabstandes (bzw. der lokalen Reynoldszahl und des Wandabstandes) die eine oder die andere Formulierung angewendet wird.

2.1.5 SAS Modell

Das SAS - Modell (SAS ... *Scale Adaptive Simulation*) wurde von *Menter und Egorov* entwickelt. Es kombiniert in Abhängigkeit der zeitlichen und räumlichen Skalen und Auflösungen das Large-Eddy-Simulation-Modell (LES) und das $k - \varepsilon$ -Modell (bzw. im SST SAS - Modell das LES mit dem SST $k - \omega$ -Modell).

In dem eigentlichen LES - Modell werden die großen Wirbelstrukturen sowohl örtlich als auch zeitlich direkt aus den Navier - Stokes - Gleichungen berechnet. Die Effekte in den kleineren Skalen werden mit Hilfe eines Tiefpassfilters gedämpft wiedergegeben. Das macht sowohl im zeitlichen als auch im räumlichen Maßstab eine sehr feine Auflösung erforderlich, da die Tiefpassfilterung die Turbulenz nur ungenügend wiedergibt und nur in einem begrenzten Gebiet des Strömungsfeldes angewendet werden darf. Das gilt insbesondere, da die Tiefpassfilterung sowohl im zeitlichen wie auch im räumlichen Maßstab stattfindet und damit für die direkte Berechnung aus den Navier - Stokes - Gleichung beide Kriterien eingehalten werden müssen. An diesem Punkt setzt das SAS - Modell an. In dem erfolgt die Berechnung der kleinen Skalen nicht mit einer Dämpfungsfunktion, sondern mit Hilfe des $k - \varepsilon$ - bzw. SST $k - \omega$ -Modells [7]. Die Anwendung des jeweiligen Modellansatzes ist dabei auch nicht auf den wandnahen Bereich begrenzt, es schaltet vielmehr zwischen den Modellen in Abhängigkeit der zeitlichen und räumlichen Skalen und der gegebenen Auflösung um. Das macht den Vorteil des SAS Modells deutlich. In den Strömungen hoher Reynoldszahlen (und niedriger Strouhal - Zahlen) müssen die Größen des Strömungsfeldes nicht mehr modelliert werden, sondern gehen direkt aus der Navier - Stokes - Gleichung hervor. Wenn das aufgrund der Auflösung nicht möglich, dann entstehen gegenüber den Lösungen der Zweigleichungsmodelle keine Nachteile durch nur unzureichende Dämpfungsfunktionen (wie sie in dem LES - Modell angewendet werden).

2.2 Allgemeine Modellgrundlagen „Standard - OP“

Die Basisuntersuchungen und Validierungen des OP - Raumes werden mit dem Standardraum des GiG I - Projektes durchgeführt. Dessen Abmessungen sind ca. 6,5 m x 7,2 m x 3,2 m (X x Y x Z). Die Zuluft erfolgt über eine TAV - Decke über dem Operationsbereich mit 10.370 m³/h (TAV = turbulenzarme Verdrängungsströmung). Die Luftmenge ist so gewählt, dass sich über die Decke mit den Abmessungen 3,1 m x 3,1 m eine homogene Strömungsgeschwindigkeit von $w_{zu} = 0,30$ m/s einstellt. Die in den Raum eingebrachte Luft wird an drei Positionen wieder abgeführt. Das sind 800 m³/h über der Tür und insgesamt 9.570 m³/h über zwei Linienabsaugungen unter der Decke. Die Deckenabsaugungen dienen im realen OP - Raum dem Umluftbetrieb der Lüftungsanlage. Eine Übersicht des zu Grunde gelegten Operationsraumes mit den Zu- und Abluftpositionen sowie den Luftmengen zeigt Bild 2.2.1.

Temperaturprofil Dummies:

(1) $t = 28,3 + 20,3 (z / 1,5)$

(2) $t = 24,8 + 9,7 (z / 1,2)$

(3/4/5/6) $t = 25 + 6 (z / 1,8)$

z ... Höhe ü. OKFF

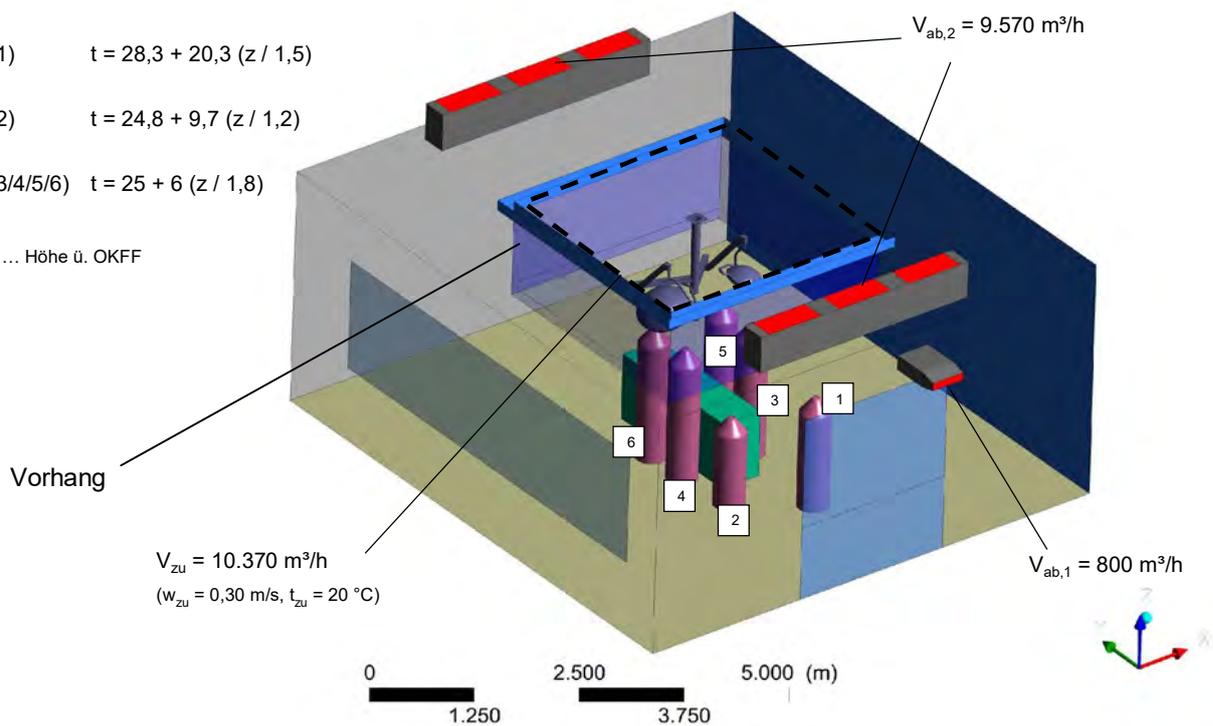


Bild 2.2.1: Geometrisches Modell des OP - Raumes inklusive der Zu- und Abluftverteilung sowie den Temperaturprofilen an den Dummies

Neben den beschriebenen Zu- und Abluftverteilungen des Standardmodelles werden im ersten Schritt auch die thermischen Randbedingungen und Partikelmessungen aus dem GiG I übernommen. Das umfasst vor allem die Definition eines linearen Temperaturprofils an den Dummies (siehe Bild 2.2.1) sowie den Oberflächentemperaturen an der Beleuchtung.

Die Partikelemissionen erfolgen entsprechend Bild 2.2.2 an sechs Quellpunkten an der äußeren Begrenzung des Vorhanges (jedoch weiterhin im Schutzbereich, „Messung des äußeren Schutzgrades“). Insgesamt werden ca. $6,3 \cdot 10^9$ Partikel je Minute ($6,3 \cdot 10^9$ P/min über sechs Generatoren bedeutet $1,05 \cdot 10^9$ P / min je Quelle) in den Raum eingebracht.

Die Schutzgradberechnungen wurden mit einem Tracergas durchgeführt, das die gleichen Eigenschaften wie Luft ausweist. Dazu wurde in den Simulationen der Partikelstrom in einen äquivalenten Massestrom des Tracergases überführt. Dessen Konzentrationsverteilung wurde dann lokal bewertet und in den Schutzgrad umgerechnet. Grundlage dieses Ansatzes ist, dass auch in den Messungen der Partikeltransport allein durch die Strömung beeinflusst wird, ohne diese zu ändern. Das ist gegeben, da der definierte Massestrom sehr klein gegenüber dem Raumvolumen und dem Luftwechsel ist. (In den CFD - Simulationen des GiG I wurden die Partikel mit den definierten *Additional Variables* als massenlos betrachtet, was ähnlich des Tracergas - Ansatzes ist.)

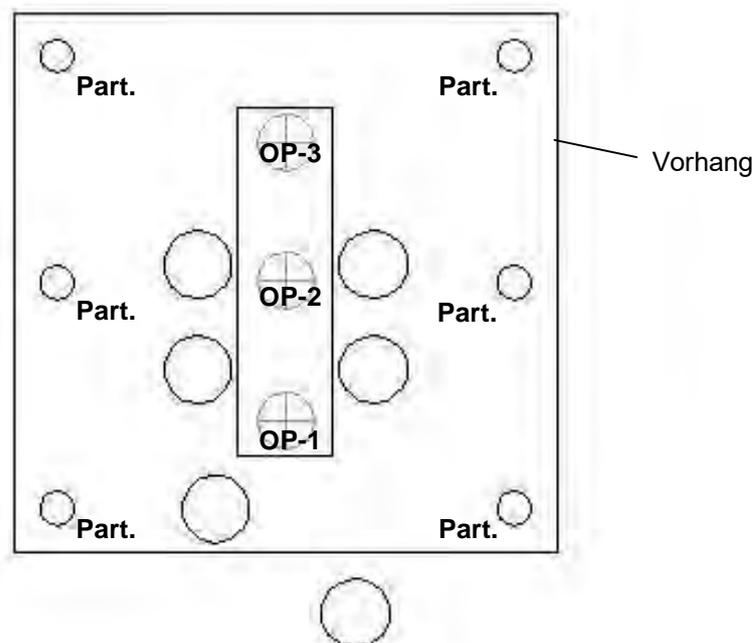


Bild 2.2.2: Anordnung der Partikelemissionen (*Part.*) und der Messpunkte auf dem OP - Tisch (*OP-x*), Prüfung der Schutzwirkung gegen Lasteintrag von außen

Die Partikel haben einen angenommenen Durchmesser von etwa $0,3 \mu\text{m}$ ($D_p = 0,3 \mu\text{m}$). Somit beträgt das Volumen eines Partikels, bei einer angenommenen Kugelform, $V_p = 1,131 \cdot 10^{-19} \text{ m}^3$. Der Volumenstrom ergibt sich dann auf insgesamt $7,125 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3/\text{min}$ bzw. der Massestrom auf $\Sigma m_p = 8,521 \cdot 10^{-10} \text{ kg}/\text{min}$ (bei $\rho = 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$). Das ist der in den Simulationen definierte Partikelstrom / Massestrom über die sechs Generatoren. Ungenauigkeiten bei diesem Ansatz gleichen sich später in der Schutzgradberechnung durch die Referenzkonzentration aus, da diese ebenfalls auf gleichem Wege angepasst wird.

Zusammengefasst wurden die CFD - Simulationen mit umgerechnet folgenden Masseströmen an den Partikelgeneratoren durchgeführt:

Partikelstrom (Summe über alle Generatoren): $Q_P = 6,3 * 10^9$ P/min

Durchmesser je Partikel: $D_P = 0,3 \mu\text{m}$

Partikelvolumen (Kugelform): $V_P = 4/3 * \pi * D_P^3 \approx 1,131 * 10^{-19} \text{ m}^3$

Volumenstrom der Partikelemission: $V^\circ_P = V_P * Q_P \approx 7,125 * 10^{-10} \text{ m}^3/\text{min}$

Massestrom der Partikelemission :
(bei $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$) $m^\circ_P = V^\circ_P * \rho \approx 8,521 * 10^{-10} \text{ kg/min}$

Referenzkonzentration bei $D_P = 0,3 \mu\text{m}$:

$C_{\text{Ref}} = 1 * 10^6 \text{ P/ft}^3 = 3,53 * 10^7 \text{ P/m}^3$ $\approx 3,992 * 10^{-12} \text{ kg(P) / kg(L)}$

Sowohl die Positionen der Dummies und Partikeleinträge als auch der Lampen (inklusive ihres Anstellwinkels) entsprechen den Vorgaben nach VDI 2167 - 1.

2.3 Auswertungen und Bewertungsgrößen

Die Schutzgradberechnung erfolgt nach VDI 2167 bzw. SWKI 99-3 mit dem negativen dekadischen Logarithmus aus dem Verhältnis zwischen der lokalen Konzentration an einem beliebigen Punkt im Raum und einer Referenzkonzentration:

$$SG = -\log_{10} (C_{\text{lokal}} / C_{\text{Ref}}) \quad C_{\text{Ref}} = 3,53 \cdot 10^7 \text{ P/m}^3 \quad (1)$$

In den Simulationsberechnungen wird die Partikelkonzentration für jeden Zeitschritt an drei Messpunkten auf dem Operationstisch bestimmt, in 10 - Minuten - Mittelwerten ausgewertet und in den Schutzgrad umgerechnet. Die Positionen der Messpunkte zeigt Bild 2.2.2 (MP01 bis MP03). Für die Schutzgradbewertung ist darauf zu achten, dass die Verläufe auf einen weitestgehend konstanten Wert konvergieren. Das Minimum dieser (konstant verlaufenden) Werte ist dann der den OP - Raum charakterisierende Schutzgrad.

Neben dem Schutzgrad wird ebenso die grundsätzliche Raumströmung bewertet. Hierzu dienen z. B. die Luftgeschwindigkeit und charakteristische Bahnlinien als Bewertungskriterium. Zusätzlich werden, analog zu den Untersuchungen im GiG I, an vier Messlinien um den Vorhang die vertikalen Geschwindigkeitsprofile ausgewertet.

2.4 Vorgehensweise und Variantenstudien

Die Simulationsberechnungen für den Standard - OP - Raum im Rahmen des GiG II umfassen Parameterstudien für verschiedene Modellierungs- und Simulationsansätze. Hierfür wurden vor allem die Turbulenzmodellierung sowie die zeitliche und räumliche Diskretisierung (Zeitschrittweiten und Gittergrößen) variiert.

Neben diesen Studien wurden ebenfalls zwei Modellansätze für die Wärmeabgabe an den Personen / Dummies untersucht. Das ist zum einen die Definition des vertikalen Temperaturprofils an den Oberflächen entsprechend den Empfehlungen des GiG I. Alternativ wurde die Wärmeabgabe mittels eines (konvektiven) Energiequellterms in den wandnächsten Zellen definiert. Der Wärmestrom wird dabei in Anlehnung an die Vorgaben der VDI 2167 - 1 bestimmt. Er kann aber auch mit der Differenz zwischen der jeweiligen mittleren Oberflächentemperatur der Dummies und einer Raumtemperatur von 20 °C berechnet werden:

$$Q = \alpha_i \cdot \Delta t = 6 \cdot A_{\text{Dum}} \cdot (t_{\text{m,Dum}} - 20 \text{ °C}) \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K} = \text{W}] \quad (2)$$

Die nachfolgende Auflistung zeigt nochmals zusammengefasst die maßgeblichen Berechnungsansätze der Optimierungsstudien:

- räumliche Diskretisierung (Zellgrößen und Netzverfeinerung lokaler Bereiche), siehe Abschnitt 4.1
 - a) ca. 4,8 Mio. Tetraederzellen bzw. ca. 0,6 Mio. Polyeder
 - b) ca. 6,2 Mio. Tetraederzellen bzw. ca. 1,1 Mio. Polyeder
 - c) ca. 0,8 Mio. Tetraederzellen bzw. ca. 0,2 Mio. Polyeder

- Modellierung der Wärmeabgabe Personen (Dummys 1 - 6) / des Wärmeeintrages, siehe Abschnitt 4.2
 - a) Profil der Oberflächentemperaturen gemäß Best - Practice - Guideline GiG I
 - b) konvektiver Energiequellterm an den Personen

- Turbulenzmodellierung, siehe Abschnitt 4.3
 - a) SST k - ω - Modell
 - c) Standard k - ϵ - Modell
 - b) Realizable k - ϵ - Modell
 - d) RNG k - ϵ - Modell
 - e) SAS Modell

- zeitliche Diskretisierung (Zeitschrittweite), siehe Abschnitt 4.4
 - a) $\Delta\tau = 0,1$ sec
 - b) $\Delta\tau = 1,0$ sec
 - c) $\Delta\tau = 10$ sec
 - d) stationär

- Schutzgradmodellierung / Modellierung der Partikelemissionen, siehe Abschnitt 4.5
 - a) Emission von in Summe 6,5 Partikel / Minute
 - b) Emission von in Summe 6,5 Mio. Partikel / Minute

3 Grundsätzliche Strömungsverhältnisse und Vergleich mit den Ergebnissen aus dem Projekt GiG I

Die CFD - Berechnungen des OP - Raumes haben grundsätzlich äquivalente Ergebnisse wie in dem Projekt GiG I gezeigt. Sowohl die qualitative visuelle Auswertung der Raumströmung als auch der Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten an den Messpunkten um den OP - Bereich gemäß Bild 2.4.1 zeigt zwischen den Messungen und den Strömungssimulationen im GiG I (*CFD HSLU*) und im GiG II (*CFD GTD*) ähnliche Charakteristiken.

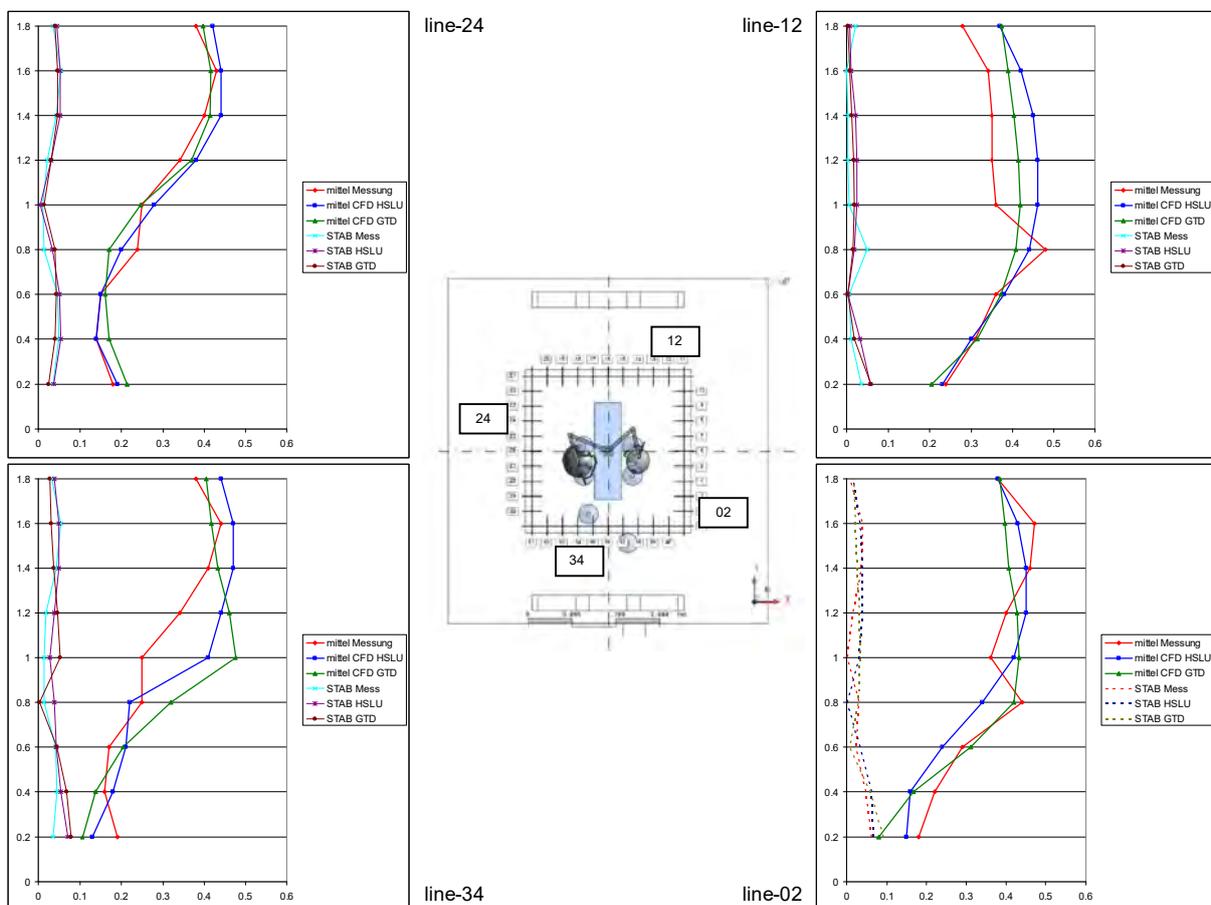


Bild 2.4.1: Höhenabhängige Profile der Strömungsgeschwindigkeiten [m/s] an ausgewählten Messreihen um die Strömungsschürze, Vergleich zwischen Messungen und den CFD - Simulationen im GiG I (*CFD HSLU*) und GiG II (*CFD GTD*)

Aufgrund der begrenzten Raumabmessungen, den Einbauten und dem Auftrieb an den thermischen Oberflächen ist die Strömung stark instationär. Das zeigen sowohl die Bewertungen des Schutzgrades auf dem OP - Tisch während einer stationären Berechnung entsprechend Bild 2.4.2 als auch die Auswertung der Pfadlinien für verschiedene Zeitpunkte nach Bild 2.4.5.

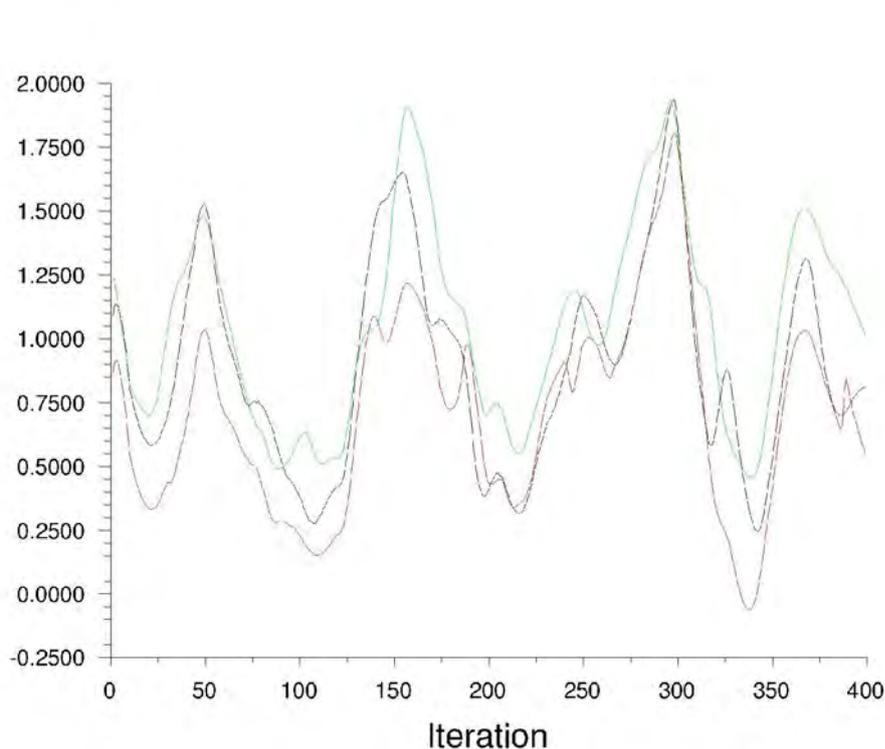


Bild 2.4.2: Verläufe des Schutzgrades an den Messpunkten auf dem OP - Tisch während einer stationären Berechnung

Der Schutzgrad über dem OP - Tisch folgt aus zwei Gründen diesem instationären Verlauf: Zum einen entsteht bei der Umströmung der kompakten OP - Lampen ein Nachlaufgebiet, welches bis in den Operationsbereich wirkt (siehe Bild 2.4.3). Diese Zone ist gekennzeichnet von hoher Turbulenz und Wirbelbildung. Infolge dieser Strömung stellt sich in dem Bereich nicht die angestrebte Verdrängungsströmung ein. Es wird vielmehr Umgebungsluft induziert, welche bereits mit erhöhter Partikelkonzentration kontaminiert ist (siehe Bild 2.4.4).

Neben dem voran geschriebenen Effekt entsteht an den, gegenüber der Umgebungsluft, wärmeren Oberflächen der Dummies eine Auftriebsströmung. Sie ist jedoch nicht so ausgeprägt, dass sich eine dauerhafte Aufwärtsbewegung einstellt und die herabströmende Zuluft umkehrt. Vielmehr lenkt die Auftriebsströmung (unregelmäßig) Luft mit geringerem Impuls außerhalb der Schutzzone in den Operationsbereich (siehe Bild 2.4.5). Damit geht ein erhöhter Partikeltransport einher. Die auf diesem Weg eingetragene kontaminierte Luft wird dann auch in das oben beschriebene Nachlaufgebiet der Lampen getragen und verteilt sich großflächig auf dem Operationstisch.

Die beschriebene Strömungscharakteristik zeigt, dass die Partikelkonzentration im Schutzbereich und an den Messpunkten in hohem Maße von der Auftriebsströmung an den Dummies bestimmt wird. Der Auftriebsimpuls wird dabei im Wesentlichen vom Wärmeeintrag und -übergang an den thermisch aktiven Oberflächen bestimmt. Folglich ist die Berechnung des Wärmeüberganges an den Oberflächen von entscheidender Bedeutung.

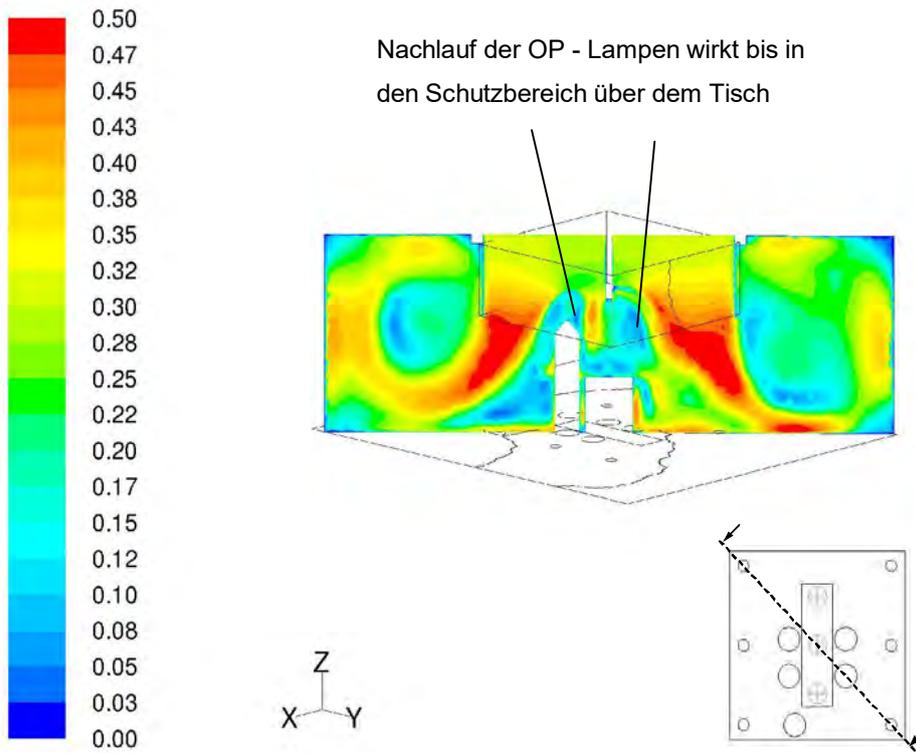


Bild 2.4.3: Luftgeschwindigkeit [m/s] in einer XY - Schnittebene durch den OP - Raum

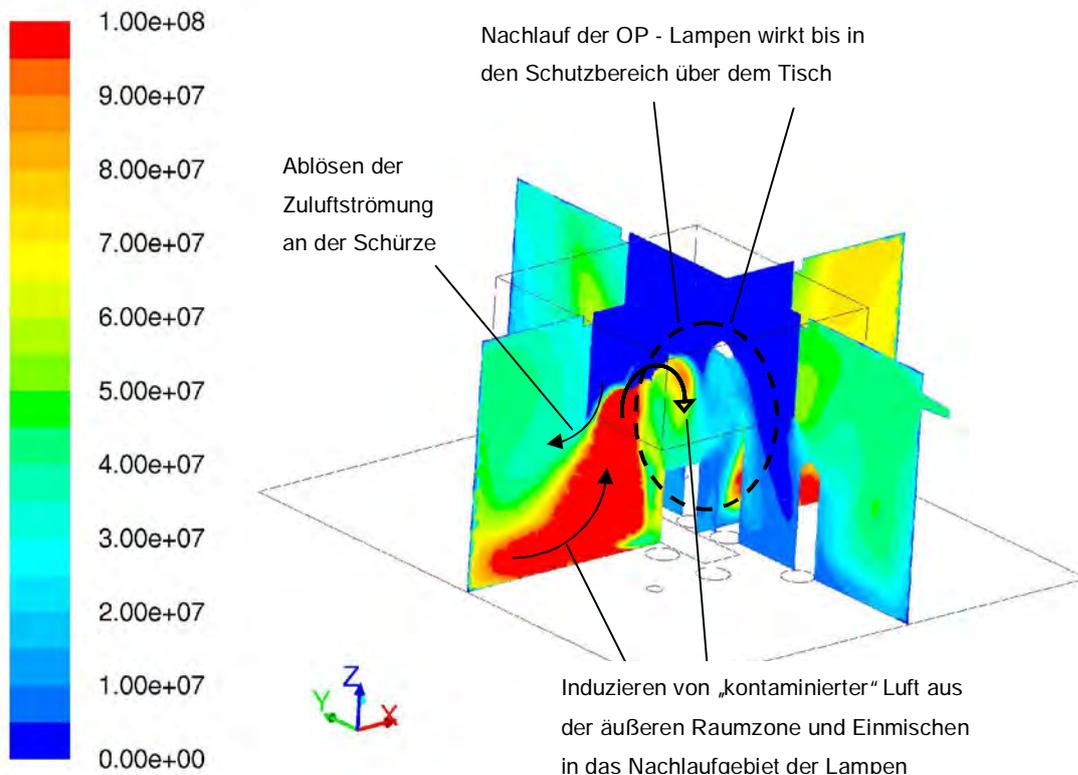


Bild 2.4.4: Partikelkonzentration [P/m³] in zwei Ebenen (Schnitt durch die Dummies 3 + 5, den OP - Tisch und die Lampen), Ansicht 3D

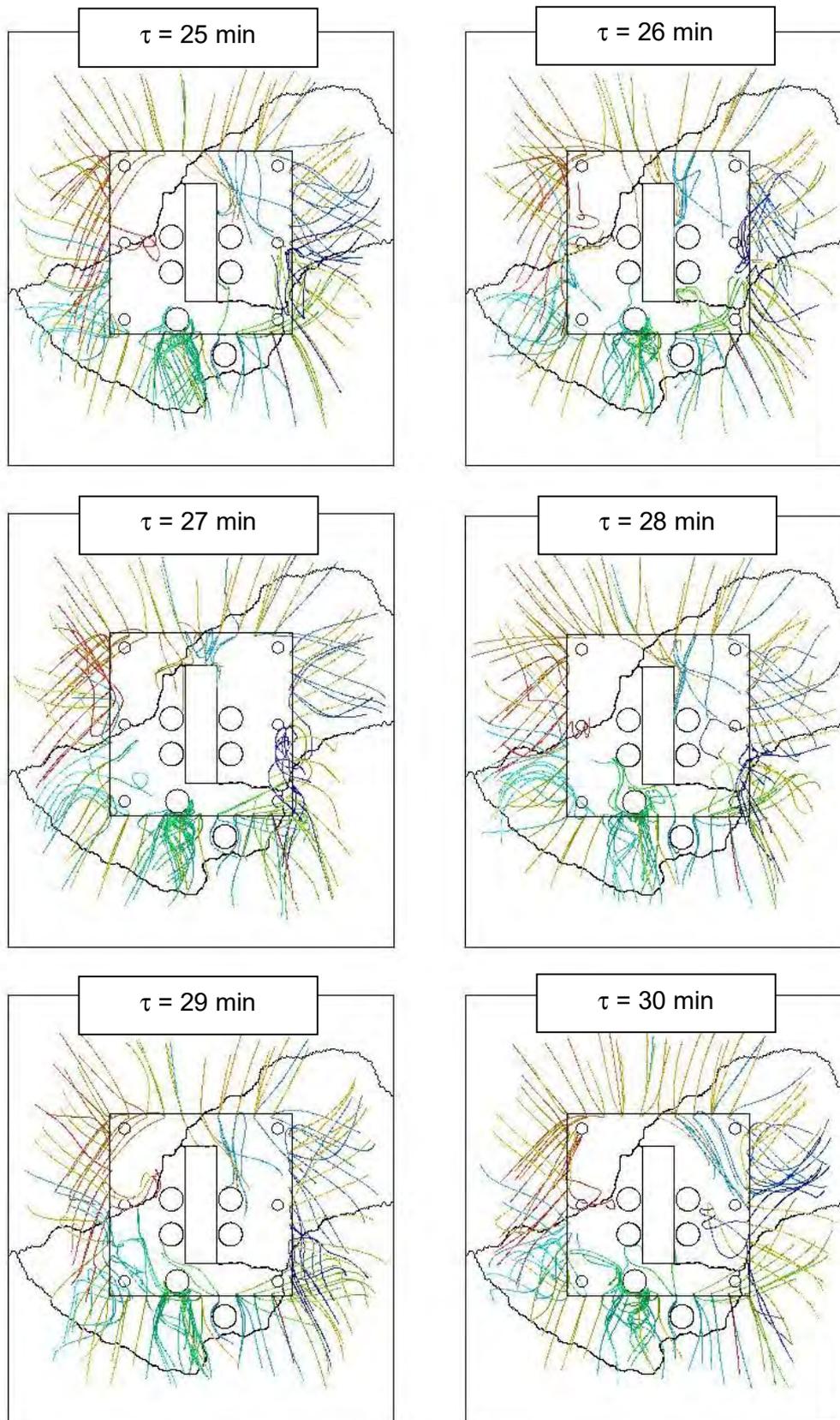


Bild 2.4.5: Pfadlinien um den Vorhang für charakteristische Zeitpunkte, Ansicht $z = \text{const.}$

4 Ergebnisse für den Standard OP - Raum

4.1 Netzgenerierung

Die CFD - Simulationen im GiG I haben, soweit allgemeine Standards in der Modellierung eingehalten werden, eine weitestgehende Unabhängigkeit von der Netzgenerierung aufgezeigt. Das soll hier noch einmal näher untersucht und insbesondere die Raumströmung und die Konzentrationsverteilung maßgeblich beeinflussende Bereiche lokalisiert werden. Als Grundlage dienen der „Standard - OP - Raum sowie die Randbedingungen und Ansätze aus dem Projekt GiG I. Demnach wird der Wärmeeintrag mittels Temperaturprofilen auf den Oberflächen der Dummies und Einbauten (z. B. Lampen) modelliert und die turbulente Raumströmung mit dem SST k - ω - Turbulenzmodell berechnet.

Temperaturprofile an den Dummies:

$$\text{Dummy 1} \quad t_o = 28,3 + 20,3 * (z / 1,5)$$

$$\text{Dummy 2} \quad t_o = 24,8 + 9,7 * (z / 1,2)$$

$$\text{Dummies 3/4/5/6} \quad t_o = 25 + 6 * (z / 1,8)$$

Die Vernetzung des Raumvolumens erfolgt hier, abweichend zum GiG I, ausschließlich mit Tetraederzellen. Diese wurden dann in ein Polyedergitter umgewandelt. Mit diesem Feature des Programms Ansys Fluent können die Rechenzeiten gegenüber dem ursprünglichen Tetraedergitter in etwa halbiert werden. Die Untersuchungen in den verwendeten Berechnungsmodellen wie auch in vergleichbaren Anwendungen haben zwischen beiden Gittertypen vor und nach der Konvertierung gleichwertige Ergebnisse erzielt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Netzstudien in erster Linie hinsichtlich des erreichten Schutzgrades an den Messpunkten auf dem OP - Tisch ausgewertet. Eine tiefere Diskussion zur Ursache dieser Ergebnisse erfolgt dann in dem Abschnitt 4.2.1 im Rahmen der Behandlung des Wärmeeintrages.

4.1.1 Modell mit ca. 4,8 Mio. Tetraederzellen bzw. ca. 0,6 Mio. Polyederzellen (Modell A01)

Das Modell der Variante A01 beinhaltet ca. 4,8 Mio. Zellen. Die Oberflächen der Dummies und Lampen wurden hier mit einem Oberflächengitter der Kantenlänge 5 cm vernetzt. Das Raumvolumen beinhaltet Zellen mit etwa 15 cm Kantenlänge.

Die Ergebnisse dieses Gitternetzes in Form des Schutzgrades auf dem OP - Tisch zeigen für zwei Berechnungspunkte / Zeitschritte die Darstellungen nach Bild 4.1.2 sowie die zeitlichen Verläufe an den Messpunkten nach Bild 4.1.1. Der Schutzgrad weist im zeitlichen Mittel einen Wert von minimal 1,2 auf. Das Minimum wird (unter den Lampen) am mittleren Messpunkt 2 erreicht. Der Nachlauf der Leuchten bewirkt dort die größte Beeinflussung und Umgebungsluftfeinmischung. Die äußeren Punkte sind mit Werten von ca. 1,4 bzw. 1,6 etwas günstiger gelegen.

Nach den oben geführten Beschreibungen stimmen die qualitativen Verläufe gut mit den Simulationen GiG I überein (vgl. Bild 1.4). Die quantitativen Schutzgrade wurden jedoch in diesem Modell zu hoch berechnet (Standard - OP GiG I: $SG_{\min} = 0$ bis 0,7).

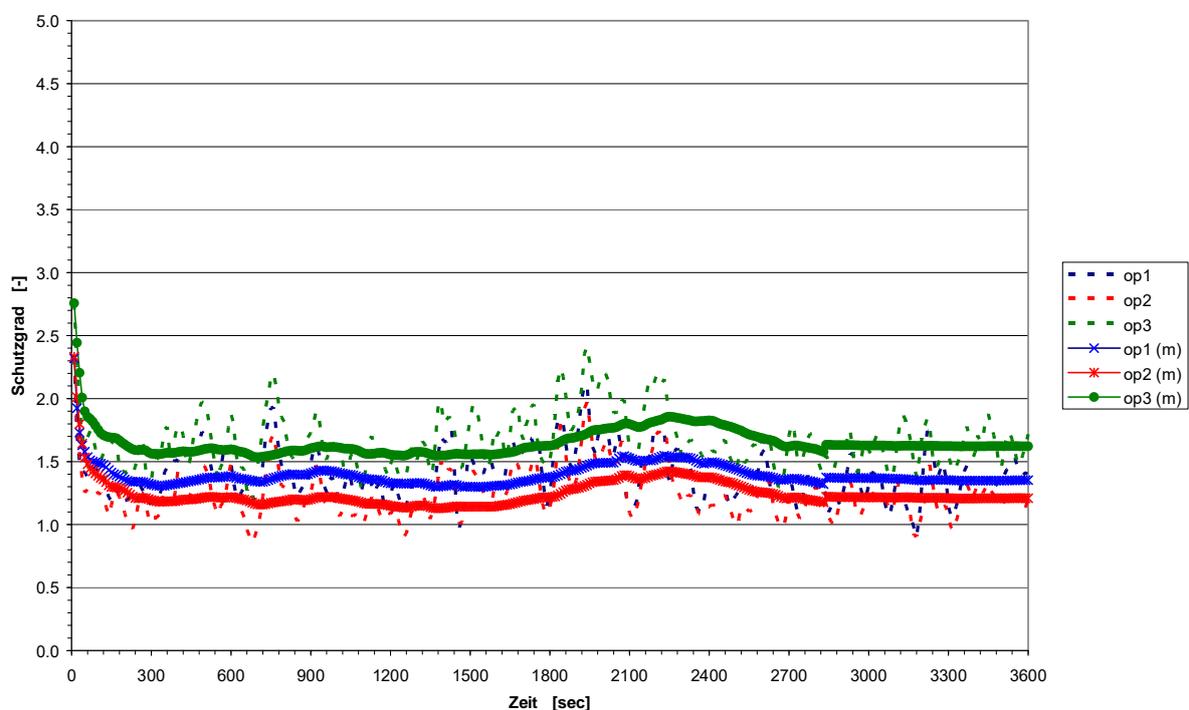


Bild 4.1.1: Verlauf des Schutzgrades an den Messpunkten auf dem OP - Tisch (Momentanwerte und 10 Minuten - Mittelungen) für das Modell der Variante A01

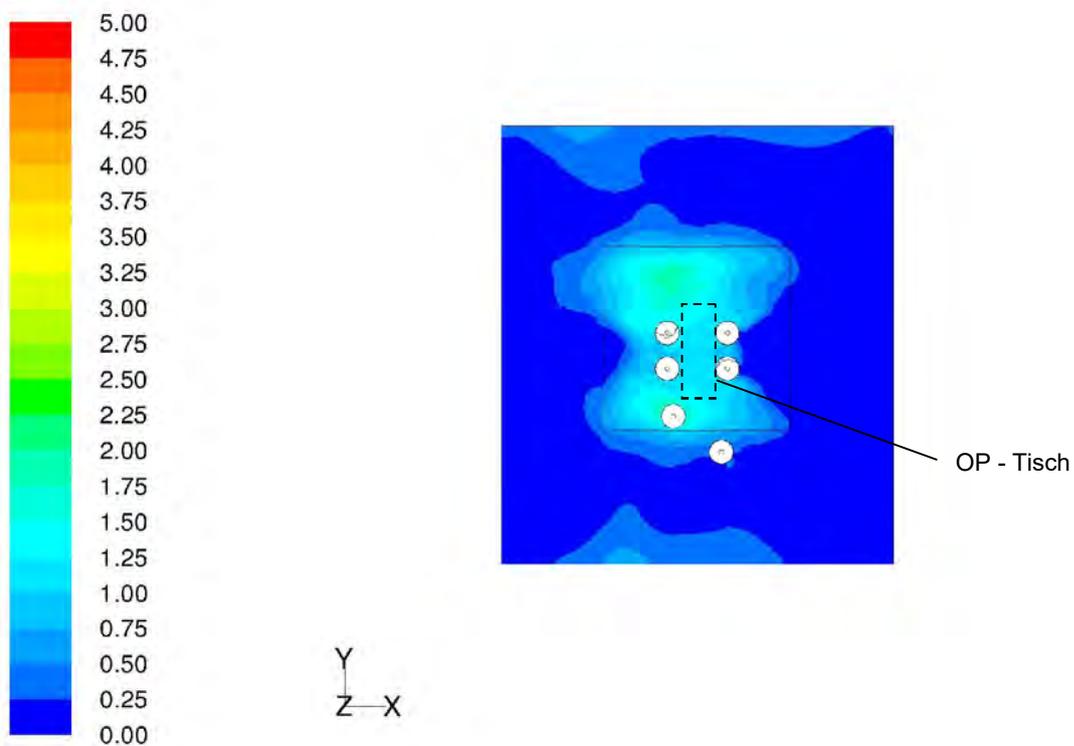
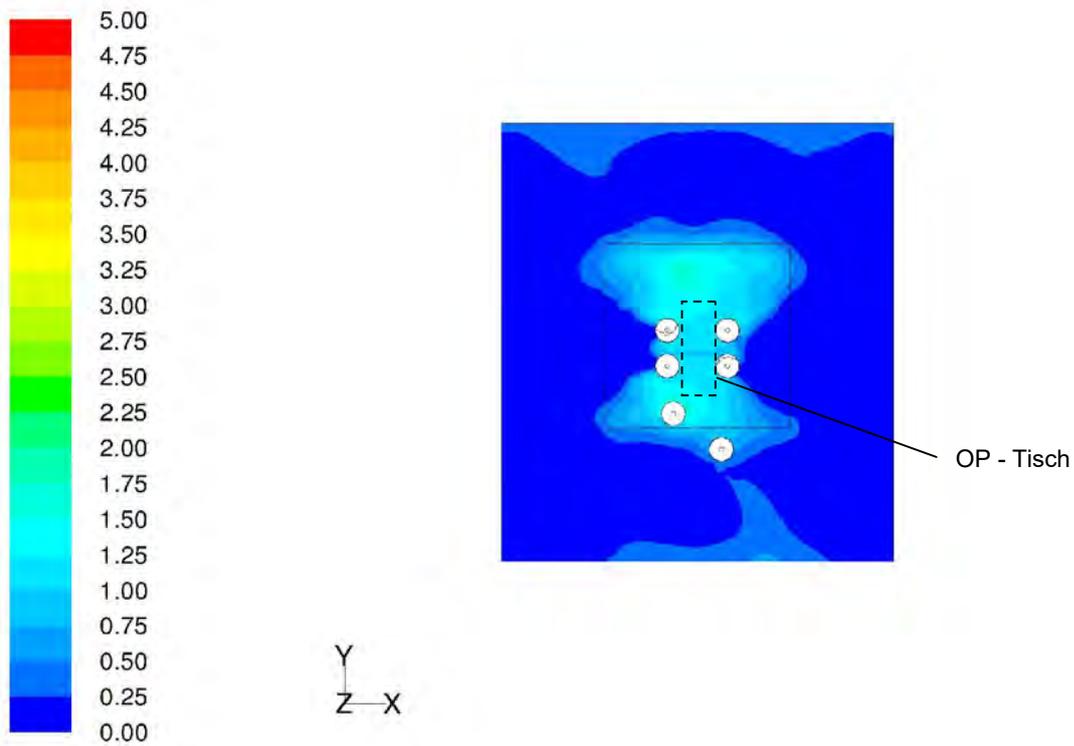


Bild 4.1.2: Modell A01 Schutzgrade [-] auf bzw. knapp über dem OP - Tisch für zwei Berechnungszeitpunkte, Ansicht z = const.

4.1.2 Modell mit ca. 6,2 Mio. Tetraederzellen bzw. ca. 1,1 Mio. Polyederzellen (Modell A02)

In der Variante A02 wurden, gegenüber der Variante A01, die Oberflächennetze verfeinert. Sie weisen nun ein Gitter mit einer Kantenlänge von 1 cm auf. Das Raumvolumen wurde weiterhin mit 0,15 cm vernetzt. Bei dieser Auflösung ergibt sich eine Modellgröße von ca. 6,2 Mio. Tetraederzellen.

Mit dem verfeinerten Gitternetz ergeben sich geringere Schutzgrade auf dem OP - Tisch. Das zeigen die Auswertung über dem OP - Tisch in Bild 4.1.4 und die zeitlichen Verläufe an den Messpunkten gemäß Bild 4.1.3. Bedingt durch den Nachlauf der Lampen und der an den Personen induzierten Umgebungsluft sind die Werte an allen Messpunkten aufgrund den lokalen, über dem OP - Tisch herrschenden Strömungsverhältnissen stark alternierend. Gegenüber der Variante A01 sind die Partikel in der Variante A02 unregelmäßiger um den Tisch verteilt und weisen ein insgesamt konturloses und asymmetrisches Profil auf (vgl. A02: Bild 4.1.4 mit A01: Bild 4.1.2). Der geringste Wert der 10 - Minuten - Mittelung wird in der Variante A02 mit ca. $SG = 0,5$ am MP 02 bestimmt. Das stimmt, neben den qualitativen Verläufen, auch im berechneten Schutzgrad gut mit den CFD - Simulationen im GiG I und den Messungen überein ($SG_{GiG I} = 0 - 0,7$ / $SG_{CFD-GiG I} = 0,6$; vgl. Bild 1.3).

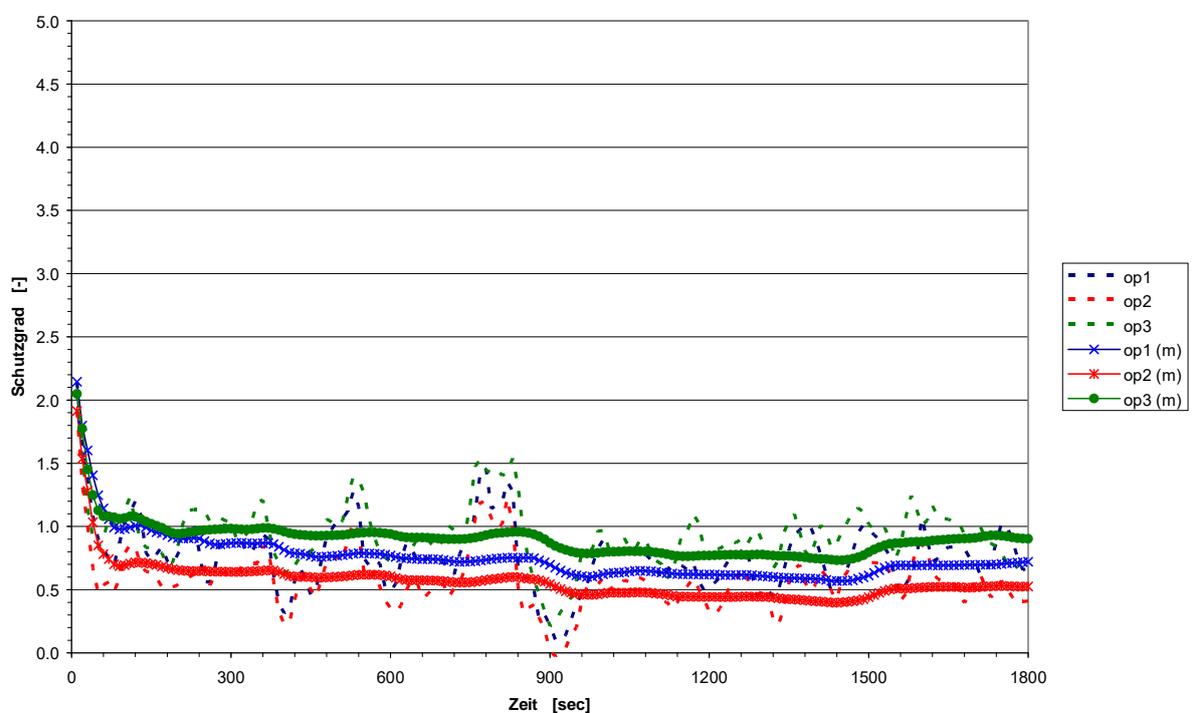


Bild 4.1.3: Verlauf des Schutzgrades an den Messpunkten auf dem OP - Tisch (Momentanwerte und 10 Minuten - Mittelungen) für das Modell der Variante A02

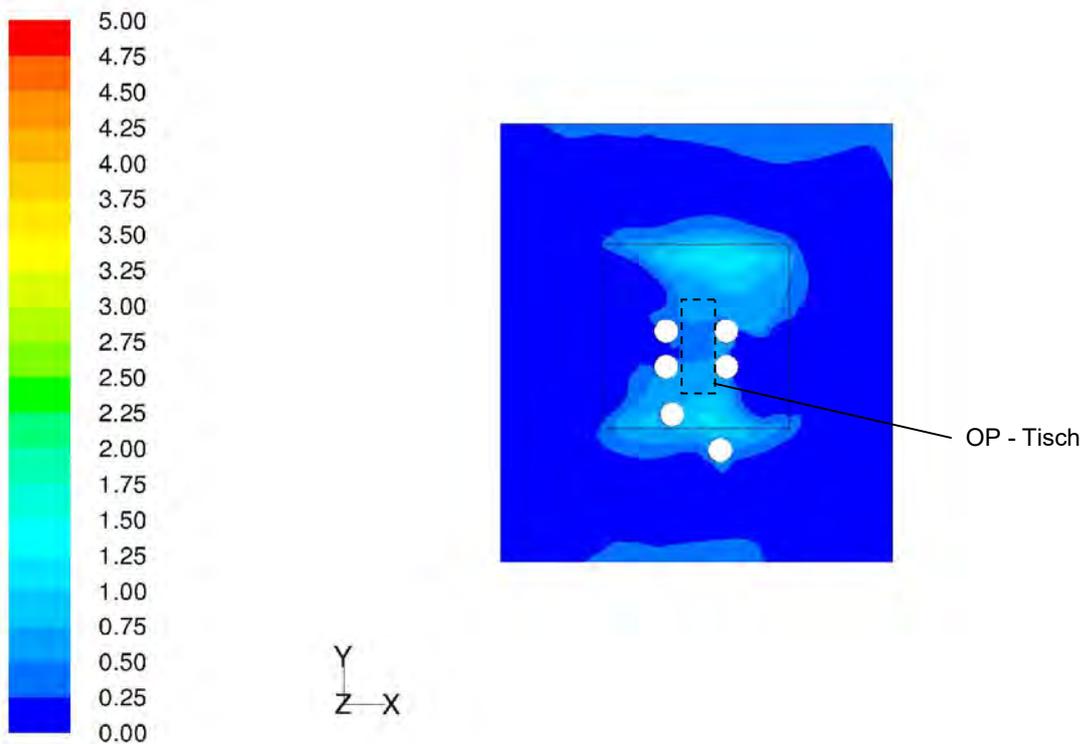
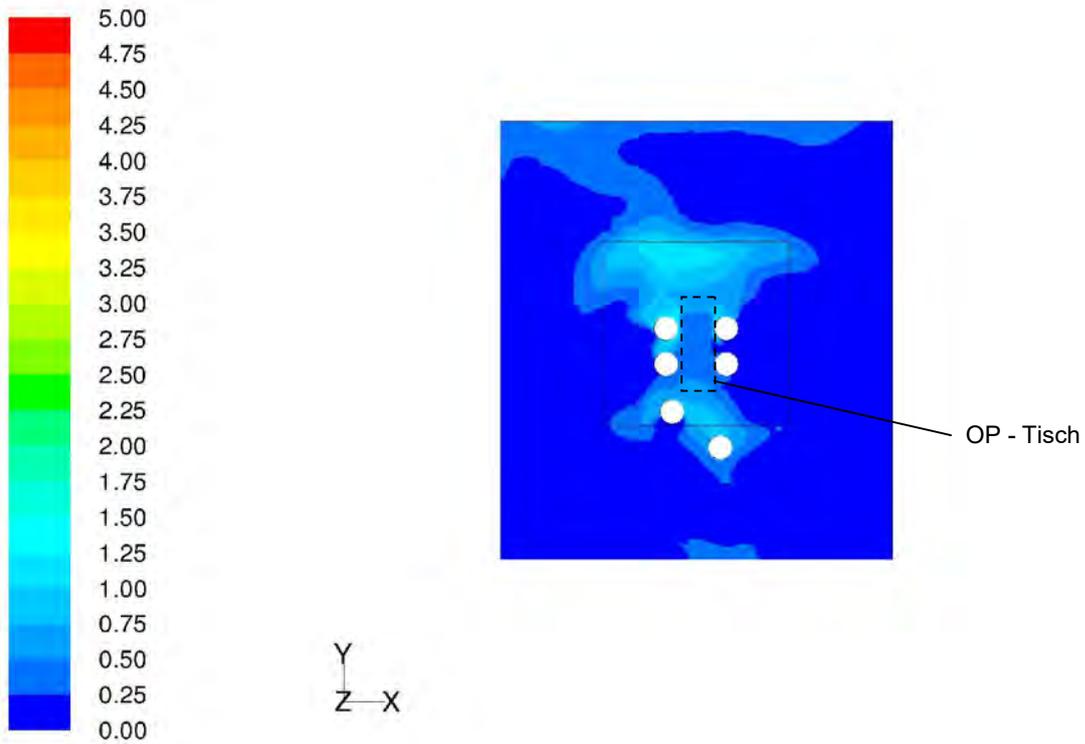


Bild 4.1.4: Modell A02 Schutzgrade [-] auf bzw. knapp über dem OP - Tisch für zwei Berechnungszeitpunkte, Ansicht z = const.

4.1.3 Modell mit ca. 0,8 Mio. Tetraederzellen bzw. ca. 0,2 Mio. Polyederzellen (Modell B01)

In dem Modell der Variante B01 wurden neben einem größeren Berechnungsgitter auch Vereinfachungen im Modell vorgenommen. So wurden die Halterungsrohre der Leuchten über dem OP - Tisch nicht berücksichtigt (siehe Bild 4.1.5). Ansatzpunkt dieser Vereinfachung ist, dass deren Abmessungen und Einflüsse nur gering sind. Die Leuchten weisen eine wesentlich kompaktere Bauform auf und bewirken deutlich stärkere Störungen des Strömungsfeldes. Auch sind die Rohrdurchmesser, im Verhältnis des Abstandes zum OP -Tisch, nur gering. Die Dummies und Einbauten wurden mit einem Oberflächengitter von 10 cm und das Raumvolumen mit 0,2 cm Kantenlänge vernetzt. Durch diese Maßnahmen (Netzvergrößerung und Modellvereinfachungen) konnte die Zellenanzahl auf ca. 0,8 Mio. reduziert werden.

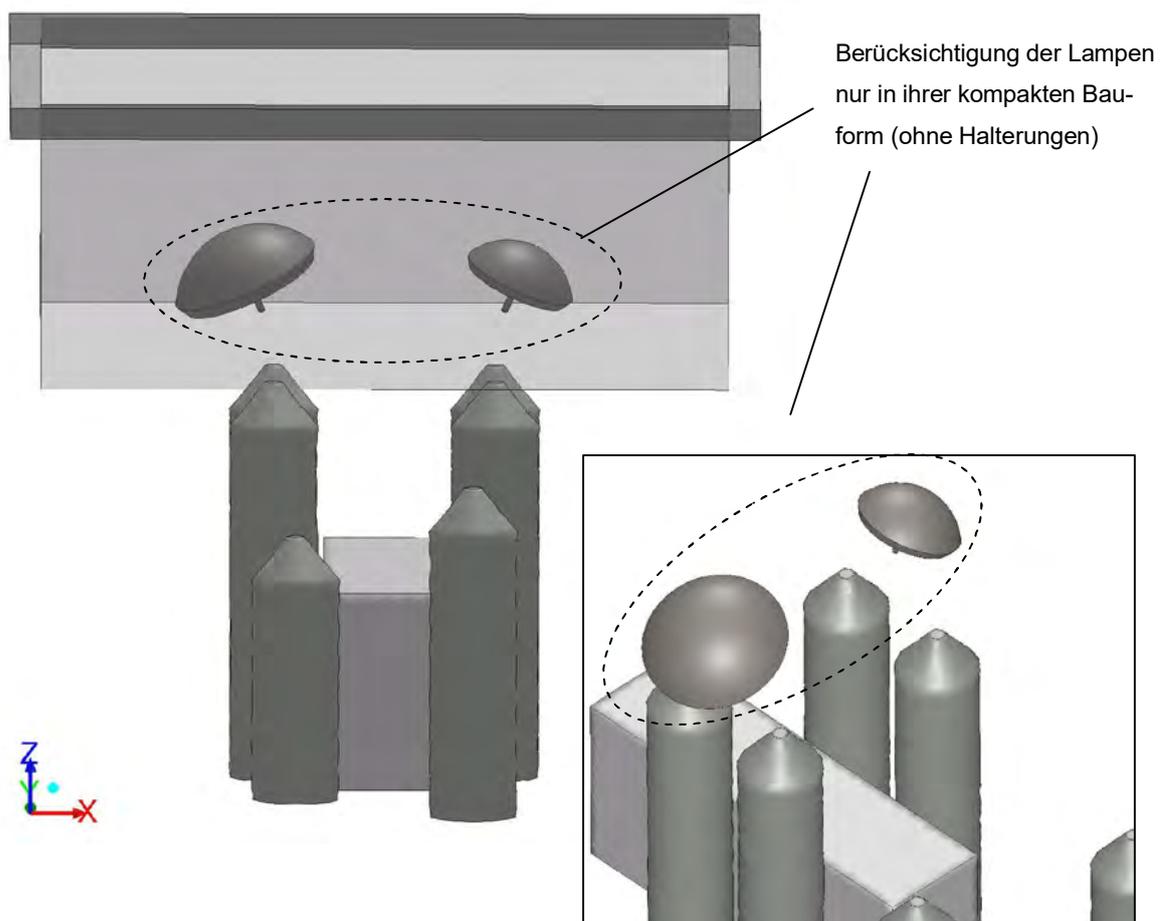


Bild 4.1.5: Geometrisches Modell in der Variante B01, Ausschnitt des Schutzbereiches um den OP - Tisch mit den Lampen und den Dummies

Die Auswertung des Schutzgrades über dem OP - Tisch gemäß Bild 4.1.7 zeigt, ähnlich zur Variante A02, eine asymmetrische Partikelverteilung um den Schutzbereich. Die Konturen sind jedoch etwas gleichmäßiger ausgebildet und weniger instationär als in der Variante A02. Das zeigt sich auch in der Bewertung der zeitlichen Verläufe gemäß Bild 4.1.6. Der Schutzgrad wird zwar mit einem Wert von $SG_{\min} = 0,6$ in guter Übereinstimmung zu den Messungen bestimmt, die Momentanwerte sind jedoch deutlich weniger schwankend als in den vorherigen Untersuchungen. Ursache ist das in dem Modell B01 verwendete gröbere Gitternetz, was sich insgesamt auch dämpfend auf die Raumströmung auswirkt.

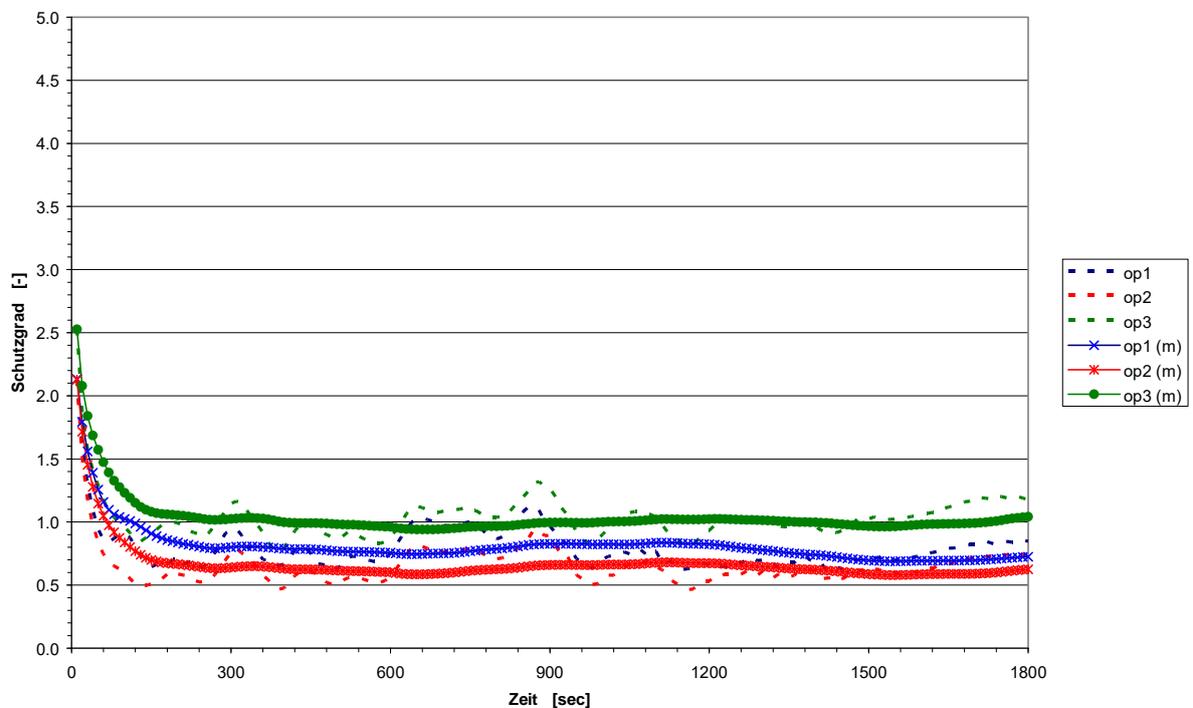


Bild 4.1.6: Verlauf des Schutzgrades an den Messpunkten auf dem OP - Tisch (Momentanwerte und 10 Minuten - Mittelungen) für das Modell der Variante B01

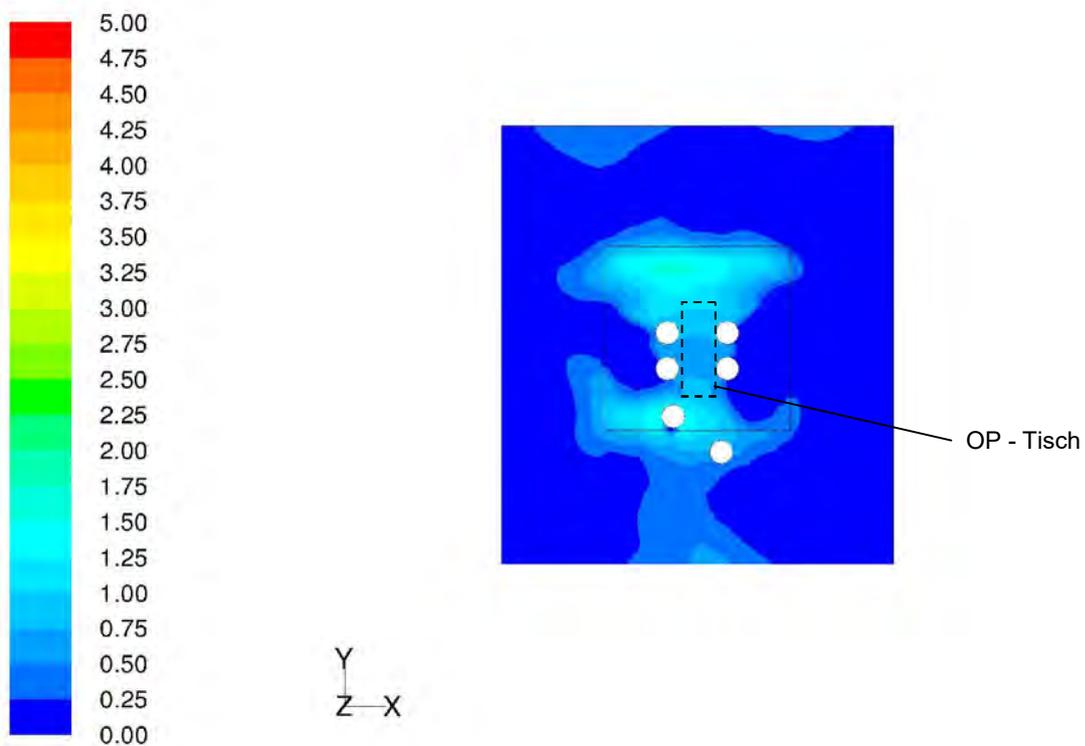
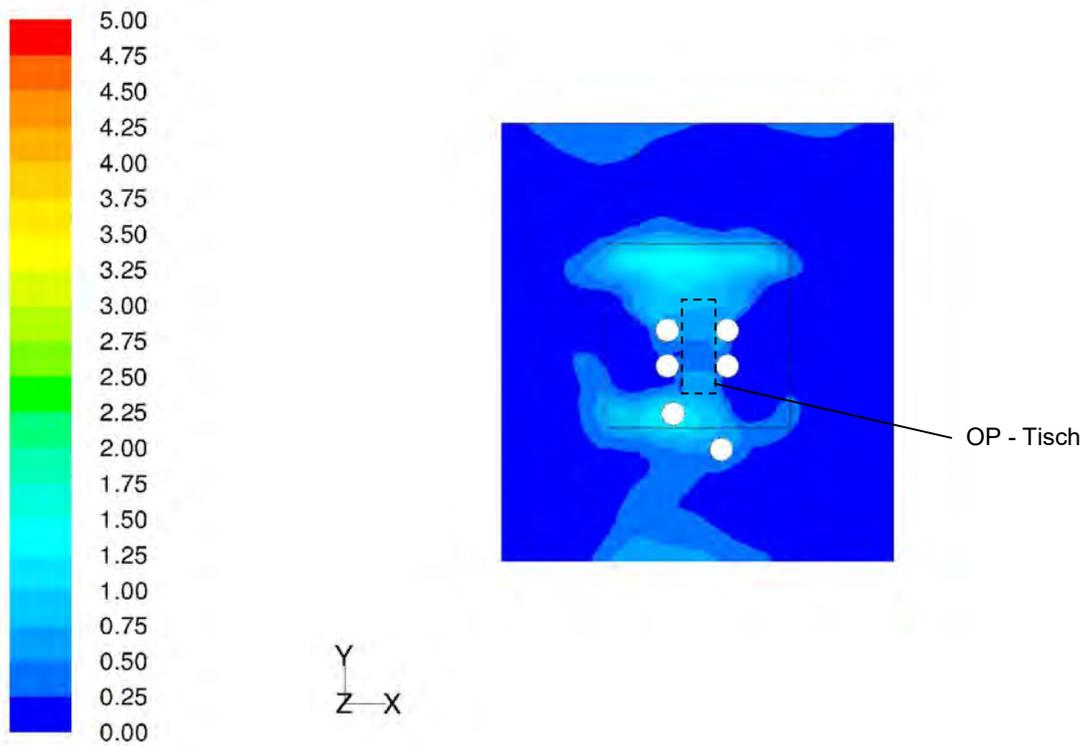


Bild 4.1.7: Modell B01 Schutzgrade [-] auf bzw. knapp über dem OP - Tisch für zwei Berechnungszeitpunkte, Ansicht z = const.

4.2 Wärmeeintrag

4.2.1 Temperaturprofile an den Dummies

Die bisherigen CFD - Simulationen, sowohl im GiG I als auch die Grundlagenuntersuchungen im GiG II gemäß Abschnitt 4.1, haben ausschließlich Temperaturrandbedingungen für die thermischen Lasteinträge zu Grunde gelegt. Diese Ansätze haben in den Berechnungen des GiG I nahezu netzunabhängig gute Ergebnisse erzielt. Die Beeinflussung lokaler Vernetzungen insbesondere auf die berechneten Konzentrationsverteilungen und Schutzgrade wurden dann noch einmal in den Grundlagenuntersuchungen des GiG II näher analysiert. Dabei haben die Auswertungen gemäß Abschnitt 4.1 durchaus die Notwendigkeit detaillierter Auflösung einzelner Raumbereiche und Einflussfaktoren nachgewiesen. Ursache ist die gewählte Form des Wärmeeintrages über die Temperaturrandbedingungen an den Oberflächen.

Die Raumströmung ist gekennzeichnet durch die abwärts gerichtete Zuluft und damit einhergehender Verdrängung sowie dem konvektiven Wärmeeintrag an den Personen. Durch die Übertemperatur in den grenzschichtnahen Bereichen und den dort aufsteigenden Luftmengen wird „kontaminierte“ Umgebungsluft induziert und bis in den Schutzbereich mitgetragen. (Diese Effekte wurden bereits im Abschnitt 3 beschrieben.) Das bedeutet, bei dem Ansatz der Temperaturprofile an den Oberflächen muss der Wärmeeintrag exakt mit seinem Konvektions- und Strahlungseintrag bestimmt werden. Wenn das nicht geschieht und der Wärmeübergang an den Oberflächen zu gering bestimmt wird, wird u. U. der konvektive Anteil unterbewertet. In Folge bildet sich der Auftrieb an den Personen / Dummys nur unzureichend aus. (Dabei ist dann der Strahlungsanteil höher, da der Gesamtwärmeeintrag in etwa konstant bleibt.) Wenn die Konvektion (Temperaturerhöhungen in den oberflächennahen Luftschichten) und der Auftrieb zu gering sind, wirkt die abwärts gerichtete Verdrängungsströmung der Zuluft dominanter. Es werden dann folglich auch weniger Umgebungsluft und Partikel in den Schutzbereich getragen und der Schutzgrad zu hoch bestimmt.

Die Gewichtung des konvektiven und strahlenden Wärmeeintrages ist in hohem Maße von den lokalen Strömungsverhältnissen insbesondere in den Bereichen um die warmen Oberflächen und dort in der turbulenten Grenzschicht abhängig. Ein Bewertungskriterium für den Anwendungsbereich der gewählten Ansätze (Turbulenzmodell, Wandfunktion, Netzgröße) sind in der Strömungsmechanik die y^+ - Werte auf den Oberflächen. Sie sollten in dem Bereich von ungefähr 1 („aufgelöste“ Grenzschicht, exakte Berechnung) oder aber, bei Anwendung einer Wandfunktion, zwischen 30 und 300 (Modellierung der Grenzschicht und des Wärmeüberganges) liegen. Der y^+ - Wert ist im Wesentlichen von den lokalen Strömungsgrößen (Geschwindigkeit, Turbulenz) und der Netzgröße in diesen Bereichen abhängig.

Die y^+ - Werte sind für die in Abschnitt 4.1 untersuchten Modelle in Bild 4.2.1 ausgewertet. Diese Darstellungen zeigen zwar qualitativ ähnliche Strömungsstrukturen mit lokal höheren und geringeren y^+ - Werten, sie sind jedoch in ihrer Höhe sind deutlich verschieden.

In dem Modell A01 liegen sie in dem ungünstigen Bereich $y^+ = 10 - 20$. Die Turbulenz in der Grenzschicht und damit der Wärmeübergang werden in dieser Variante weder exakt direkt berechnet noch ausreichend gut mit Hilfe einer Wandfunktion modelliert. Damit einhergehend werden der Auftrieb und die Induktion von Umgebungsluft zu gering bestimmt. Es gelangen folglich weniger Partikel in den Schutzbereich und der auf dem OP - Tisch berechnete Schutzgrad ist zu hoch. Das erklärt die unzureichenden Ergebnisse in der Variante dieses Gitternetzes nach Abschnitt 4.1.1.

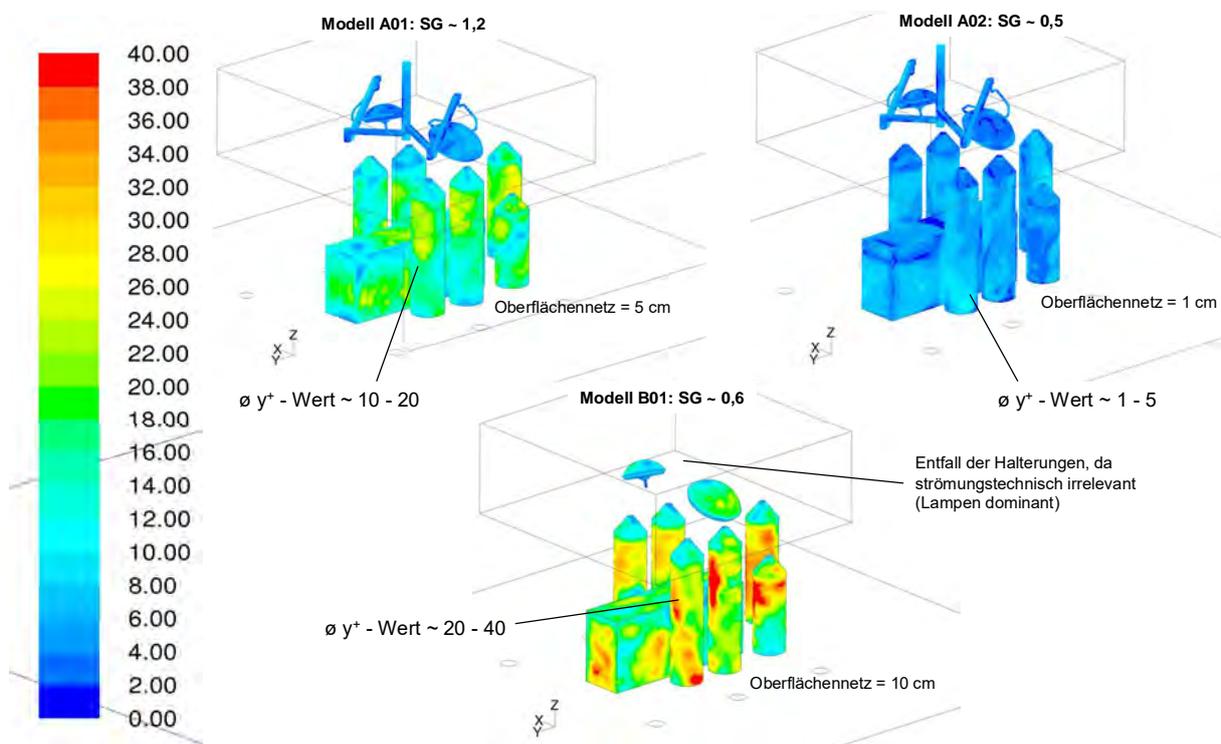


Bild 4.2.1: Vergleich der y^+ - Werte [-] an thermisch aktiven Oberflächen für die Modelle

Das feiner aufgelöste Modell A02 zeigt Werte von $y^+ = 1 - 5$. Durch die bessere Auflösung der Grenzschicht in diesem Modell werden die Strömung und der Wärmeübergang an den Flächen direkt berechnet. Somit werden der konvektive Wärmeeintrag und der Auftrieb exakter bestimmt, was auch die Auswertungen des Schutzgrades nach Abschnitt 4.1.2 mit guter Übereinstimmung zwischen Simulation und Messungen zeigen.

Das Modell B01 hat ein gröber aufgelöstes Raum- und Oberflächengitter, wodurch in dieser Variante die y^+ -Werte auf 25 bis >40 bestimmt werden. Das liegt in dem Anwendungsbereich der Wandfunktionen, so dass der Wärmeübergang an den Oberflächen hier modelliert wird. Die Grenzschichtmodelle bestimmen zwar den Konvektionsanteil nicht exakt, dafür aber die lokalen Mittelwerte in guter Annäherung. Das heißt die Temperaturschwankungen und damit der Auftrieb wirken etwas gedämpfter. Sie stimmen aber in ihren (zeitlichen) Mittelwerten gut mit der direkten Berechnung überein. Somit wird auch der Partikeleintrag in den Schutzbereich und damit einhergehend der Schutzgrad auf dem OP - Tisch in guter Annäherung berechnet, was auch die Auswertungen nach Abschnitt 4.1.3 gezeigt haben.

Die Störungen und Instabilitäten des Auftriebes sind bei einer direkten Berechnung in der Grenzschicht ($y^+ = 1$) größeren Schwankungen unterworfen als bei der Modellierung mittels Wandfunktionen (stärkere Dämpfung). Durch die Anwendung der Wandfunktionen und der Berechnung des „mittleren Wärmeüberganges“ wird der Auftrieb zeitlich eher gedämpft wiedergegeben und die Schwankungen der Partikeleinträge sind geringer. Diese beiden Effekte spiegeln sich in den schwankenden Schutzgraden des Modells A02 und den konstanteren Verläufen im Modells B01 wieder.

Neben den beschriebenen Abhängigkeiten des lokalen Wärmeeintrages lassen die Darstellungen nach Bild 4.2.1 mit den aufgezeigten Verteilungen auch auf weitere instationäre Effekte in der Partikelinduktion schließen: Die Strömung an den Dummys ist um die Flächen verdrallt, was zusätzliche Turbulenz in den Schutzbereich einbringt. Dieses Umströmen der Dummys ist ebenso instabil und die Strömungsstrukturen und Stromlinien, für einen Zeitpunkt beispielhaft dargestellt in Bild 4.2.2, zirkulieren eher um die Oberflächen.

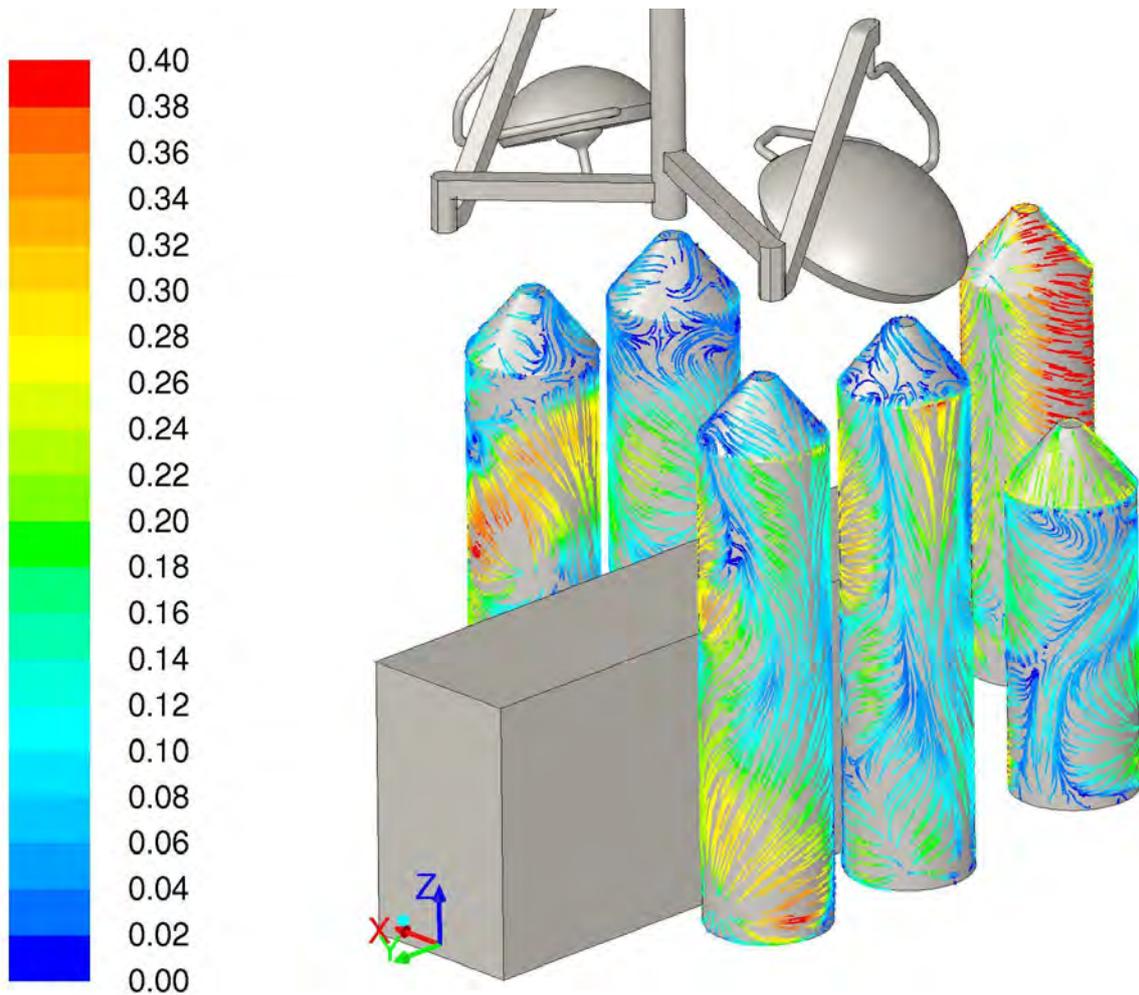


Bild 4.2.2: Pfadlinien auf den Oberflächen der Dummies, eingefärbt mit der Strömungsgeschwindigkeit [m/s], Ansicht 3D

4.2.2 Energiequellterme an den Dummys Σ 800 W

In den bisherigen Untersuchungen wurden die Wärmelasten mit Vorgaben der Oberflächentemperaturen an den Lampen, Dummys usw. vorgegeben. Diese Ansätze haben in Abhängigkeit der lokalen Vernetzung (insbesondere an den thermisch aktiven Oberflächen) unterschiedliche Partikeleinträge in den Schutzbereich und abweichende Schutzgrade auf dem OP - Tisch ermittelt. Aus diesem Grund wurde in den im Folgenden dargestellten Varianten mit Vorgabe eines Wärmestromes in den wandnächsten Zellen um die Dummys und die Lampen eine alternative Form des Lasteintrages untersucht.

Grundgedanke des neuen Ansatzes ist den konvektiven Wärmeeintrag unabhängiger von der Vernetzung zu gestalten. Das ist der Fall, wenn die konvektive Wärmeabgabe und damit der Auftrieb nicht mehr mit dem Wärmeübergang an den thermisch aktiven Flächen bestimmt werden. Somit erfolgt dann auch der Partikeleintrag in den Schutzbereich nahezu losgelöst von dem lokalen Oberflächengitter.*

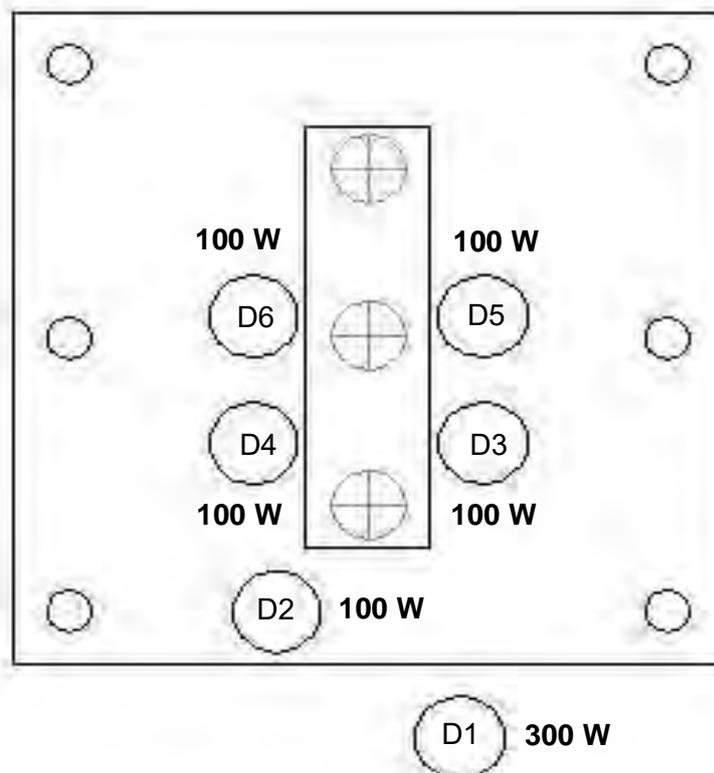


Bild 4.2.3: Wärmeströme [W] an den Dummys; Σ Q = 800 W

Bei der Definition der Energiequelltürme wurde sich an den Vorgaben der VDI 2167 - 1 orientiert. Dort wird zusätzlich zur Beleuchtung eine Leistung von mindestens 800 W über die Dummies gefordert. Diese Gesamtwärmeabgabe wird in den Berechnungen auf 300 W am Dummy 1 und je 100 W an den Dummies 2 bis 6 aufgeteilt (siehe Bild 4.2.3). Das entspricht unter Berücksichtigung der mittleren Temperaturen auf den Dummyoberflächen in den bisherigen Lastdefinitionen (Temperaturprofile) und einer Umgebungstemperatur von 20 °C einem Wärmeübergangskoeffizienten von ca. $\alpha_i = 6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

Der Wärmeeintrag wird gleichmäßig um die Dummies vorgegeben, so dass sich, ähnlich zu den Temperaturprofilen, eine mit der Höhe ansteigende Fluid- und Oberflächentemperatur einstellt. Die Lampen über dem Operationstisch wurden mit einer Leistung von 300 W definiert.

Die mit den oben beschriebenen Energiequelltermen erzielten Schutzgrade zeigen die Auswertungen nach Bild 4.2.5. Es wird ersichtlich, dass die Ergebnisse der drei Modelle mit den erzielten Schutzgraden

- im Modell A01 SG \approx 0,8
- im Modell A02 SG \approx 0,6
- im Modell B01 SG \approx 0,3

alle in dem Wertebereich der Messungen liegen.

Der Auftrieb an den Dummies und damit der Partikeleintrag in den Operationsbereich sind insgesamt weniger von der Vernetzung abhängig. Die zeitlichen Verläufe der Schutzgrade zeigen gegenüber den Temperaturvorgaben ähnliche Charakteristiken, wie z. B. der deutlich stabilere Verlauf in dem Modell B01. Die Auswertungen der Schutzgrade über dem OP - Tisch gemäß Bild 4.2.4 weisen ebenfalls ähnliche Verteilungen wie in den Varianten der Temperaturprofile auf (vgl. Bild 4.1.2, Bild 4.1.4 und Bild 4.1.7). Abweichungen zwischen den Ansätzen Temperaturprofile und Energiequellterme sind in dem insgesamt turbulenten und chaotischen Charakter der Strömung um den OP - Tisch begründet (Strömungsablösungen an der Schürze, Nachlauf der Lampen, intermittierende Auftriebsströmung an den Dummies).

(*) Anmerkung:

Im eigentlichen Sinn kehrt sich bei der Definition eines Energiequellterms die Kausalität des Wärmeeintrages gegenüber den Temperaturvorgaben um. Die Wärme wird in den wandnahen Zellen zuerst rein konvektiv im Volumen freigesetzt. Das führt zu einer zur Erwärmung der Zellschichten und damit zum Auftrieb als auch zu Temperaturerhöhungen auf den Oberflächen z. B. der Dummies. Die Flächen interagieren dann im Strahlungsaustausch mit der Umgebung. Wenn in dem Fall die Grenzschicht nur unzureichend aufgelöst ist und der Wärmeübergang nicht korrekt berechnet wird, sind die Oberflächentemperaturen geringer und der Konvektionsanteil wird etwas überbewertet. Da der aber einen wesentlichen Effekt für den Partikeltransport in den Schutzbereich darstellt, führt diese Ungenauigkeit eher zu einer konservativeren Bewertung. Weiterhin führen geringfügig höhere Temperaturen in der Grenzschicht nicht zwangsläufig zu anderen Auftriebsströmen. Der Auftrieb wird aus den Dichtedifferenzen zur Umgebung bestimmt und geht damit nur zu geringen Anteilen in die Berechnung ein. Die Strahlung wirkt dagegen in der 4. Potenz und gibt dadurch bei einem falsch berechneten Wärmeübergang deutlich mehr Energie an die umgebenden Wandflächen ab, die dann für den Auftrieb an den Dummies nicht mehr zur Verfügung steht.

Konvektion: $\Delta p_A = 9.81 * \Delta z * (\rho - \rho_i)$ $w_A = (2 * \Delta p / \rho_m)^{0.5}$ $Q_K \sim m^{\circ}_L \sim w_A \sim \Delta T^{0.5}$

Strahlung: $(T_o^4 - T_w^4) = (t_o + 273.15)^4 - (t_w + 273.15)^4$ $Q_S \sim \Delta T^4$

Δp_A ... Druckdifferenz / Auftriebsdruck [Pa]

Δz ... Höhendifferenz [m]

w_A ... Auftriebsgeschwindigkeit [m/s]

ρ ... lokale Dichte [kg/m³]

ρ_i ... Umgebungsdichte [kg/m³]

ρ_m ... mittlere Dichte [kg/m³]

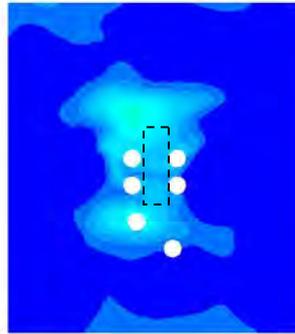
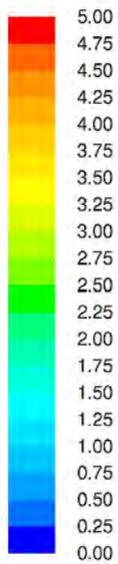
t ... lokale Oberflächentemperatur [°C]

t_w ... Wandtemperaturen [°C]

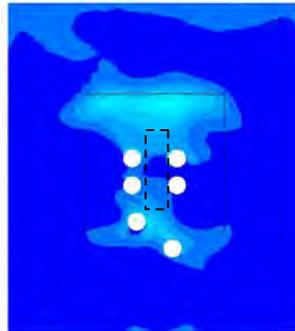
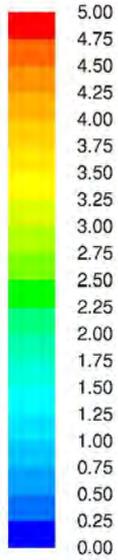
Q_K ... konvektiver Wärmestrom

Q_S ... Wärmestrom durch Strahlung

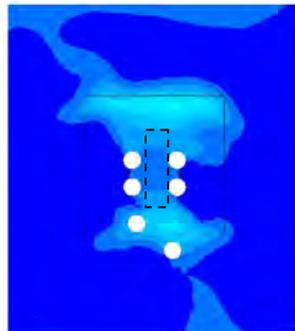
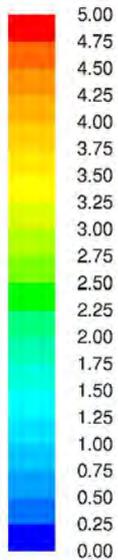
m°_L ... Luftmassenstrom in der Grenzschicht, induziert aus der Umgebungsluft



Modell A01

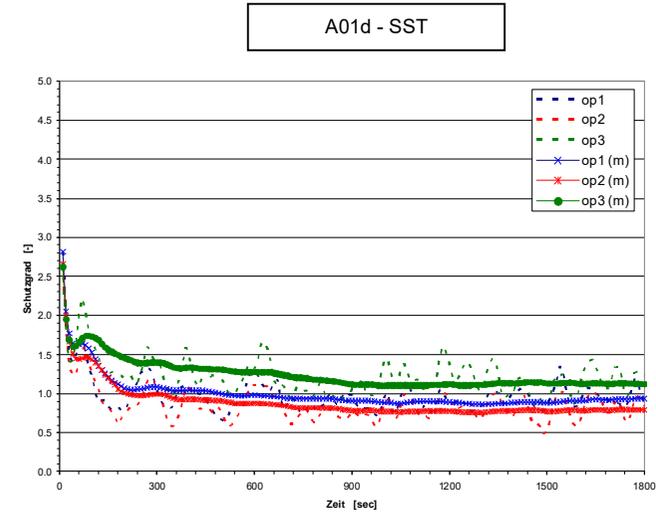
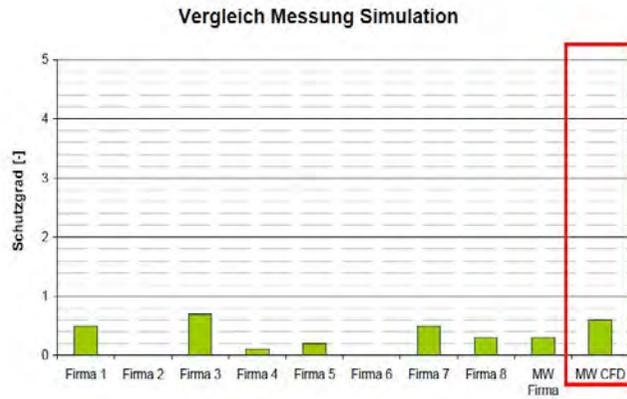


Modell A02



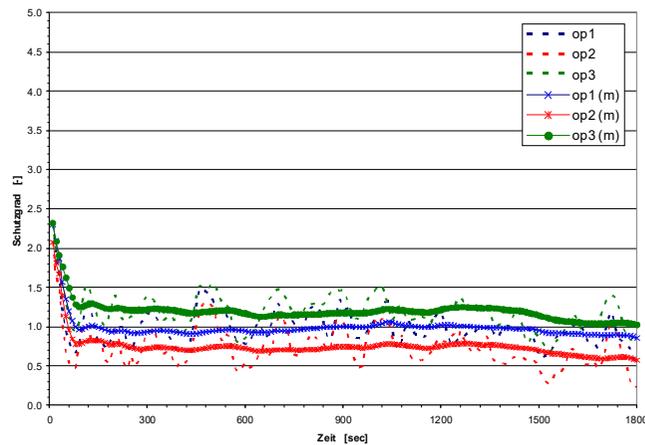
Modell B01

Bild 4.2.4: Schutzgrade [-] auf bzw. knapp über dem OP - Tisch für die drei Vernetzungsmodelle und Energiequelltermen an den Dummies, Ansicht z = const.



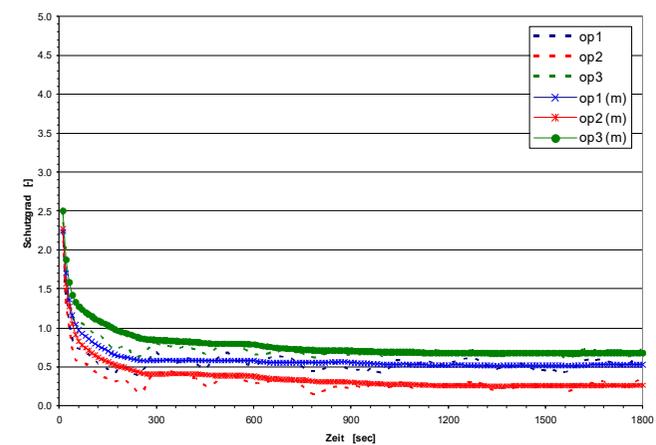
SG ≈ 0,8

A02d - SST



SG ≈ 0,6

B01d - SST



SG ≈ 0,3

Bild 4.2.5: Vergleich der Ergebnisse GiG I (links oben) und der Schutzgrade für verschiedene Gitternetzgrößen (Modelle A01 / A02 / B01) mit einem Wärmeeintrag von in Summe 800 W an den Dummies

4.2.3 Energiequellterme an den Dummys Σ 1.000 W

In den Untersuchungen nach Abschnitt 4.2.2 wurden die Wärmeflüsse an den Dummys gemäß den Mindestanforderungen nach VDI 2167 - 1 mit insgesamt 800 W definiert. Im Folgenden soll einmal mit jeweils 150 W an den Dummys 3 bis 6 ein deutlich höherer Energieeintrag um den OP -Tisch betrachtet werden (siehe Bild 4.2.6). Die Wärmeflüsse an den Dummys 1 und 2 sind mit 300 W bzw. 100 W weiter den ursprünglichen Vorgaben. Der Gesamteintrag beträgt demnach 1.000 W. Die OP - Leuchten über dem Tisch werden weiterhin mit 300 W zu Grunde gelegt.

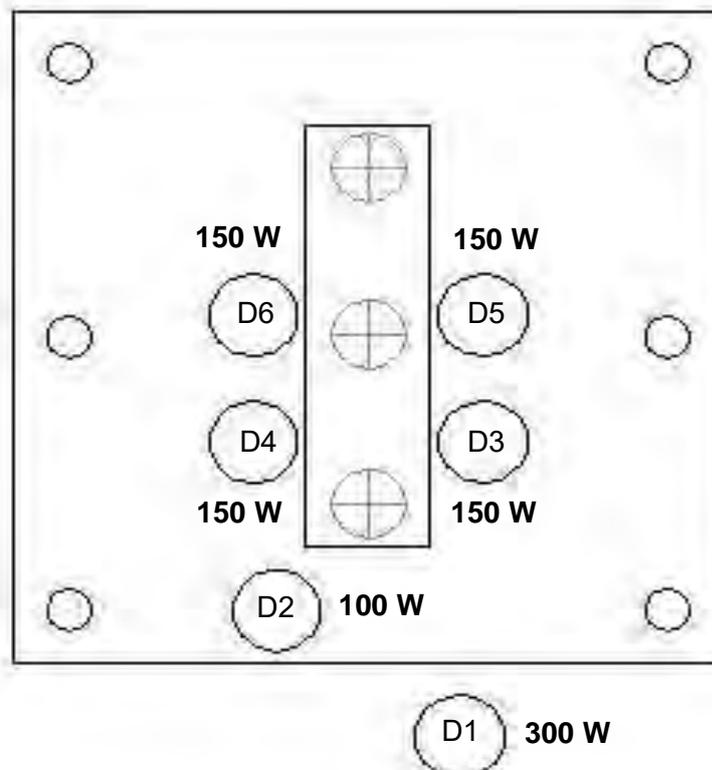


Bild 4.2.6: Wärmeströme [W] an den Dummys; $\Sigma Q = 1.000$ W

Mit den erhöhten Wärmeeinträgen um den OP -Tisch soll deren Einfluss auf den Partikeleintrag bewertet werden. Aufgrund der stärkeren Auftriebsströmung ist auch eine ausgeprägtere Einmischung von Umgebungsluft zu erwarten und damit einhergehend eine geringere Schutzwirkung um den OP - Tisch.

Die Ergebnisse dieser Parameter zeigen die Auswertungen in Bild 4.2.7. Sowohl die erzielten Schutzgrade als auch deren zeitlichen Verläufe liegen mit Werten von

- SG \approx 0,6 im Modell A01
- SG \approx 0,3 im Modell A02
- SG \approx 0,3 im Modell B01

in einem ähnlichen Bereich wie in dem Szenario der geringeren Wärmeeinträge (vgl. Abschnitt 4.2.2). Es wurden zwar höhere Partikeleinträge festgestellt, die erzielten Schutzgrade liegen aber weiter in dem Wertebereich der Messungen. Der Einfluss der höheren Wärmeeinträge ist bei dem hier zu Grunde gelegten OP - Raum und der Ausstattung (z. B. kompakte OP - Leuchten) sowie der homogenen Zuluftströmung anscheinend nur sekundär bzw. stellt nicht den einzigen und größten Einflussfaktor dar.

Es gilt bei der Wertung der Ergebnisse zu beachten, dass die Wärmeeinträge weiterhin zu gleichen Anteilen um den Tisch verteilt sind. Eine deutlich inhomogene Lastverteilung um den OP - Tisch, hervorgerufen durch die unterschiedlichen Tätigkeiten der Personen, kann die Strömungsverhältnisse und lokalen Auftriebsströme deutlich verändern (z. B. Chirurg: schwere körperliche Tätigkeit; OP - Schwester: leichte bis mittelschwere Tätigkeit [4]).

1 x Chirurg	mäßige bis schwere körperliche Tätigkeit	je 200 - 300 W
1 x Assistent	leichte bis mäßige körperliche Tätigkeit	je 140 - 200 W
2 x OP - Schwester	leichte bis mäßige körperliche Tätigkeit	je 140 - 200 W
(1 x Anästhesist	leichte sitzende Tätigkeit	je 100 - 125 W)

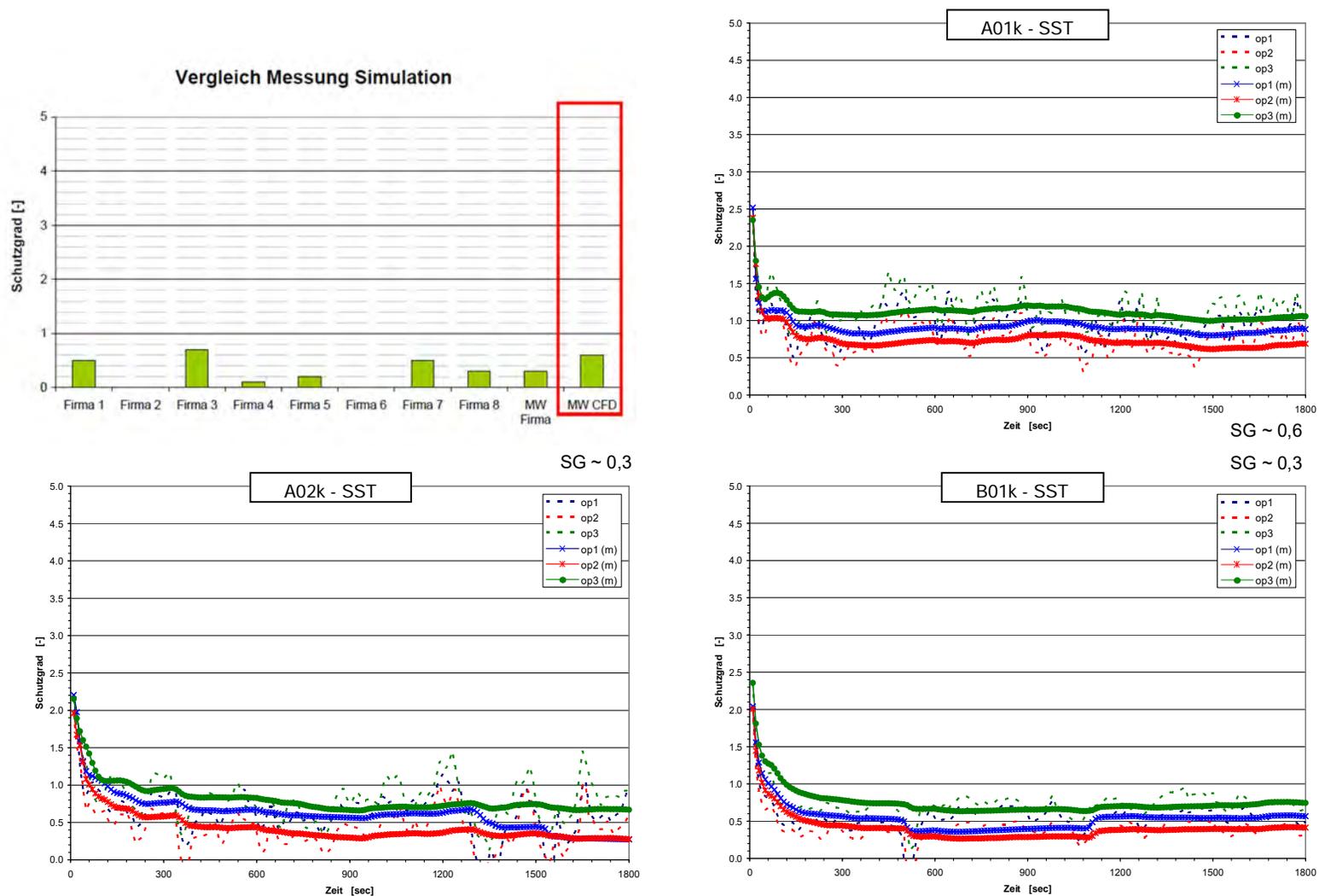


Bild 4.2.7: Vergleich der Ergebnisse GiG I (links oben) und der Schutzgrade für verschiedene Gitternetzgrößen (Modelle A01 / A02 / B01) mit einem Wärmeeintrag von in Summe 1.000 W an den Dummies

4.3 Turbulenzmodellierung

Die bisher vorgestellten CFD - Simulationen wurden, übereinstimmend zum GiG I, mit dem SST $k - \omega$ - Modell (*SST = Shear - Stress - Transport*) zur Berechnung der turbulenten Raumströmung durchgeführt. Das Modell hat sowohl die Partikel- bzw. Schutzgradverteilungen als auch die Instabilitäten und den chaotischen Charakter der Raumströmung gut nachgebildet. Im Rahmen der Untersuchungen und hier geführten Optimierungsstudien wurde aber auch der Einfluss der Turbulenzmodellierung betrachtet. In diesem Sinn sind die Anwendbarkeit und u. U. Unzulänglichkeiten anderer Turbulenzmodelle analysiert worden. Dabei kamen, neben dem bereits dargestellten SST $k - \omega$ - Modell, in erster Linie die populären Formulierungen des $k - \varepsilon$ - Modells sowie das relativ neu entwickelte SAS Modell zum Einsatz:*

- Standard $k - \varepsilon$ - Modell
- Realizable $k - \varepsilon$ - Modell
- RNG $k - \varepsilon$ - Modell (*RNG = ReNormalisation Group*)
- SAS Modell (*SAS = Scaled Adaptive Simulation*)

In den im Folgenden dargestellten Ergebnissen werden die Wärmelasten in den wandnahen Zellen um die Dummies gemäß Abschnitt 4.2.2 ($\Sigma 800 \text{ W}$) eingetragen. Die Untersuchungen mit den Temperaturprofilen weisen ähnliche Abhängigkeiten wie bei dem SST $k - \omega$ - Modell auf (vgl. Abschnitt 4.1 und 4.2).

(*) Anmerkung:

Neben den erwähnten Turbulenzmodellen wurde auch das Reynolds - Stress - Model (RSM) untersucht. Der Vorteil dieses Modells liegt in der Zulässigkeit einer anisotropen Turbulenz (Ungleichheit in den drei Raumrichtungen; richtungsabhängige Turbulenz) und der guten Nachbildung stark gekrümmter Stromlinien. Um mit dem RSM eine Konvergenz zu erreichen, waren jedoch aufgrund dessen Formulierung der sechs Reynoldsspannungen (drei Normal- und drei Scherspannungen) sehr geringe Zeitschrittweiten erforderlich. Dieser Sachverhalt sowie die Lösung der insgesamt sieben Gleichungen für die Turbulenzberechnung (sechs für die Reynoldsspannungen und eine Gleichung für die turbulente kinetische Energie k) waren sehr zeitaufwendig, so dass die Zielsetzung der Studien mit dem Erarbeiten einer wirtschaftlichen Herangehensweise für CFD - Simulationen in OP - Räumen nicht entsprochen werden konnte. Aus diesem Grund wird auf die Darstellung dieser Ergebnisse hier verzichtet. Insgesamt waren die Strömungsverhältnisse und Schutzgrade aber ähnlich denen des SST $k - \omega$ - und des RNG $k - \varepsilon$ - Modells.

Die Ergebnisse der Studien zur Turbulenzmodellierung sind in den Auswertungen nach Bild 4.3.1 bis Bild 4.3.4 zusammengestellt. Bereits die zeitlichen Schutzgradverläufe nach Bild 4.3.3 zeigen die wesentlichen Eigenschaften der mit den jeweiligen Modellen berechneten Strömungen. Die Schutzgrade stimmen mit Werten von 0,5 bis 0,6 insgesamt recht gut mit den bisherigen Berechnungen und den Messungen überein. Nur das *Realizable k-ε-Modell* weist einen Wert von $SG \approx 0,9$ auf und ist damit etwas höher als in den anderen Ansätzen. Die zeitlichen Verläufe sind bei dem *Standard* und dem *Realizable k-ε-Modell* deutlich stabiler und zum Teil nahezu konstant gegenüber den anderen Turbulenzmodellen.

Vergleicht man zusätzlich die Verteilungen der Schutzgrade um den OP - Tisch nach Bild 4.3.4 ist außerdem auffallend, dass die Modelle mit konstanteren zeitlichen Verläufen (*skε*, *rke*) eine fast symmetrische Partikelverteilung (bzw. in den Auswertungen Schutzgrade) aufweisen. Dagegen ergeben sich in den Modellen mit stark instationärem Charakter (*SST*, *RNG*, *SAS*) geringere Schutzgrade in den Bereichen höherer Wärmelasten. Die Partikelkonzentrationen und Schutzgrade sind in diesen Modellen deutlich asymmetrisch verteilt, was bei der Verteilung der Wärmelasten auch eher zu erwarten wäre.

Die Auswertungen der Luftgeschwindigkeiten über dem OP - Tisch, für den Messpunkt 02 und 03 dargestellt in Bild 4.3.1 und Bild 4.3.2, zeigen einen ähnlichen Charakter wie die oben geführten Beschreibungen der Schutzgrade. Während sie in dem *SST*, *RNG* und *SAS Modell* deutlich instationär und chaotisch verlaufen, ist die Strömung bei dem *Standard* und dem *Realizable k-ε-Modell* eher gedämpft. Die zeitlichen Verläufe weisen sogar eine nahezu periodische Schwingung auf. Das geht kongruent mit den symmetrischen Partikel- und Schutzgradverteilungen um den OP - Tisch (vgl. Bild 4.3.4). Die lokalen Auftriebseffekte an den einzeln stehenden Anästhesiedummys (D-1 & D-2) haben in dem *skε* und dem *rke* anscheinend einen geringeren Einfluss auf die Partikeleinmischung als das kompakte Lastgebiet um den Tisch. Eine Ursache kann die mit diesen Modellen nur unzureichende Nachbildung lokaler / einzelner Umlenkungen der Stromlinien in dem Gebiet hoher spezifischer Wärmelasten sein ($\Sigma 400 \text{ W}$ über 2 Dummys; dagegen um den OP - Tisch $\Sigma 400 \text{ W}$ über 4 Dummys).

Ausgehend von den berechneten Strömungen und Schutzgraden können mit den jeweiligen Turbulenztheorien Rückschlüsse auf die maßgeblichen Einflüsse in dem untersuchten OP - Raum gezogen werden (vgl. dazu *Grundlagen Turbulenzmodellierung* nach Abschnitt 2.1). Ein bestimmender Faktor ist die Nachbildung des Auftriebes und der Strömung auch in den Gebieten niedriger Reynoldszahlen. Das gilt vor allem um die Dummys (z. T. aber als auch im Zuluftbereich, da dort die Luft turbulenzarm eingebracht wird). An diesem Punkt stoßen das *Standard* und das *Realizable k-ε-Modell* an ihre Grenzen, da sie eine vollständig turbulente Strömung voraussetzen.

Die unzureichende Nachbildung der Interaktion zwischen nach außen strömender Zuluft und dem Umlenken der Strömung an den Personen durch den Auftrieb werden besonders anhand zweier Effekte deutlich:

- die fast symmetrische Schutzgradverteilung um den OP - Tisch und
- der nahezu periodische Geschwindigkeitsverlauf auf dem OP - Tisch.

Dass das *Standard k - ε - Modell* in dem berechneten Schutzgrad trotzdem gut mit den Messungen und den bisherigen Simulationen übereinstimmt, kann an einer höheren, aber letztlich falschen, Turbulenzproduktion im Staupunkt auf dem OP - Tisch oder bei der Umströmung der Lampen liegen (vgl. Abschnitt 2.1.1). (Die chaotischen Geschwindigkeiten am MP-02 auch für das *Standard k - ε - Modell* lassen auf die Umströmung der Lampen schließen.) Unter Umständen kompensiert das den geringeren Auftriebsimpuls an den Dummies. Wie bereits in den Grundlagen der Turbulenzmodellierung in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, wird dieser Modellfehler in dem *Realizable k - ε - Modell* behoben, so dass mit diesem Modell dann auch ein höherer Schutzgrad berechnet wird. Letztlich führt die Überproduktion in dem Standardmodell aber nur zu einer „Scheinturbulenz“, die in der Realität so nicht entsteht. Die lokalen Auftriebseffekte und der damit einhergehende Partikeleintrag an den Dummies werden dabei trotzdem nur unzureichend beschrieben.

Übereinstimmend zu den grundlegenden Erläuterungen der Turbulenzmodelle in Abschnitt 2.1 bilden dagegen das SST k - ω -, RNG k - ε - und SAS - Modell sowohl die globalen als auch die lokalen Strömungsverhältnisse sehr gut ab. Insbesondere die wandnahen Auftriebsströmungen und die Umlenkungen an den Dummies bestimmen maßgeblich den Partikeltransport in den Schutzbereich. Gerade diese Effekte werden auch mit den Modellen gut beschrieben.

Zusammengefasst ergeben sich für die Untersuchungen der Turbulenzmodelle folgende Ergebnisse:

- | | | |
|------------------------------|----------|--|
| - SST k - ω - Modell: | SG ≈ 0,6 | deutlich instationärer und chaotischer Partikel- / Schutzgrad- und Geschwindigkeitsverlauf |
| - Standard k - ε - Modell: | SG ≈ 0,6 | stabilerer Partikel- / Schutzgrad- und Geschwindigkeitsverlauf |
| - Realizable k - ε - Modell: | SG ≈ 0,9 | stabilerer Partikel- / Schutzgrad- und Geschwindigkeitsverlauf |
| - RNG k - ε - Modell: | SG ≈ 0,5 | deutlich instationärer und chaotischer Partikel- / Schutzgrad- und Geschwindigkeitsverlauf |
| - SAS Modell: | SG ≈ 0,5 | deutlich instationärer und chaotischer Partikel- / Schutzgrad- und Geschwindigkeitsverlauf |

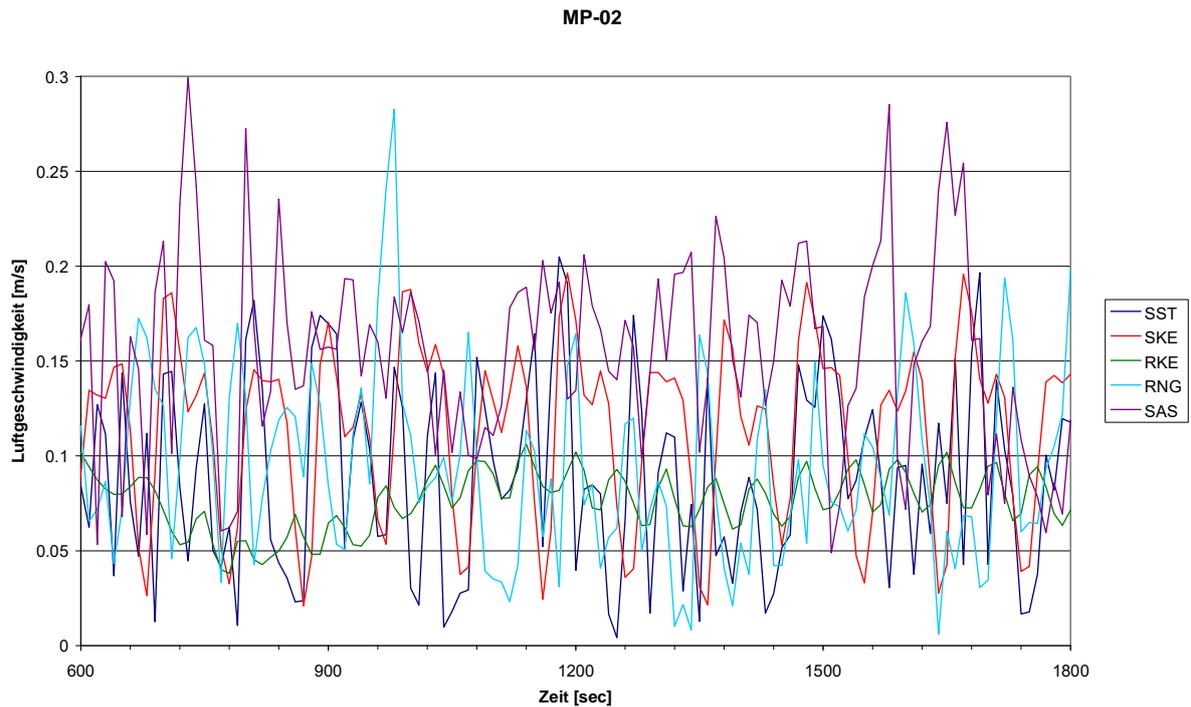


Bild 4.3.1: Verläufe der Luftgeschwindigkeiten [m/s] am MP-02 auf dem OP - Tisch, Vergleich der untersuchten Turbulenzmodelle

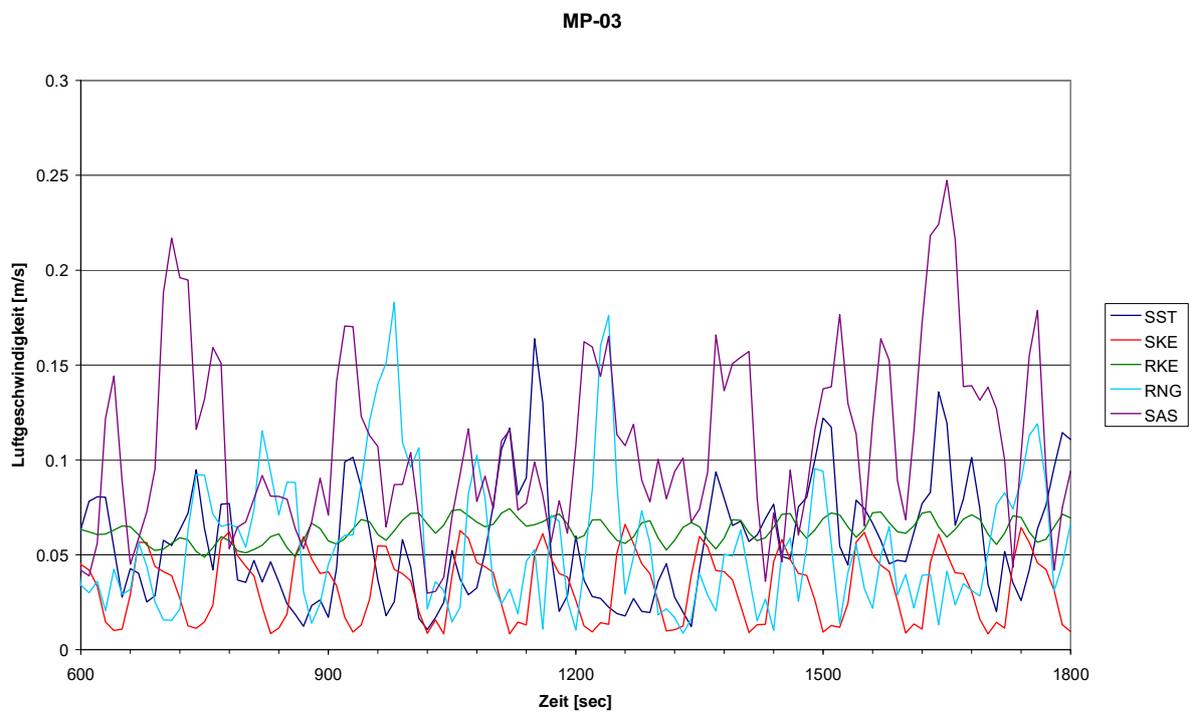


Bild 4.3.2 : Verläufe der Luftgeschwindigkeiten [m/s] am MP-03 auf dem OP - Tisch, Vergleich der untersuchten Turbulenzmodelle

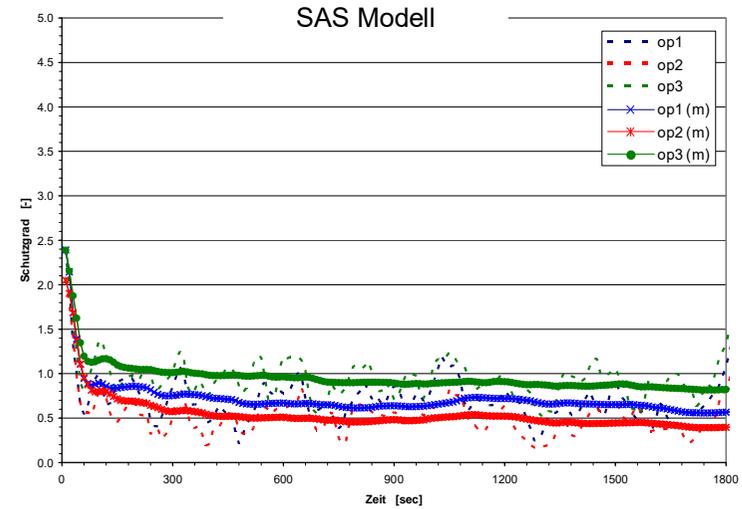
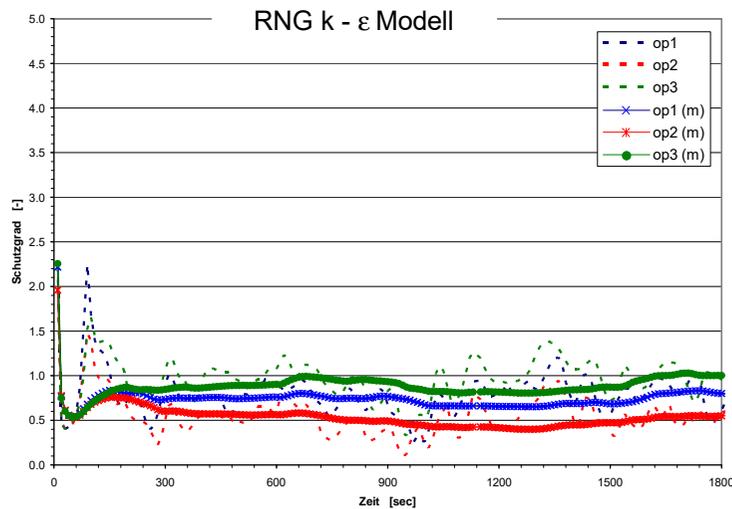
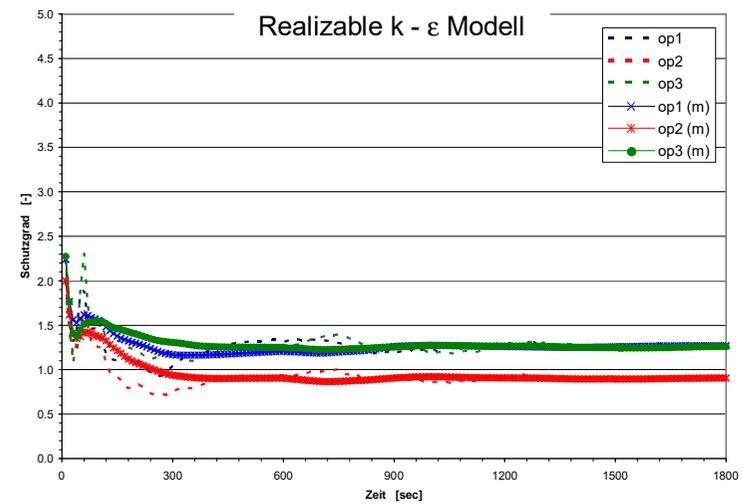
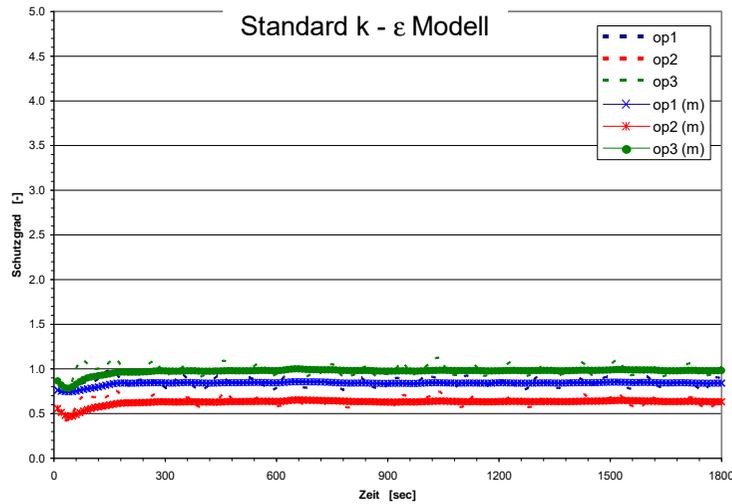


Bild 4.3.3: Verläufe des Schutzgrades an den Messpunkten auf dem OP - Tisch (Momentanwerte und 10 Minuten - Mittelungen) für die untersuchten $k - \epsilon$ - Modelle sowie das SAS Modell

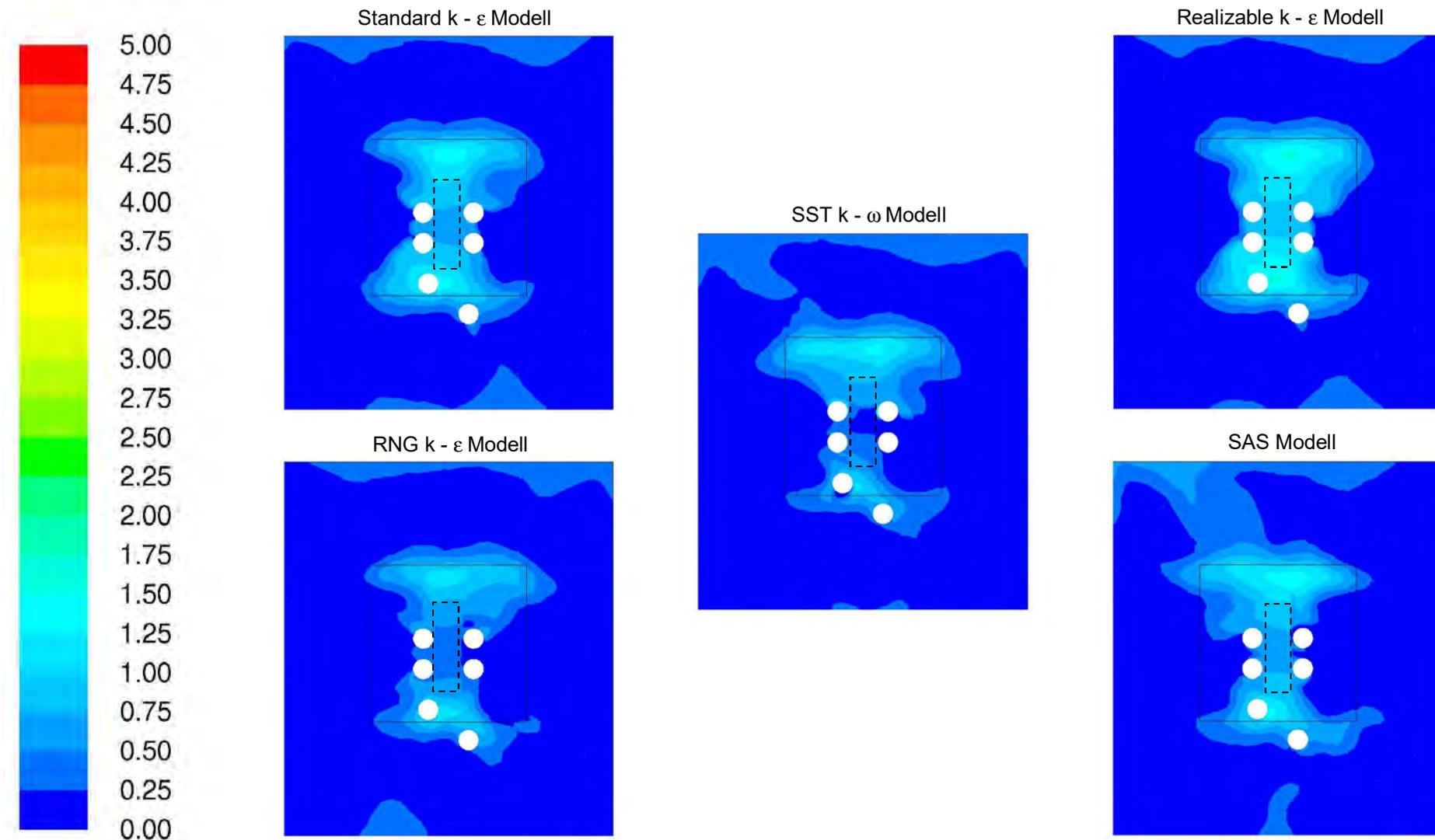


Bild 4.3.4: Schutzgrad [-] auf bzw. knapp über dem OP - Tisch für die untersuchten Turbulenzmodelle, Ansicht $z = \text{const}$

4.4 Zeitliche Auflösung / Zeitschrittweite

4.4.1 Instationäre Bewertungen

In den Untersuchungen des GiG I wurden die CFD - Simulationen mit Zeitschrittweiten von $\Delta\tau = 0,1$ sec durchgeführt. Diese sehr kleinen zeitlichen Auflösungen haben zwar gute Ergebnisse erzielt, das machte die Berechnungen jedoch sehr zeitaufwendig. Aus diesem Grund wurden in den Optimierungsstudien die Notwendigkeit der zeitlichen Auflösung sowie Unzulänglichkeiten bei der Verwendung größerer Zeitschrittweite betrachtet. Diese Ergebnisse sind in den folgenden Auswertungen zusammengefasst. Sie werden hier beispielhaft für das Modell A02 mit volumetrischen Energiequelltermen an den Dummies ($\Sigma 800$ W, analog Abschnitt 4.2.2) und unter Verwendung des SST k - ω - Modells dargestellt. Sowohl die anderen Vernetzungsmodelle als auch die Berechnungen mit anderen Turbulenzmodellen haben äquivalente Ergebnisse erzielt.

Die Untersuchungen im GiG II wurden mit Zeitschrittweiten von $\Delta\tau = 0,1$ sec / 1,0 sec und 10 sec durchgeführt. Die Bewertungen der in diesen Berechnungen erzielten Schutzgrade auf dem OP - Tisch zeigen die Verläufe nach Bild 4.4.1. In denen wird deutlich, dass die Strömung bei größeren Zeitschritten gedämpfter stattfindet, die Partikelverteilung insgesamt aber trotzdem gut wiedergegeben wird. Die Schutzgrade wurden bei allen drei untersuchten zeitlichen Auflösungen mit $SG \approx 0,6$ bestimmt.

Markant ist auch, dass bei einer Zeitschrittweite von $\Delta\tau = 10$ sec der niedrigste Schutzgrad am MP-02 und damit unter den Lampen bestimmt wird. Die äußeren Messpunkte weisen deutlich größere Schutzwirkungen auf. Mit geringeren Zeitschrittweiten dagegen liegen die Verläufe des MP-01 und des MP-02 näher beieinander und weisen ähnliche Werte auf (obwohl der MP-02 weiterhin das Minimum bildet). Da der Messpunkt 01 am äußeren Rand des OP - Tisches liegt und an den Dummies 1 und 2 eine erhöhter Wärmelasteintrag stattfindet, soll ausgehend von dieser Lastverschiebung noch einmal kurz auf die hauptsächlichen Strömungsverhältnisse in dem Raum eingegangen werden:

- I. Die sind im Wesentlichen durch die turbulenzarme Verdrängungsströmung in der Zuluftzone über dem OP - Tisch (bzw. über den Lampen) und einem eher mischluftartigen Gebiet außerhalb der Schutzzone beschrieben. Die Durchmischung in der Außenzone wird vor allem durch ein Ablösen der Strömung an der Schürze und damit einhergehender Wirbelbildung hervorgerufen. Das sich dabei ausbildende Unterdruckgebiet induziert, unterstützt durch den Auftrieb an den Dummies um den Tisch, kontaminierte Luft aus dem äußeren Raumbereich in die Schutzzone. Die über diesen Weg transportierten Partikel werden in das Nachlaufgebiet der kompakten Leuchten getragen.

- II. Neben den oben beschriebenen Effekten bewirkt der Auftrieb an den Personen zum Teil ein Umlenken der Strömung, so dass, unabhängig der Ablösung an der Schürze, Partikel in den Schutzbereich getragen werden. Das geschieht dann nur kurzzeitig, da der Verdrängungsimpuls durch die Zuluftströmung ($w_{zu} = 0,30 \text{ m/s}$) in der gleichen Größenordnung wie der Auftriebsimpuls ($w_A = 0,2 - 0,3 \text{ m/s}$) liegt. Die beiden, entgegen zueinander gerichteten Strömungen führen dann zu einem Ausweichen in die eine oder andere Richtung.

Mit den beschriebenen Mechanismen des Partikeltransportes können die Minima der Schutzgradverläufe auf dem OP - Tisch besser bewertet werden. Bei größeren Zeitschritten ($\Delta\tau = 10 \text{ sec}$) ist der Punkt (I) dominant. Das intermittierende Umlenken der Strömung an den Dummies (II) wird bei der größeren Zeitauflösung nicht ausreichend wiedergegeben, da die Strömung und der Partikeltransport zwischen den Zeitschritten interpoliert werden. Wenn die Zeitschritte aber soweit verringert werden, dass die Periodizität des Umlenkens ausreichend abgebildet wird, dann werden auch diese Effekte reproduziert. Da dieses Kriterium in den Untersuchungen mit $\Delta\tau = 0,1 \text{ sec}$ und $1,0 \text{ sec}$ eingehalten ist, weisen sie einen geringeren Schutzgrad am MP-01 auf. Dieser wird dann nicht mehr nur durch das Ablösen an der Schürze und dem Nachlauf der Lampen bestimmt, sondern in höherem Maße auch durch die temporären Auftriebseffekte an den Dummies 1 und 2.*

Neben den Auswertungen der Schutzgrade zeigen die vergleichenden Darstellungen in Bild 4.4.2 die Verläufe der Strömungsgeschwindigkeiten auf dem OP - Tisch. In denen bestätigen sich insgesamt die vorherigen Analysen: Mit einer größeren zeitlichen Auflösung werden die Strömungsverhältnisse gegenüber den kleineren Zeitschrittweiten gedämpfter wiedergegeben. In dem Bereich unter den Lampen, der auch am MP-02 noch durch den Nachlauf der Leuchten beeinflusst wird, werden die Strömungsschwankungen dagegen gut abgebildet. Interessant ist auch, dass der qualitative Geschwindigkeitsverlauf mit zeitlichen Minima und Maxima gut in den unterschiedlichen Zeitschrittweiten übereinstimmt, nur dass die Werte bei der Auflösung $\Delta\tau = 10 \text{ sec}$ gedämpft wiedergegeben werden.

Zusammenfassend lässt sich für die Studien der zeitlichen Auflösung festhalten, dass die berechneten Schutzgrade auch mit Zeitschrittweiten von $\Delta\tau = 10 \text{ sec}$ gut mit den Messungen und den Simulationen aus dem GiG I übereinstimmen. Strömungseffekte die in geringeren Skalen als diese zeitlichen Auflösungen ablaufen, werden jedoch nur gedämpft beschrieben. Für diese sind kleinere Zeitschritte erforderlich. Die Untersuchungen haben aber auch gezeigt, dass Zeitschrittweiten von etwa $\Delta\tau = 1,0 \text{ sec}$ ausreichend sind, um bei den untersuchten Randbedingungen alle relevanten Phänomene abzubilden.

(*) Anmerkung:

In den Untersuchungen der Zeitschrittweiten wurden an den Dummies die Wärmeeinträge nach VDI 2167 - 1 zugrunde gelegt. In der sind am Dummy 1 300 W und an den Dummies 2 bis 6 je 100 W definiert. Im Laborraum der Hochschule Luzern weist dagegen der Dummy 2 nur eine Leistung von 56 W auf [5]. Diese Lastverschiebung kann die Auftriebsströmung in diesem Bereich und damit einhergehend auch die Partikelverteilungen und die Schutzgrade auf dem OP - Tisch verschieben.

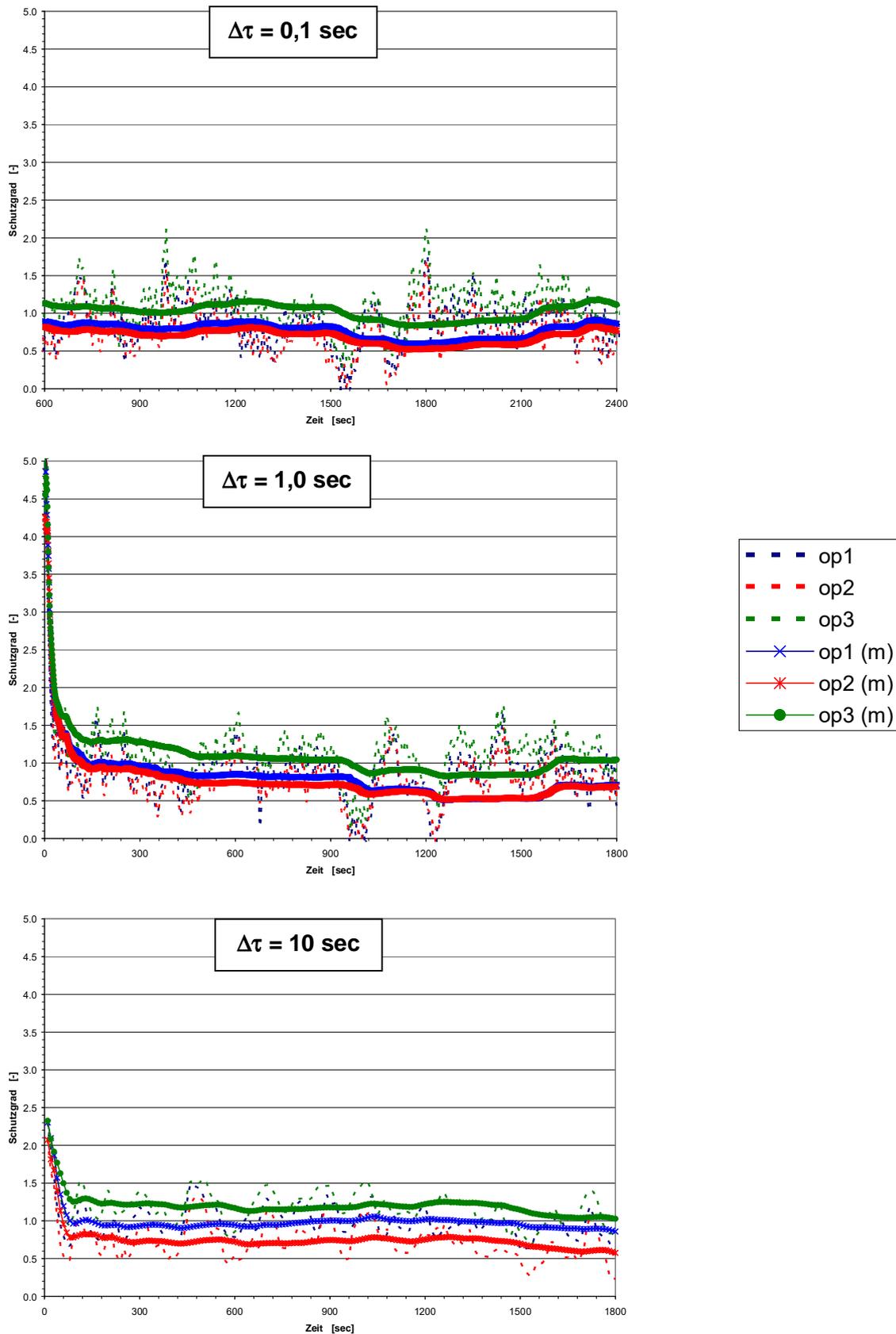


Bild 4.4.1: Verlauf des Schutzgrades an den Messpunkten auf dem OP - Tisch (Momentanwerte und 10 Minuten - Mittelungen) bei Zeitschrittweiten von 0,1 / 1,0 / 10 sec

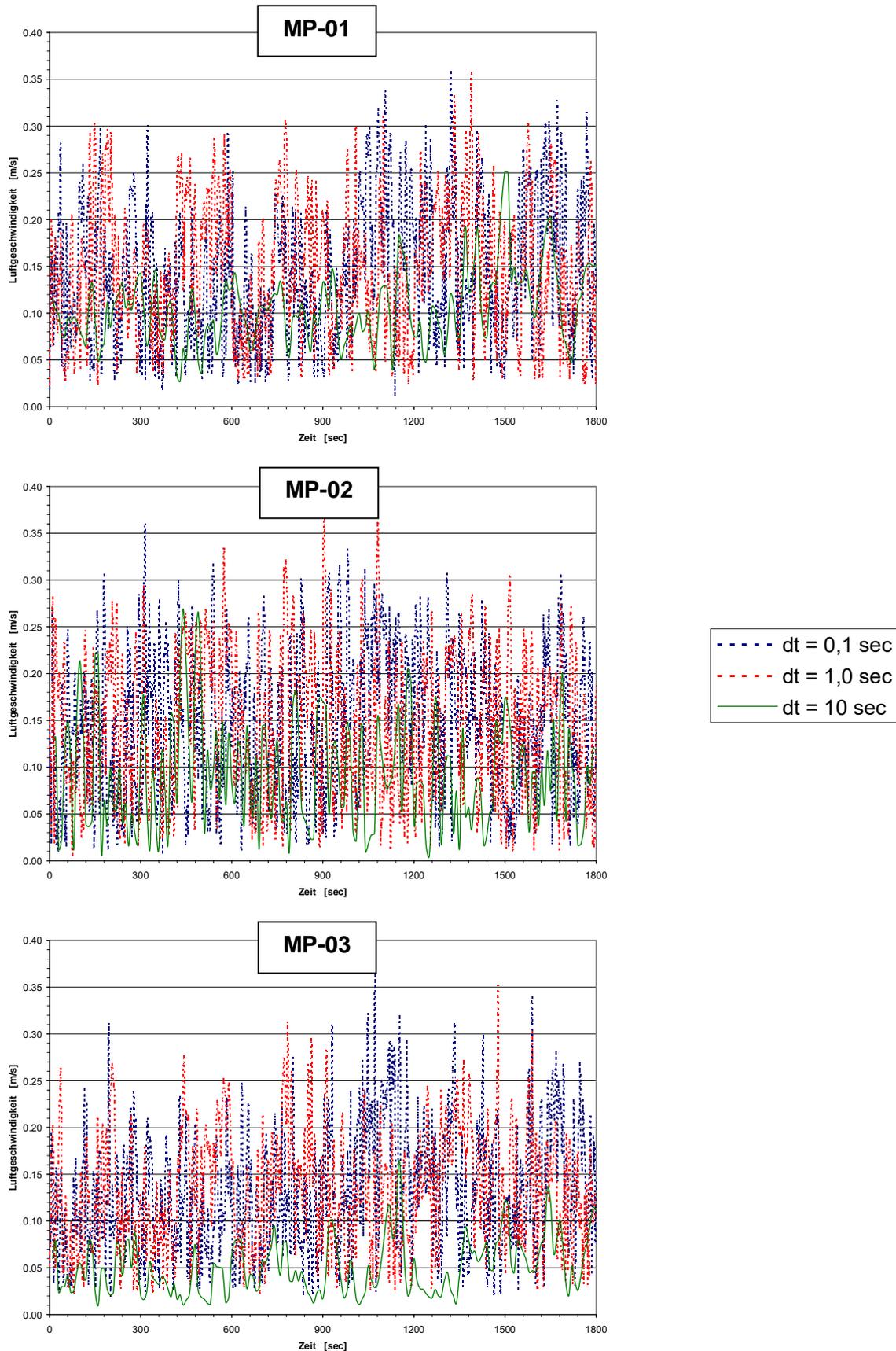


Bild 4.4.2: Vergleich der Geschwindigkeiten [m/s] an den Messpunkten auf dem OP - Tisch bei Zeitschrittwerten von $\Delta\tau = 0,1 / 1,0 / 10$ sec

4.4.2 Stationäre Bewertungen

Obwohl die Strömungen in dem OP - Raum stark instationär sind, wurden sie auch unter stationären Gesichtspunkten bewertet. Grundlage dieser Analyse ist, dass das mittlere Induzieren von Umgebungsluft in einen Luftstrahl aber auch die Nachlaufgebiete umströmter Körper bei einer turbulenten Strömung hinreichend genau zeitunabhängig vorhergesagt werden können. (Die Analogie dazu ist die Bewertung von Staupunktströmungen und Nachlaufgebieten in der Gebäudeaerodynamik. In der erfolgt die Analyse der Über- und Unterdruckgebiete ebenso mit einer stationären Betrachtung.) Ebenso gilt, dass die globale Raumströmung, ohne dass die lokalen Effekte berücksichtigt werden, weitestgehend konstant abläuft und die Schutzgradbewertung mit den 10 - Minuten - Mittelungen auch einen stationären Charakter aufweist. (Konstant bedeutet hier im Sinne einer Mischlüftung „im zeitlichen Mittel konstant“.)

Die Ergebnisse der stationären Simulationen in Form der Schutzgrade an den Messpunkten zeigt Bild 4.4.4. Die Werte werden hier, ausgehend von einer sich ausgebildeten Raumströmung, über jeden Iterationsschritt gemittelt. Im Ergebnisse stellt sich nach einer ausreichend großen Iterationszahl ein konstanter Verlauf ein, um den die Iterationswerte schwanken. Der Schutzgrad wird hier auf einen Mittelwert von ca. 0,6 berechnet. Das stimmt sehr gut mit den bisher erzielten Werten überein.

Vergleicht man zusätzlich die Strömungsverhältnisse in dem Raum, anhand der Luftgeschwindigkeiten dargestellt in Bild 4.4.3, dann werden die Bedingungen bei der stationären Bewertung gegenüber den zeitabhängigen Berechnungen nur gedämpft wiedergegeben. Die intermittierenden Ablösungen sind nur als Mittelwerte aufgelöst, so dass keine Ausgleichsströmungen stattfinden. Das wird sowohl an den geringeren Geschwindigkeiten in der Ablösung an der Schürze als auch an dem schwächer ausgeprägten Hintergrundwirbel im äußeren Raumbereich deutlich.

Insgesamt hat die stationäre Schutzgradbewertung für eine qualitative Analyse gute Ergebnisse erzielt und sowohl die globalen Strömungsverhältnisse als auch die sich auf dem OP - Tisch einstellenden Schutzgrade gut nachgebildet. Lokale und nur temporär auftretende Effekte werden dabei selbstverständlich nicht aufgelöst und können dementsprechend auch nicht bewertet werden. Das heißt aber auch, dass die stationäre Bewertung bei einer dominanteren Grundströmung im Schutzbereich sowie um und über dem OP - Tisch umso mehr anwendbar ist. Wenn die durch Auftrieb induzierte Partikeleinmischung weiter unterbunden wird, dann gewinnt auch die stationäre Analyse an Aussagekraft.

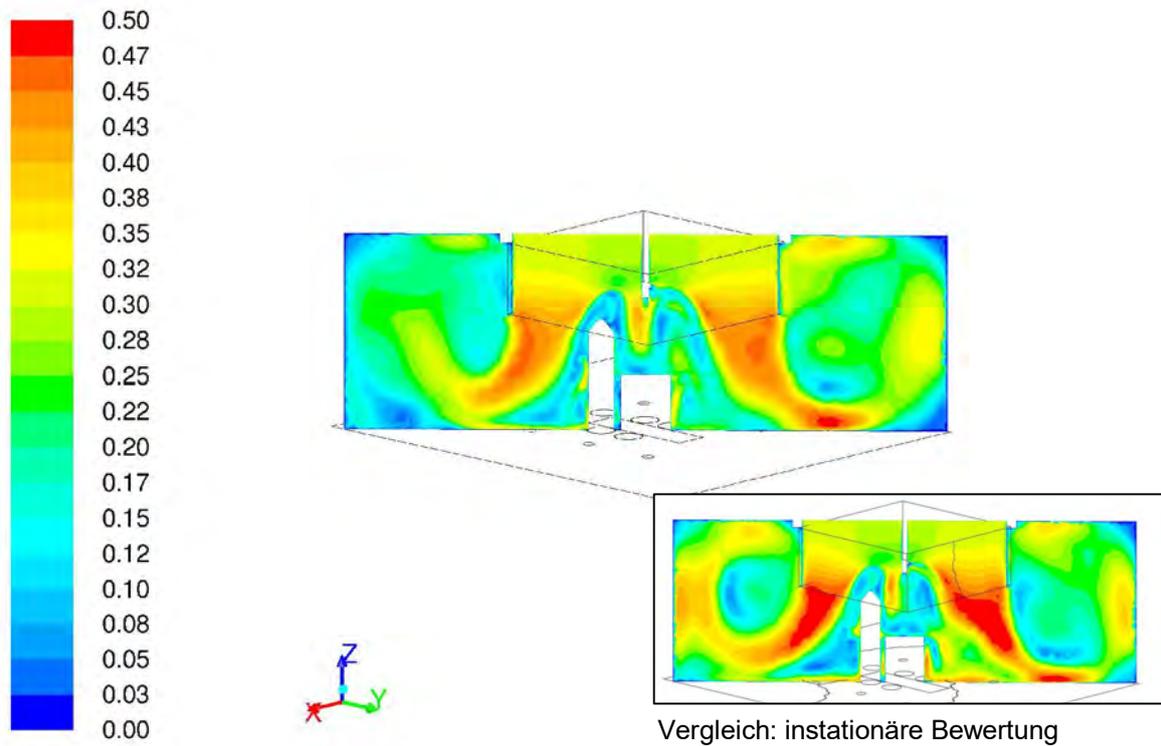


Bild 4.4.3: Luftgeschwindigkeit [m/s] in einer XY - Schnittebene durch den OP - Raum

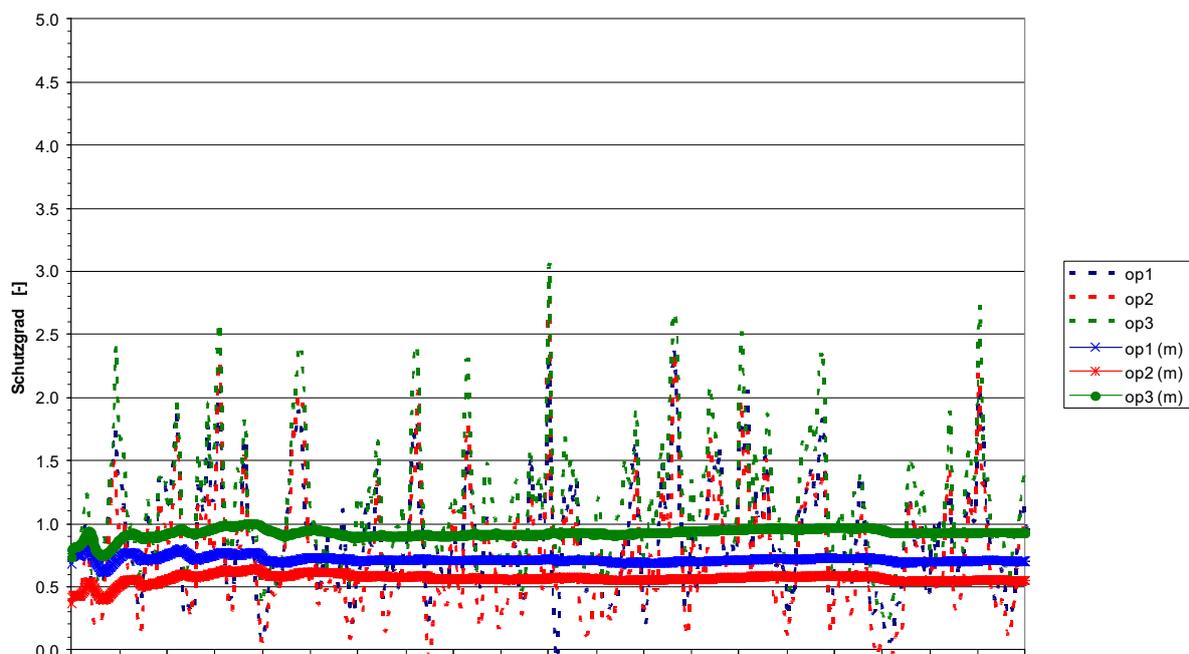


Bild 4.4.4: Verlauf des Schutzgrades in einer stationären Berechnung („Momentanwert“ / Iterationswert und Mittelwert über die Iterationszahl)

4.5 Schutzgradmodellierung

4.5.1 Erhöhter Partikeleintrag

Die Schutzgradbewertungen wurden mit einem Tracergas durchgeführt, welches die gleichen Eigenschaften wie Luft aufweist. Mit dieser Methode wurde der Partikelstrom in einen Massestrom umgerechnet und über die Generatoren in den Raum eingebracht. Dabei ergeben sich sowohl sehr geringe Masseströme von $\approx 2,4 * 10^{-12}$ kg/s je Partikeleingabe ($N = 6$) als auch, im Rückschluss der Partikelkonzentration nach Bild 2.4.4, sehr kleine Massenkonzentrationen des Tracergases im Bereich von 10^{-6} ppm (10^{-12} kg_P/kg_L). Bei diesen niedrigen Wertebereichen können die numerischen Berechnungen trotz des verwendeten double - precision - Löser (double precision bedeutet 16 Nachkommastellen) Ungenauigkeiten aufweisen. Aus diesem Grund wurde untersucht, wie sich eine (scheinbar) höhere Partikeleingabe, d. h. ein größerer Massestrom des Tracergases, auf die Schutzgrade auswirkt.

Damit die Ergebnisse mit den bisherigen Berechnungen vergleichbar sind, ist es bei diesem Ansatz wichtig, dass in gleichem Maße der Lasterhöhung auch die Referenzkonzentration angepasst wird. Die Erhöhungen des Partikelstromes müssen so gewählt werden, dass der numerische Fehler abnimmt und damit eine größere Genauigkeit der Konzentrationsverteilungen erreicht wird. Gleichzeitig gilt aber zu beachten, dass die höheren Masseströme die Raumströmung unter keinen Umständen beeinflussen oder gar ändern. Weiter müssen die Masseströme vernachlässigbar gering gegenüber der Zuluft sein, damit die Referenzkonzentration mit dem gleichen Faktor umgerechnet werden kann. Ausgehend von diesen Überlegungen ergeben sich in den Untersuchungen folgender Gesamtmassestrom und gleichwertige Referenzkonzentration:

$$\Sigma m'_{\text{P}} \approx 8,521 * 10^{-4} \text{ kg/min}$$

$$C'_{\text{Ref}} \approx 3,992 * 10^{-6} \text{ kg(P) / kg(L)}$$

Die zugrunde gelegte Erhöhung des Partikelstromes um den Faktor 10^6 führt zu einem äquivalenten Volumenstrom von in Summe $7,125 * 10^{-4}$ m³/min oder $4,275 * 10^{-2}$ m³/h über die sechs Generatoren (gegenüber bisher $7,125 * 10^{-10}$ m³/min). Das sind etwa $4 * 10^{-4}$ % des Zuluftvolumenstromes. Der Luftwechsel im Raum erhöht sich um $\approx 3 * 10^{-4}$ 1/h (bei einem Gesamtluftwechsel von fast $\lambda = 70 \text{ h}^{-1}$). Die Unabhängigkeit der Raumströmung von den Partikel- bzw. Tracergasströmen sowie die Zulässigkeit der Erhöhung der Referenzkonzentration ebenso um den Faktor 10^6 sollten somit gegeben sein.

Entsprechend den Auswertungen nach Bild 4.5.3 stellen sich mit Schutzgraden von 0,3 bis 0,6 ähnliche Werte wie in den bisherigen CFD -Simulationen bei „realen“ Partikelströmen sowie den Messungen aus dem GiG I ein. Gleiches gilt für die Darstellung der Konzentrationsverteilungen im Raum gemäß Bild 4.5.2.

Die sich aus den Partikelkonzentrationen und den Geschwindigkeiten (Bild 4.5.1) ableitbaren Strömungsbedingungen zeigen gleiche Effekte wie sie in den bisherigen Untersuchungen festgestellt wurden. Abweichungen sind in dem instationären und chaotischen Verhalten der Raumströmung insgesamt begründet.

Ausgehend von den berechneten Konzentrationsverteilungen und Schutzgraden, hat die Erhöhung des Partikelstromes bei den hier gewählten Parametern keinen Einfluss auf die Ergebnisse. Es wäre aber zu untersuchen, ob diese Aussage bei einer größeren Spreizung zwischen den Konzentrationsverteilungen im Schutzbereich und in der Hintergrundströmung (also höheren Schutzgraden über dem OP - Tisch) auch gilt.

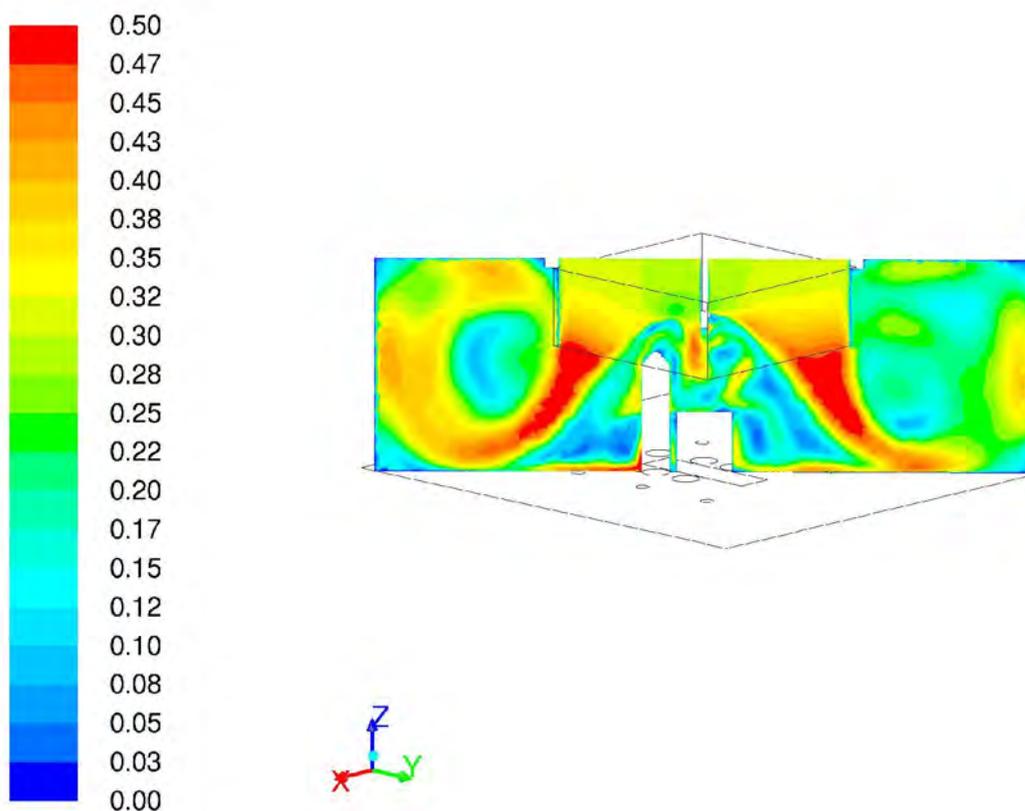


Bild 4.5.1: Luftgeschwindigkeit [m/s] in einer XY - Schnittebene durch den OP - Raum

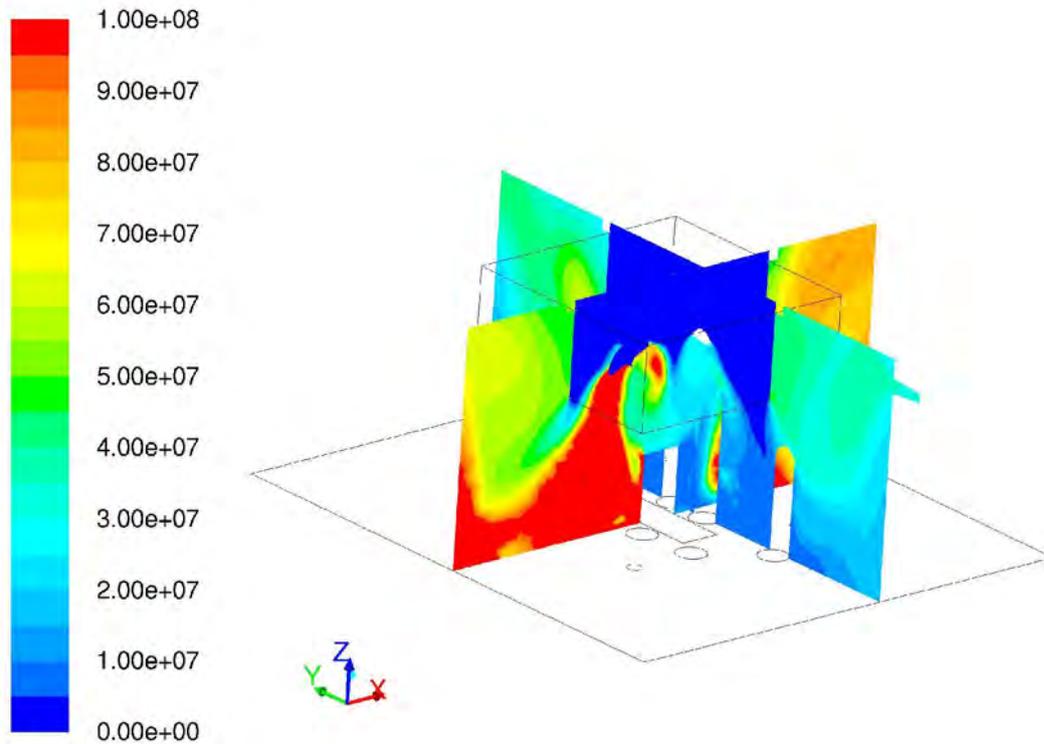


Bild 4.5.2: Partikelkonzentration [P/m³] in zwei Ebenen (Schnitt durch die Dummies 3 + 5, den OP - Tisch und die Lampen), Ansicht 3D

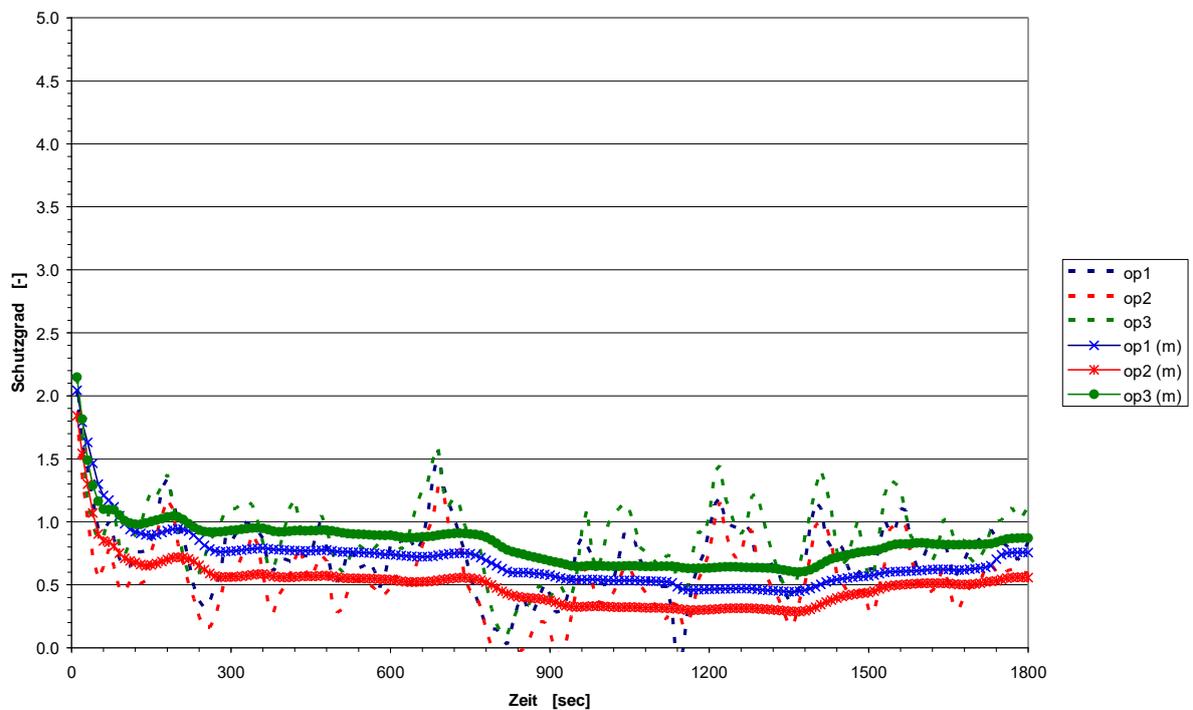
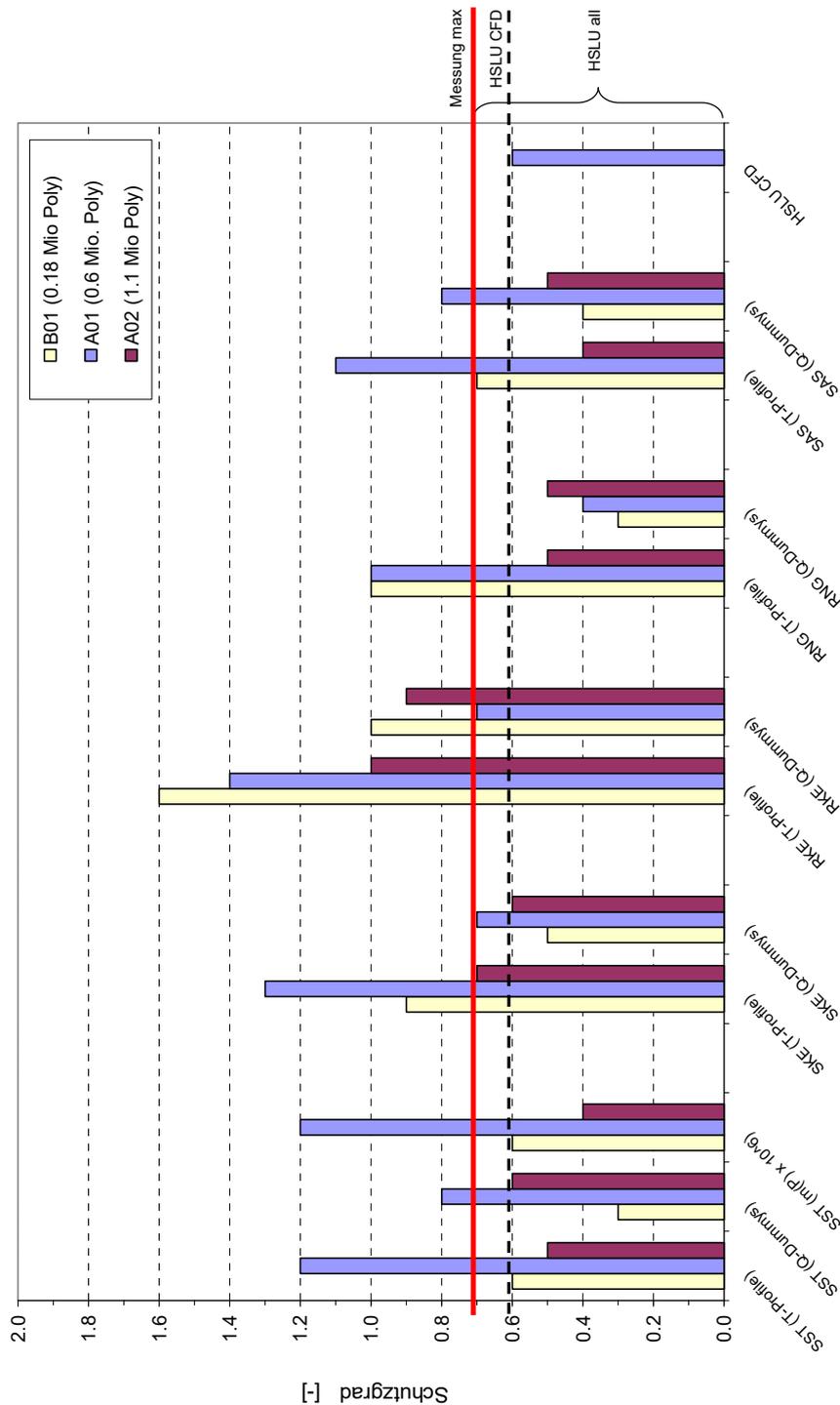


Bild 4.5.3: Verlauf des Schutzgrades an den Messpunkten auf dem OP - Tisch (Momentanwerte und 10 Minuten - Mittelungen) bei einem $\times 10^6$ erhöhten Partikeleintrag

4.6 Zusammenfassende Übersicht der Variantenstudien

Die nachfolgende Übersicht zeigt noch einmal zusammengefasst signifikante Ergebnisse zu den berechneten Schutzgraden für die untersuchten Modellgrößen sowie für verschiedene Modellierungsansätze des Wärmeeintrages und der Turbulenz.



5 Überführen der Ergebnisse auf andere Randbedingungen

Die bisherigen Studien zu den CFD - Simulationen in OP - Räumen wurden für den Standard - OP aus dem GiG I - Projekt durchgeführt. Mit den in Abschnitt 4 erarbeiteten Ansätzen wurden, hinsichtlich der Reproduzierbarkeit auf reale Bedingungen, gute Ergebnisse erzielt. In den folgenden Untersuchungen soll nun die Übertragbarkeit der Modellierungsansätze auf andere Randbedingungen und insbesondere besseren Schutzgraden über dem OP - Tisch betrachtet werden. Die Referenz bilden dazu zum einen ebenfalls die Untersuchungen aus dem GiG I [1] wie auch verschiedene Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten die im Rahmen der beiden GiG - Projekte an der Hochschule Luzern erstellt wurden. Die Untersuchungen der geänderten Randbedingungen umfassen in den hier dargestellten Szenarien folgende Änderungen der Ausgangsparameter:

- bodennahe Umluftabsaugung im Wandbereich
- homogene Zuluft (TAV), aerodynamische OP - Leuchten
- Zuluft *Differential Flow 2m x 2m* (10.370 m³/h), aerodynamische OP - Lampen
- Zuluft *Differential Flow 2m x 1m* (9.200 m³/h), aerodynamische OP - Lampen

5.1 Bodennahe Absaugung im Wandbereich

In der ersten Variantenstudie erfolgt die Ablufferfassung des Umluftanteils mit 9.570 m³/h nicht an der Decke sondern gleichverteilt über 4 bodennahe Absaugungen an den Seitenwänden. Die Darstellung des geometrischen Modells in Bild 5.1.1 verdeutlicht deren Positionen. Die weiteren Randbedingungen hinsichtlich

- Zuluftparameter mit $V_{zu} = 10.370 \text{ m}^3/\text{h}$ (homogen 0,30 m/s)
- Positionen der Dummies und der kompakten OP - Leuchten sowie
- der Partikelgeneratoren zur Messung der Schutzwirkung gegen äußeren Lasteintrag

sind analog dem „Standard - OP“ gemäß Abschnitt 2.2. Die Untersuchungen berücksichtigen die Ergebnisse nach Abschnitt 4 und sollen die dort festgestellten Abhängigkeiten der lokalen Vernetzung und des Wärmeeintrages nochmals untermauern. Für die Modellierung der Turbulenz wird, ebenfalls mit den Schlussfolgerungen aus den vorangegangenen Simulationen, jeweils das SST k - ω - Modell verwendet.

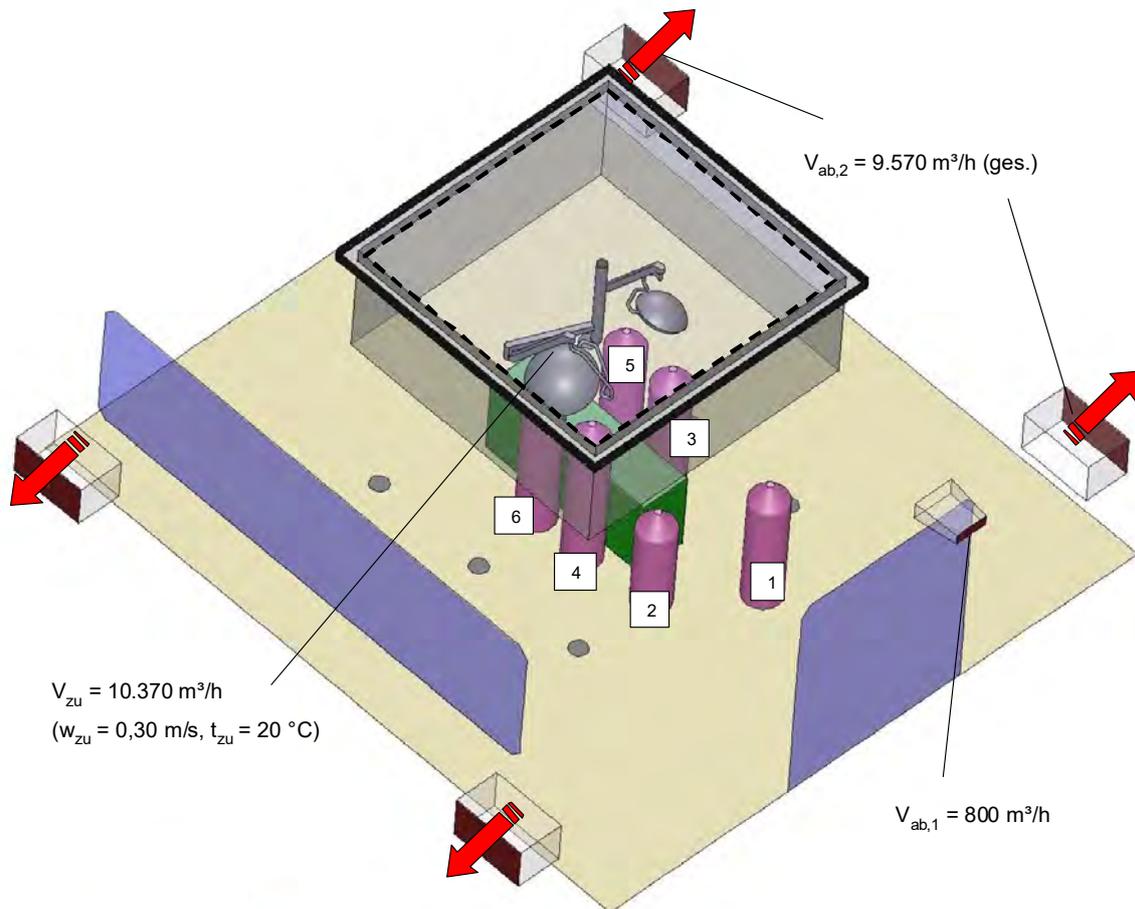


Bild 5.1.1: Geometrisches Modell des OP - Raumes mit bodennahen Umluftabsaugungen

Die Berechnungen zur bodennahen Umlufterfassung wurden für die drei Modelle unterschiedlicher Netzgenerierung (vgl. Abschnitt 4.1)

- Modell A01
- Modell A02
- Modell B01

sowie den Methoden der Wärmelastmodellierung (vgl. Abschnitt 4.2)

- Temperaturprofile an den Dummys
- Energiequellterme $\Sigma 800 \text{ W}$ (D1 = 300W; D2 - D6 je 100 W)

durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Bild 5.1.2 für die jeweils niedrigsten Schutzgrade an den Messpunkten auf dem OP - Tisch gegenübergestellt. Aus denen können, wenn die CFD - Simulationen aus dem GiG I die Referenz sind, übereinstimmende Schlussfolgerungen wie aus den bisherigen CFD - Simulationen gezogen werden:

Für eine reale Berechnung der Strömungsverhältnisse in dem Raum müssen die lokalen Effekte ausreichend nachgebildet werden. Dazu zählen in erster die Auftriebsströmungen an den Dummies. Um das zu erreichen müssen entweder die Wärmeübergänge an den Oberflächen richtig bestimmt werden (bei der Definition der Temperaturrandbedingungen) oder die Wärmeeinträge müssen unabhängiger von den Oberflächennetzen ablaufen. Das kann erreicht werden durch die Definition von Energiequelltermen in den wandnahen Zellschichten um die Dummies (vgl. dazu die Auswertungen nach Abschnitt 4.2).

In den vorangegangenen Simulationen mit den Standardrandbedingungen wurde gezeigt, dass mit dem Modell A01 die Wärmeübergänge nur unzureichend berechnet werden. Die Auftriebseffekte sind aufgrund dessen zu gering ausgeprägt und die Schutzgrade werden zu hoch bestimmt. Das bestätigt sich hier ebenso mit einem $SG_{A01} \approx 1,7$ in dem Modell A01 für die Varianten der Temperaturprofile. Die anderen beiden Gitternetzmodelle liegen dagegen mit $SG_{A02/B01} \approx 0,8$ in einem Wertebereich übereinstimmend zu den Simulationen des GiG I ($SG_{GiG I} \approx 0,9$).

Die beschriebene Netzabhängigkeit kann durch eine Definition der Wärmezufuhr in den wandnahen Zellen an den Dummies umgangen werden. Bei dieser Modellierung stimmen die Schutzgrade mit Werten von

Modell A02	$SG \approx 0,9$
Modell B01	$SG \approx 1,1$
Modell A01	$SG \approx 1,2$

für alle Modelle gut mit den Ergebnissen des GiG I überein.

In der Auswertung der Strömungsgeschwindigkeiten gemäß Bild 5.1.3 fällt auf, dass die Ablösungen an der Schürze schwächer ausgeprägt sind als bei der Deckenabsaugung. Durch die bodennahe Ablufferfassung wird bereits frühzeitig Impuls aus der Raumströmung genommen, so dass sich der Hintergrundwirbel nicht so stark ausprägt. Das wirkt dann auch, trotz der geringen Tiefenwirkung einer Absaugung, bis an den Schutzbereich und die Ablösegebiete.

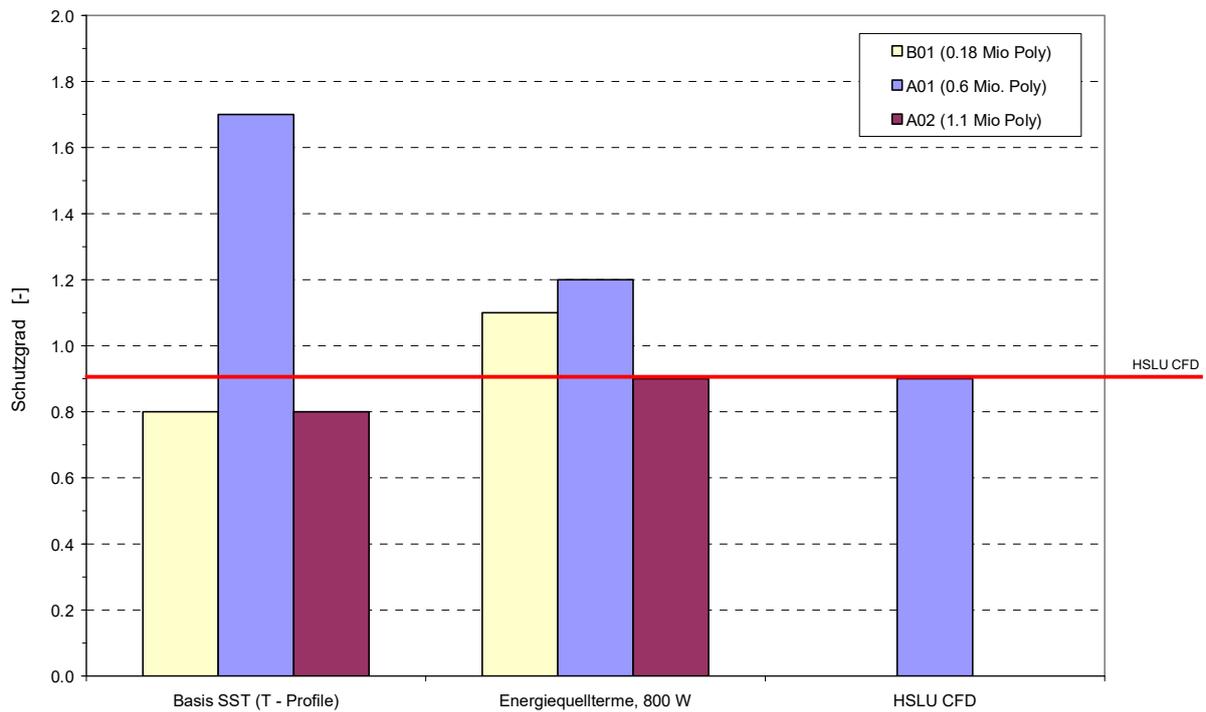


Bild 5.1.2: Vergleich der Schutzgrade für die untersuchten Modellgrößen und Szenarien der Wärmeeinträge

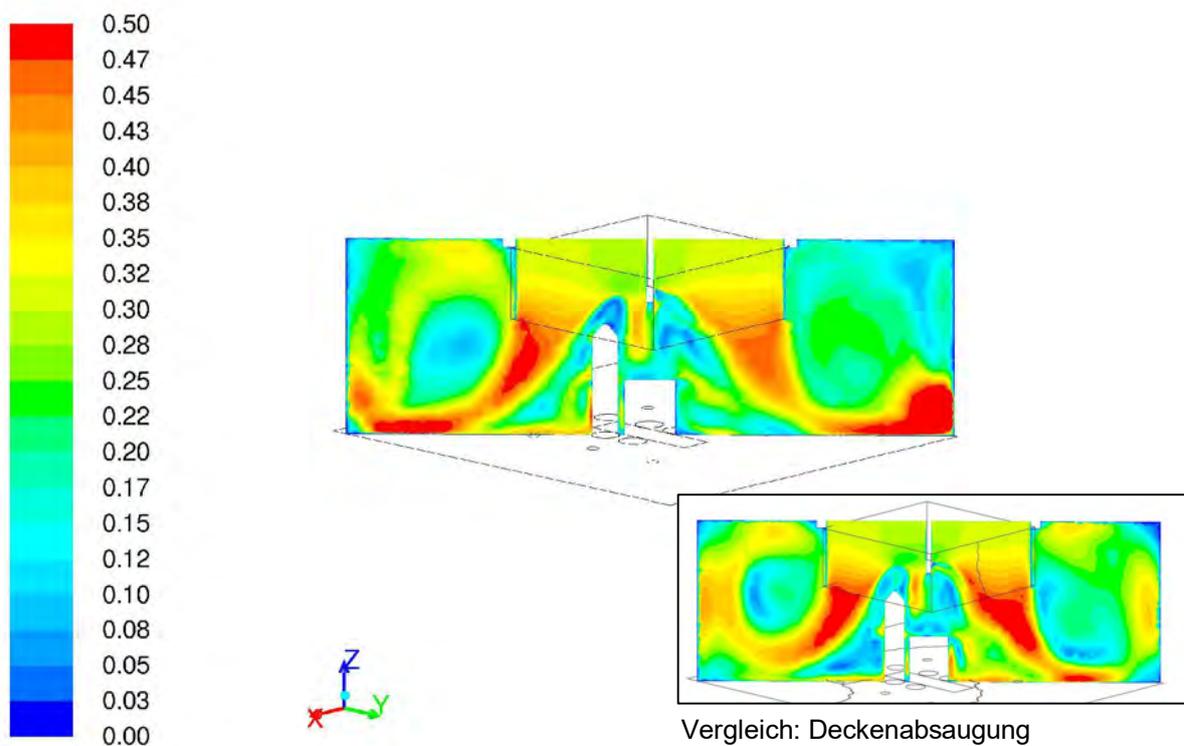


Bild 5.1.3: Luftgeschwindigkeit [m/s] in einer XY - Schnittebene durch den OP - Raum

5.2 Optimierte OP - Lampen und homogene Zuluft mit 0,30 m/s

Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Umströmung der kompakten OP - Lampen in hohem Maße die Strömungsverhältnisse über dem OP - Tisch beeinflusst. Aus diesem Grund wurde auch der Einsatz von aerodynamisch gestalteten Lampen bewertet. Die weiteren Randbedingungen sind analog den Grundlagenuntersuchungen gemäß Abschnitt 2.2 bzw. den Ergebnisdarstellungen nach Abschnitt 4:

- homogene Zuluftgeschwindigkeit von 0,30 m/s
- Absaugung des Umluftanteils (9.570 m³/h) an der Decke

Der Wärmeeintrag von in Summe 800 W an den Dummies (D1: 300 W; D2 - D6: je 100 W) sowie 300 W an den Lampen erfolgt in den wandnahen Zellschichten gemäß den Ansätzen nach Abschnitt 4.2.2. (Die Wärmeabgabe der Lampen wird auf der gleichen Leistung gehalten, damit allein deren Geometrieinfluss auf die Strömungsverhältnisse bewertet wird.) Als Turbulenzmodell wird das SST k - ω - Modell verwendet. (Die Untersuchungen wurden ebenso mit dem RNG k - ϵ - Modell durchgeführt. Dessen Ergebnisse sind gleichwertig.)

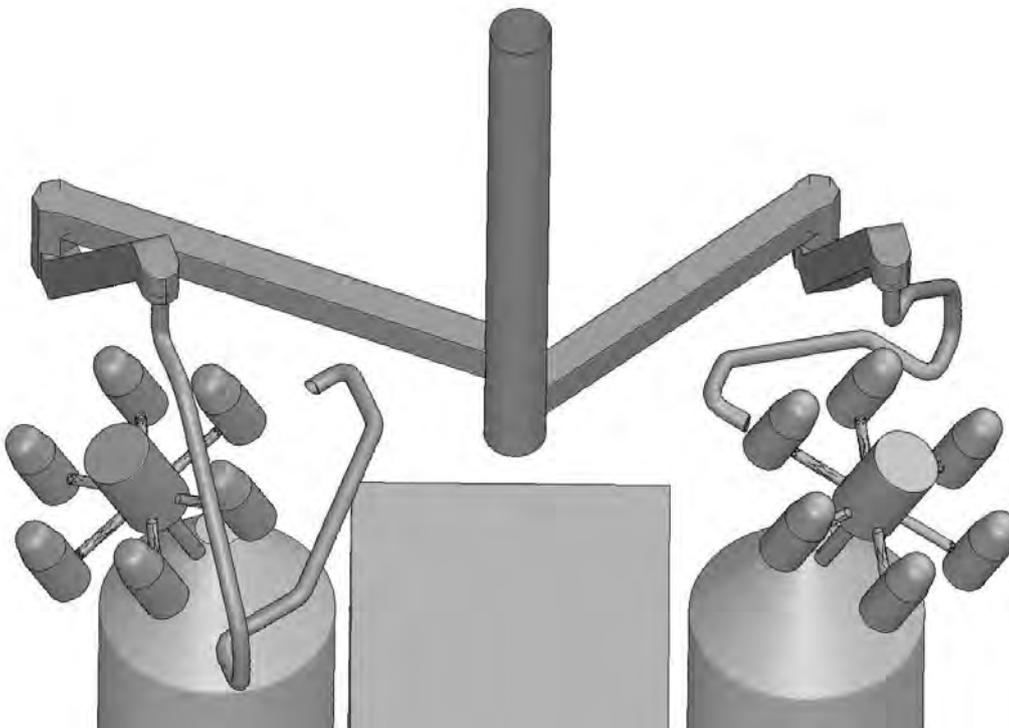


Bild 5.2.1: Geometrisches Modell für die Studien mit optimierten / aerodynamisch geformten OP - Lampen, Detailansicht der Lampen

Die Darstellung in Bild 5.2.1 zeigt die modellierte Geometrie der Lampen über dem Tisch. Deren Positionen und Ausrichtungen sind gleich den bisherigen Untersuchungen und übereinstimmend mit VDI 2167 - 1. Die Untersuchungen für den Standard - OP haben gezeigt, dass bei dem Einsatz der kompakten Leuchten die Halterungen nur einen geringen Einfluss auf die Strömungsbedingungen haben. Dem entgegen wurden sie für die aerodynamischen Formen mitmodelliert. Grund ist der abgeschwächte Nachlauf bei der Lampenumströmung. Die Strömungseinflüsse durch die Umströmung der Halterungen liegen in einer ähnlichen Größenordnung, so dass sie in den Bewertungen berücksichtigt werden müssen.

Die Auswertungen des Schutzgrades an den Messpunkten auf dem OP - Tisch nach Bild 5.2.4 zeigen, dass sich allein durch die Anwendung von optimierten Leuchten die Schutzwirkung auf dem Tisch nur geringfügig verbessern lässt. Es stellt sich unter den angesetzten Bedingungen ein Wert von $SG \approx 0,8$ ein (gegenüber $SG \approx 0,6$ mit konventionellen Leuchten). Das geschieht, wie die vergleichenden Darstellungen in Bild 5.2.2 zeigen, obwohl das Nachlaufgebiet der Lampen und die Ablösungen an der Schürze schwächer ausgeprägt sind als mit den kompakten Leuchten,.

Der hier angesetzten homogenen Zuluftströmung wirkt weiterhin der Auftrieb an den Dummies mit einem ähnlichen Impuls entgegen. Infolge dessen intermittiert die Strömung zwischen den beiden Personengruppen um die Längsseiten des OP - Tisches (Dummies 3 + 5 sowie 4 + 6). Durch die damit induzierte Turbulenz ist die Strömung und die Partikelverteilung über dem Tisch auch nur geringfügig stabiler / stationärer und mischt kontaminierte Luft aus dem Außenbereich ein. Das zeigen die Auswertungen nach Bild 5.2.5 und Bild 5.2.3.

Die Darstellung der Konzentrationsverteilungen in Bild 5.2.3 zeigt, dass der Partikeltransport aus der Außenzone geringer ausgeprägt ist als mit den kompakten Leuchten. Sie werden jedoch in die Fluktuation über dem Tisch eingemischt und dort nur über Verdünnung wieder abgebaut. Dadurch verbleiben sie eine zeitlang in diesem Bereich und konzentrieren sich auf einen mehr oder weniger konstanten Wert auf.

Die Geschwindigkeitsauswertungen in Bild 5.2.2 zeigen aber auch geringere Strömungsgeschwindigkeiten an den Kanten der Schürze. Dieser positive Effekt entsteht, da sich durch die kleineren Nachlaufgebiete der Lampen der effektive Strömungsquerschnitt in der Abströmung vergrößert. Infolge dessen bildet sich der Hintergrundwirbel in der Außenströmung (wenn auch nur geringfügig) schwächer aus.

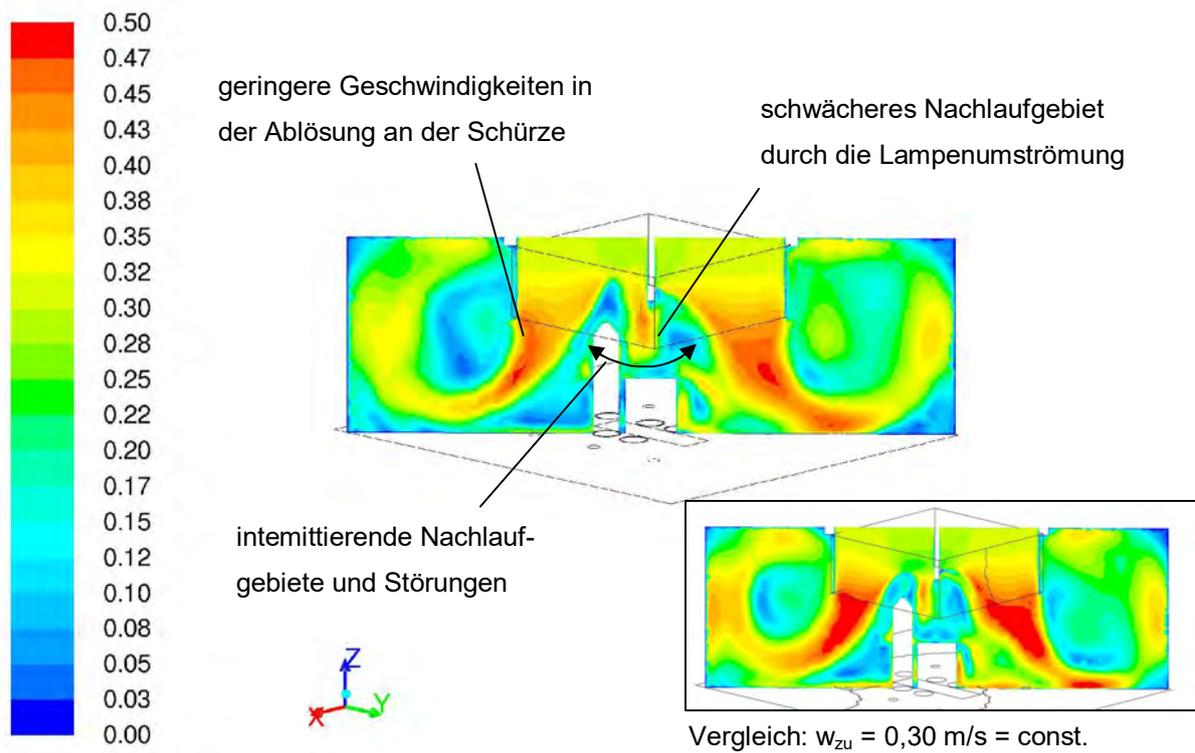


Bild 5.2.2: Luftgeschwindigkeit [m/s] in einer XY - Schnittebene durch den OP - Raum

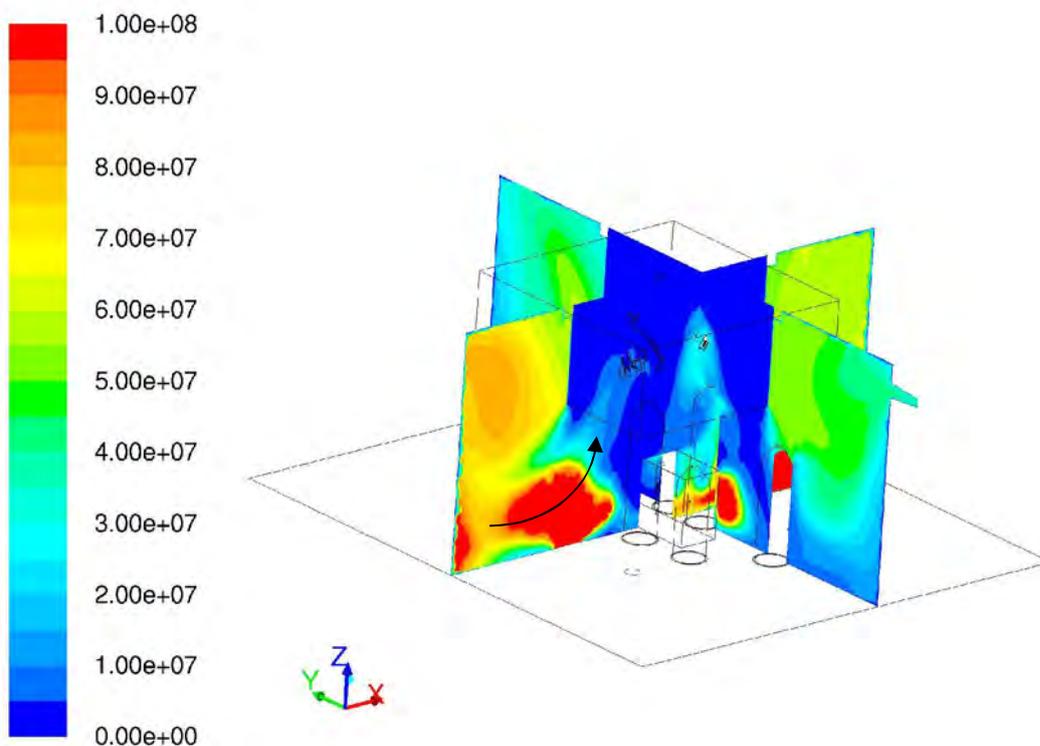


Bild 5.2.3: Partikelkonzentration [P/m³] in zwei Ebenen (Schnitt durch die Dummies 3 + 5, den OP - Tisch und die Lampen), Ansicht 3D

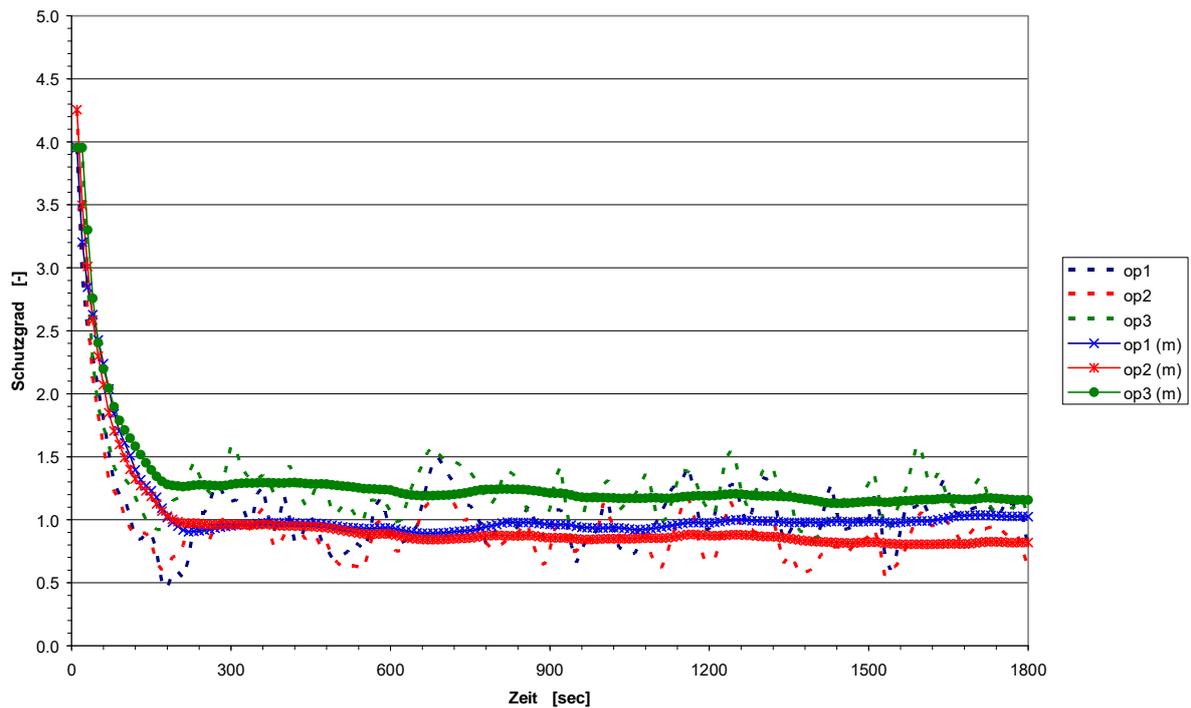


Bild 5.2.4: Verlauf des Schutzgrades an den Messpunkten auf dem OP - Tisch (Momentanwerte und 10 Minuten - Mittelungen) für die Variante mit aerodynamischen Leuchten und homogener Zuluftströmung mit 0,30 m/s

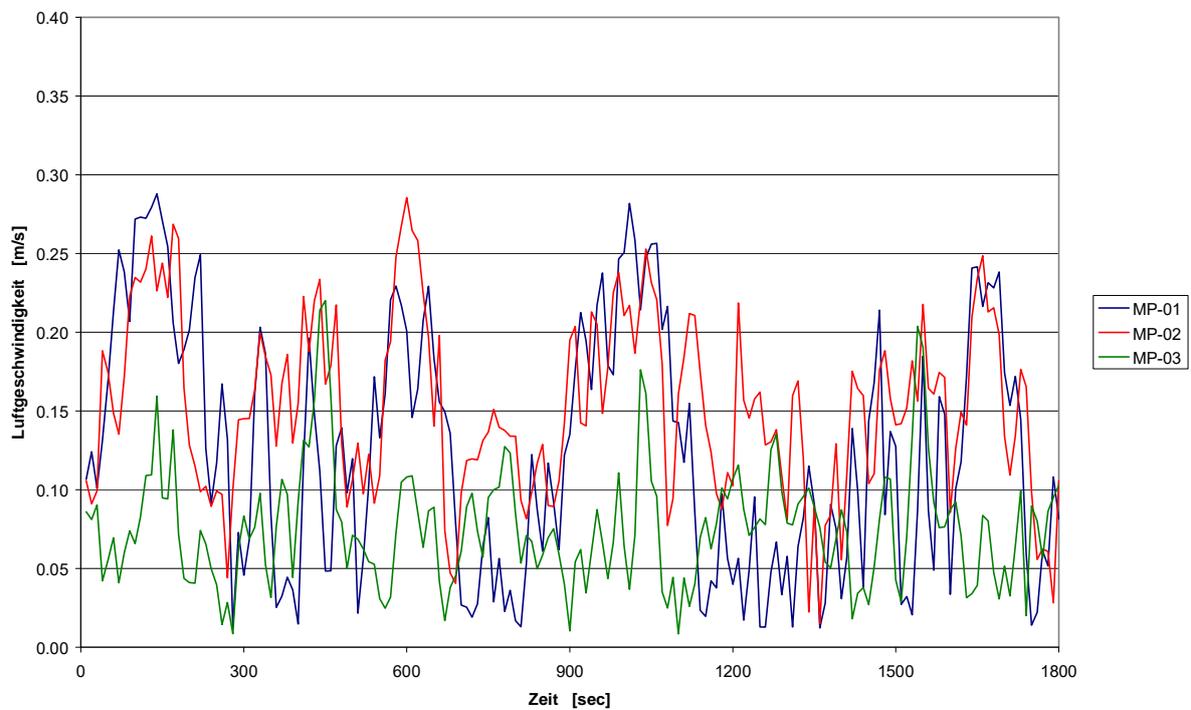


Bild 5.2.5: Verläufe der Luftgeschwindigkeiten [m/s] an den MP auf dem OP - Tisch

5.3 Optimierte OP - Lampen und Differential Flow 2 x 2

Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass mit den zugrunde gelegten Ansätzen die Strömungsverhältnisse und Schutzgrade in dem OP - Raum gut abgebildet werden. Die Schutzwirkung wird jedoch bei der Änderung einzelner Parameter nur geringfügig erhöht. So hat zum Beispiel die Anwendung von aerodynamisch günstiger geformten Leuchten den Schutzgrad auf dem OP - Tisch nur um wenige Punkte verbessert. In den im Folgenden dargestellten Untersuchungen wird mit dem *Differential Flow* ein anderes Zuluftprinzip eingesetzt.

Bei dem *Differential Flow* wird die Zuluft über die Decke (3,1 m x 3,1 m) in zwei Bereiche unterschiedlicher Geschwindigkeiten aufgeteilt. Das sind in diesen Untersuchungen eine Kernzone mit den Abmessungen von 2 m x 2 m und höheren Zuluftgeschwindigkeiten ($w_{zu,i} \approx 0,42$ m/s) sowie einem Randbereich geringerer Geschwindigkeiten von $w_{zu,a} \approx 0,21$ m/s.

Die grafische Darstellung in Bild 5.3.1 verdeutlicht die zugrunde gelegte Aufteilung. Die Geschwindigkeiten wurden so gewählt, dass der Gesamtvolumenstrom von 10.370 m³/h in etwa konstant bleibt und der Luftwechsel damit keinen Einfluss auf die Ergebnisse hat.

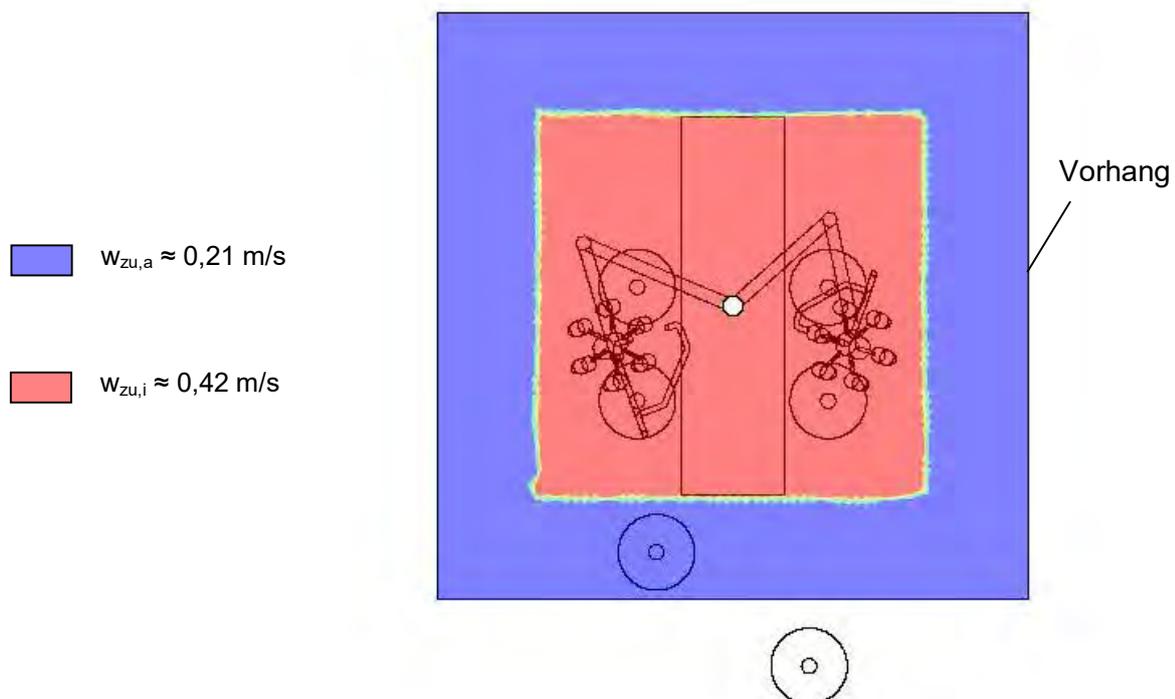


Bild 5.3.1: Aufteilung der Strömungsgeschwindigkeiten [m/s] über die Zuluftdecke, Ansicht $z = \text{const}$ (Modell mit optimierten / aerodynamischen OP - Lampen)

Bei dem zugrunde gelegten Differential Flow mit den Abmessungen 2m x 2m bildet sich über dem OP - Tisch die angestrebte Kernzone höherer Luftgeschwindigkeiten aus. Das zeigen die Auswertungen in Bild 5.3.4 und Bild 5.3.5. Dabei stellt sich über dem OP - Tisch eine dominante Abwärtsströmung ein, die auch durch die Umströmung der Lampen nur gering gestört wird.

Die Bewertungen der Schutzgradverläufe nach Bild 5.3.6 und Bild 5.3.7 sowie deren Verteilungen gemäß Bild 5.3.2 zeigen über den gesamten OP - Tisch Werte größer als 5,0. Entgegen den bisherigen Untersuchungen stellen sich mit dem Differential Flow in der Mitte des Tisches (MP-02) deutlich höhere Schutzgrade ein als in den Randbereichen (vgl. Bild 5.3.6 und Bild 5.3.7). Bei dem großflächigen Abwärtsimpuls in der Kernzone hat die Umströmung der aerodynamischen Lampen nur noch einen geringen Einfluss. Die Störungen in den bereits deutlich verkleinerten Nachlaufgebieten werden durch nachgeführte Zuluft weiter verringert, da die Luft auch zwischen den Einzelleuchten der Lampen durchströmen kann (siehe Bild 5.3.4).

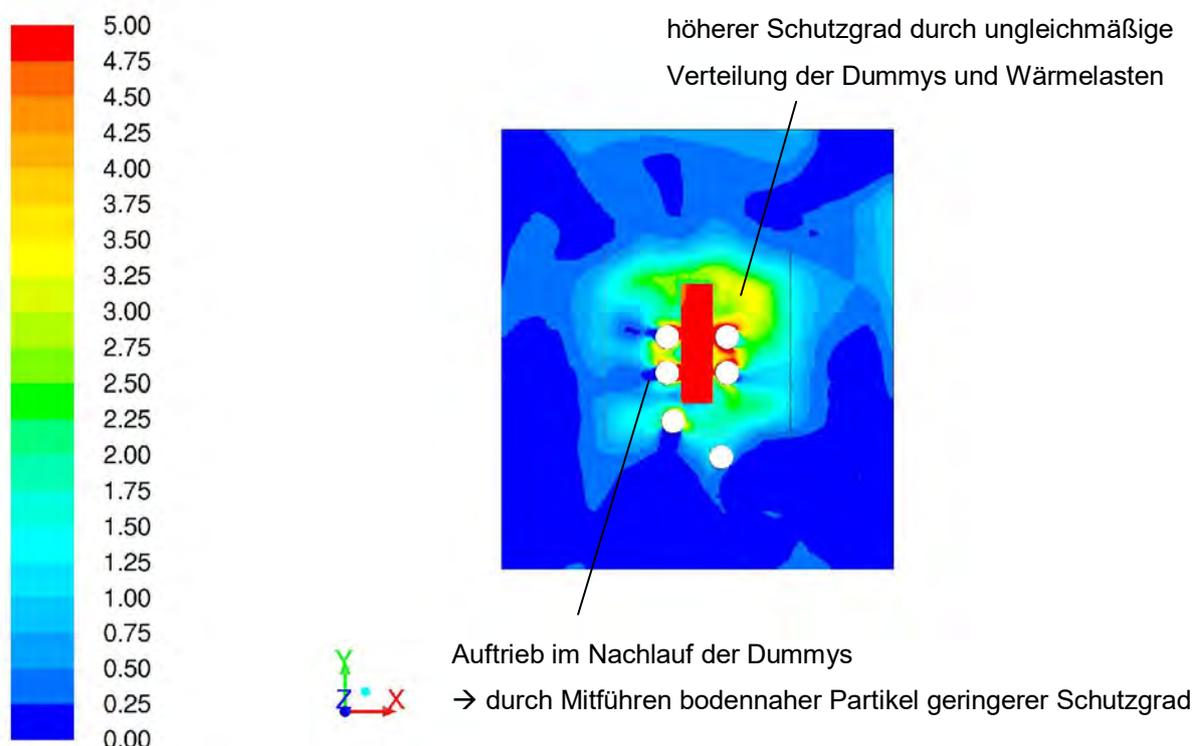


Bild 5.3.2: Schutzgrad [-] auf bzw. knapp über dem OP - Tisch, Differential Flow 2 x 2 und aerodynamische Lampen, Ansicht z = const

Die Messpunkte an den Enden des Tisches dagegen sind bereits (wenn auch gering) durch die Induktion von Umgebungsluft und damit einzelnen Partikeln in den Luftstrahl beeinflusst (Prinzip des Freistrahls). Weiterhin reicht die Kernzone der Zuluft nur bis an die Stirnseiten des OP - Tisches. Durch den geringeren äußeren Abwärtsimpuls in den Randbereichen reißt die Strömung an den Kanten des Tisches ab (siehe Bild 5.3.5). Dabei bilden sich an den Stirnseiten zwei bodennahe Rezirkulationsgebiete aus, über die Partikel induziert und vereinzelt bis auf den Tisch getragen werden. Das verdeutlicht die Darstellung der Partikelverteilungen in Bild 5.3.3.

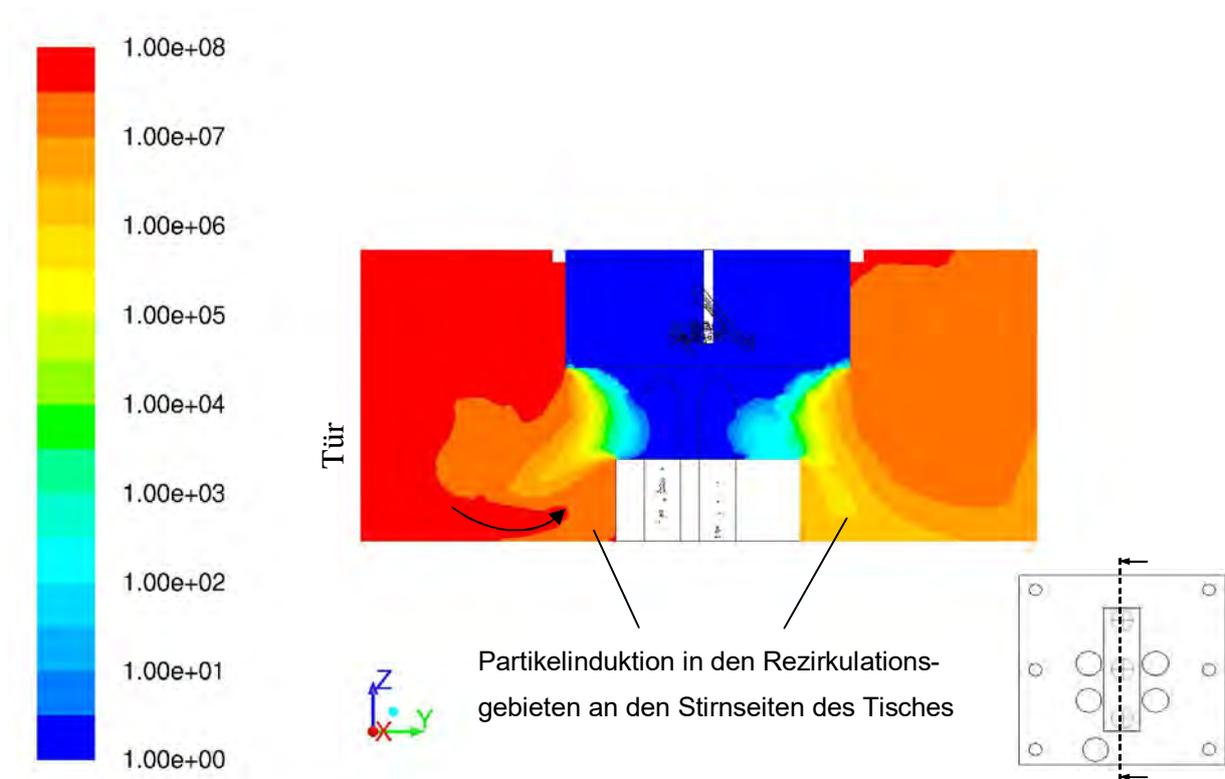


Bild 5.3.3: Partikelkonzentration [P/m^3] in einer Ebene $X = \text{const}$ durch die Mitte des OP - Tisches, Ansicht $x = \text{const}$.

Sowohl die Berechnungen mit Zeitschrittweiten von $\Delta\tau = 10 \text{ sec}$ (Bild 5.3.7) als auch die mit $\Delta\tau = 1,0 \text{ sec}$ (Bild 5.3.6) folgen ähnlichen Schwankungen und haben auch in den berechneten Schutzgraden keine wesentlichen Abweichungen untereinander. Die Partikelverteilungen werden bei den hier angesetzten Bedingungen stärker von der Zuluftströmung und deren Verdrängungseffekten beeinflusst. Der Auftrieb an den Dummies hat, zumindest in Luv zum OP - Tisch, einen wesentlich geringeren Einfluss auf die Strömungsverhältnisse als in den früheren Untersuchungen. Dadurch reduzieren sich auch die instationären Effekte in der Raumströmung, so dass bereits die größeren Zeitschrittweiten die Frequenz der Partikeleinmischungen ausreichend abbilden.

Neben den Verteilungen der Schutzgrade ist in der Auswertung nach Bild 5.3.2 auffallend, dass sich in Lee der Dummies ein Gebiet geringeren Schutzgrades einstellt. Durch die Umströmung der Dummies sind die Geschwindigkeiten in deren Nachlauf gering. Damit einhergehend stellt sich dort eine Auftriebsströmung ein, die dann auch bodennahe Partikel mitführt.

Vergleicht man die Strömungsabrisse an den Stirnseiten des Tisches (Bild 5.3.5) mit denen an der Schürze (Bild 5.3.4), dann fällt auf, dass sich die Strömung vom Vorhang ausgehend am Boden ausbreitet. Das geschieht, obwohl die Schürze höher gelegen ist als die Tischkante. Ursache ist die aus der Kernzone nachströmende Luft, die sich an den Längsseiten des Tisches bereits an den Boden angelegt hat und im Weiteren die Luft in den Außenzonen mitzieht. Dementsprechend ist bei dem hier zugrunde gelegten Zuluftprinzip und den sich einstellenden Strömungsverhältnissen, trotz des größeren Zuluftimpulses gegenüber früheren Varianten, der Hintergrundwirbel in der Außenströmung schwächer ausgeprägt.

Die Momentanwerte der Schutzgrade zeigen einen deutlich stabileren Verlauf als in den Untersuchungen mit homogenen Zuluftgeschwindigkeiten und kompakten Lampen. Das geschieht zum einen weil die Lampenumströmungen keinen allzu großen Nachlauf erzeugen. Zum anderen wirken die höheren Geschwindigkeiten in der Kernzone der Zuluft dominant gegenüber anderen Effekten, wie z. B. dem Auftrieb an den Dummies. Die Schwankungen des Schutzgrades sind in diesem Fall eher der ebenen Staupunktströmung auf den OP - Tisch geschuldet (siehe Bild 5.3.5). Das heißt aber auch, dass sich die Partikelverteilungen weiter stabilisieren werden und die Schutzgrade konstanter und u. U. auch auf höherem Niveau verlaufen, wenn die großflächige Staupunktströmung so nicht zustande kommt. Diese Bedingungen sind beispielsweise gegeben, wenn ein Patient auf dem Tisch liegt. Bei der sich dadurch einstellenden keilförmigen Umströmung des Patienten fließt die Luft an den Seiten des Tisches günstiger ab (keine plötzliche Querschnittsänderung durch die Tischoberfläche).

Die Strömung mit dem Differential Flow bewirkt eine gute Schutzwirkung über dem OP - Tisch und damit einhergehend große Konzentrationsunterschiede der Partikel zwischen dem Schutzbereich und der äußeren Raumzone. Dabei ergeben sich im Zuluftgebiet und über dem Tisch Massenkonzentrationen im Wertebereich von etwa 10^{-20} kg(P) / kg(L) (und 10^{-12} kg(P) / kg(L) im Außenbereich). Diese geringen Konzentrationen in Kombination mit den großen Konzentrationsgradienten werden auch mit dem double - precision - Löser nicht mehr abgebildet. Aus diesem Grund musste hier die Partikeleingabe in ppm erfolgen. Der Partikelmassenstrom wurde deshalb um den Faktor 10^6 erhöht (vgl. dazu Abschnitt 4.5.1).

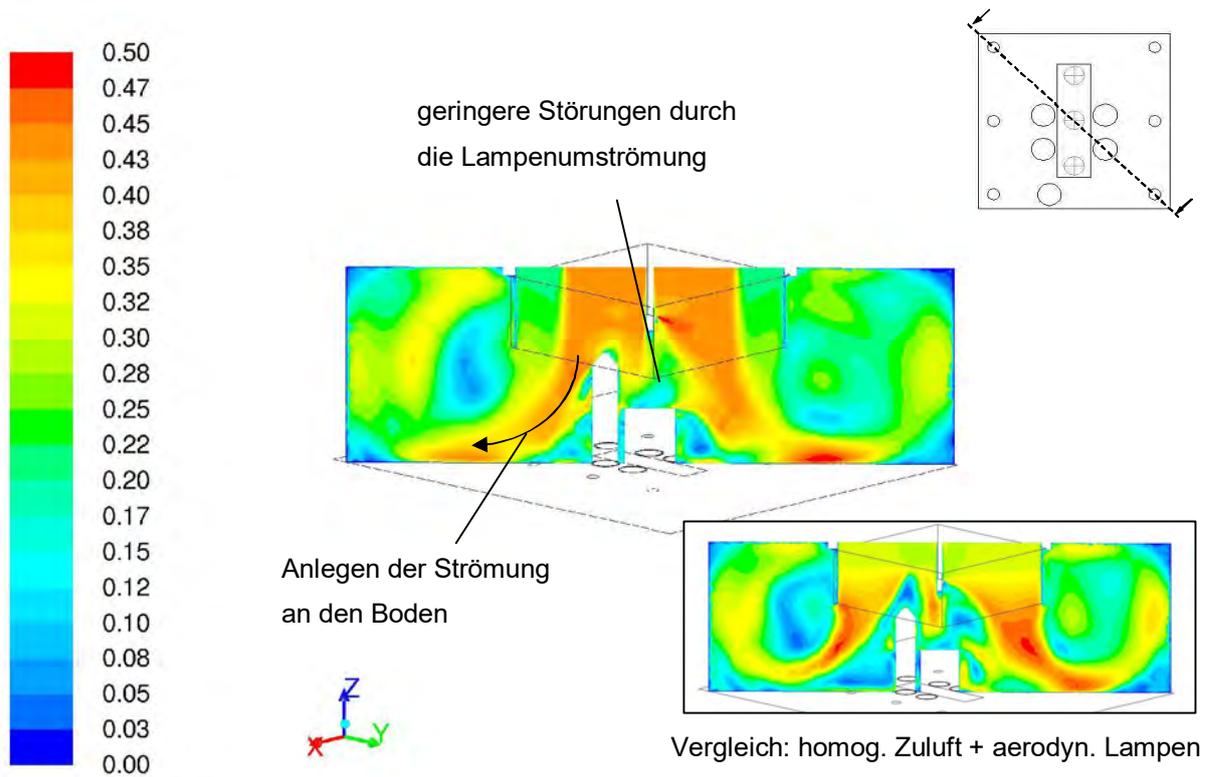


Bild 5.3.4: Luftgeschwindigkeit [m/s] in einer XY - Schnittebene durch den OP - Raum

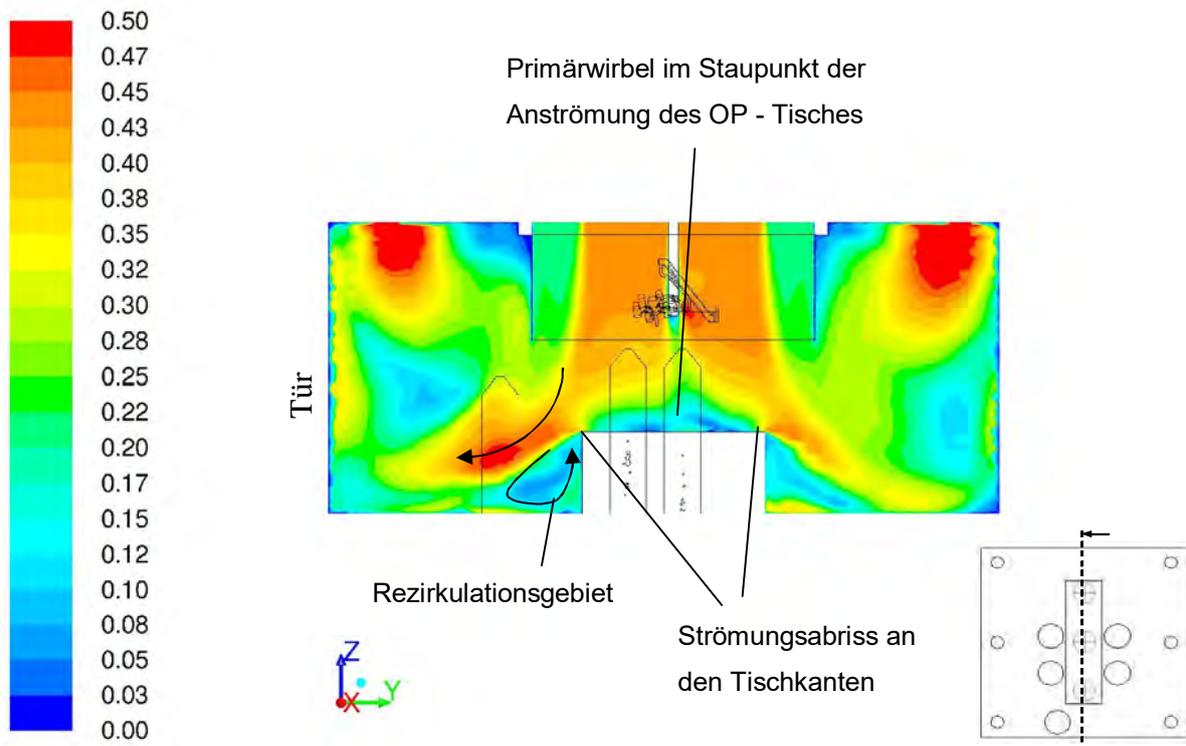


Bild 5.3.5: Luftgeschwindigkeit [m/s] in einer Ebene $X = \text{const}$ durch die Mitte des OP - Tisches, Ansicht $x = \text{const}$.

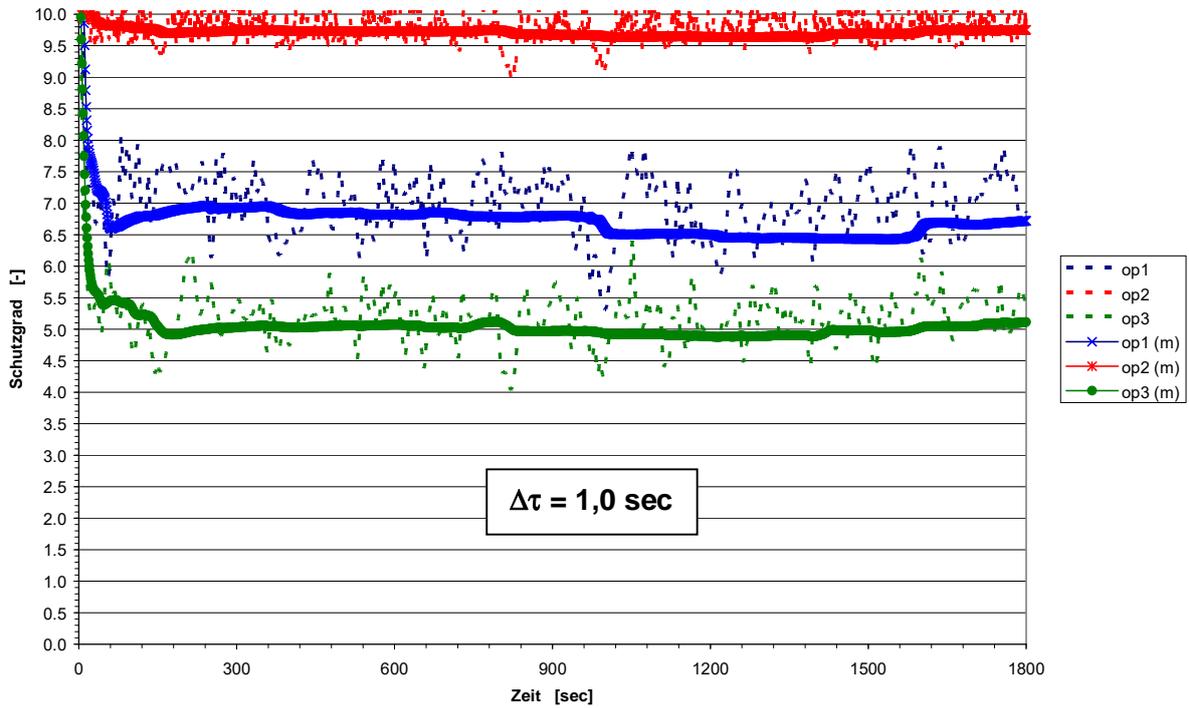


Bild 5.3.6: Verlauf des Schutzgrades an den Messpunkten auf dem OP - Tisch (Momentanwerte und 10 Minuten - Mittelungen) bei einer Zeitschrittweite $\Delta\tau = 1,0 \text{ sec}$

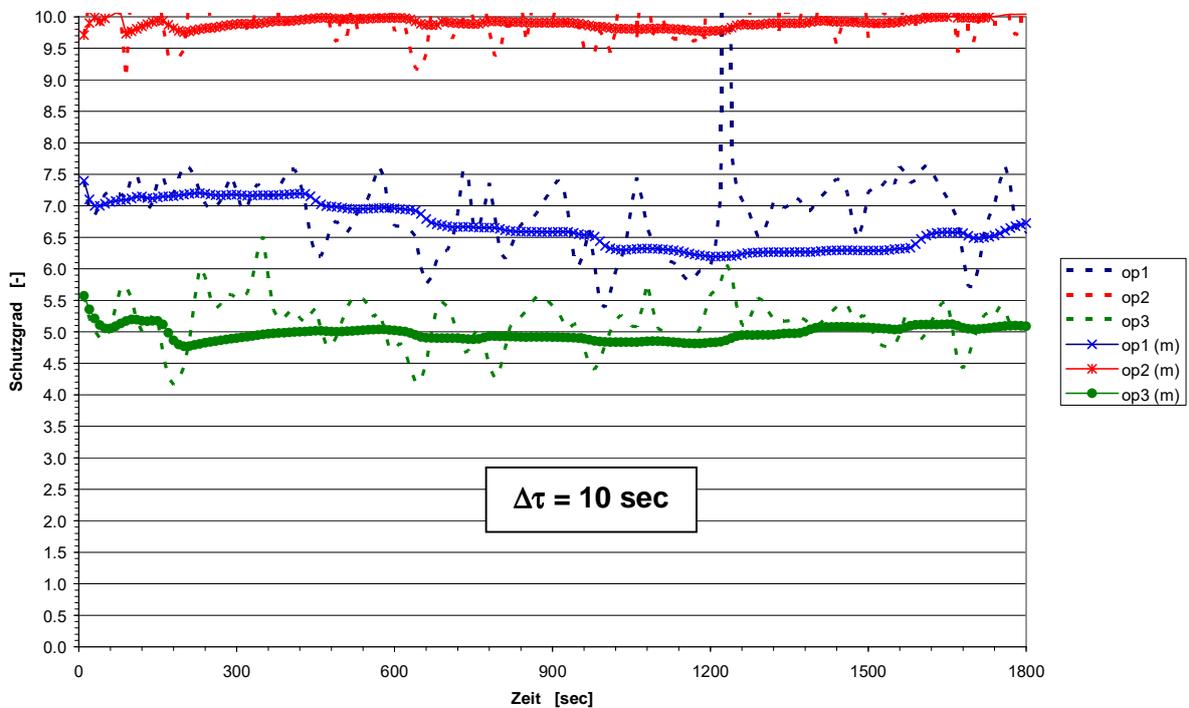


Bild 5.3.7: Verlauf des Schutzgrades an den Messpunkten auf dem OP - Tisch (Momentanwerte und 10 Minuten - Mittelungen) bei einer Zeitschrittweite $\Delta\tau = 10 \text{ sec}$

5.4 Optimierte OP - Lampen und Differential Flow 2 x 1

Die Untersuchungen gemäß Abschnitt 5.3 (Differential Flow 2m x 2m und Einsatz aerodynamischer Lampen) haben sehr gute Schutzwirkungen mit hohen Gradienten zwischen dem äußeren Raumbereich und der Operationszone aufgezeigt. Die Kernzone der Zuluft wurde dabei mit einer Fläche von insgesamt 4 m² und einer Breite über die Dummies hinaus sehr groß gewählt. Aus diesem Grund soll in der folgenden Betrachtung ein kleineres Feld erhöhter Zuluftgeschwindigkeiten zugrunde gelegt werden.

Die Abmessungen der Kernzone sind nun 2m x 1m [6]. Sie grenzt in ihrer Längsausdehnung weiterhin an die Stirnseiten des Tisches. In der Breite schließt sie über den Dummies und den Lampen ab. Die Übersicht in Bild 5.4.1 verdeutlicht die Verteilungen der Zuluftgeschwindigkeiten und die Lage der Kernzone.

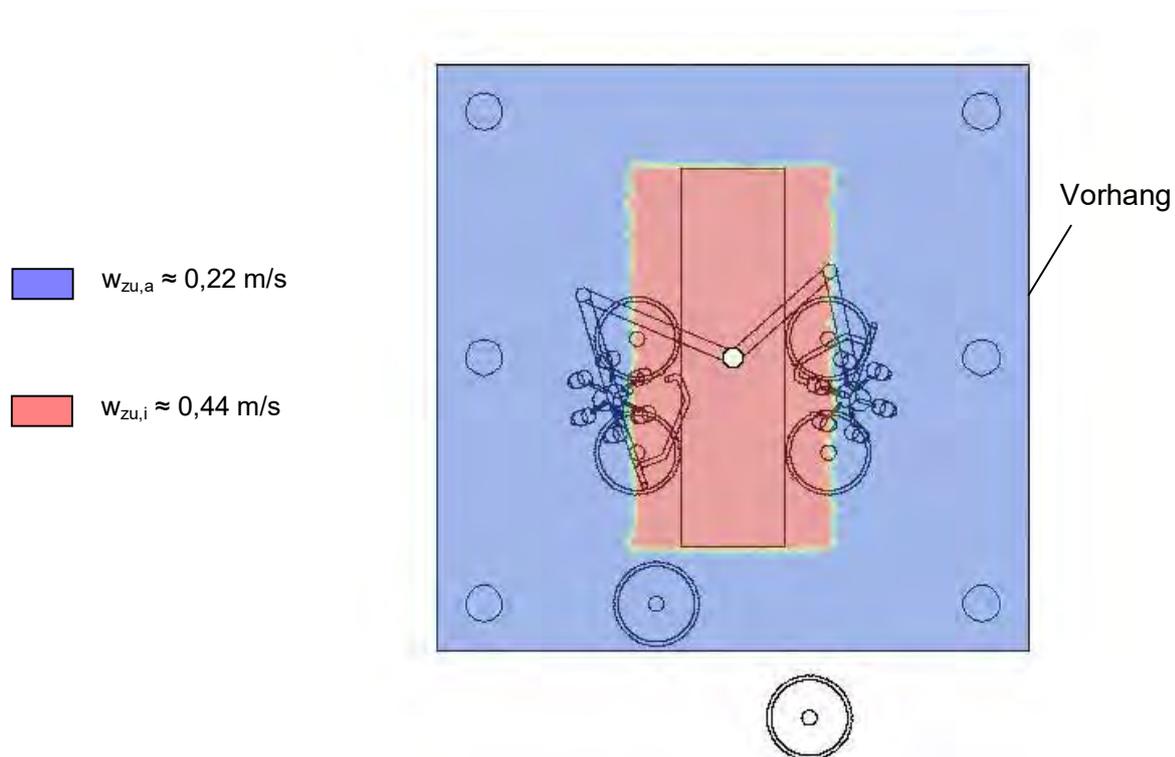


Bild 5.4.1: Aufteilung der Strömungsgeschwindigkeiten [m/s] über die Zuluftdecke, Ansicht $z = \text{const}$ (Modell mit optimierten / aerodynamischen OP - Lampen)

Da die Zuluftgeschwindigkeiten gegenüber dem Differential Flow 2x2 im Wesentlichen gleich angesetzt werden, verringert sich der Zuluftvolumenstrom auf insgesamt 9.200 m³/h.

Auch wenn die Änderung des Zuluftvolumenstromes im Verhältnis zu den Partikelemissionen nur gering ist, wurde die Referenzkonzentration in der Schutzgradberechnung angepasst. Sie ergibt sich bei den zugrunde gelegten 9.200 m³/h Zuluft nun auf $C_{\text{Ref,neu}} = 4,11 \cdot 10^7 \text{ P/m}^3$ (gegenüber bisher $C_{\text{Ref}} = 3,53 \cdot 10^7 \text{ P/m}^3$):

$$C_{\text{Ref,neu}} = Q_P / (V_{\text{zu}} / 60) = 6,3 \cdot 10^9 / (9.200 / 60) = \underline{4,11 \cdot 10^7 \text{ P/m}^3}$$

$$[\text{P/m}^3 = \text{P/min} / (\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{min}/\text{h})]$$

Die Auswertungen der Luftgeschwindigkeiten in Bild 5.4.2 insbesondere um den Vorhang und den OP - Tisch zeigen, dass mit der verkleinerten Kernzone die Strömungsverhältnisse weniger stabil und zuluftdominiert sind als in der Variante des Differential Flow 2 x 2 (vgl. Abschnitt 5.3). Da das Feld höherer Zuluftgeschwindigkeiten nicht über die gesamte Fläche der Dummypositionen reicht, stellt sich jeweils im Leegebiet temporär eine Auftriebsströmung. In der direkten Anströmung werden diese Effekte dagegen weitestgehend unterbunden. Besonders ausgeprägt ist das in der Mitte des OP - Tisches. Dort bewirken der Auftrieb und die parallele Dummyanordnung sogar eine Einschnürung der Zuluftströmung über dem Tisch.

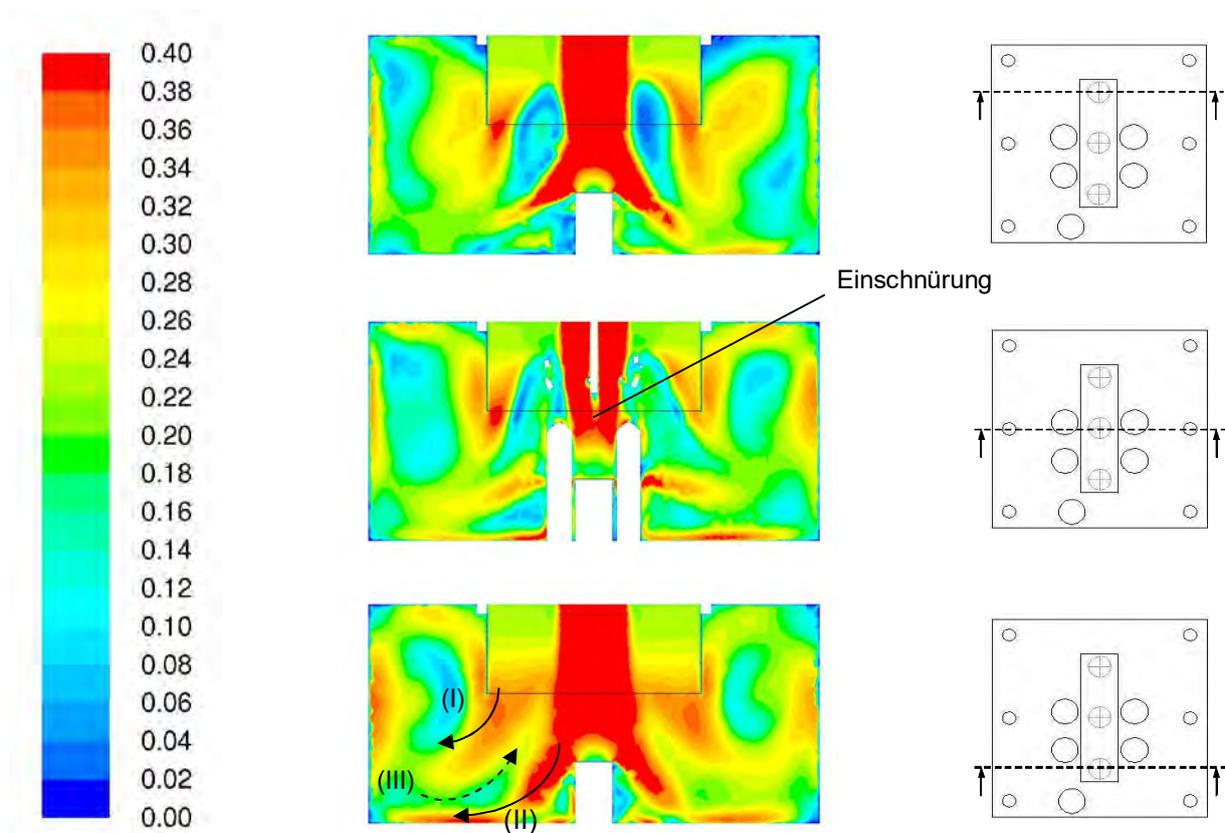


Bild 5.4.2: Luftgeschwindigkeit [m/s] in drei Ebenen Y = const. durch den OP - Tisch

Durch die Auftriebsströmungen an den Dummies wird die äußere Zuluftströmung eingeschnürt. Sie beschleunigt in den Randbereichen und reißt an der Schürze ab. (Im Unterschied zu dem Diff. Flow 2x2 wird sie aufgrund der Auftriebsströmungen nicht an den Boden angesogen.) Dadurch bilden sich um den Vorhang drei wesentliche Strömungsgebiete aus (vgl. Bild 5.4.2):

- I. Strömungsabriss an der Schürze durch die äußere Zuluftströmung ($w_{zu,a} = 0,22$ m/s)
- II. Anlegen der Zuluftströmung aus der Kernzone an den Boden und Abströmen nach außen ($w_{zu,i} = 0,44$ m/s)
- III. Nachführen der durch den Auftrieb aufsteigenden Luft aus der äußeren Raumzone zwischen den Strömungsgebieten (I) und (II)

Infolge der aus dem äußeren Raumbereich nachströmenden Luft nach Punkt (III) werden Partikel in das Leegebiet der Dummies getragen. Sie mischen dann im Weiteren in die Zuluft ein und werden dadurch bis über den OP - Tisch getragen (siehe Bild 5.4.3).

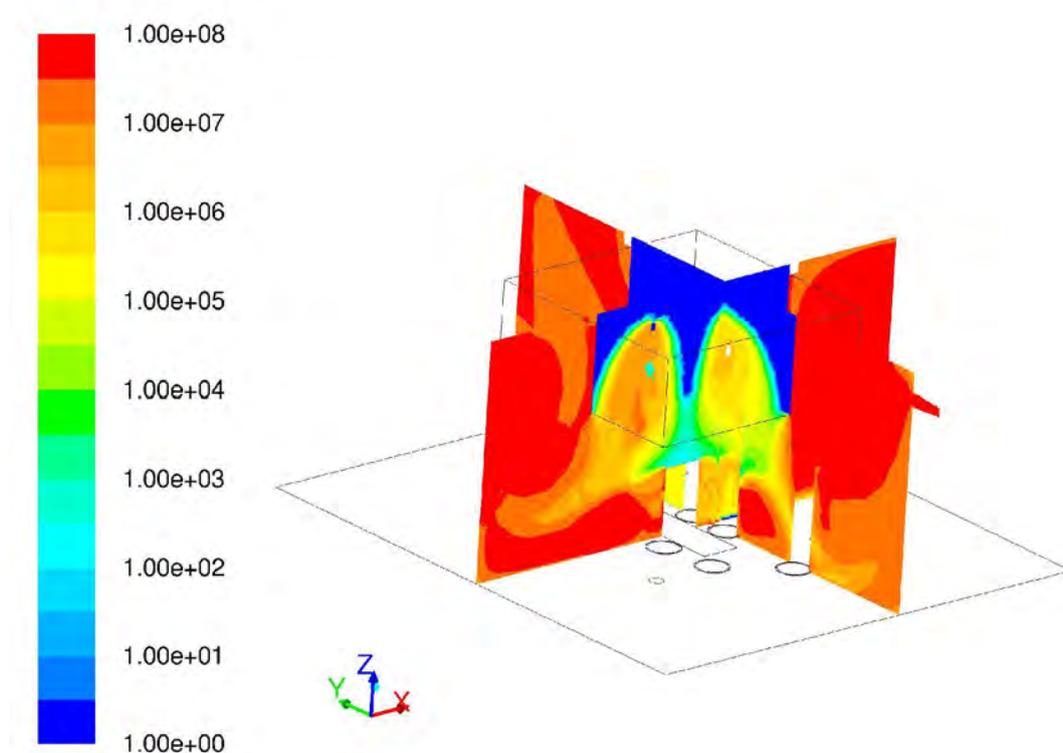


Bild 5.4.3: Partikelkonzentration [P/m^3] in zwei Ebenen (Schnitt durch die Dummies 3 + 5, den OP - Tisch und die Lampen), Ansicht 3D (logarithmische Skala)

Ausgehend von den beschriebenen Strömungsbedingungen und dem, gegenüber Abschnitt 5.3, höheren Partikeltransport in den Schutzbereich weisen auch die Schutzgrade auf dem OP - Tisch etwas geringere Werte auf. Bei der hier angesetzten Zuluftverteilung und dem Volumenstrom von 9.200 m³/h wird aber weiterhin eine sehr gute Schutzwirkung von minimal SG \approx 4,5 erreicht (siehe Bild 5.4.4).

Obwohl die Strömungsverhältnisse gemäß den oben geführten Beschreibungen zeitlich veränderlich und zum Teil auch intermittierend zwischen den Messpunkten und den Dummys sind, weisen die Schutzgrade mit SG \approx 4,5 - 5,0 an den drei Messpunkten sehr gute Werte auf. Die Partikelverteilungen sind über dem OP - Tisch gleichmäßiger verteilt als bei dem Differential Flow 2 x 2 (vgl. Abschnitt 5.3, Bild 5.3.6 und Bild 5.3.7). Das geschieht, da die Partikel nicht direkt auf den OP - Tisch getragen werden. Sie gelangen vielmehr erst oberhalb der Dummys in die Zuluftströmung.

Durch die Auftriebsströmung oberhalb der Dummys stellt sich dort eine der Zuluft entgegen gerichtete Strömung ein. Das verringert den Abwärtsimpuls und ruft zusätzliche Turbulenz in diesem Bereich hervor. Die Partikel verteilen sich dadurch über die Länge des Tisches und werden dort durch Verdrängung und Verdünnung abgebaut. Dieser Effekt dämpft die Schwankungen in der Auftriebsströmung (und damit des Partikeltransportes aus der Außenzone), so dass die Schutzgrade wie beschrieben insgesamt recht gleichmäßig verteilt sind.

Die Bewertung des Schutzgrades in Höhe des OP - Tisches nach Bild 5.4.5 zeigt auf Seite der Dummys 1 und 2 geringere Werte als auf der anderen Stirnseite des Tisches. Die größere spezifische Wärmelast und die Positionen außerhalb der Kernzone höherer Zuluftgeschwindigkeiten bewirken dort eine stärkere Auftriebsströmung. Damit geht dann auch ein höherer Partikeltransport einher.

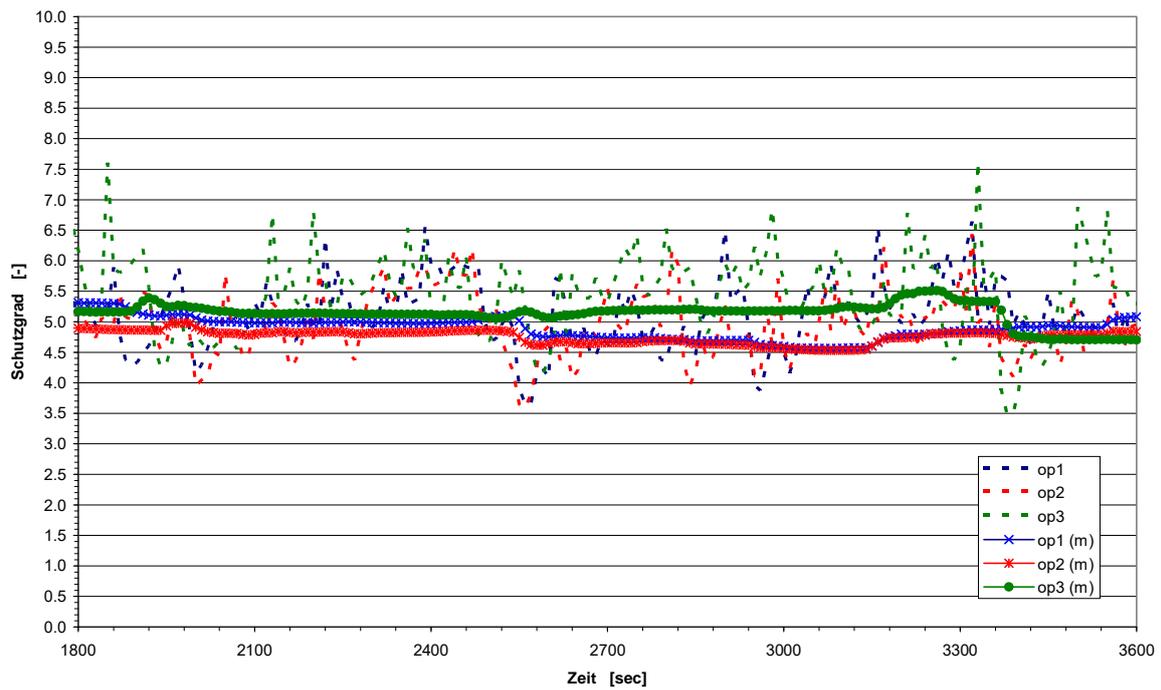


Bild 5.4.4: Verlauf des Schutzgrades an den Messpunkten auf dem OP - Tisch (Momentanwerte und 10 Minuten - Mittelungen)

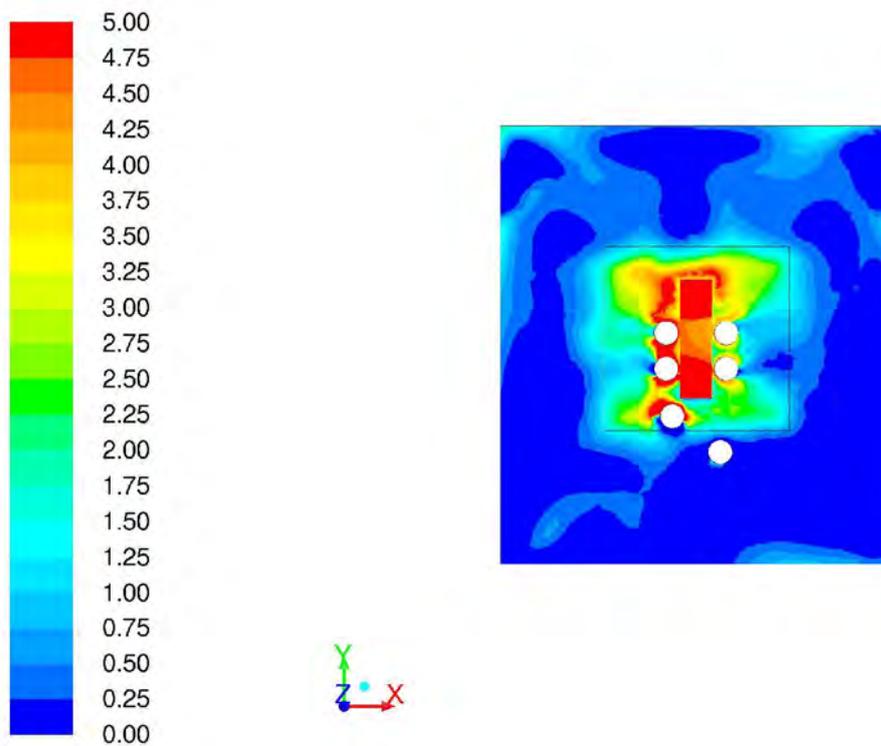


Bild 5.4.5: Schutzgrade [-] auf bzw. knapp über dem OP - Tisch (Momentanwert), Ansicht z = const.

6 Zusammenfassung der Optimierungen in den CFD - Simulationen

Die Berechnungen und Validierungen für CFD - Simulationen in OP - Räumen haben gute Übereinstimmungen mit Messungen und den Ergebnissen des GiG I aufgezeigt. Das gilt sowohl für die Berechnungen des Standard OP - Raumes aus dem GiG I nach Abschnitt 4 als auch für Randbedingungen die eine bessere Schutzwirkung erzielen gemäß Abschnitt 5.

Die Untersuchungen wurden sowohl für verschiedene räumliche und zeitliche Diskretisierungen wie auch mit unterschiedlichen Modellierungsansätzen der Wärmelasten und Turbulenzmodellen durchgeführt. Hierbei hat sich vor allem die Wärmeabgabe an den thermisch aktiven Oberflächen als ein dominierendes Kriterium für die Strömung im Schutzbereich und damit einhergehend auf die Schutzgradbestimmung herausgestellt.

Die sich einstellende Auftriebsströmung sowie der damit induzierte Partikeltransport bestimmen maßgeblich den Schutzgrad auf dem Operationstisch. Davon ausgehend ist die Modellierung des Wärmeeintrages an den Oberflächen von entscheidender Bedeutung für das Ergebnis. Wenn die Wärmeübergänge, zum Beispiel durch ein ungünstiges Oberflächennetz, nur unzureichend bestimmt werden, dann bildet sich eine geringere Auftriebsströmung aus. Über die werden dann auch entsprechend weniger Partikel induziert und die Schutzgrade zu hoch berechnet. Diese Abhängigkeit kann umgangen werden, indem der Wärmeeintrag nicht über Temperaturvorgaben an den Oberflächen erfolgt, sondern in den wandnahen Zellen über einen (volumetrischen) Energiequellterm.

Als zweites wesentliches Ergebnis haben die Standardformulierungen des $k - \varepsilon$ - Modells (*Standard $k - \varepsilon$* und *Realizable $k - \varepsilon$*) gegenüber dem SST $k - \omega$ - Modell stark dämpfende Eigenschaften in der Raumströmung aufgezeigt. Ursache sind zum einen der Charakter des $k - \varepsilon$ - Modells, zum anderen aber in wesentlichem Umfang auch eine unzureichende Berechnung der wandnahen Strömungen (Grenzschichtmodellierung) an den thermischen Oberflächen. Dadurch wird der Wärmeübergang zu gering bestimmt und die Auftriebsströmung kann sich nicht in ausreichendem Maße ausbilden.

Bei der Anwendung der RNG $k - \varepsilon$ - Modells wurden dagegen analoge Ergebnisse zum SST $k - \omega$ - Modell erzielt. Bei diesem Ansatz werden sowohl die wandnahen Auftriebströmungen aber auch die Stromlinienkrümmungen an den Dummies und um den Vorhang besser abgebildet als mit dem Standard und dem Realizable $k - \varepsilon$ - Modell.

Neben den Berechnungen mit den $k - \varepsilon$ - Modellen und dem SST $k - \omega$ - Modell wurde auch die Anwendung des SAS Modelles untersucht. Dieses hat ebenfalls sowohl hinsichtlich der Raumströmung wie auch der Schutzgrade gute und mit den Messungen und Simulationen des GiG I übereinstimmende Ergebnisse erzielt. Da dieses Modell jedoch in der Anwendung noch relativ neu ist, sind mit ihm weitere Verifizierungen erforderlich.

Insgesamt lässt sich aber festhalten, dass bei einem modellierten Energieeintrag in den wandnahen Zellen der Oberflächen (insbesondere an den Dummies), die Raumströmung und Partikelverteilungen / Schutzgrade sowohl von der Vernetzung wie auch von der Turbulenzmodellierung unabhängiger sind als bei der Vorgabe von Oberflächentemperaturen bzw. Temperaturprofilen.

6.1 Instationäre Bewertungen

Die Zeitschrittweite hat in den Ergebnissen der Untersuchungen nur einen untergeordneten Einfluss aufgezeigt. Bei einer größeren zeitlichen Auflösung werden zwar einzelne Strömungseffekte nur gedämpft wiedergegeben, die allgemeinen Strömungsverhältnisse werden jedoch ausreichend aufgelöst. Die Partikelverteilungen und Schutzgrade erzielen, in Anbetracht der deutlich geringeren Rechenzeiten, sehr gute Ergebnisse.

Die vergleichende Übersicht in Bild 6.1.1 verdeutlicht den Vorteil größerer Zeitschrittweiten. Insbesondere Variantenstudien unterschiedlicher Lüftungs- oder Randbedingungsszenarien lassen sich so einfacher, schneller und wirtschaftlicher durchführen. Es gilt aber zu beachten, dass für eine detaillierte Analyse mit allen sich einstellenden Strömungseinflüssen dementsprechend auch weiterhin geringere zeitliche Auflösungen erforderlich sind. Die Studien zu den Zeitschrittweiten haben aber gezeigt, dass mit $\Delta\tau = 1,0$ sec alle wesentlichen Effekte abgebildet werden.

Die Notwendigkeit einer feinen zeitlichen Auflösung nimmt mit einer dominanten Grundströmung über dem OP - Tisch weiter ab. Das ist beispielsweise mit dem Differential Flow gegeben. Bei diesem Zuluftprinzip unterbinden die höheren Geschwindigkeiten in der Kernzone und die stabiler ausgebildete Verdrängungsströmung vom OP - Tisch weg die Auftriebsströmung an den Dummies. Dadurch bilden sich die instationären Auftriebsvorgänge nicht aus und müssen dementsprechend auch nicht aufgelöst werden. Effekte in kleineren Zeitskalen haben dagegen unter diesen Bedingungen keinen maßgeblichen Einfluss auf die Partikelverteilungen.

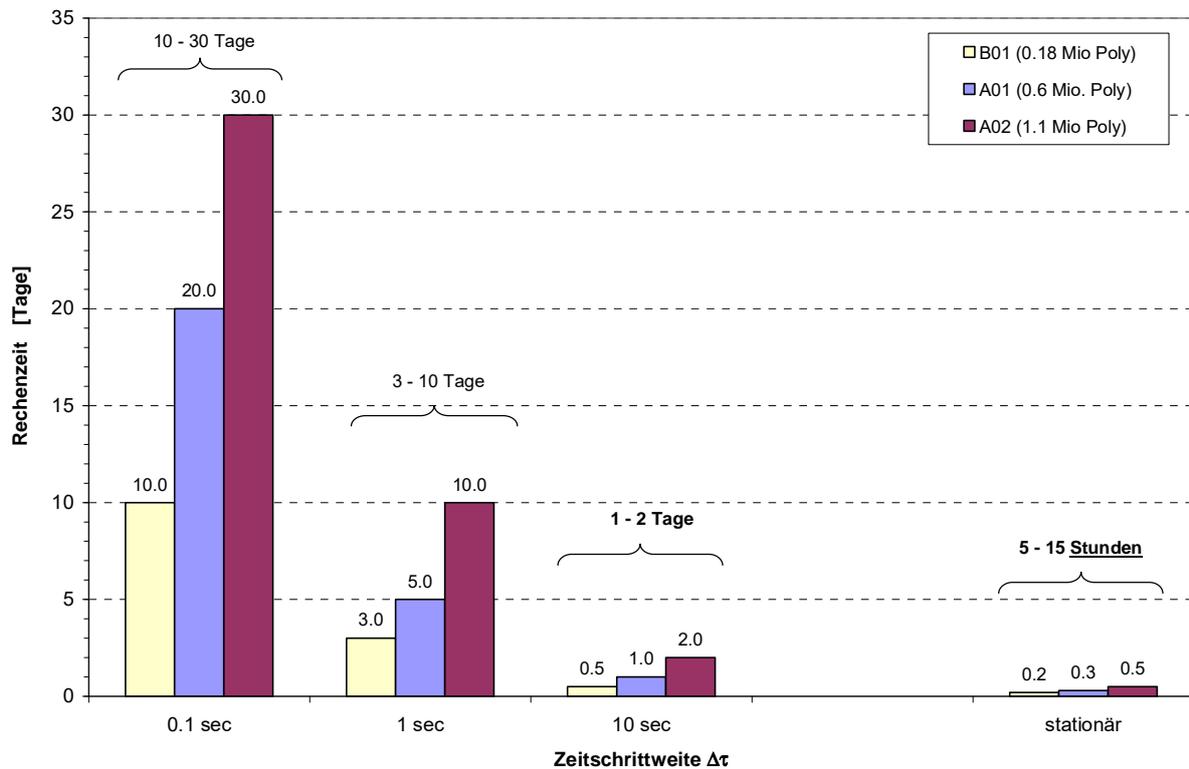


Bild 6.1.1: Vergleich der Rechenzeiten der Modellgrößen für unterschiedliche Zeitschrittweiten sowie stationäre Bewertungen, Realzeit = 30 Minuten [12]

6.2 Stationäre Bewertungen

Obwohl die Raumströmung und die Strömungseffekte des Partikeltransportes deutlich instationär sind, wurden die Untersuchungen ebenfalls mit einem stationären Berechnungsansatz durchgeführt. Dabei können dann einzelne Strömungseffekte, wie zum Beispiel der intermittierende Auftrieb an den Personen, nicht abgeleitet werden. Die erzielten Schutzgrade sind jedoch, bei einer geeigneten Mittelwertbildung über die Iterationszahl, gut mit den instationären Berechnungen vergleichbar. Das zeigen gemäß Bild 6.2.1 sowohl die Bewertungen für den Standard OP - Raum des GiG I als auch die Variationen mit einer bodennahen Ablufferfassung und einer damit einhergehenden ruhigeren Hintergrundströmung.

Die Aussagekraft einer stationären Simulationen nimmt mit einer dominanten Zuluftströmung und nur geringen Auftriebseffekten weiter zu. Wenn diese zeitlich abhängigen Partikeltransporte unterbunden werden, dann ist die Raumströmung insgesamt stabiler und die Partikelverteilungen folgen eher den globalen Strömungsverhältnissen. Rezirkulationen zum Beispiel in der Staupunktströmung über dem OP - Tisch und die damit einhergehenden mittleren Partikelverteilungen werden auch mit einem stationären Ansatz gut wiedergegeben.

Ausgehend von den oben geführten Erläuterungen und Abhängigkeiten können mit den stationären CFD - Simulationen zwar keine absoluten Aussagen getroffen werden, für die Durchführung von Vergleichsstudien mit dem Ziel „besser oder schlechter als“ sind sie jedoch durchaus geeignet. Die Anwendung der stationären Berechnungen mit dem Ziel von Parameterstudien ist insbesondere angesichts des nur geringen Rechenaufwandes von wenigen Stunden geeignet (siehe Bild 6.1.1).

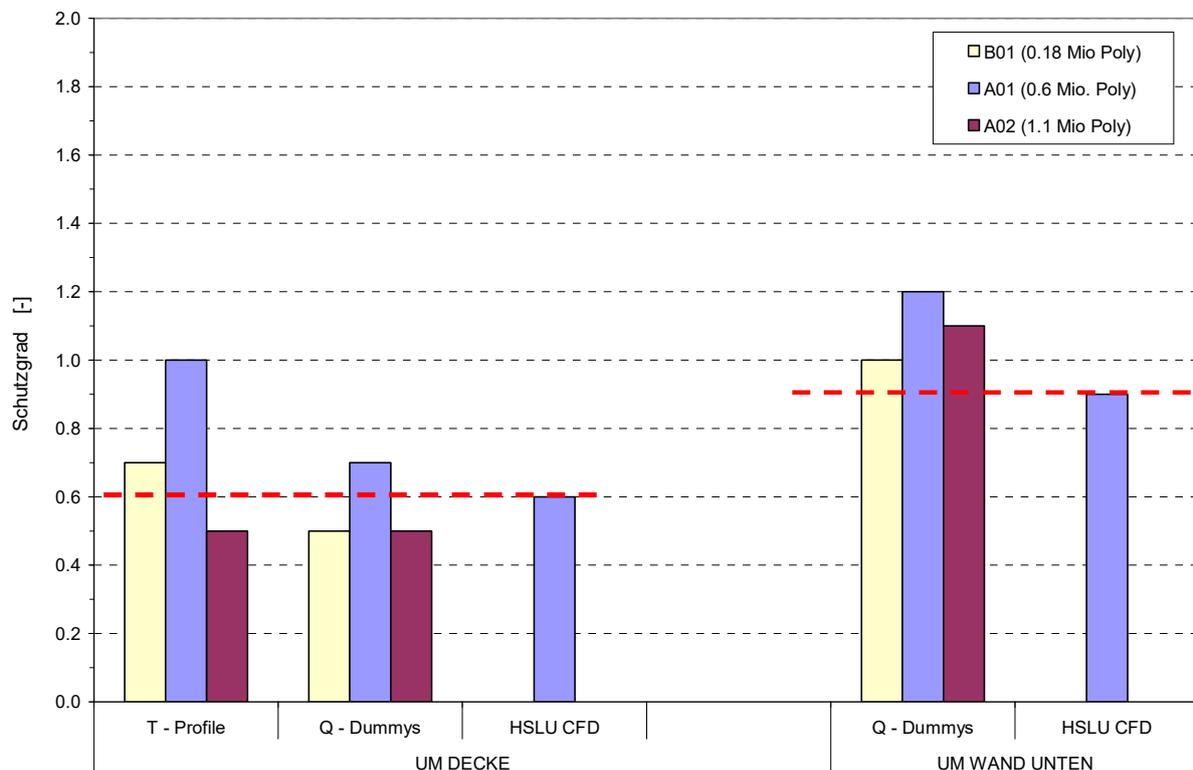


Bild 6.2.1: Übersicht der Schutzgrade in stationären Berechnungen für den Standard OP - Raum (*UM DECKE*) und dem Szenario der bodennahen Absaugung des Umluftanteils (*UM WAND UNTEN*)

7 Best - Practice - Guideline

Die nachfolgende empfohlene Vorgehensweise für CFD - Simulationen in OP - Räumen gilt für das Programm *Ansys Fluent*TM. Die Übertragbarkeit der gewählten Ansätze insbesondere der Zeitschrittweite auf andere Simulationsprogramme muss nachgewiesen werden. Für die Bewertung der Schutzwirkung bilden die Vorgaben nach VDI 2167 - 1 die Grundlage. Davon abweichende Vorgaben müssen im Projekt abgestimmt werden.

7.1 Geometrisches Modell

Grundlage des CFD - Modells ist der reale OP - Raum mit dessen Abmessungen und Einbauten. Gleiches gilt für die Zu- und Abluftflächen. Die Darstellung in Bild 7.1.1 zeigt beispielhaft das Geometriemodell eines OP - Raum mit einer homogenen TAV - Decke, Dummies und konventionellen OP - Lampen (Anordnung nach VDI 2167 - 1).

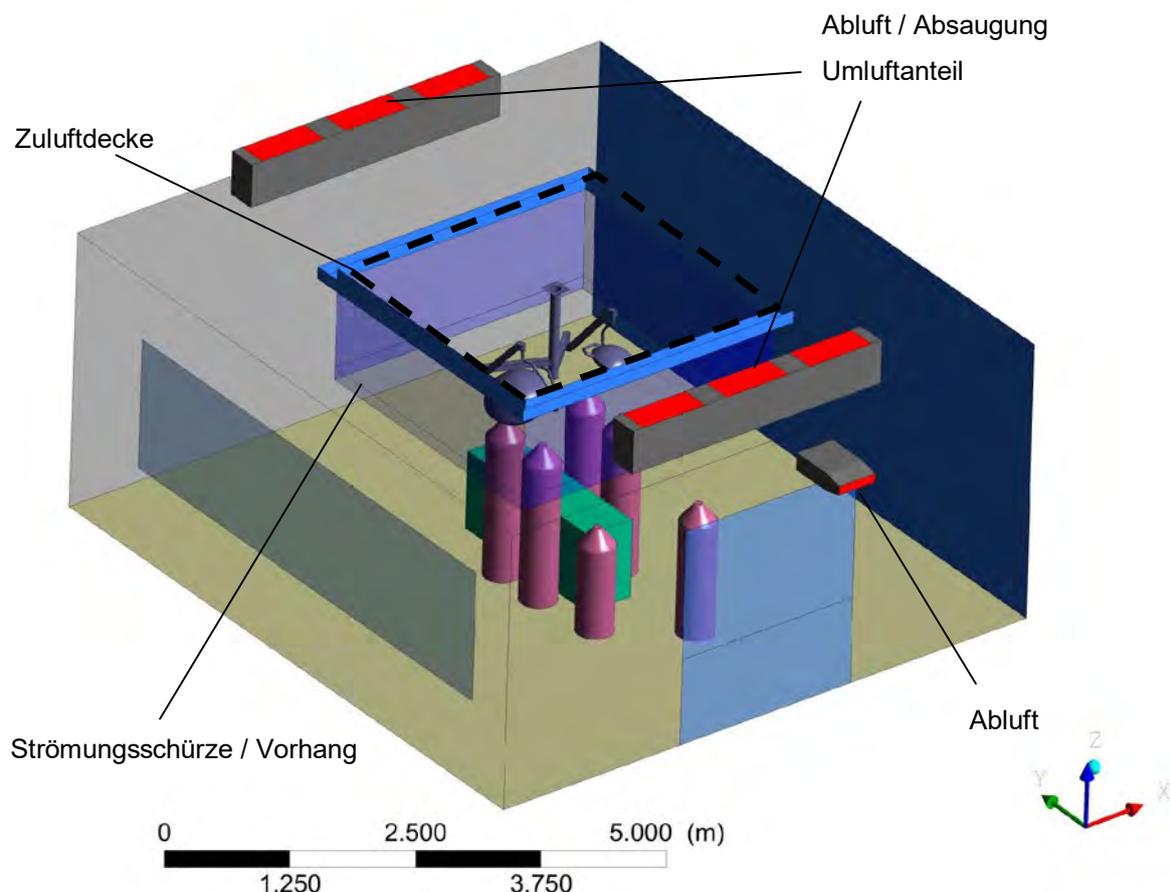


Bild 7.1.1: Geometrisches Modell eines OP - Raumes

Die Raumgeometrie sollte auf strömungsrelevante Bauteile und Einbauten vereinfacht werden, da somit in erheblichem Maße Zellvolumina und Rechenzeit eingespart werden können. So hat sich zum Beispiel gezeigt, dass bei der Verwendung von kompakten OP - Lampen deren Halterungen nur einen untergeordneten Einfluss auf die Strömungsverhältnisse über dem OP - Tisch haben. Die Störungen bei der Umströmung dieser Lampen sind signifikant größer als die der Aufhängungen. Dagegen müssen sie bei modernen, aerodynamisch geformten Leuchten durchaus berücksichtigt werden.

Die Positionen und Ausrichtungen der Dummies und OP - Lampen erfolgt, soweit nicht anders vereinbart, nach den Musterlastanordnungen der VDI 2167 - 1 (siehe Bild 7.1.2 und Bild 7.1.3). In der werden zylindrischen Dummies mit folgenden Abmessungen definiert:

Dummy 1	H = 1,5 m	;	D = 0,4 m
Dummy 2	H = 1,2 m	;	D = 0,4 m
Dummy 3/4/5/6	H = 1,8 m	;	D = 0,4 m

Die Lampen sollten mit ihren realen Abmessungen und Geometrien modelliert werden, die den Herstellerangaben zu entnehmen sind.

Die Volumina der Dummies und der Lampen werden aus dem Raumvolumen abgezogen, damit ihre Versperrungen und damit einhergehenden Strömungseinflüsse ausreichend berücksichtigt werden. Die Vorgabe von thermischen Lasten erfolgt später direkt auf den Oberflächen oder in den wandnahen Zellen.

Die Schutzwirkungen können für einen äußeren oder inneren Partikeleintrag nach VDI 2167 - 1 bestimmt werden. Die Positionen der Generatoren sind für die beiden Musterlastanordnungen ebenfalls in Bild 7.1.2 und Bild 7.1.3 dargestellt.

Wenn ein bodenlanges Tuch auf dem OP - Tisch zugrunde gelegt wird, kann das als starr angesehen werden. Der Tisch wird dann als Quader modelliert, dessen Volumen vom Raum abgezogen wird. Bei einem kürzeren OP - Tuch ist der Tisch über dem Boden entsprechend offen zu gestalten, damit die Querströmungen ausreichend abgebildet werden.

Neben den beschriebenen Versperrungen und Lasteinträgen ist es häufig sinnvoll, einzelne Flächen wie z. B. Fenster und Türen separat darzustellen. Das gilt insbesondere für thermisch aktive Flächen wie z. B. Wandheizungen.

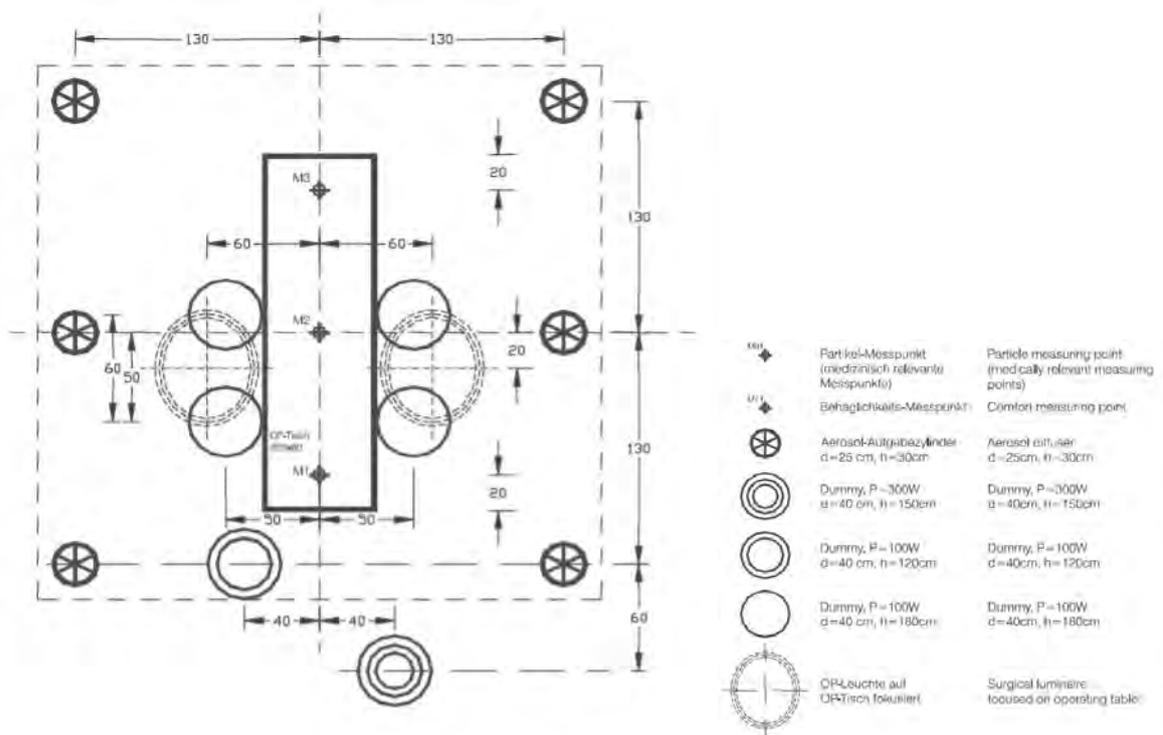


Bild 7.1.2: Musterlastanordnung zur Prüfung der Schutzwirkung gegen Lasteintrag von außen [2]

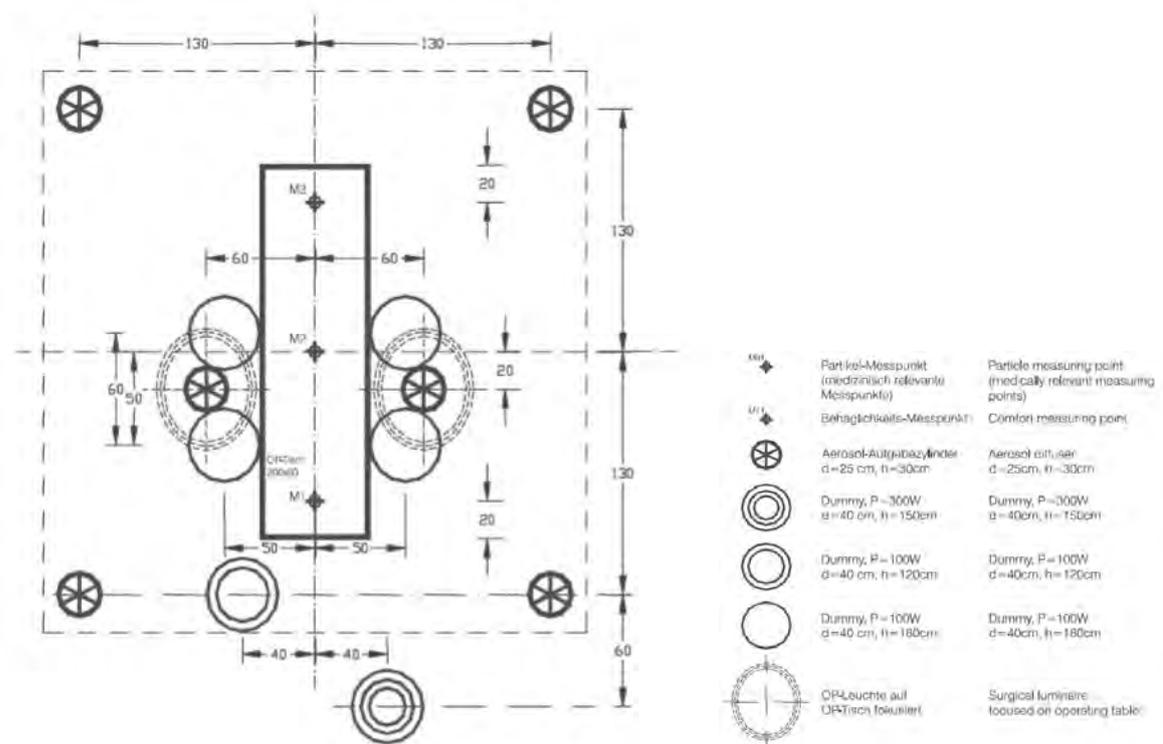


Bild 7.1.3: Musterlastanordnung zur Prüfung der Schutzwirkung gegen Lasteintrag von innen [2]

7.2 Netzgenerierung

In den CFD - Simulationen wird das Raumvolumen in eine finite Anzahl von Zellen unterteilt, über die dann die Gleichungen zur Charakterisierung der Strömungsverhältnisse (Masse und Turbulenz), der Temperatur (Energie und Strahlung) und der Partikelverteilungen (Spezies oder *Additional Scalars*) gelöst werden. Dieser Ansatz verdeutlicht den Zwiespalt in der Modellierung: Für eine exakte Berechnung der Raumströmung inklusive aller lokaler Einflüsse muss der Raum mit kleinen Zellvolumina fein aufgelöst werden. Das bedeutet jedoch einen hohen Rechenaufwand, was die Anwendung der CFD - Simulationen ineffizient machen kann. Dementsprechend ist es im Vorfeld der Berechnungen zum einen notwendig, die Geometrie soweit es geht zu vereinfachen. Zum anderen müssen die Zellgrößen ausreichend groß für eine effiziente Berechnung aber hinreichend klein für die Auflösung lokaler Einflüsse gewählt werden.

Im Allgemeinen bietet sich eine detaillierte Vernetzung einzelner Bereichen an. Diese lokalen kleinen Zellen passen sich dann an das gröbere Raumgitter an. Charakterisierendes Merkmal sind dabei neben den Abmessungen kleinerer Einbauten auch die numerischen Anforderungen der Gleichungssysteme, insbesondere der Turbulenzmodellierung.

In den Simulationen für OP - Räumen haben Auftriebseffekte einen wesentlichen Einfluss auf die Partikelverteilung. Davon ausgehend müssen diese Effekte ausreichend nachgebildet werden. Hier ist vor allem auf die Dummies zu achten, da die an ihnen aufsteigende Luft direkt in den Schutzbereich und auch auf den OP - Tisch wirken kann. Bereits bei der Vernetzung der Dummies spielt die spätere Wahl der Modellierung des Wärmeeintrages eine Rolle:

- I. Wenn die Wärmelasten mittels der Definition von Oberflächentemperaturen modelliert werden sollen, dann müssen deren Flächen entsprechend fein vernetzt werden. Kriterium bilden die y^+ - Werte an den Flächen. Die sollten in einem Bereich von etwa 1 bis 5 liegen, so dass sich der erste Gitterpunkt an der Wand in der viskosen Unterschicht befindet. (Je geringer sie sind und je feiner die Auflösung, desto exakter wird der Wärmeübergang an den Oberflächen berechnet.) Die notwendige Auflösung lässt sich mit der nachstehenden Berechnung abschätzen [13]:

$$y^+ = \frac{u_\tau \times y_P}{\nu} \quad \Rightarrow \quad y_P = \frac{y^+ \times \nu}{u_\tau}$$

max. Größe der wandnahen Zellen:

$$\Rightarrow \quad y \approx 2 \times y_P$$

y_P	...	Abstand des Punktes P von der Wand [m]	
y^+	...	y^+ - Wert [-]	$y^+ = 1 - 5$
ν	...	kinematische Viskosität [m ² /s];	$\nu = \eta / \rho$
η	...	dynamische Viskosität [kg/(m.s)]	$\eta = 18,2 * 10^{-6} \text{ kg/(m.s)}$ (bei $t_L = 20 \text{ }^\circ\text{C}$)
ρ	...	Dichte [kg/m ³]	$\rho \approx 1,2 \text{ kg/m}^3 \text{ für Luft}$
u_τ	...	Schubspannungsgeschwindigkeit [m/s]	$u_\tau = (\tau_W / \rho)^{0,5}$
τ_W	...	Schubspannung an der Wand [N/m ²]	$\tau_W = 0,5 * C_f * \rho * u_0^2$
C_f	...	Wandreibungskoeffizient [-]	$C_f = [2 * \log_{10}(Re) - 0,65]^{-2,3}$ gültig für $Re < 10^9$
u_0	...	charakteristische Geschwindigkeit [m/s]; z. B. Auftriebsgeschwindigkeit an den Dummys	$u_0 \approx 0,25 \text{ m/s}$
Re	...	Reynoldszahl [-]	$Re = u_0 * L / \nu$
L	...	charakteristische Länge [m]; z. B. Höhe der Dummys	$L = 1,8 \text{ m}$

Die Optimierungsstudien der CFD - Anwendungen haben gezeigt, dass für die Berechnung der Raumströmung in OP - Räumen ein Oberflächennetz mit Kantenlängen von 1 cm ausreichend ist, um die wesentlichen Effekte abzubilden. Das entspricht einem $y^+ = 5$. Beispielhaft sind in Bild 7.2.1 und Bild 7.2.2 die Oberflächennetze eines Dummys und der OP - Lampen dargestellt.

Wenn die thermischen Oberflächen mit einem gröberen Netz versehen werden, dann ist darauf zu achten, dass die (mittleren) y^+ - Werte nicht in dem Bereich 5 - 20 liegen. Ab $y^+ > 30$ werden die Grenzschichteffekte mit Hilfe von Wandfunktionen modelliert. Die Wärmeübergänge werden dann im Mittel gut berechnet. Das geht aber mit einer Dämpfung der Strömung einher, so dass die instationären Effekte nicht in vollem Umfang abgebildet werden. Die rechte Darstellung in Bild 7.2.1 zeigt das Oberflächennetz eines Dummys das diesen Anforderungen genügt.

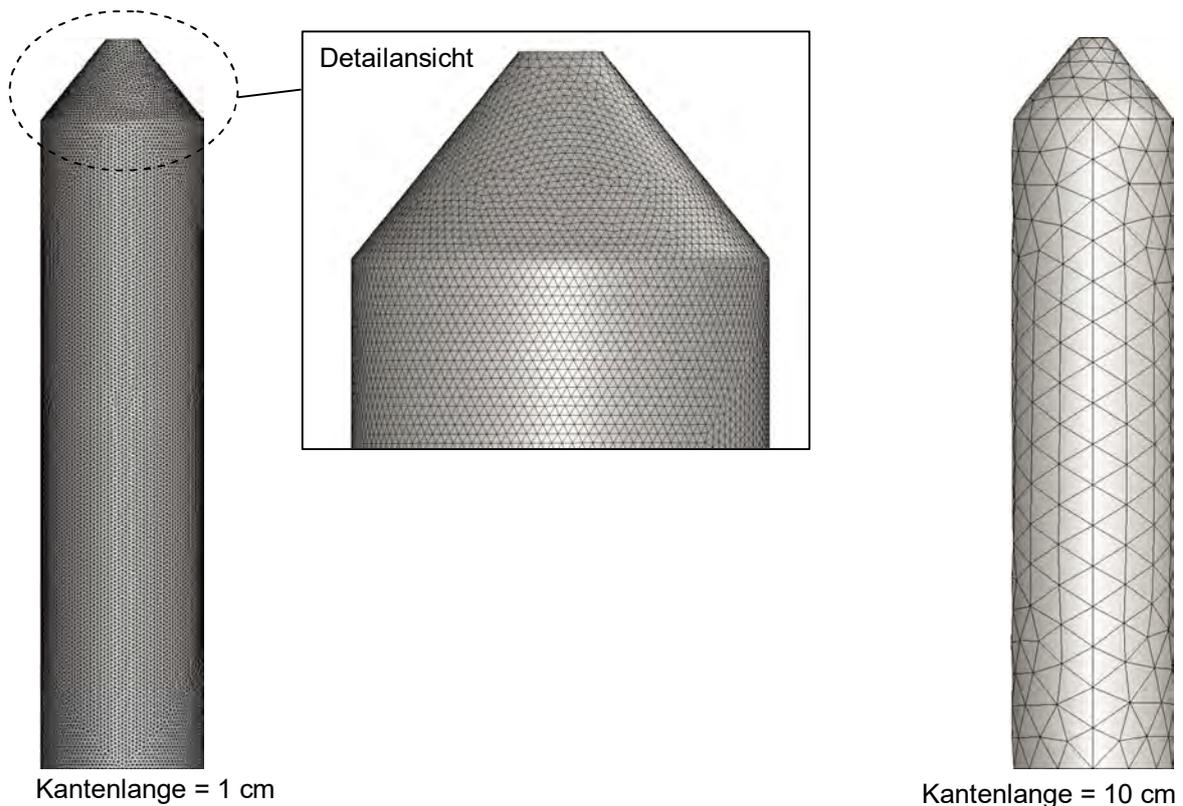


Bild 7.2.1: Oberflächennetze auf einem Dummy mit Kantenlängen von 1 cm (links) und 10 cm (rechts)

- II. Da der Auftrieb an den Dummies maßgeblich den Partikeleintrag in den Schutzbereich beeinflusst, können die Wärmeeinträge an den Oberflächen auch mittels Energiequelltermen in den wandnahen Zellen modelliert werden. Mit diesem Ansatz wird die Berechnung des Auftriebes weitestgehend von der Berechnung des Wärmeüberganges in der Wandgrenzschicht entkoppelt. Das bedeutet, die Vernetzung der Oberflächen hat einen geringeren Einfluss auf die Strömungsverhältnisse. Somit müssen die Oberflächennetze dann auch keine notwendigen Größen / Auflösungen einhalten. Es gilt aber auch hier zu achten, dass ein gröberes Gitter insgesamt eine dämpfende Wirkung auf die Strömungsbedingungen hat.

In beiden Ansätzen gilt weiterhin als notwendiges Kriterium, dass Einschnürungen und Spalte, wie z. B. der Abstand zwischen den Dummies und dem OP - Tisch, ausreichend abgebildet werden. In denen sind mindestens drei Zellen erforderlich.

Die Halterungen können bei der Verwendung kompakter OP - Lampen vereinfacht werden oder u. U. sogar entfallen.

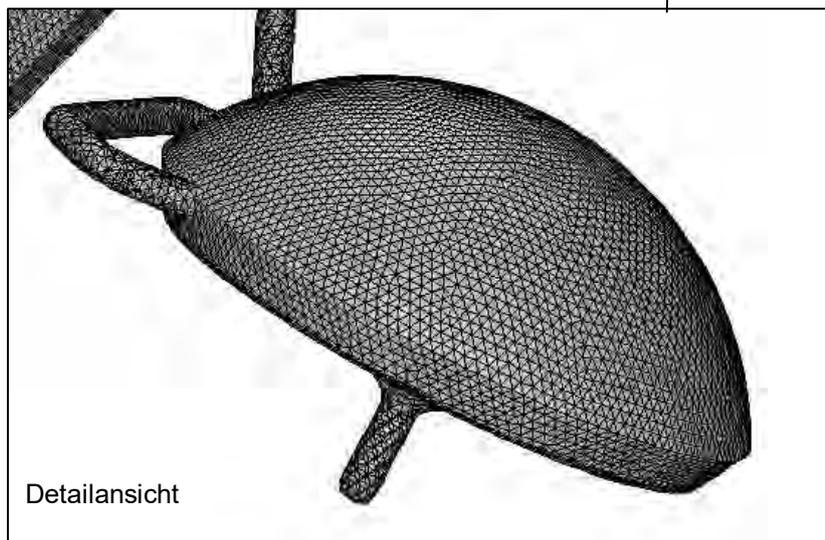
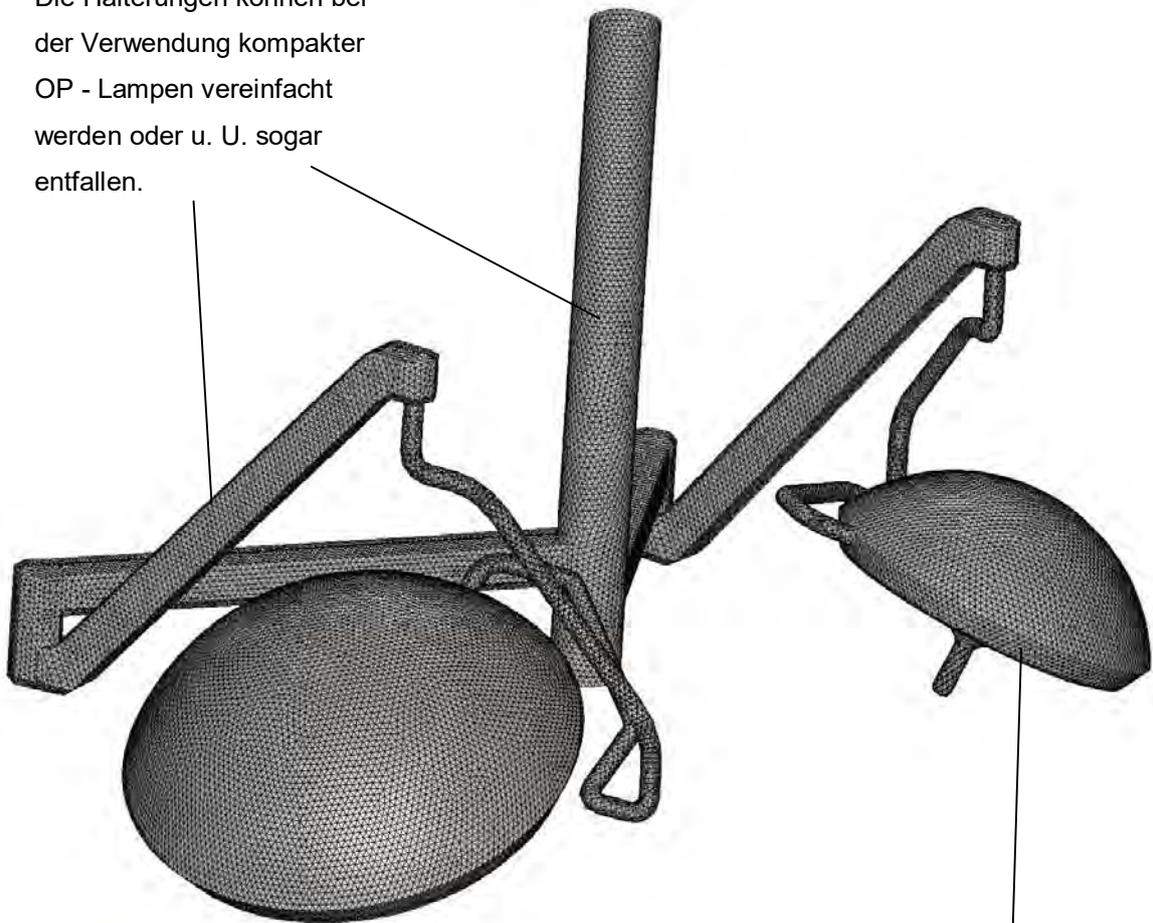


Bild 7.2.2: Oberflächennetz auf den Lampen über dem OP - Tisch in einer Gesamt- und Detailansicht (mit Halterungen)

An den Lampen gelten prinzipiell die gleichen Anforderungen wie an den Dummies. Sie sind jedoch wesentlich geringerer Bauhöhe, so dass der Auftrieb an ihnen weniger ausgeprägt ist. (Dagegen sind jedoch ihre spezifischen Wärmelasten und damit ihre Oberflächentemperaturen höher.) Weiterhin führt ihre Umströmung i. A. zu stärkeren Störungen des Strömungsfeldes als der Auftrieb. Das gilt insbesondere für kompakte Bauformen. Ausgehend von diesem Zusammenhang müssen vor allem bei aerodynamischen Geometrien die Kriterien der notwendigen Netzgrößen nach Punkt (I) beachtet werden oder eine spätere Wärmemodellierung nach Punkt (II) erfolgen. Die Darstellung in Bild 7.2.2 zeigt ein Oberflächennetz von 1 cm auf den Lampen kompakter Bauart, das den Anforderungen nach Punkt I genügt.

Die Zuluftflächen müssen mit mindestens 5 Gitterzellen im engsten Querschnitt aufgelöst werden. (Im Allgemeinen ist dieses Kriterium bei der Anwendung von OP - Decken eingehalten und gilt vor allem bei kleineren Zuluftauslässen zu beachten.) An den Abluftflächen ist dieses Kriterium aufgrund der geringen Tiefenwirkung einer Abluft i. A. nicht so starr gehalten. Es empfiehlt sich jedoch schon aufgrund der numerischen Stabilität auch dort mindestens drei Zellen vorzusehen.

Von den fein aufgelösten Flächen wächst das Gitternetz in den Raum bis zu einer Größe von max. 0,1 bis 0,2 m (Kantenlänge) bzw. etwa 1 dm³. Dabei empfiehlt sich ein Zellwachstum mit dem Faktor 1,2. Ausgehend von den Strömungsverhältnissen ist zu beachten, dass der Bereich um den OP - Tisch und die Dummies aufgrund der Vielzahl und gegensätzlich wirkenden Strömungseffekte feiner aufgelöst werden muss als beispielsweise die äußere Raumzone. Analog zu den lokalen Vernetzungen gilt es zu beachten, dass ein gröberes Gitter die Strömungseffekte dämpft und dann insbesondere nur örtlich und temporär auftretende Erscheinungen u. U. nicht in vollem Umfang wiedergegeben werden.

In dem Bereich innerhalb der Strömungsschürze ist aufgrund der ungleichmäßig geformten OP - Lampen ein unstrukturiertes Gitternetz erforderlich. Dagegen bietet sich außerhalb des Schutzbereiches aufgrund der orthogonalen Kubatur des OP - Raumes auch ein strukturiertes Hexaedergitter an.

In den Optimierungsstudien wurden im gesamten Raum Tetraederzellen verwendet, die ein unstrukturiertes Netz erzeugen. Das erzeugt zwar erst einmal eine höhere Zellanzahl, der Vorteil dieser Gitter ist aber neben einer schnellen Vernetzung, dass in dem Programm *Ansys Fluent*TM aus den Tetraederzellen Polyeder erzeugt werden können. Deren Strukturen sind am Beispiel der Oberflächennetze an den Lampen in Bild 7.2.3 dargestellt. Die Konvertierung reduziert die Zellanzahl um den Faktor 3 bis 5. Außerdem sind die Polyeder aufgrund der Mehrzahl an (Bilanz-) Flächen in der Berechnung numerisch stabiler als Tetraeder und sowohl in der Anzahl wie in der Stabilität vergleichbar mit Hexaedern.



Bild 7.2.3: Oberflächennetz auf den Lampen über dem OP - Tisch nach der Konvertierung in Polyeder

7.3 Physikalische Modelle

Nachdem das Raumvolumen mit dem Gitternetz diskretisiert wurde, müssen die physikalischen Modelle für die Berechnungen definiert werden. Die Gleichungen werden in jeder Zelle (iterativ) gelöst, so dass sie für einen effektiven Berechnungslauf geeignet gewählt werden müssen („So wenig wie möglich für eine schnelle Ergebnisfindung aber so viel wie notwendig für die Nachbildung der realen Bedingungen.“)

Die Strömungssimulationen werden immer unter Anwendung der Kontinuitätsgleichung durchgeführt. Zusätzlich werden Gleichungen für den Impulstransport gelöst, so dass die globalen und lokalen Strukturen der Strömung nachgebildet werden.

Da die Raumströmung turbulent ist, müssen diese Effekte ebenso nachgebildet werden. Die Turbulenz kann zurzeit noch nicht (vollständig) direkt aus den Navier - Stokes - Gleichungen berechnet werden. Aus diesem Grund wird sie mit Hilfe von Modellansätzen modelliert. Hier haben sich das SST $k - \omega$ - Modell und das RNG $k - \epsilon$ - Modell als geeignet erwiesen. Auch das SAS Modell hat gute Ergebnisse erzielt. Mit dem sind jedoch aufgrund seiner noch relativ neuen Implementierung in das Programmsystem zusätzliche Validierungen erforderlich. Die Strömungsbedingungen und Schutzwirkungen in einem OP - Raum werden neben den Einflüssen von Einbauten in erheblichem Maße auch von lokalen Auftriebseffekten bestimmt. Um diese nachzubilden müssen die lokalen Temperaturen in der Luft und an den Oberflächen berechnet werden. Das erfolgt über die Lösung der Energiegleichung.

Simulationen unter isothermen Bedingungen (konstante Temperatur in der Zu- und Raumluft sowie an allen Oberflächen; $t_{zu} = t_{Raum} = konst.$) sind nur dafür geeignet die globalen Strömungsbedingungen zu bewerten. Lokale Effekte, welche häufig auftriebsbedingt sind, und damit einhergehend die Partikelverteilungen und Schutzgrade können damit nicht ausreichend bewertet werden.

Der Wärmetransport im Raum geschieht neben den konvektiven Prozessen über Strahlungstransport zwischen den Oberflächen.. Um diese Effekte nachzubilden, müssen zusätzlich Gleichungen für den Strahlungsaustausch gelöst werden.

Die lokalen Temperaturverteilungen und Wärmeströme sind neben der Berechnung der Strömungsverhältnisse auch für Bewertungen der thermischen Behaglichkeit erforderlich. In diesen Analysen fließen die lokalen Verteilungen der Luftgeschwindigkeit und des Turbulenzgrades sowie die Luft- und Strahlungstemperatur ein, die mit den oben stehenden Gleichungen berechnet werden.

Für die Bewertung der Schutzwirkung muss die Raumströmung, ausgehend von einem oder mehreren Punkten im Raum, markiert werden. Das erfolgt mit mindestens einer, neben der Raumluft, zusätzlichen Spezies oder einem ähnlichen Skalar (*Additional Scalar*). Der Partikelstrom kann mit einer Spezies (bzw. einem Skalar) für alle Partikelgeneratoren zusammen vorgegeben werden. Wenn jedoch ihr Weg durch den Raum einzeln verfolgt werden soll, dann sind entsprechend mehr Definitionen erforderlich. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass für jede Spezies bzw. jeden Skalar eine neue Transportgleichung gelöst werden muss.

Zusammengefasst müssen für die thermische Berechnung in einem OP - Raum folgende Transportgleichungen gelöst werden:

- Kontinuität
- Turbulenz
- Energie / Temperatur
- Strahlung
- mind. eine zusätzliche Spezies bzw. Skalar für den Partikeltransport

(für isothermische Simulationen entfallen die Energie- und Strahlungsgleichungen; wenn die Partikelverteilung nicht bewertet soll, entfällt die Speziesgleichung bzw. der zusätzliche Skalar)

Die Gleichungen werden mit numerischen Methoden iterativ gelöst. Die Berechnungen müssen aufgrund der großen Konzentrationsunterschiede zwischen Schutz- und äußerem Raumbereich sowie den lokalen intermittierenden Auftriebsströmungen mit Diskretisierungen höherer Ordnung erfolgen. (Das Anrechnen kann mit geringeren Ordnungen geschehen. Die Bewertung der Schutzwirkung muss jedoch bei mindestens zweiter besser höherer Ordnung durchgeführt werden.)

7.4 Notwendige Randbedingungen und Freiheitsgrade

7.4.1 Zu- und Abluft

Sowohl in den isothermen als auch den thermischen CFD - Simulationen wird die globale Raumströmung durch die Zuluftströmung initiiert. Deren Definition erfolgt mit den mittleren Geschwindigkeiten (oder Volumenströmen o. ä.) über der Zuluftflächen (die in dem geometrischen Modell an den Positionen des realen OP - Raumes definiert und mit ausreichend Gitterzellen vernetzt sind). Das sind für einen Volumenstrom von ca. 10.300 m³/h über ein 3,1 m x 3,1 m Feld z. B. homogen 0,30 m/s oder, bei einem Differential Flow, zwei Geschwindigkeitsfelder mit jeweils 0,21 m/s in der Außen- und 0,42 m/s in der Kernzone (siehe Bild 7.4.1). Die Berechnung erfolgt mit der Formel:

$$w_{zu} = \frac{V_{zu}}{A_{zu}} \times \frac{1}{3600}$$

w_{zu}	... Zuluftgeschwindigkeit	[m/s]
V_{zu}	... Zuluftvolumenstrom	[m ³ /h]
A_{zu}	... Zuluftfläche	[m ²]

Die tatsächlichen Verteilungen der Geschwindigkeiten und Volumenströme sind mit dem Hersteller der Zuluftdecke bzw. des Gewebeverteilers abzustimmen.

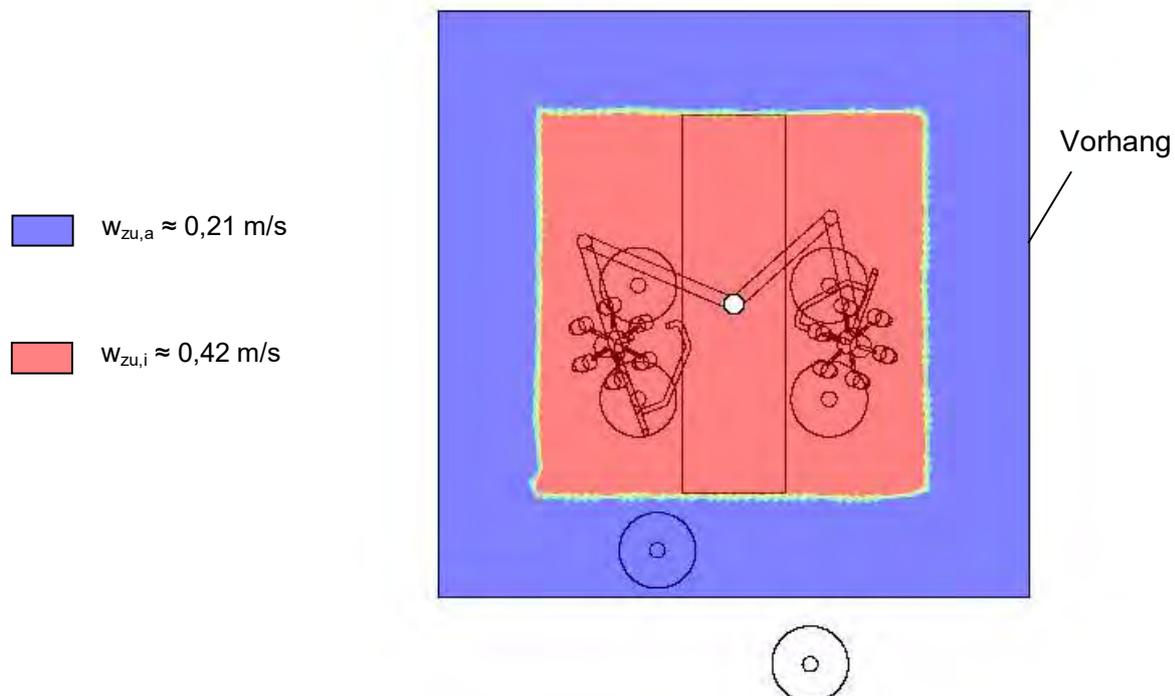


Bild 7.4.1: Aufteilung der Strömungsgeschwindigkeiten [m/s] über die Zuluftdecke bei einem *Differential Flow* (Modell mit optimierten / aerodynamischen OP - Lampen)

Die in den Raum eingebrachte Zuluft muss für die Massenerhaltung (Kontinuität) wieder aus ihm abgeführt werden. Das erfolgt über die Abluft und Umluftabsaugungen. Deren Definitionen sind analog zu den Zuluftflächen mit negativem Vorzeichen. Es werden also die mittleren Geschwindigkeiten bezogen auf den (jeweiligen) Abluftvolumenstrom und die Abluftfläche definiert.

Es empfiehlt sich eine Abluft, z. B. die Fläche über der Tür, als Druckrandbedingung (*pressure outlet*) zu definieren. Das gibt zum einen eine größere numerische Stabilität für die Berechnungen und zum anderen gleichen sich Massenungleichgewichte darüber aus. Die Definition muss aber so erfolgen, dass Rückströmungen in den Raum hinein, auch numerisch, vermieden werden, da andernfalls eine unerwünschte und nicht reale Sekundärströmung entsteht.

Für den Fall, dass das Szenario der Türöffnung in einen (ebenso offenen) Nachbarraum untersucht werden soll, dann bildet diese Tür die Druckrandbedingung. An der Abluft und den Absaugungen sind dann definierte Volumenströme abzuführen.

7.4.2 Thermische Randbedingungen

Neben den globalen Strömungsverhältnissen werden die Partikeltransporte und -verteilungen auch von lokalen Effekten beeinflusst. Das ist neben der Umströmung einzelner Bauteile und Einbauten vor allem der Auftrieb an den Dummies. Der Auftrieb stellt sich bei einer örtlichen Übertemperatur gegenüber der umgebenden Raumluft ein. Aus diesem Grund ist die Modellierung des Wärmeeintrages von entscheidender Bedeutung. Für dessen Definition wurden zwei Ansätze untersucht, die gleichermaßen anwendbar sind:

- I. Die Wärmeeinträge an den Dummies können mittels Temperaturprofilen an deren Oberflächen definiert werden. Für Wärmelasten nach VDI 2167 - 1 wurden dabei folgende Profile bestimmt [1]:

$$\text{Dummy 1} \quad t_o = 28,3 + 20,3 * (z / 1,5)$$

$$\text{Dummy 2} \quad t_o = 24,8 + 9,7 * (z / 1,2)$$

$$\text{Dummies 3/4/5/6} \quad t_o = 25 + 6 * (z / 1,8)$$

Die Darstellungen in Bild 7.4.2 zeigen diese Temperaturprofile auf den Dummies.

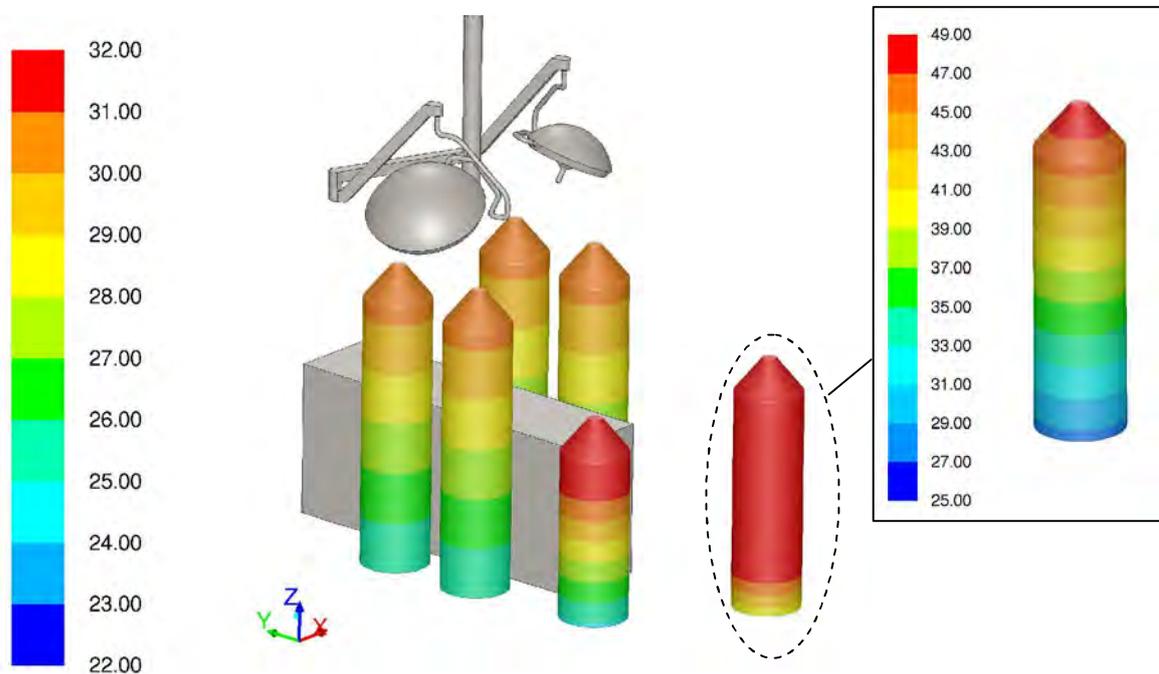


Bild 7.4.2: Oberflächentemperaturen [°C] auf den Dummies bei der Definition von Temperaturprofilen

Der Gesamtwärmeeintrag setzt sich stets aus einem konvektiven und einem Strahlungsanteil zusammen. Der Auftrieb wird allein aus dem konvektiven Wärmestrom bestimmt, da durch ihn die oberflächennahen Luftschichten erwärmt werden. Sie weisen damit eine Übertemperatur gegenüber der Umgebungsluft auf und infolge der lokalen Dichteunterschiede bildet sich eine Auftriebsströmung aus. Dabei können Partikel aus der Außenzone induziert und im Weiteren in den Schutzbereich getragen werden. Von diesem theoretischen Hintergrund ausgehend bestimmt die Berechnung der anteiligen Wärmeströme maßgeblich die lokalen Strömungsbedingungen und damit einhergehend den Partikeltransport.

Der konvektive Wärmestrom ist das Produkt aus der Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche und der Umgebung sowie dem lokalen Wärmeübergang. Die Oberflächentemperaturen sind mit den Temperaturprofilen eindeutig definiert und die Umgebungstemperatur ergibt sich weitestgehend aus den globalen Strömungsbedingungen. Der Wärmeübergang bildet folglich den letzten Freiheitsgrad. Dessen Berechnung ist von der lokalen, oberflächennahen Strömung abhängig. Sie muss bei dem Ansatz der Temperaturprofile exakt nachgebildet werden. Dementsprechend ist die Abhängigkeit der Auftriebsströmungen von der lokalen Vernetzung bei diesem Modellansatz unbedingt zu beachten (vgl. Abschnitt 7.2).

- II. In dem zweiten Ansatz wird die Wärme an den Dummies in den wandnahen Zellen um die Oberflächen eingebracht. Bei einem Lasteintrag nach VDI 2167 -1 sind Wärmeströme von in Summe mindestens 800 W vorzusehen. Deren Aufteilung sowie ein Beispiel der wandnahen Zellschichten um die Dummies zeigt Bild 7.4.3 (vgl. auch Bild 7.1.2 und Bild 7.1.3).

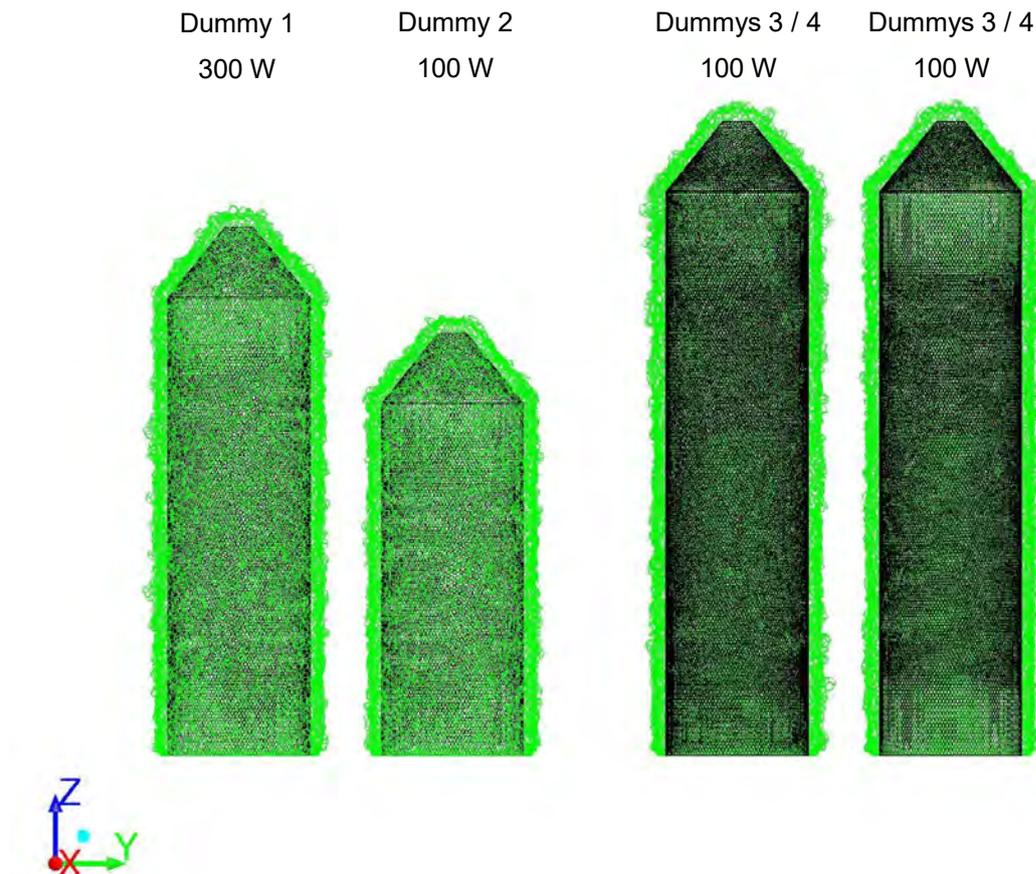


Bild 7.4.3: Wandnahe Fluidzonen um die Dummies und Wärmeströme nach VDI 2167-1

Bei der Definition der Wärmeströme in den oberflächennahen Zellen erfolgt der Lasteintrag zuerst einmal rein konvektiv. Die damit einhergehende lokale Erwärmung führt zur Ausbildung des Auftriebes. Dabei werden aber auch die angrenzenden Flächen erwärmt, die dann im Strahlungsaustausch mit dem Raum stehen. In der Wechselwirkung dieser Prozesse stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Auftriebsströmung und Erwärmung der Oberflächen ein (Gleichgewicht bedeutet hier aufgrund der instationären Strömungen nicht Beharrungszustand).

Die Berechnung der Oberflächentemperaturen erfolgt wieder in Abhängigkeit der lokalen Wärmeübergangskoeffizienten. Die Umkehr der Kausalität im Wärmeübergang zeigt aber den Vorteil des Modellansatzes gegenüber den Temperaturprofilen. Wenn er nicht exakt abgebildet wird, dann ist in diesem Fall der Konvektionsanteil etwas überbewertet. Das führt eher zu einer konservativen Berücksichtigung der Auftriebseffekte und Partikeltransporte. Weiterhin haben die geringfügig höheren Dichtedifferenzen nur einen geringen Einfluss auf die grundsätzliche Auftriebsströmung, so dass der Fehler wesentlich geringer ist als bei der Vorgabe der Temperaturprofile. Im Rückschluss ist die Berechnung der Auftriebseffekte und damit der Partikeltransport mit dem Ansatz der oberflächennahen Wärmeströme weitestgehend unabhängig von der Oberflächenvernetzung (soweit die Forderungen nach Abschnitt 7.2 eingehalten sind).

Ein weiterer Vorteil der direkten Definition der Wärmeströme ist die Skalierbarkeit auf andere Lastfälle. So können damit auch von den Vorgaben der VDI 2167 - 1 abweichende Lastverteilungen einfach analysiert werden. Beispielhaft sind in der Tabelle 7.4.1 einmal verschiedene Wärmeströme in Abhängigkeit der Tätigkeiten im OP zusammengestellt.

Tabelle 7.4.1: Wärmeabgabe bei verschiedenen Tätigkeiten [4]

Tätigkeit	Wärmeabgabe [W]	≈ OP
ruhend	80	Patient
sitzend entspannt	100	Anästhesist
stehend entspannt	125	Anästhesist, Springer
sitzend, leichte Tätigkeit	125	Anästhesist, Chirurg
stehend, leichte Tätigkeit	145	Anästhesist, Springer, Assistent, Instrumentierschwester
mäßige körperliche Arbeit	200	Chirurg, Assistent, Instrumentierschwester
schwere körperliche Arbeit	300	Chirurg

Die Wärmeeinträge an den Lampen können analog mit den Ansätzen nach Punkt I und II mittels Vorgabe der Oberflächentemperaturen oder der Wärmeströme definiert werden. Es gelten an ihnen die gleichen Zusammenhänge wie an den Dummys. Zu beachten ist jedoch, dass die Oberflächentemperaturen um die Lampenkubatur inhomogen verteilt sein können. Das ist insbesondere in der Bewertung der thermischen Behaglichkeit zu beachten, da eine wärmere Unterseite dort auch zu höheren Strahlungstemperaturen führt. Die Bedeutung des Lasteintrages nimmt mit aerodynamisch geformten Lampen zu. Bei kompakten Geometrien sind die Umströmung und die damit einhergehenden Störungen der Strömung dominant. Die Abwärme der Beleuchtung ist den Herstellerangaben zu entnehmen.

7.4.3 Partikeleingabe

Die Partikel werden über die sechs Generatoren für die äußere oder innere Messung der Schutzwirkung gemäß Bild 7.1.2 und Bild 7.1.3 eingebracht. Der Partikelstrom beträgt bei einem Zuluftvolumenstrom von 10.800 m³/h

$$\Sigma Q_P = 6,3 * 10^9 \text{ P/min.}$$

Es wird in der Hintergrundströmung eine Referenzkonzentration von $C_{\text{Ref}} = 10^6 \text{ P/ft}^3$ bzw. $3,53 * 10^7 \text{ P/m}^3$ angestrebt. In der VDI 2167 - 1 erfolgt die Partikeleingabe abhängig vom Zuluftstrom und wird mit der Formel

$$\Sigma Q_P = C_{\text{Ref}} * V_{\text{zu}} * 1/60 \quad [\text{P/min} = \text{P/m}^3 * \text{m}^3/\text{h} * \text{h/min}]$$

berechnet. Der Ansatz eines von der Zuluft unabhängigen, konstanten Partikelstrom von $Q_P = 6,3 * 10^9 \text{ P/min}$ und die Umrechnung der Referenzkonzentration ist aufgrund des deutlich höheren Zuluftvolumenstromes und der masselosen Betrachtung der Partikel gleichwertig.

Der Partikeltransport kann in den Simulationen mit verschiedenen Methoden berechnet werden. Grundlage ist dabei jeweils die Annahme, dass sie sich ausschließlich mit der Strömung bewegen. Es entstehen keine Rückkopplungen zwischen Luftbewegungen und Partikeltransport. Die Partikel weisen auch keine eigenen, von der umgebenden Luft abweichenden Stoffeigenschaften auf.

Bei der Berechnung mit einem *Additional Scalar* werden die Partikel als masselos angesehen. Ihr Eintrag erfolgt gleichmäßig verteilt über die sechs Generatoren an den jeweiligen Positionen. (Wenn mehrere Skalare definiert sind beträgt der Eintrag für jeden $1,05 * 10^9 \text{ P/min.}$)

Im zweiten Ansatz wird der Partikelstrom in einen äquivalenten Massestrom umgerechnet. Bildlich erfolgt hier keine Partikeleingabe, sondern ein Tracergasstrom mit den gleichen Eigenschaften wie die umgebende Luft (Definition einer zweiten „Luftspezies“). Das ist zulässig, da die Masseströme gering gegenüber der Zuluftströmung und des Luftwechsels im Raum sind. Im weiteren werden dann die Tracergaskonzentrationen bewertet. Sie können aber auch wieder in eine Partikelverteilung umgerechnet werden. Wenn die Ausbreitung der Partikel von jedem Generator einzeln bewertet werden soll, dann sind entsprechend mehr Speziesdefinitionen mit jeweils einem Massestrom von $1,42 \cdot 10^{-10}$ kg/min erforderlich ($\Sigma 8,521 \cdot 10^{-10}$ kg/min über die sechs Generatoren). Die Übersicht in Tabelle 7.4.2 zeigt die Umrechnung eines Partikelstromes mit insgesamt $6,3 \cdot 10^9$ P/min in einen äquivalenten Massestrom.

Tabelle 7.4.2: Umrechnung der Partikeleingabe in einen äquivalenten Massestrom

Partikelstrom (Summe über alle Generatoren):	$Q_P = 6,3 \cdot 10^9$ P/min
Durchmesser je Partikel:	$D_P = 0,3 \mu\text{m}$
Partikelvolumen (Kugelform):	$V_P = 4/3 \cdot \pi \cdot D_P^3 \approx 1,131 \cdot 10^{-19} \text{ m}^3$
Volumenstrom der Partikelemission:	$V_P^\circ = V_P \cdot Q_P \approx 7,125 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3/\text{min}$
Massestrom der Partikelemission : (bei $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$)	$m_P^\circ = V_P^\circ \cdot \rho \approx 8,521 \cdot 10^{-10} \text{ kg/min}$
Referenzkonzentration bei $D_P = 0,3 \mu\text{m}$: $C_{\text{Ref}} = 1 \cdot 10^6 \text{ P/ft}^3 = 3,53 \cdot 10^7 \text{ P/m}^3$	$\approx 3,992 \cdot 10^{-12} \text{ kg(P) / kg(L)}$

Aufgrund der geringen Masseströme sowie den sich mit ihnen einstellenden geringen Tracergaskonzentrationen kann es erforderlich sein, die Eingabe in ppm vorzunehmen. Das gilt umso mehr, je größer die Konzentrationsunterschiede zwischen der Schutzzone und dem äußeren Raumbereich sind. Bei einer sehr guten Schutzwirkung werden Konzentrationen von beispielsweise $10^{-20} \text{ kg}_P/\text{kg}_L$ im Schutzbereich mit dem einfachen Massestrom u. U. nicht mehr ausreichend abgebildet. Aus diesem Grund werden der in Tabelle 7.4.2 berechnete Massestrom sowie die Referenzkonzentration mit dem Faktor 10^6 multipliziert. Die Quellterme sind auch mit diesem Ansatz immer noch gering gegenüber der Lüftung, so dass sie die Strömung nicht beeinflussen. Die erhöhte ppm - Definition ist i. A. nur bei guten Schutzwirkungen ab einem Schutzgrad von $\text{SG} = 3 - 4$ erforderlich.

7.5 Kontrollgrößen während der Berechnungen

Während der Berechnungen müssen die Partikelkonzentrationen (bzw. Tracergaskonzentrationen) an jedem Messpunkten auf dem OP - Tisch (oder an äquivalenten Positionen) für jeden Zeitschritt mitgeschrieben werden (Positionen der Messpunkte vgl. Bild 7.1.2 und Bild 7.1.3). Diese Werte werden dann später für die Schutzgradbestimmung ausgewertet.

Neben den notwendigen Größen an den Messpunkten empfiehlt es sich weitere Parameter während der Berechnung zu kontrollieren. Hier bieten sich beispielsweise der Volumenstrom (oder Massestrom) und die Partikelkonzentrationen in der Abluft (Druckrandbedingung) an. Die müssen zum Ende eines jeden Zeitschrittes in einen konvergenten / konstanten Verlauf übergegangen sein. Große Schwankungen zwischen den einzelnen Zeitschritten sollten auch hinterfragt werden. Beispielhaft zeigt Bild 7.5.1 einen solchen Plot mit hinreichend konstantem Verlauf.

Zusätzlich können die Luftgeschwindigkeiten und -temperaturen an signifikanten Punkten in der Hintergrundströmung kontrolliert werden. Der Schutzbereich und insbesondere die Zone über dem OP - Tisch sind dafür jedoch nur bedingt geeignet. Sie liegen i. A. im Einflussbereich der Lampenumströmung und der Auftriebströmungen. An diesen Positionen werden deshalb eher die instationären Effekte nachgewiesen.

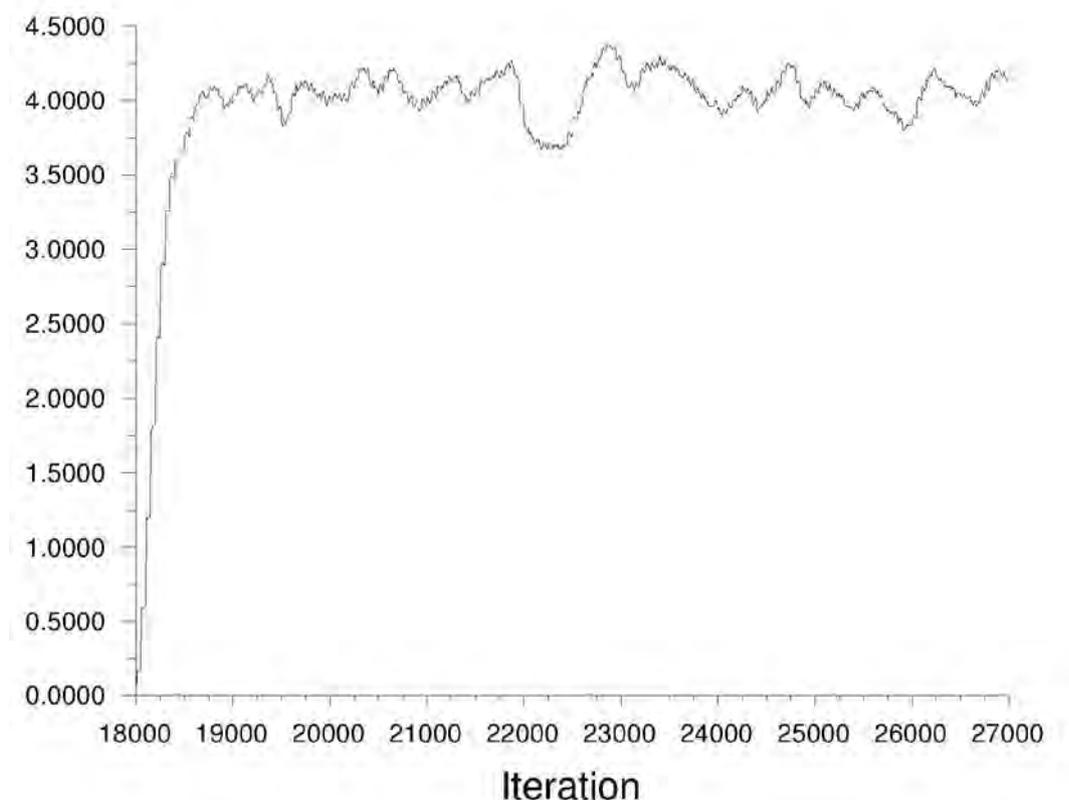


Bild 7.5.1: Partikelkonzentration [10^{-6} ppm] in der Abluft über der Tür

7.6 Berechnungsdurchlauf

Die Strömung in dem OP - Raum ist stark instationär. Aus diesem Grund müssen die Berechnungen transient durchgeführt werden. Es empfiehlt sich aber als Grundlage eine stationäre Lösung mit einer ausgebildeten Raumströmung und grundsätzlichen Partikelverteilung zu verwenden. Die Zeitschrittweite hat maßgeblichen Einfluss auf die Simulationsdauer. Sie ist so zu wählen, dass die wesentlichen Effekte abgebildet werden.

Vor allem die Auftriebsströmungen an den Dummies führen zu ungleichmäßigen Partikeleinträgen in den Schutzbereich. Der instationäre Charakter ist bei einer homogenen Zuluft stärker ausgeprägt als bei einer dominanteren Strömung im Schutzbereich mit dem *Differential Flow*. Untersuchungen mit homogenen Zuluftgeschwindigkeiten von 0,30 m/s haben gezeigt, dass bereits mit Zeitschrittweiten von $\Delta\tau = 10$ sec die Konzentrationsverteilungen gut bestimmt werden. Dabei sind zwar nicht alle Auftriebseffekte exakt (zeitlich) aufgelöst, die mittleren Partikeltransporte werden jedoch trotzdem gut wiedergegeben. Die, gegenüber den zeitlichen Abläufen, größere Zeitschrittweite führt zu einer Dämpfung der Strömung.

Für eine detaillierte Auflösung der zeitlichen Abläufe ist eine Zeitschrittweite von maximal $\Delta\tau = 1,0$ sec erforderlich.

Bei einer dominanteren Zuluftströmung mit dem *Differential Flow* und der Anwendung von aerodynamisch gestalteten OP - Lampen haben die Auftriebsströmungen an den Dummies einen geringeren Einfluss auf den Partikeltransport. In diesem Fall haben bereits Zeitschrittweiten von $\Delta\tau = 10$ sec die Strömungen ausreichend aufgelöst.

Die Berechnungen müssen mindestens für eine Realzeit von 30 Minuten durchgeführt werden. In Erfahrung der bisherigen Untersuchungen bilden sich in den ersten 10 Minuten die instationären Strömungseffekte und Auftriebsströme aus. Für den weiteren Zeitraum können dann die Partikelverteilungen und Schutzgrade hinreichend genau bestimmt werden. Dafür muss der Schutzgrad einen weitestgehend konstanten Verlauf einnehmen. Das heißt aber auch, wenn die angesetzten 30 Minuten Simulationsdauer dafür nicht ausreichen, müssen die Berechnungen über einen längeren Zeitraum durchgeführt werden. (Die gemittelten Schutzgrade können auch wiederkehrende Schwankungen / Absenkungen aufweisen. In diesem Fall ist der Schutzgrad hinreichend konstant.)

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass für den Nachweis der Schutzwirkung die Strömungsbedingungen mit Zeitschrittweiten von max. $\Delta\tau = 1,0$ sec aufgelöst werden müssen. In Variantenstudien sind dagegen auch größere Zeitskalen zulässig. Dabei ist jedoch die Gleichwertigkeit mit geringeren Zeitschrittweiten in mindestens einer Variante nachzuweisen.

Obwohl die Strömungen in dem OP - Raum stark instationär sind, können u. U. auch stationäre Berechnungen die Partikelverteilungen hinreichend genau abbilden. Der Vorteil liegt in der deutlich kürzeren Berechnungsdauer je Variante gegenüber den instationären Simulationen. Dementsprechend sind sie gegebenenfalls für Variantenstudien interessant, in denen die Aussage „besser oder schlechter als“ im ersten Schritt ausreichend sind. Der stationäre Ansatz lässt auch nur eine grundsätzliche Bewertung der Strömungseffekte und insbesondere der lokalen Einflüsse zu.

Auch die Bewertungen des Schutzgrades in den stationären Berechnungen gehen von einer ausgebildeten Raumströmung und Partikelverteilung aus. Sie werden dann solange durchgeführt, bis sich an den Messpunkten ein konstanter Mittelwert des Schutzgrades einstellt. Die Anwendbarkeit des stationären Ansatzes ist in den Variantenstudien nachzuweisen.

Die Berechnungen müssen aufgrund der geringen Konzentrationen und den großen Konzentrationsunterschieden zwischen dem Schutzbereich und der Hintergrundströmung mit einem *double - precision - Solver* durchgeführt werden.

7.7 Postprocessing und Auswertung der Schutzwirkung

Primäres Ziel der CFD - Simulationen ist im Allgemeinen die Schutzwirkung in dem OP - Raum zu bewerten. In diesem Sinn wird die Partikelverteilung bestimmt. Deren Auswertung erfolgt nach VDI 2167 -1 mit dem Schutzgrad.

Der Schutzgrad ist der negative dekadische Logarithmus der lokalen Partikelkonzentration zur Referenzkonzentration in der Hintergrundströmung. Die Auswertung erfolgt durch Mittelung der lokalen Partikelkonzentrationen für jeden Zeitpunkt (Momentanwert) über eine Dauer von zehn aufeinanderfolgenden Minuten. Dieser 10 Minuten - Mittelwert wird dann in den Schutzgrad umgerechnet. Für einen kontinuierlichen Verlauf des gemittelten Schutzgrades empfiehlt es sich die Mittelung jeweils vom aktuellen Wert 10 Minuten zurück durchzuführen. Die Schutzwirkung wird dann mit dem zeitlich minimalen Schutzgrad an den Messpunkten angegeben.

Die Berechnung des gemittelten Schutzgrad erfolgt bei konstanter Zeitdifferenz zwischen den Momentanwerten mit folgendem Zusammenhang:

$$SG = -\log_{10} \frac{C_{mittel}}{C_{Ref}} \quad \text{mit} \quad C_{mittel} = \frac{\sum_{\tau_1}^{\tau_2} C_{lokal}}{N}$$

SG	...	Schutzgrad (am Messpunkt)
C_{mittel}	...	10 - Minuten - Mittelwert der lokalen Partikelkonzentration
C_{Ref}	...	Referenzkonzentration ($3,53 * 10^7$ P/m ³ bei ca. 10.800 m ³ /h)
C_{lokal}	...	Momentanwert der lokalen Partikelkonzentration (am Messpunkt)
τ_2	...	Zeitpunkt des Momentanwertes
τ_1	...	τ_2 - 10 Minuten
N	...	Anzahl der Momentanwerte von τ_1 bis τ_2

Die Referenzkonzentration ist in der Auswertung konstant zu halten, so dass sich Schwankungen im Schutzgrad nur aus der lokalen Partikelkonzentration ergeben.

Ein beispielhafter Verlauf des Schutzgrades mit sehr guter Schutzwirkung von SG = 4,5 ist in Bild 7.7.1 dargestellt.

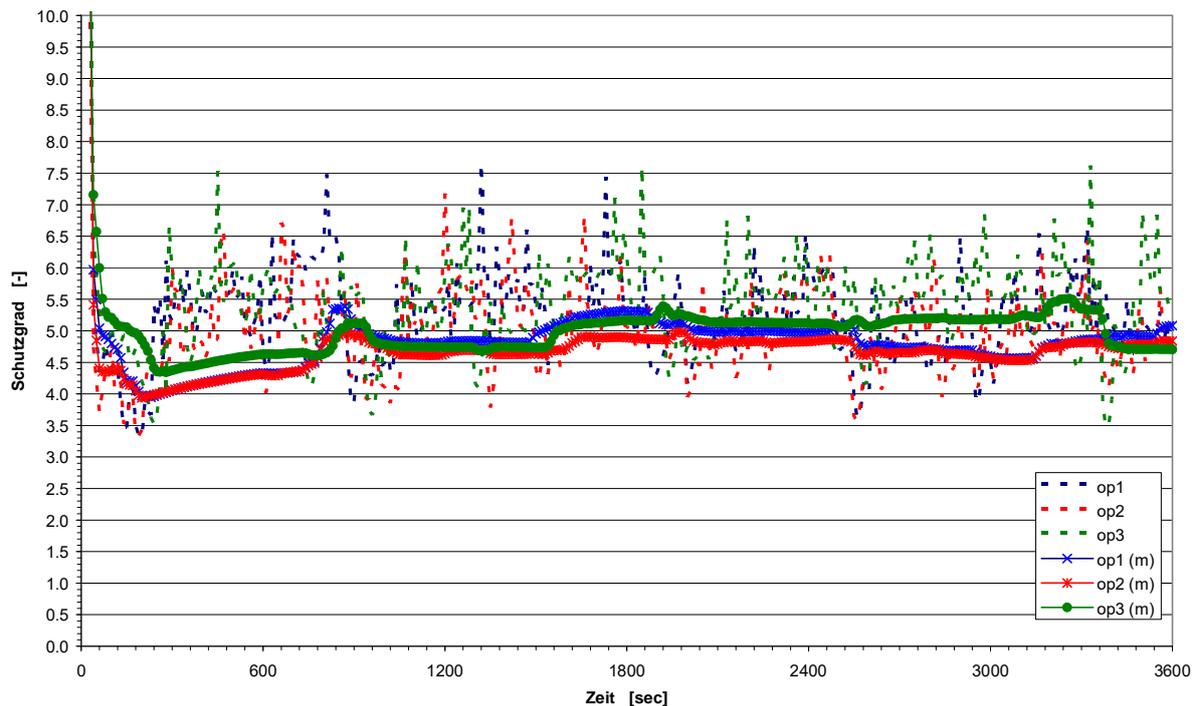


Bild 7.7.1: Verlauf des Schutzgrades an den Messpunkten auf dem OP - Tisch über einen Zeitraum von 60 Minuten (Momentanwerte und 10 Minuten - Mittelungen)

Ein wesentlicher Vorteil der CFD - Simulationen gegenüber Messungen ist, dass die Strömungsbedingungen und Partikelverteilungen im Nachgang der eigentlichen Berechnungen an jedem beliebigen Punkt bewertet werden können. Das erfolgt beispielsweise mit den Strömungsgeschwindigkeiten und den Partikelkonzentrationen in charakteristischen Schnittebenen. Dabei sind i. A. die Ebenen durch den OP - Tisch und die Dummies aussagekräftig. Hilfreich für die Bewertung der Strömungsbedingungen und ursächlichen Effekte des Partikeltransportes sind auch deren zeitliche Änderungen.

Häufig sind auch die Partikelverteilungen bzw. der Schutzgrad (für den jeweiligen Zeitpunkt) über dem OP - Tisch interessant. Mit dieser Bewertung können Rückschlüsse auf die maßgeblichen, auch lokalen Einflüsse des Partikeltransportes und der Schutzwirkung insgesamt gezogen werden.

Die Darstellungen in Bild 7.7.2 und Bild 7.7.3 zeigen diese Auswertungen für die Momentanwerte eines Zeitschrittes.

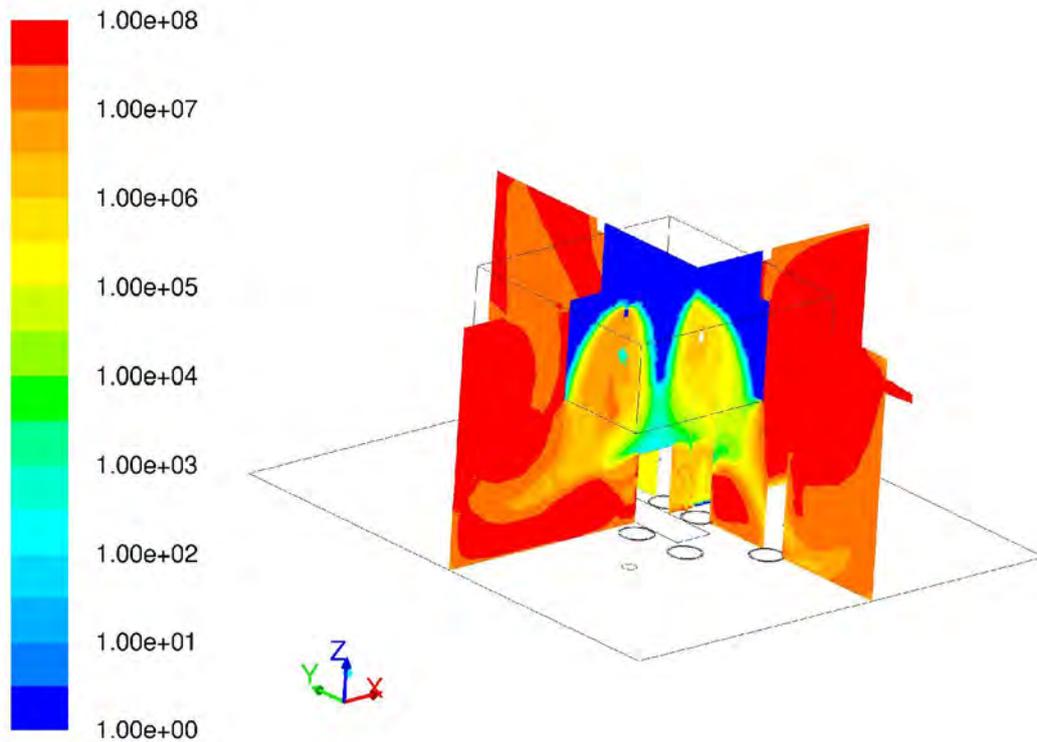


Bild 7.7.2: Partikelkonzentration [P/m^3] in zwei Ebenen (Schnitt durch die Dummies 3 + 5, den OP - Tisch und die Lampen), Ansicht 3D (logarithmische Skala)

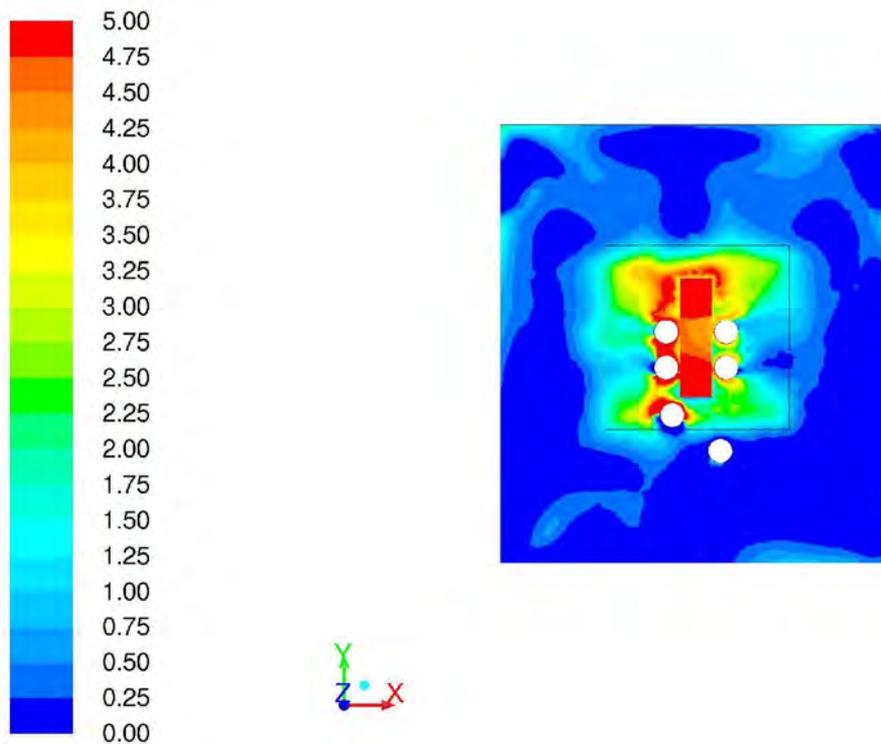


Bild 7.7.3: Schutzgrade [-] auf bzw. knapp über dem OP - Tisch (Momentanwert), Ansicht $z = \text{const.}$

8 Referenzen

- [1] Hochschule Luzern, Technische Fachhochschule Berlin, Züricher Hochschule Winterthur, AYSID GmbH: Gebäudetechnik im Gesundheitswesen, Schlussbericht KTI - Projekt 7764.1 EPRP - IW. Dezember 2007
- [2] VDI 2167 - 1: Technische Gebäudeausrüstung von Krankenhäusern, Heizungs- und Raumluftechnik. Dezember 2004
- [3] VDI 2083 - 5: Reinraumtechnik, Thermische Behaglichkeit. Februar 1996
- [4] Scherrer, M.: Raumluftechnik im OP - sinnvolle Neuerungen. 7. Hygiene Forum Bonn, September 2010
- [5] Hilgendorf, N.M. / Stather, C.: Einfluss der Raumgeometrie auf die Wirksamkeit der Reinluftströmung in Operationsräumen. Anhang zur Diplomarbeit, Technische Hochschule Berlin / Hochschule Luzern, Technik & Architektur, August 2008
- [6] Breithecker, C. / Mauch, S.: Leistungsfähigkeit von OP - Raum - Lüftungskonzepten. Kapitel 7.1.1, Beuth Hochschule für Technik Berlin / Hochschule Luzern, Technik & Architektur, Januar 2010
- [7] Ansys Inc.: Ansys Fluent 12.0, Theory Guide. April 2009
- [8] Launder, B.E. / Spalding, D.B. : Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, London, England, 1972
- [9] Gatski, T. / Hussaini, M.Y. / Lumley, J.L. : Simulation and Modeling of Turbulent Flows; Orszag, S.A. : Introduction to Renormalization Group Modeling of Turbulence. Oxford University Press, New York Oxford 1996
- [10] Shih, T.-H. / Liou, W.W. / Shabbir, A. / Zhu, J. : A New $k - \epsilon$ - Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation. Computers Fluids, 24(3): pp. 227-238, 1995
- [11] Yakhot, V. / Orszag, S.A. : Renormalization Group Analysis of Turbulence - 1st Basic Theory. J.Scientific Computing, 1: pp. 3-51, 1986
- [12] Rechentechnik: XEON w5590, 3,33 GHz, 8 Kerne, 48 GB RAM
- [13] [www.cfd-online.com/Wiki/Dimensionless_wall_distance_\(y_plus\)](http://www.cfd-online.com/Wiki/Dimensionless_wall_distance_(y_plus))
www.cfd-online.com/Wiki/Skin_friction_coefficient

}

Horw, 30. Juni 2012

Seite 89/90

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

10.4. Anhang 4: Teilbericht: Bearbeitung konkreter Fragestellungen

KTI-Projekt Nr. 10058.1 PFLS-LS

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

Teilprojekt 4.3: Bearbeitung konkreter Fragestellungen

Ausgearbeitet durch

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW)

Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering (IEFE)

Prof. Dr. Frank Tillenkamp

BSc in Maschinentechnik, Martin Schneider

BSc in Maschinentechnik, Martin Lagler

Im Auftrag des

Bundesamt für Berufsbildung und Technologie BBT

Förderagentur für Innovation KTI

Juli 2011

Abstract

Ausgangslage

Durch das Forschungsprojekt *Gebäudetechnik im Gesundheitswesen I (GIG I)* konnten viele Unklarheiten und Vorurteile bezüglich Notwendigkeit und Wirksamkeit von lufttechnischen Schutzkonzepten, mit ihren Investitions- und Betriebskosten bei integraler Betrachtung, beseitigt werden. Die daraus abgeleiteten Optimierungen bei den Konzepten und Komponenten haben den Markt schon stark beeinflusst. Gleichzeitig hat sich auch gezeigt, dass ein erheblicher, weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht. Im Rahmen des neuen KTI-Projekts GIG II werden zum einen die bisher gültigen Ergebnisse für OP-Raum-Neubauten mittels ergänzender Versuche auf allgemeingültige Umsetzbarkeit untersucht. Benötigt werden vom Markt vor allem verbesserte Grundlagen zur Umsetzung im Bereich der Umbauten und Neukonfigurationen von OP-Räumen. Zum anderen verlangen die bisherigen historisch-technisch bedingten Entwicklungen im OP-Raum über Instrumente, Geräte, medizinische Einrichtungen und Operationsmethoden sowie den Veränderungen in der Anästhesie/Narkose nach einer kompletten interdisziplinären Neukonzeption des OP-Raumes unter den Aspekten Ergonomie, Hygiene, Ökonomie und Ökologie.

Im Speziellen ist auch die Konzeption hinsichtlich der Personensicherheit des OP-Teams zu überdenken und zu prüfen sowie die Wirksamkeit von Absaugeinrichtungen für chirurgischen Rauch. Chirurgischer Rauch entsteht bei einer Vielzahl von Operationen und ist häufig gesundheitsschädlich. Er ist daher möglichst effizient abzusaugen. Die heute angewendeten Verfahren sind hinsichtlich ihrer Wirksamkeit noch kaum überprüft worden.

Projektziele

Ziel des Arbeitspaketes 4.3 war es, durch Strömungssimulationen im Computational Fluid Dynamics (CFD) Aussagen über die Konzentration des chirurgischen Rauchs im Kopfbereich des OP-Teams machen zu können. Hierfür wurden verschiedene Strömungsmodelle aufgebaut und mit unterschiedlichen Randbedingungen und Parametern gefüttert, damit die wichtigsten Einflussfaktoren und ihre Wirkung aufgezeigt werden konnten.

Erkenntnisse und Resultate

Aus den Arbeiten am GIG II, um genauer zu sein am Arbeitspaket 4.3, konnten die folgenden Erkenntnisse und Resultate gewonnen werden:

- Der chirurgische Rauch lässt sich im CFD ausreichend genau simulieren
- Sind keine strömungsrelevanten Hindernisse wie Dummies und OP-Leuchten im Bereich des Differential-Flow angeordnet, so strömt der chirurgische Rauch der OP-Tischoberfläche entlang und nachher in Richtung Bodenbereich, ohne auch nur in die Nähe des Kopfbereiches des OP-Teams zu kommen
- Unter Berücksichtigung der strömungsrelevanten Hindernisse, im Speziellen der Standard OP-Leuchten, steigt der chirurgische Rauch bis hin zum Kopfbereich des OP-Teams und erreicht dort Spitzenwerte bei der Rauchkonzentration von 3×10^{-5} [-]
- Durch den Einbau von strömungsoptimierten OP-Leuchten kann die Konzentration des chirurgischen Rauchs im Kopfbereich des OP-Teams bis um das 10-fache gesenkt werden
- Generell sind die Rauchkonzentration im Kopfbereich relativ gering, das heisst in über 90 % aller Fälle kleiner als $1,5 \times 10^{-5}$ [-]

Fazit

Die in diesem Projekt erarbeiteten Erkenntnisse und Resultate sind hinreichend genau um erste Aussagen und Tendenzen bezüglich der Rauchausbreitung sowie der Rauchkonzentrationen im OP-Raum, insbesondere im Kopfbereich des OP-Teams, machen zu können. Es konnten aber bei weitem nicht alle möglichen Randbedingungen und Konfigurationen simuliert werden, welche eine endgültige Aussage über die Sicherheit des OP-Teams erlauben würden. Dafür bräuchte es weiterführende Arbeiten im Bereich der Untersuchungen des chirurgischen Rauchs sowie Expertenaussagen in Bezug auf die Gefährdung des OP-Teams durch die vorherrschenden Rauchkonzentrationen.

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage GIG II	4
1.1	Raumluftechnische Konzepte für OP-Räume	4
1.2	Mobile Luftreinigungsgeräte für Personenschutz	4
1.3	Projektziele.....	5
2	Teilprojekt 4.3: Definition und Validierung	6
2.1	Zielsetzung Teilprojekt 4	6
2.2	Zielsetzung Arbeitspaket 4.3.....	6
2.3	Vorgehen.....	7
2.4	Validierung	8
2.4.1	Ausgangslage.....	8
2.4.2	Modellierung	8
2.4.3	Auswertung und Resultate	9
2.4.4	Fazit.....	9
3	Belastung des OP-Teams durch chirurgischen Rauch	10
3.1	Keine strömungsrelevanten Einflüsse	10
3.1.1	Ausgangslage.....	10
3.1.2	Modellierung	10
3.1.3	Auswertung.....	11
3.1.4	Resultate	11
3.1.5	Fazit.....	11
3.2	Abhängigkeit der Quellgeschwindigkeit	12
3.2.1	Ausgangslage.....	12
3.2.2	Modellierung	12
3.2.3	Auswertung.....	13
3.2.4	Resultate	13
3.2.5	Fazit.....	14
3.3	Berücksichtigung von Dummys und Standard OP-Leuchten	15
3.3.1	Ausgangslage.....	15
3.3.2	Modellierung	15
3.3.3	Auswertung.....	16
3.3.4	Resultate	17
3.3.5	Fazit.....	18
3.4	Berücksichtigung von Dummys und strömungsoptimierten OP-Leuchten	19
3.4.1	Ausgangslage.....	19
3.4.2	Modellierung	19
3.4.3	Auswertung.....	20
3.4.4	Resultate	21
3.4.5	Fazit.....	22
4	Schlussfolgerung	23

1 Ausgangslage GIG II

1.1 *Raumlufttechnische Konzepte für OP-Räume*

Beim ersten KTI-Projekt *Gebäudetechnik im Gesundheitswesen I* (GIG I) konnten die erarbeiteten Ergebnisse erhebliche Wissenslücken über die Möglichkeiten, Leistung und Grenzen von Lüftungskonzepten für OP-Räume schliessen. Die daraus abgeleiteten Optimierungen bei den Konzepten und Komponenten haben den Markt schon stark beeinflusst. Gleichzeitig hat sich auch gezeigt, dass ein erheblicher, weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht. Im Rahmen des neuen KTI-Projekts GIG II werden zum einen die bisher gültigen Ergebnisse für OP-Raum-Neubauten mittels ergänzender Versuche auf allgemeingültige Umsetzbarkeit untersucht. Benötigt werden vom Markt vor allem verbesserte Grundlagen zur Umsetzung im Bereich der Umbauten und Neukonfigurationen von OP-Räumen. Zum anderen verlangen die bisherigen historisch-technisch bedingten Entwicklungen im OP-Raum über Instrumente, Geräte, medizinische Einrichtungen und Operationsmethoden sowie den Veränderungen in der Anästhesie/Narkose nach einer kompletten interdisziplinären Neukonzeption des OP-Raumes unter den Aspekten Ergonomie, Hygiene, Ökonomie und Ökologie. Vorgängig ist auch die Konzeption hinsichtlich der Personensicherheit des OP-Teams zu überdenken und zu prüfen.

Ebenso ist die Wirksamkeit von Absaugeinrichtungen für chirurgischen Rauch zu prüfen. Chirurgischer Rauch entsteht bei einer Vielzahl von Operationen und ist häufig gesundheitsschädlich. Er ist daher möglichst effizient abzusaugen. Die heute angewendeten Verfahren sind hinsichtlich ihrer Wirksamkeit noch kaum überprüft worden.

Die Entwicklung eines integrierten Operationssaales, der primär für die breite Anwendung von endoskopischen/minimalinvasiven Eingriffen entwickelt wird, ist daher ein weiterer wichtiger Projektgegenstand.

Bei Sofortmassnahmen oder Umstellungen auf die offene Operation müssen die Raumfunktionen aber entsprechend angepasst werden können. Weiterhin sind raumfüllende medizinische Geräte, Apparate und Leuchten in jeweils zu entwickelnden Konzeptionen strömungstechnisch zu verbessern oder Möglichkeiten zu entwickeln, die unter Beibehaltung ihrer Nutzungsabsicht aus dem direkten OP-Feld eliminiert werden können.

1.2 *Mobile Luftreinigungsgeräte für Personenschutz*

Zu Zeiten erhöhter Mobilität kommt es immer wieder vor, dass sich hochgradig ansteckende Krankheiten, wie zum Beispiel das SARS-Virus (Schwere Akute Respiratorische Syndrome), schnell verbreiten. Um diesen via Luft übertragenen Krankheitserreger einzudämmen, werden spezielle medizinische Einrichtungen und Isolierzimmer mit spezieller Lüftungstechnik benötigt. Diese Einrichtungen stehen jedoch nur in begrenztem Masse zur Verfügung. Darum sind Systeme gefragt, welche innerhalb kürzester Zeit ein konventionelles Patientenzimmer in ein Isolierzimmer umwandeln können. Mobile Umluftreinigungsgeräte sorgen somit für die Reduktion luftgetragener Kontaminationen, zur Sicherung der Gesundheit der Patienten, des Pflegepersonals sowie der Personen in unmittelbarer Umgebung des Raums.

Dafür kommen in der Praxis mobile Umluftreinigungsgeräte zur Anwendung. Mobil heisst sie sind schnell montier- und demontierbar. Die Beurteilung der Wirksamkeit solcher Geräte basiert auf Qualitätskriterien, die unter definierten Prüfbedingungen ermittelt werden. Eines dieser Qualitätskriterien ist zum Beispiel die Erholzeit in Abhängigkeit der Lüftrate und der Filterqualität.

Ziel ist, die Produkte auf ihre tatsächliche Leistung zu prüfen und nachvollziehbare Qualitätsmerkmale, die für den Endnutzer verständlich sind, zu definieren.

1.3 Projektziele

Ein Hauptziel der am Projekt beteiligten Industriepartner ist, ihre Produkte weiter zu optimieren oder neu zu gestalten. Damit verbessern sie ihre Wettbewerbstauglichkeit und schaffen nachhaltig Arbeitsplätze im Zuliefersektor des Gesundheitswesens bei gleichzeitiger Kostensenkung.

Schliesslich besteht ein wesentlicher Projektgegenstand in der Intensivierung des Wissenstransfers für die unterschiedlichen Berufsgruppen: Architekten und Planer, Komponentenlieferanten und Anlagengerichter, Mess- und Prüffirmen, Betreiber und Nutzer für Räume des Gesundheitswesens.

Das Gesamtprojekt ist daher in fünf Teilprojekte strukturiert:

- Teilprojekt 1: Raumluftechnik für OP-Neubau und Sanierungen
- Teilprojekt 2: Prüfausrüstungen und Betriebsoptimierung für OP-Abteilungen
- Teilprojekt 3: Standardprüfverfahren für mobile Luftreinigungsgeräte
- Teilprojekt 4: Anwendung / Weiterentwicklung Planungstool CFD
- Teilprojekt 5: Wissenstransfer

Die schon im ersten KTI-Projekt ausgeführten wirtschaftlichen Ziele seitens der Spitäler und Industriepartner sowie die entsprechenden volkswirtschaftlichen Ziele werden auch mit dem hier beantragten Projekt konsequent weiterverfolgt. Dies kommt auch durch die weitere Zusammenarbeit mit den bisherigen Projektpartnern und durch den Gewinn neuer Partner zum Ausdruck. Während die Projektpartner beim ersten KTI-Projekt überwiegend aus dem Bereich der Gebäudetechnik und der Messtechnik kamen, sind die neuen Projektpartner vermehrt aus dem Bereich der Betreiber und der Medizinaltechnik.

2 Teilprojekt 4.3: Definition und Validierung

2.1 Zielsetzung Teilprojekt 4

Die Ziele des Teilprojektes 4 waren:

- Weiterentwicklung der Einsatzmöglichkeiten von CFD in der Konzeption und Planung von Operationssälen
- Reduktion der Rechenzeiten bei genügender Resultatgenauigkeit und damit wirtschaftliche Anwendungen von CFD in der OP-Planung
- Skizzieren/Entwickeln einer vereinfachten Anwendbarkeit von CFD-Tools im Sinne einer *vertical application* mit einfacher Nutzerführung (in Zusammenarbeit mit einem Softwareanbieter)
- Einsatz von Luftströmungssimulationen (CFD) zur Beantwortung konkreter Fragestellungen aus den übrigen Teilprojekten

2.2 Zielsetzung Arbeitspaket 4.3

Das Teilprojekt 4 wurde in folgende Arbeitspakete unterteilt:

- Arbeitspaket 4.0: Qualitätssicherung und Projektleitung des Teilprojekts 4
- Arbeitspaket 4.1: Update Literaturrecherchen
- Arbeitspaket 4.2: Optimierung des Bearbeitungsaufwandes für praxistauglichen Einsatz von CFD-Simulationen
- Arbeitspaket 4.3: Bearbeitung konkreter Fragestellungen
- Arbeitspaket 4.4: Dokumentation und Berichterstattung des Teilprojekts 4

Im Rahmen des Arbeitspakets 4.3 soll in einem ersten Schritt, eine vereinfachte numerische Simulation zur Belastung des OP-Teams durch chirurgischen Rauch, durchgeführt werden. In einem zweiten Schritt, soll die Problematik aus der vorhergehenden Simulation in eine umfassende, stark an die Realität angelehnte Simulation übertragen werden. Vor allem die verschiedenen Einflüsse auf die Ausbreitung des chirurgischen Rauchs sind von grosser Bedeutung für das Projekt. Zu diesen Einflüssen gehören unter anderem unterschiedliche OP-Leuchten, thermischen Effekte durch die Wand-, Dummy- und OP-Leuchten-Temperaturen sowie verschiedene Quellgeschwindigkeiten.

Am Ende der Arbeit sollen klare Aussagen bezüglich der oben erwähnten Einflüsse auf den chirurgischen Rauch gemacht werden können. Mit Hilfe dieser Aussagen sollen dann zukünftige Systemströmungstechnisch, in Bezug auf diese Problematik, besser gelöst und somit die Sicherheit des OP-Teams gesteigert werden.

2.3 Vorgehen

Damit die unter 2.1 und 2.2 genannten Zielsetzungen auch erreicht werden können, bedarf es einem strukturierten Vorgehen. Ausserdem muss zum Erreichen der definierten Ziele zuerst eine gute Akzeptanz für die CFD-Simulationen von Operationsräumen geschaffen werden. Da keinerlei Vergleichsmesswerte aus der Praxis vorhanden waren, musste die Validierung der Simulationsergebnisse anhand eines theoretischen Ansatzes vorgenommen werden. Anschliessend wurde das erste, stark vereinfachte Simulationsmodell eines OP-Raums aufgesetzt und gerechnet. In den darauffolgenden Schritten wurden die unten aufgelisteten Simulationen durchgeführt und ausgewertet:

- Belastung des OP-Teams durch chirurgischen Rauch in einem vereinfachten Modell ohne jegliche strömungsrelevante Einflüsse
- Belastung des OP-Teams durch chirurgischen Rauch in einem vereinfachten Modell in Abhängigkeit der Quellgeschwindigkeit
- Belastung des OP-Teams durch chirurgischen Rauch unter Berücksichtigung von Dummys und Standard OP-Leuchten
- Belastung des OP-Teams durch chirurgischen Rauch unter Berücksichtigung von Dummys und strömungsoptimierten OP-Leuchten

2.4 Validierung

2.4.1 Ausgangslage

In einer ersten Phase wurde die Validierung der Strömungssimulation durchgeführt. Die Validierung ist notwendig, um verschiedene Simulationsmodelle anhand von Messungen zu überprüfen und zu vergleichen. Es lagen bei den hier durchgeführten Simulationen keinerlei Daten vor, welche eine exakte Validierung mittels Messung ermöglicht hätten. Aus diesem Grund musste die Validierung über theoretische Ansätze sichergestellt werden.

2.4.2 Modellierung

Da bereits im vorgängigen Projekt, dem GIG I, viele Erfahrungen und Ergebnisse bezüglich der Validierung des OP-Raums gemacht wurden, musste nur das neue Element der Simulation validiert werden, das heisst in unserem Fall der chirurgische Rauch, welcher auf dem OP-Tisch austritt und in die Umgebung des OP-Raums entweicht. Zu diesem Zweck wurde eine sogenannte Test-Box im CAD erstellt und mit unterschiedlichen Gitterausführungen ausgestattet. Dabei wurde systematisch die Art der Austrittsfläche (Source, Eintrittsfläche), Gitterausführung, Gitterelementenanzahl, Wachstumsrate, y^+ -Werte und Randschichtenauflösung variiert, bis die optimale Konfiguration, unter Berücksichtigung der Rechenzeit, gefunden wurde. Diese Konfiguration wurde dann mittels theoretischen Ansatzes auf ihre Richtigkeit überprüft und somit die Aussagekräftigkeit der Simulation unterstrichen. **Abbildung 1** zeigt den Aufbau der Test-Box.

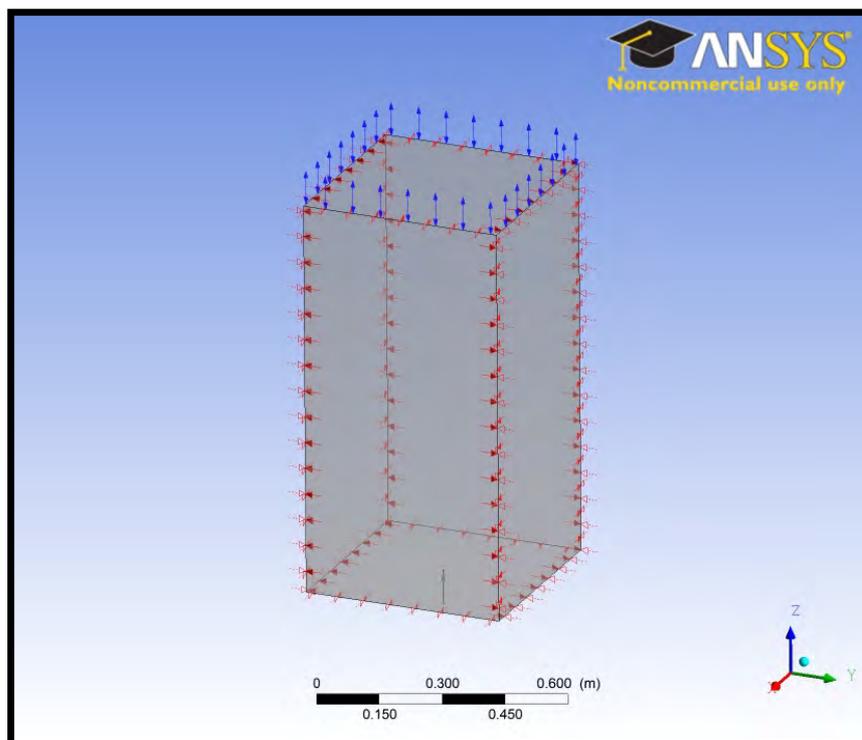


Abbildung 1: Modellierung der Test-Box im CFD

Bezogen auf den ganzen OP-Raum wurde bereits beim vorgängigen Projekt GIG I festgestellt, dass die Strömung stark instationär ist und somit transient simuliert werden muss, um alle entstehenden Wirbel abzubilden.

Damit schnell erste Resultate generiert werden konnten, wurde mit einem stark vereinfachten Simulationsmodell gearbeitet (strukturiertes Gitter; ca. 700'000 Gitterelemente), in welchem keinerlei strömungsrelevante Hindernisse berücksichtigt wurden (Simulationen unter Kapitel 3.1 und 3.2). Dabei wurden die Gitterkonfiguration aus der Test-Box und die nötigen Randbedingungen aus dem GIG I übertragen und simuliert. Es wurde keine zusätzliche Validierung mehr durchgeführt für das vereinfachte Simulationsmodell ohne jegliche strömungsrelevanten Hindernisse, da diese nicht mittels Messung abgeglichen werden konnten.

Das gleiche gilt für die Simulationen in welchen der ganze OP-Raum (OP-Raum: strukturiertes Gitter; OP-Leuchtenbereich: unstrukturiertes Gitter; ca. 4 Mio. Gitterelemente), unter Berücksichtigung der wichtigsten strömungsrelevanten Hindernisse, betrachtet wurde (Simulationen unter Kapitel 3.3 und 3.4).

2.4.3 Auswertung und Resultate

Die quantitative Auswertung basiert auf dem Vergleich eines frei einströmenden Strahls, welcher zum einen in den Simulationen der Test-Box und zum anderen mit dem theoretischen Ansatz ausgewertet und überprüft wird. So wird in der Test-Box ein freier Strahl ungehindert über eine Eintrittsfläche mit 1 m/s eingeströmt. Wichtig sind einerseits eine sehr feine Auflösung der Eintrittsfläche des Strahls selbst (Gitterelementseitenlänge ca. 0.1 mm) und andererseits die Grösse des wandnächsten Elements (0.01 mm) und dazugehörenden Wachstumsfaktors (1.2) in Richtung des einströmenden Strahls.

Diese oben erwähnten Werte sind durch Parameterstudien gefunden worden. Es wurde jeweils mit viel zu kleinen Werten begonnen und dann die Werte Schritt für Schritt vergrössert, bis eine Änderung der Eintrittslänge des Strahls festgestellt wurde. An diesem Punkt, an welchem ein markanter Rückgang der Eintrittslänge des Strahls in die Test-Box festzustellen war, wurde der vorhergehende Wert, bei welchem noch keine Änderung festzustellen war, in die Konfiguration übernommen. Auf diese Weise wurden Parameter für Parameter durchgearbeitet bis die endgültige Konfiguration gefunden wurde (**Abbildung 2**).

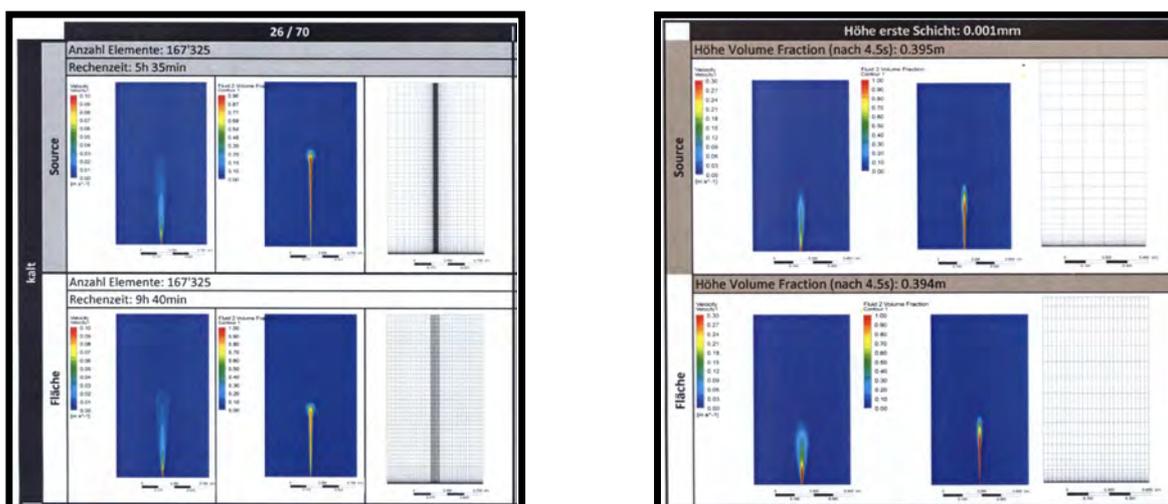


Abbildung 2: Ausschnitte aus der Validierungsarbeit in der Test-Box

Mit dieser Konfiguration wurde eine letzte Simulation in der Test-Box durchgeführt und das Resultat mit dem der theoretischen Lösung des Freistrahlansatzes aus der Literatur überprüft. Die Werte haben über weite Strecken sehr gut übereingestimmt und lassen darum die Aussage zu, dass die darauffolgenden Simulationen, in welche die ermittelte Konfiguration sowie die Erkenntnisse aus dem Projekt GIG I für den restlichen OP-Raum eingeflossen sind, ausreichend genau sind.

2.4.4 Fazit

Die quantitative Auswertung führte zum Schluss, dass das eingesetzte Simulationsmodell geeignet ist um die vorherrschenden und entscheidenden Phänomene in einem Operationssaal abzubilden. Für die eigentlichen Simulationen des chirurgischen Rauchs wurden damit die Grundlagen gelegt, wobei noch vereinzelt Randbedingungen angepasst werden müssen, damit die gewünschten Aussagen aus den Simulationen gewonnen werden können.

3 Belastung des OP-Teams durch chirurgischen Rauch

3.1 Keine strömungsrelevanten Einflüsse

3.1.1 Ausgangslage

In einem ersten Schritt wird mit einer stark vereinfachten Simulation des OP-Raumes begonnen. Dabei wird auf alle strömungsrelevanten Hindernisse verzichtet sowie der Raum auf den Bereich unterhalb der Schürze reduziert. Dadurch können schnell erste Ergebnisse erzeugt werden, welche Aussagen bezüglich der Ausbreitung und Konzentration des chirurgischen Rauchs erlauben. Würde bereits bei dieser Konfiguration, ohne jegliche Strömungseinflüsse, der chirurgische Rauch bis zu den Köpfen des OP-Teams gelangen, so wäre dies sehr schlecht und würde nicht für den Differential-Flow sprechen. Dies galt es in dieser ersten Simulation zu überprüfen.

3.1.2 Modellierung

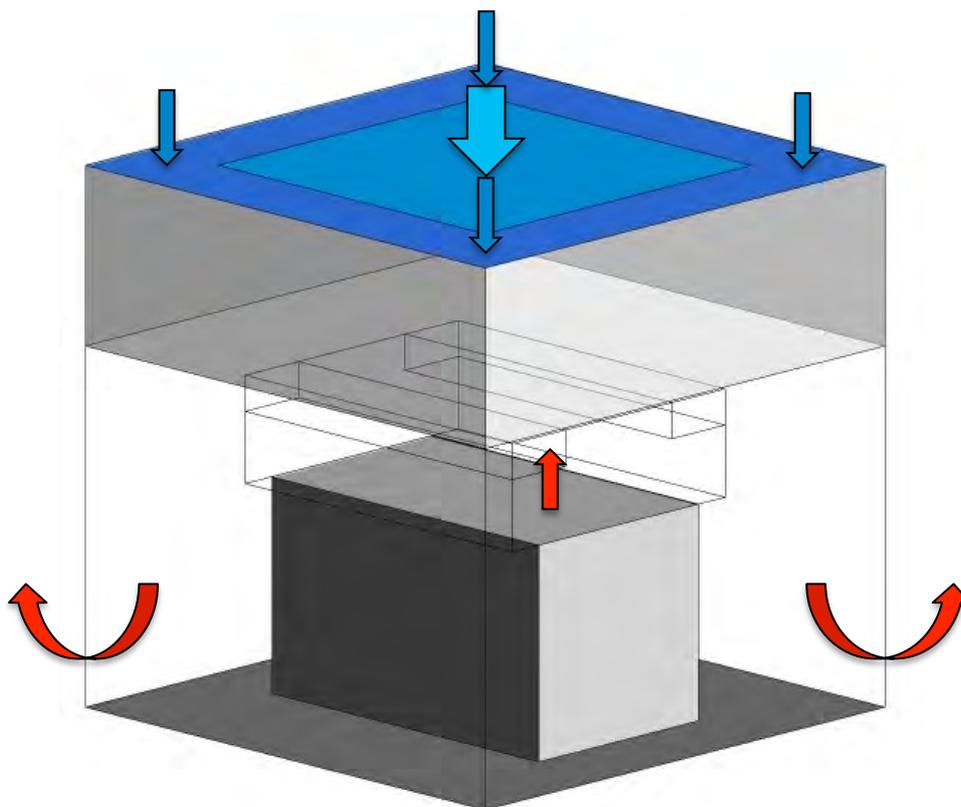


Abbildung 3: Situation im vereinfachten OP-Raum ohne jegliche strömungsrelevante Hindernisse

Abbildung 3 zeigt den vereinfachten OP-Raum und die dabei eingeführten Randbedingungen. Diese Randbedingungen sind:

- Differential-Flow mit 0.4 m/s in der Mitte (hellblau) und mit 0.2 m/s am Rand (dunkelblau)
- Rauchquelle auf dem Tisch, die Einströmgeschwindigkeit beträgt 1 m/s
- Raumgeometrie (l x b x h) 3 m x 3 m x 3 m
- Tischgeometrie (l x b x h) 2 m x 1.2 m x 1.2 m
- Deckenschürze 1 m
- Strukturiertes Gitter mit ca. 750'000 Zellen

3.1.3 Auswertung

Es wurde das Einstömverhalten aus der Rauchquelle beobachtet, im Speziellen ob der Rauch bis zu den Köpfen des OP-Teams (längliche Kästen auf beiden Seiten des Tisches) aufsteigt. Hierfür wurde eine transiente Rechnung aufgesetzt und ausgewertet.

3.1.4 Resultate

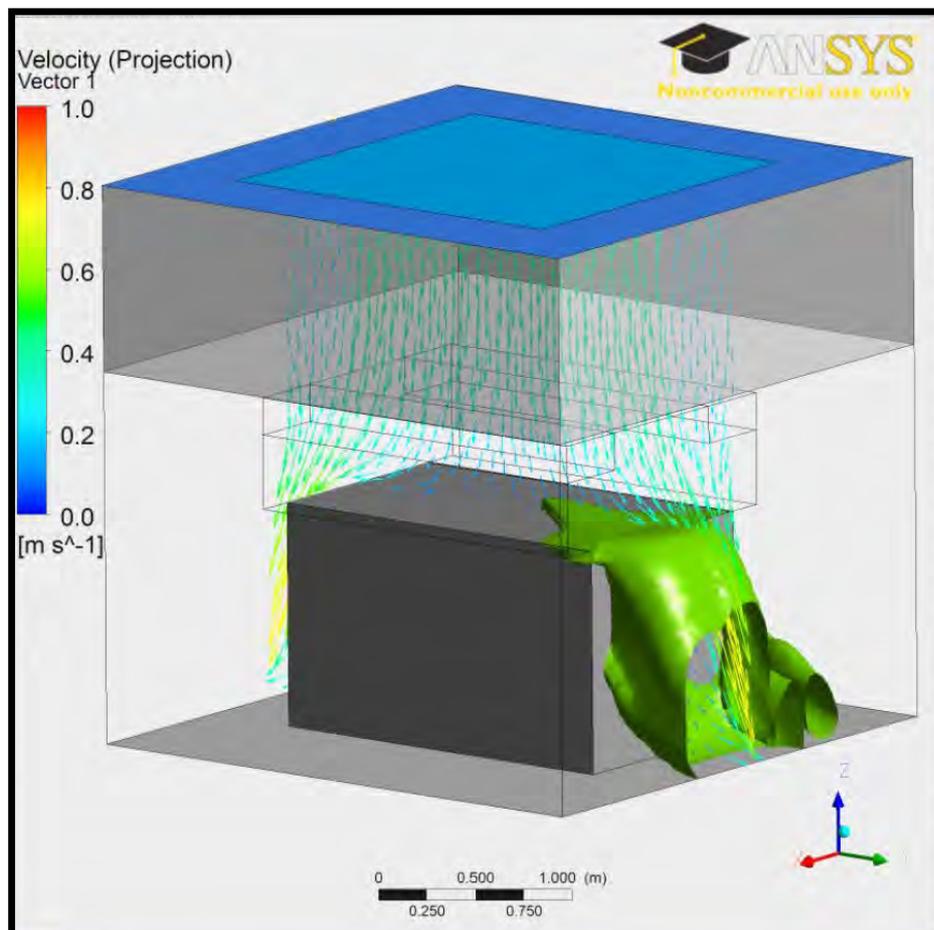


Abbildung 4: Austretender chirurgischer Rauch ohne jegliche strömungsrelevante Hindernisse

Abbildung 4 zeigt, dass keinerlei chirurgischer Rauch in die Nähe der Köpfe des OP-Teams gelangt. Der austretende Rauch wird über den Differential-Flow vom Tisch verdrängt und in Richtung Boden gedrückt. Der Differential-Flow selber ist sehr schön erkennbar, dank der eingeblendeten Geschwindigkeitsvektoren in der Mitte des OP-Raums. Die Strömung kommt gerichtet von der Schürze her und gelangt auf den OP-Tisch. Dort angekommen teilt sich die Strömung in der Mitte des OP-Tisches und strömt entlang der Oberfläche zu den Enden des Tisches, wo sie von der Aussenströmung erfasst und in Richtung Boden geleitet wird. Dadurch gelangt nichts vom gesundheitsgefährdenden chirurgischen Rauch zu den Köpfen des OP-Teams womit deren Sicherheit gewährleistet ist.

3.1.5 Fazit

Für diese Konfiguration kann festgehalten werden, dass der chirurgische Rauch in dem vereinfachten Simulationsmodell ohne jegliche strömungsrelevante Hindernisse nicht in den Kopfbereich des OP-Teams aufsteigt. Der Differential-Flow stellt sich für diese Aufgabenstellung als durchaus geeignet dar.

3.2 Abhängigkeit der Quellgeschwindigkeit

3.2.1 Ausgangslage

Als Weiterführung der vorhergehenden Simulation, bei welcher ohne jegliche strömungsrelevante Hindernisse simuliert wurde, wird nun ein erster Parameter verändert und die Rauchausbreitung im vereinfachten Modell genau beobachtet. Bei diesem Parameter handelt es sich um die Quellgeschwindigkeit des Rauches. Diese wird nun schrittweise erhöht bis zu einem Maximalwert (10 m/s), welcher in der Praxis unmöglich überschritten werden kann.

Es gilt nun also die Fragestellung zu beantworten, ob die Gefährdung des OP-Teams in Abhängigkeit der Quellgeschwindigkeit zunimmt oder nicht.

3.2.2 Modellierung

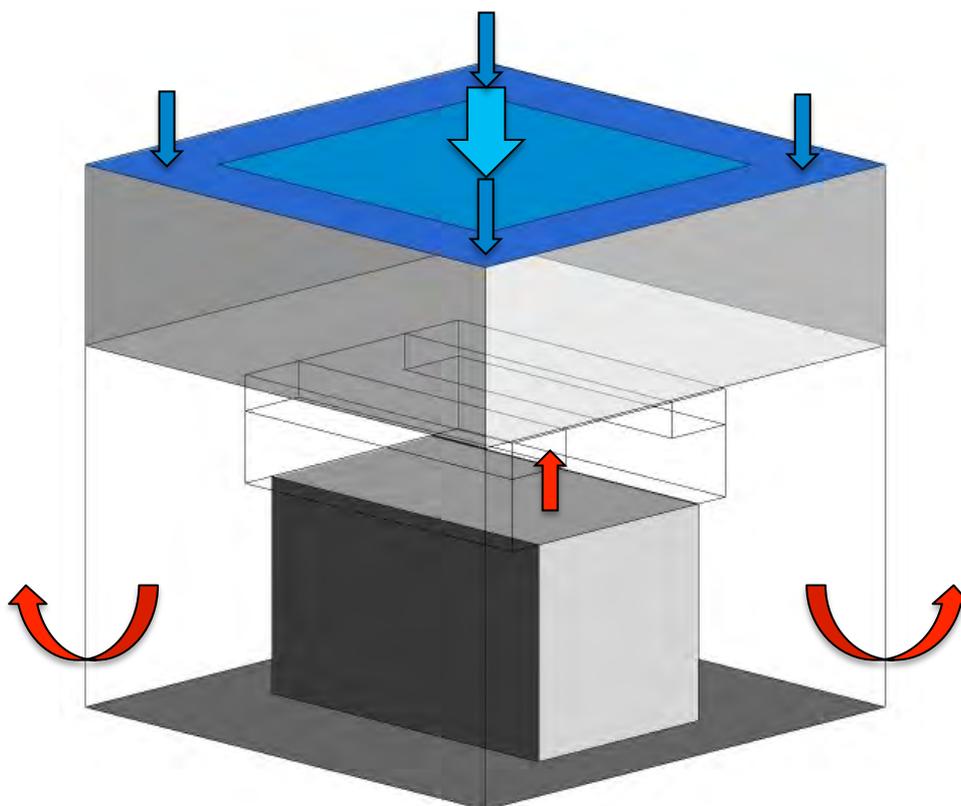


Abbildung 5: Situation im vereinfachten OP-Raum ohne jegliche strömungsrelevante Hindernisse

Abbildung 5 zeigt den vereinfachten OP-Raum und die dabei eingeführten Randbedingungen. Diese Randbedingungen sind:

- Differential-Flow mit 0.4 m/s in der Mitte (hellblau) und mit 0.2 m/s am Rand (dunkelblau)
- Rauchquelle auf dem Tisch, die Einströmgeschwindigkeit beträgt (Parameterstudie):
 - o 1 m/s
 - o 2 m/s
 - o 3 m/s
 - o 4 m/s
 - o 5 m/s
 - o 10 m/s
- Raumgeometrie (l x b x h) 3 m x 3 m x 3 m
- Tischgeometrie (l x b x h) 2 m x 1.2 m x 1.2 m
- Deckenschürze 1 m
- Strukturiertes Gitter mit ca. 750'000 Zellen

3.2.3 Auswertung

Es wurde das Einströmverhalten aus der Rauchquelle (variabel) beobachtet und geschaut ob der Rauch bis zu den Köpfen des OP-Teams (längliche Kästen auf beiden Seiten des Tisches) aufsteigt. Hierfür wurden transiente Rechnungen aufgesetzt und ausgewertet. Es wurde lediglich eine Parameterstudie für die Quellgeschwindigkeit durchgeführt und in diesem Zusammenhang die Strahleintrittslänge in das vereinfachte Modell gemessen und verglichen.

3.2.4 Resultate

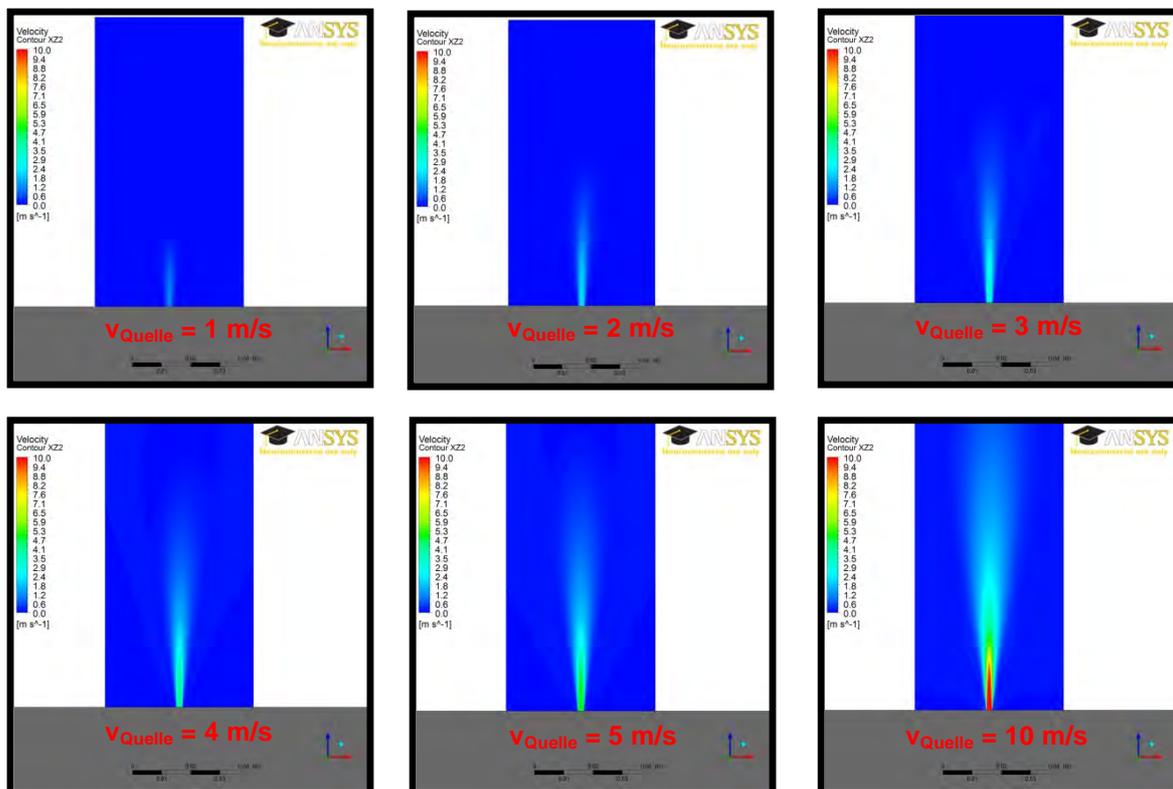


Abbildung 6: Parameterstudie der Quellgeschwindigkeiten

In **Abbildung 6** ist die Parameterstudie der Quellgeschwindigkeit abgebildet. Die Strahlaustrittslänge des Rauchs ist stark von der Quellgeschwindigkeit abhängig. Dies wird klar ersichtlich, wenn man die Entwicklung der Parameterstudie verfolgt. So wächst die Strahlaustrittslänge mit zunehmender Quellgeschwindigkeit an und strömt somit tiefer in den OP-Raum ein. Dadurch breitet sich der Strahl immer mehr in Richtung der Köpfe des OP-Teams aus, gelangt aber nicht bis dorthin, was der Wirkung des Differential-Flows zu verdanken ist. In **Abbildung 7** sind die wichtigsten Aussagen aus der Parameterstudie in einem Diagramm zusammengefasst.

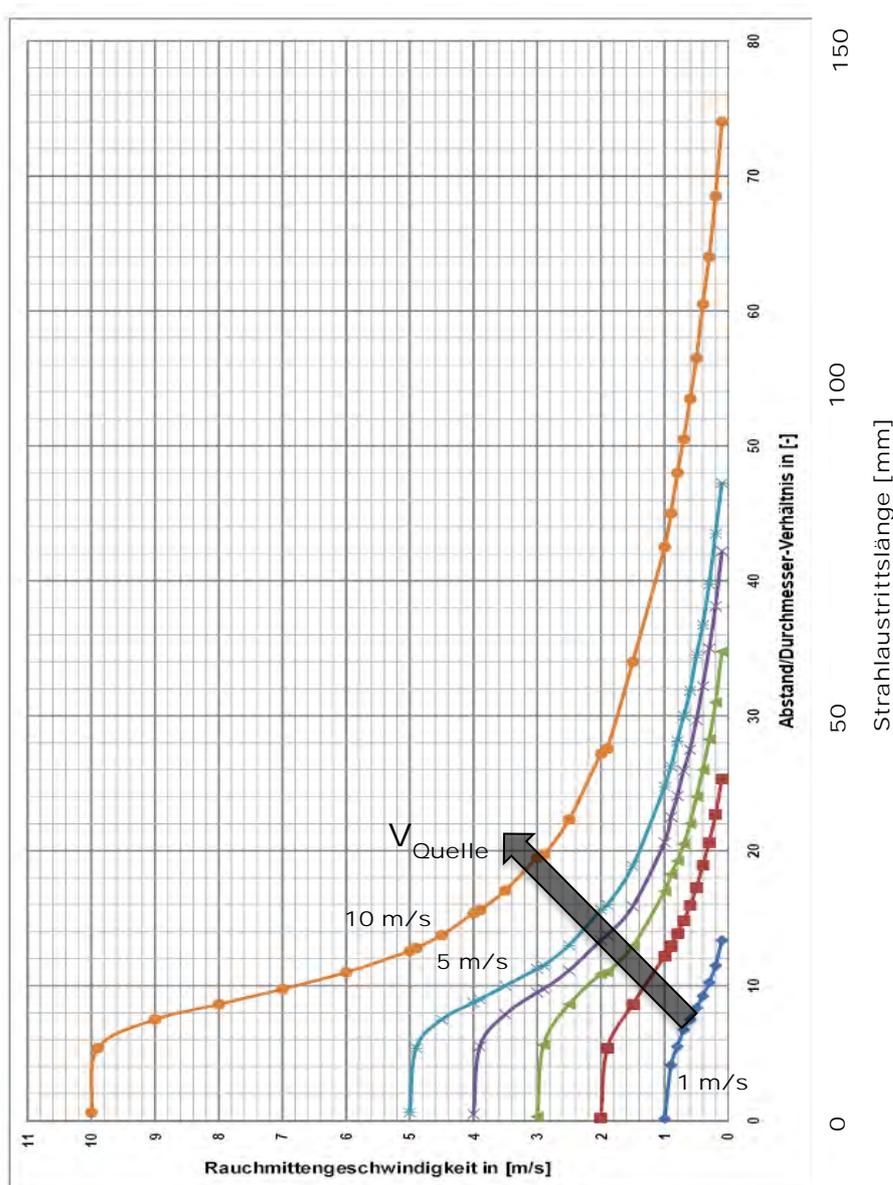


Abbildung 7: Parameterstudie: Quellgeschwindigkeit vs. Abstand/Durchmesser-Verhältnis und Strahlaustrittslänge

In **Abbildung 7** sind die aus den Parameterstudien gewonnenen Resultate zusammengetragen. Zum einen ist die Quellgeschwindigkeit gegen das Abstand/Durchmesser-Verhältnis und zum anderen die Quellgeschwindigkeit gegen die Strahlaustrittslänge in den OP-Raum aufgetragen. Wichtiger für unsere Betrachtungen ist die Strahlaustrittslänge in den OP-Raum und somit in Richtung der Köpfe des OP-Teams. Es kann aber festgehalten werden, dass auch bei einer maximalen Quellgeschwindigkeit von 10 m/s der Strahl nicht bis in den Kopfbereich gelangt, denn der Strahl reicht nur gerade ca. 145 mm vom OP-Tisch in den OP-Raum hinein, was zu kurz ist, wenn man in Betracht zieht, dass der OP-Tisch 1'200 mm hoch ist und der Atembereich bei ca. 1'600 mm liegt.

3.2.5 Fazit

Für die Parameterstudie der Strahlaustrittslänge in Abhängigkeit der Quellgeschwindigkeit kann festgehalten werden, dass der chirurgische Rauch in dem vereinfachten Simulationsmodell ohne jegliche strömungsrelevante Hindernisse nicht bis in den Kopfbereich aufzusteigen vermag. Der Differential-Flow stellte sich für diese Aufgabenstellung als durchaus geeignet dar und vermochte den chirurgischen Rauch von den Köpfen des OP-Teams fernzuhalten.

3.3 Berücksichtigung von Dummies und Standard OP-Leuchten

3.3.1 Ausgangslage

Die Resultate aus den beiden vorhergehenden Simulationen, welche keine Gefährdung durch den chirurgischen Rauch vermuten lassen, müssen nun in einem ganzen OP-Raumsimulationsmodell bestätigt werden. Hierfür wird ein deutlich aufwändigeres Simulationsmodell erstellt, welches nicht nur den ganzen OP-Raum, sondern auch die wichtigsten strömungsrelevanten Hindernisse berücksichtigt und somit sehr nahe an die Realität herankommt. Unter den wichtigsten strömungsrelevanten Hindernissen werden der volle Umfang des OP-Raumes, die Dummies und die OP-Leuchten verstanden.

Es gilt nun also die Fragestellung zu beantworten, ob der chirurgische Rauch, unter Berücksichtigung des vollen OP-Raumumfanges, den Dummies sowie den Standard OP-Leuchten, nicht in den Kopfbereich des OP-Teams aufsteigt.

3.3.2 Modellierung

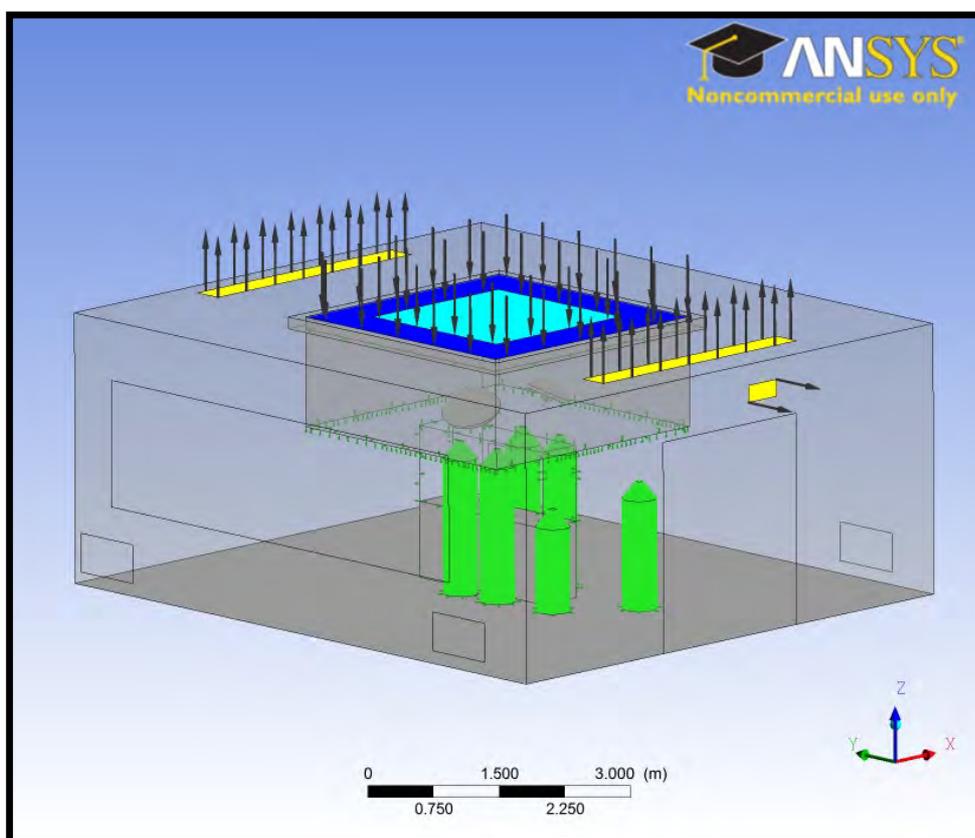


Abbildung 8: Situation im ganzen OP-Raum mit Berücksichtigung strömungsrelevanter Hindernisse

Abbildung 8 zeigt den ganzen OP-Raum und die dabei eingeführten Randbedingungen. Diese Randbedingungen sind:

- Differential-Flow mit 0.4 m/s in der Mitte (hellblau) und mit 0.2 m/s am Rand (dunkelblau)
- Rauchquelle auf dem Tisch, die Einströmgeschwindigkeit beträgt 1 m/s
- Raumgeometrie (l x b x h) 7,358 m x 6,528 m x 3,2 m
- Tischgeometrie (l x b x h) 2 m x 0,54 m x 0,9 m
- Deckenschürze 1 m
- Strukturiertes und unstrukturiertes Gitter mit ca. 4 Mio. Zellen
- Berücksichtigung thermischer Effekte (OP-Leuchten, Dummies, usw.)

3.3.3 Auswertung

1. Es wurde das Einströmverhalten aus der Rauchquelle über die Zeit beobachtet und geschaut, ob der Rauch bis zu den Köpfen des OP-Teams aufsteigt. Hierfür wurde eine transiente Rechnung aufgesetzt und ausgewertet. In der Simulation werden Rauchpartikel mit einem Rauchgehalt von bis zu 1×10^{-5} [-] erkannt und als solche angezeigt.
2. Damit eine quantitative Aussage gemacht werden konnte, wurde auf der Höhe von 1,60 m in der XZ-Ebene zwischen zwei Dummies eine Linie eingefügt (**Abbildung 9**), welche es erlaubte die Rauchkonzentration auf ihr aufzuzeichnen. Diese gewonnenen Ergebnisse wurden dann in einer Exceldatei verarbeitet und ausgewertet.

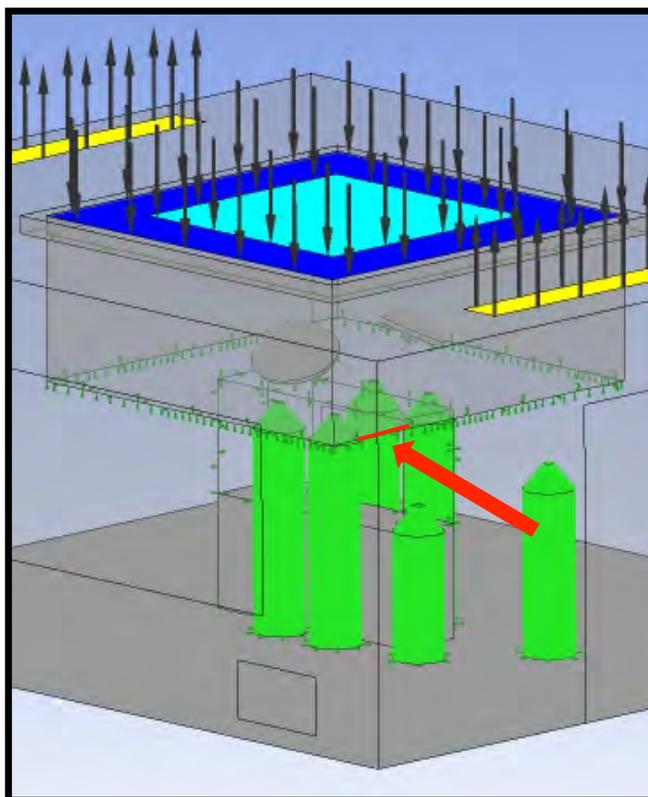


Abbildung 9: Eingefügte Linie für die Bestimmung der Rauchkonzentration auf Kopfhöhe

3.3.4 Resultate

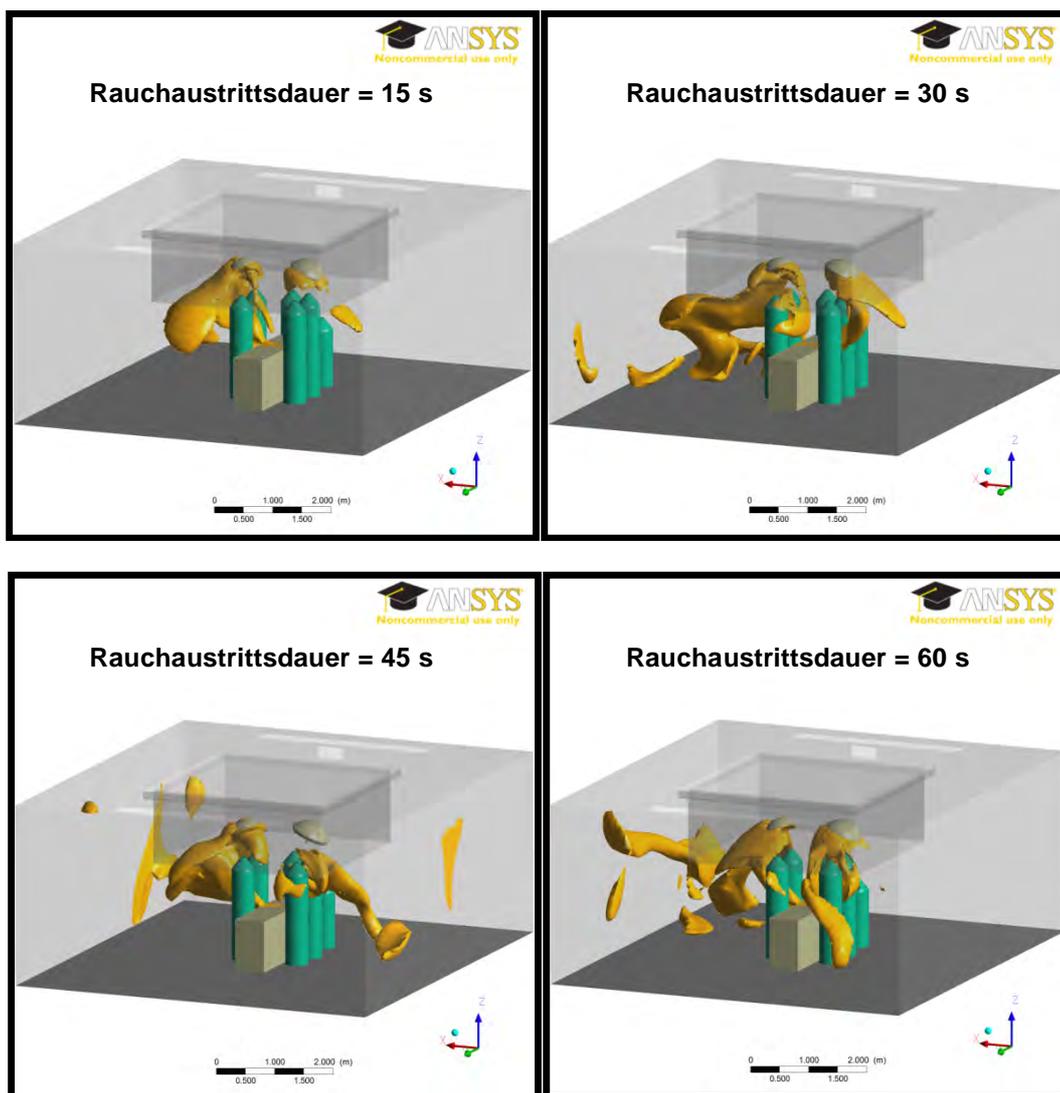


Abbildung 10: Zeitabhängige Rauchausbreitung im OP-Raum mit Berücksichtigung strömungsrelevanter Hindernisse

In **Abbildung 10** werden in Abhängigkeit der Zeit das Einströmen sowie die Verteilung des chirurgischen Rauchs beobachtet. Es wird schnell ersichtlich, dass der Rauch nun in Richtung der Köpfe des OP-Teams aufsteigt. Das Aufsteigen des chirurgischen Rauchs kann als eine Folge des Einbaus von Dummies und OP-Leuchten gesehen werden. Durch den Einbau der OP-Leuchten wird der einströmende Differential-Flow massgeblich gestört, das heisst er kommt nicht mehr homogen am OP-Tisch an, sondern wird durch das Umströmen der OP-Leuchten verwirbelt und verliert dadurch an Verdrängungswirkung. Zugleich nicht zu vernachlässigen ist die Auftriebsentwicklung durch die thermische Energieabgabe der OP-Leuchten sowie der Dummies. Diese Dummies tragen ebenso zur Verschlechterung bei, denn sie stören zum einen das Abfließen des durch den Differential-Flow verdrängten chirurgischen Rauchs und zum anderen unterstützen sie durch ihre thermische Energieabgabe den Auftrieb des gesundheitsgefährdenden Rauchs.

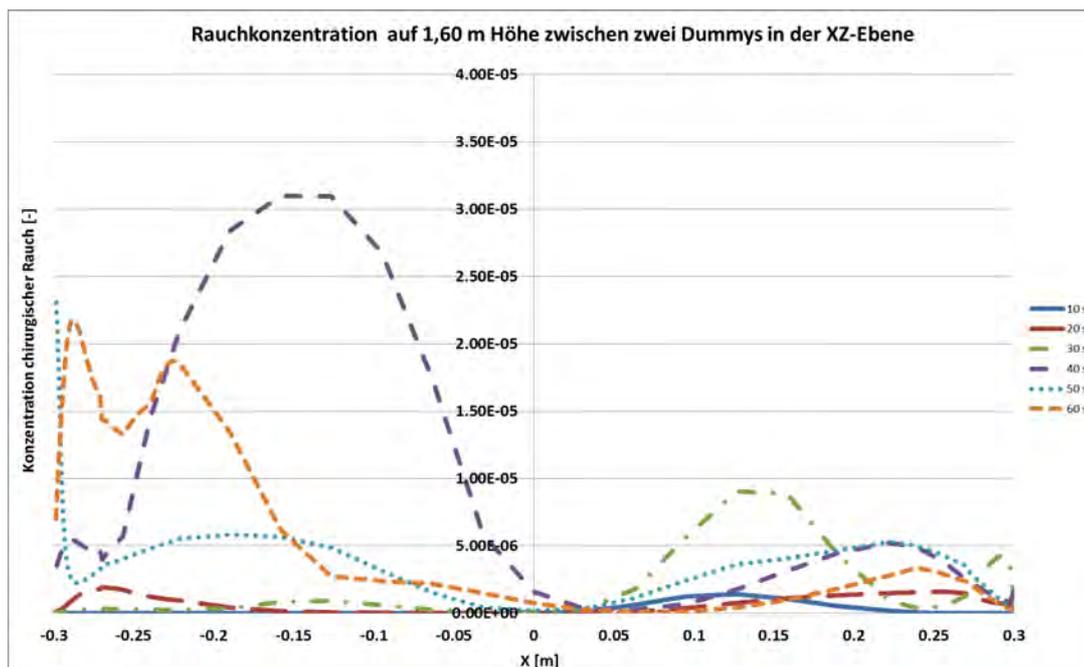


Abbildung 11: Diagramm der Rauchkonzentrationen auf der eingefügten Linie zu verschiedenen Zeitpunkten

In **Abbildung 11** sind sechs Konzentrationen, welche zu sechs verschiedenen Zeitpunkten ausgewertet wurden, aufgezeichnet. Auf der X-Achse ist die Länge der eingefügten Linie abgebildet. Zur Orientierung, bei -0.3 m auf der linken Seite der X-Achse beginnt die Oberfläche des einen Dummy sowie bei +0.3 m auf der rechten Seite der X-Achse. Dazwischen ist das Strömungsgebiet, welches von oben vom Differential-Flow durchströmt wird. Bei der Stelle 0 auf der X-Achse ist die OP-Raum- sowie die OP-Tischmitte.

Die Rauchkonzentrationen sind vom aufgezeichneten Zeitpunkt abhängig, weil es sich um eine stark instationäre Strömung handelt, welche sich andauernd ändert. Sieht man von den Spitzenwerten ab, welche bis auf 3×10^{-5} [-] hochgehen, so sind die meisten Rauchkonzentrationen zwischen 5×10^{-6} [-] und 1×10^{-5} [-]. Weiter wird deutlich, dass die Konzentrationen in Richtung der Dummies ansteigen und in der Mitte eher tief ausfallen. Ein entscheidender Grund dafür sind die OP-Leuchten, welche den Differential-Flow stören und Wirbel sowie Totgebiete in diesen Regionen induzieren.

3.3.5 Fazit

Im ganzen OP-Raum und unter Berücksichtigung der Dummies und der Standard OP-Leuchten hat die Simulation gezeigt, dass der chirurgische Rauch bis zum Kopfbereich des OP-Teams gelangt. Durch die sehr sensible Einstellung bei der Konzentration des anzuzeigenden Rauchgehalts in der Simulation, wird eine grosse Menge an Rauchpartikeln angezeigt. Viele dieser angezeigten Partikel haben nur eine sehr geringe Konzentration an chirurgischem Rauch und darum ist die abgebildete Simulation als eine Extremwertabbildung des Phänomens zu verstehen. Zudem gilt es zu beachten, dass die Rauchkonzentration in der gesamten Simulation eher niedrig ausfällt. Die Grundaussage bleibt aber die gleiche, nämlich dass sich der Rauch, unter Berücksichtigung der Dummies und OP-Leuchten, in Richtung der Köpfe des OP-Teams ausbreitet. Um Aussagen über die Gesundheitsgefährdung des OP-Teams zu machen, bedarf es eines Experten aus diesem Gebiet, welcher die Schwellenwerte der Rauchkonzentration und die Gefährdung in Abhängigkeit der ausgesetzten Zeitdauer kennt. Zudem hängt die Gefährdung noch von anderen Parametern ab, welche in dieser Simulation nicht eingebunden wurden, z.B. die Dauer der Rauchentwicklung. In der Simulation wurde über die ganze Zeit konstant Rauch zugeführt. Dies ist in der Praxis sicher nicht der Fall, ermöglichte aber die Extremwertabbildung.

3.4 Berücksichtigung von Dummies und strömungsoptimierten OP-Leuchten

3.4.1 Ausgangslage

In der vorhergehenden Simulation, in welcher der chirurgische Rauch in den Kopfbereich des OP-Teams gelangte, könnte durch das Ersetzen der Standard OP-Leuchten evtl. eine Verbesserung erzielt werden. Hierfür werden strömungsoptimierte OP-Leuchten, welche auf dem Markt erhältlich sind, in dasselbe Simulationsmodell wie unter 3.3 eingesetzt. Die restlichen Parameter bleiben unverändert.

Abzuklären ist, ob die strömungsoptimierten OP-Leuchten verhindern können, dass der Rauch zu den Köpfen des OP-Teams aufsteigt.

3.4.2 Modellierung

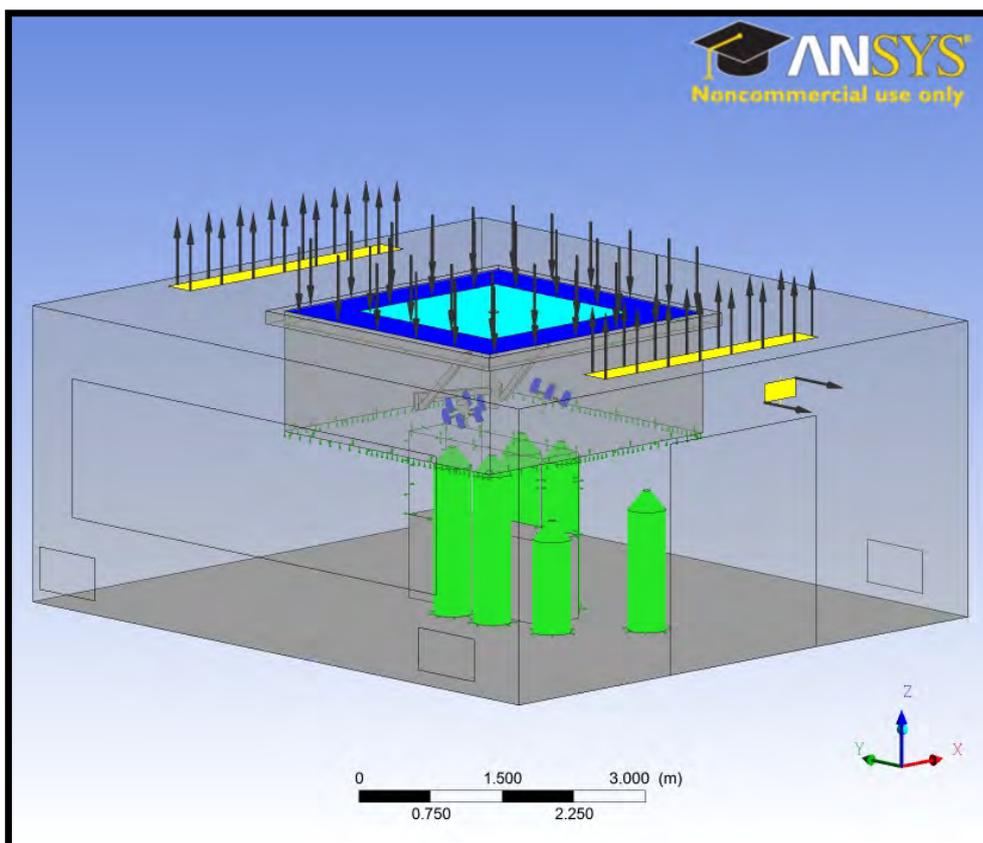


Abbildung 12: Situation im ganzen OP-Raum mit Berücksichtigung strömungsrelevanter Hindernisse

Abbildung 12 zeigt den ganzen OP-Raum und die dabei eingeführten Randbedingungen. Diese Randbedingungen sind:

- Differential-Flow mit 0.4 m/s in der Mitte (hellblau) und mit 0.2 m/s am Rand (dunkelblau)
- Rauchquelle auf dem Tisch, die Einströmgeschwindigkeit beträgt 1 m/s
- Raumgeometrie (l x b x h) 7,358 m x 6,528 m x 3,2 m
- Tischgeometrie (l x b x h) 2 m x 0,54 m x 0,9 m
- Deckenschürze 1 m
- Strukturiertes und unstrukturiertes Gitter mit ca. 4 Mio. Zellen
- Berücksichtigung thermischer Effekte (OP-Leuchten, Dummies, usw.)

3.4.3 Auswertung

1. Es wurde das Einströmverhalten aus der Rauchquelle über die Zeit beobachtet und geschaut, ob der Rauch bis zu den Köpfen des OP-Teams aufsteigt. Hierfür wurde eine transiente Rechnung aufgesetzt und ausgewertet. In der Simulation werden Rauchpartikel mit einem Rauchgehalt von bis zu 1×10^{-5} [-] erkannt und als solche angezeigt.
2. Damit eine quantitative Aussage gemacht werden kann, wurde auf der Höhe von 1,60 m in der XZ-Ebene zwischen zwei Dummies eine Linie eingefügt (**Abbildung 13**), welche es erlaubt die Rauchkonzentration auf ihr aufzuzeichnen. Diese gewonnenen Ergebnisse werden dann in einer Exceldatei verarbeitet und ausgewertet.

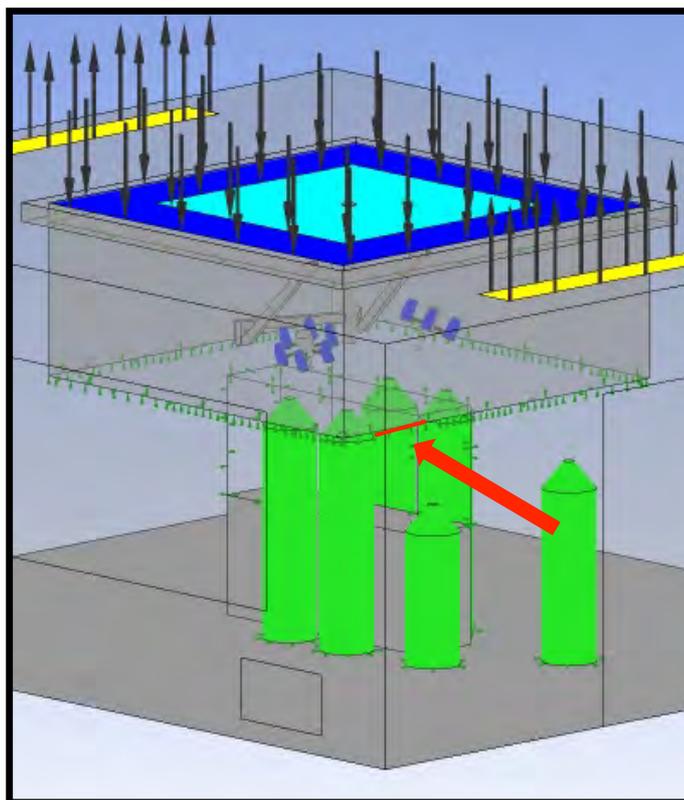


Abbildung 13: Eingefügte Linie für die Bestimmung der Rauchkonzentration auf Kopfhöhe

3.4.4 Resultate

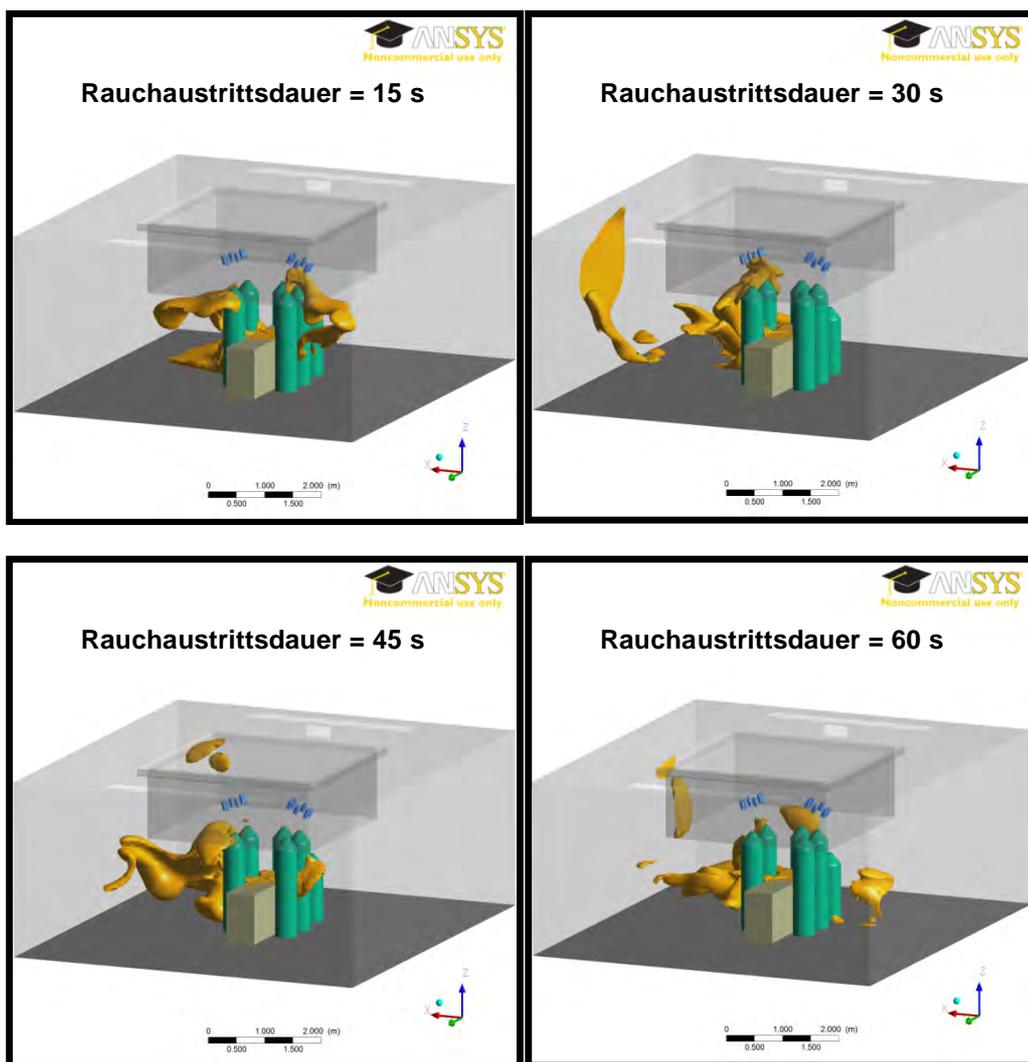


Abbildung 14: Zeitabhängige Rauchausbreitung im OP-Raum mit Berücksichtigung strömungsrelevanter Hindernisse

In **Abbildung 14** werden in Abhängigkeit der Zeit das Einströmen sowie die Verteilung des chirurgischen Rauchs beobachtet. Es wird schnell ersichtlich, dass der Rauch zwar immer noch in Richtung der Köpfe des OP-Teams aufsteigt, aber mit einer viel kleineren Intensität und viel kürzeren Verweildauern im Kopfbereich. Zudem wird der chirurgische Rauch markant besser vom OP-Tisch verdrängt und er befindet sich hauptsächlich im äusseren Bereich des OP-Raums, das heisst hinter den Dummies. Dies kann als Folge des Einbaus der strömungsoptimierten OP-Leuchten gesehen werden, welche den einströmenden Differential-Flow nur noch geringfügig stören und somit annähernd homogen am OP-Tisch ankommt. Dies aus dem Grund, dass das Umströmen der optimierten OP-Leuchten weniger Wirbel und Totgebiete erzeugt und der Differential-Flow somit deutlich weniger an Verdrängungswirkung verliert. Zugleich ist die Auftriebsentwicklung durch die geringere thermische Energieabgabe der optimierten OP-Leuchten, welche mit LED-Leuchten ausgestattet sind, eine weitere strömungstechnische Verbesserung. Die Dummies stören einerseits das Abfließen des durch den Differential-Flow verdrängten chirurgischen Rauchs und andererseits unterstützen sie durch ihre thermische Energieabgabe den Auftrieb des gesundheitsgefährdenden Rauchs.

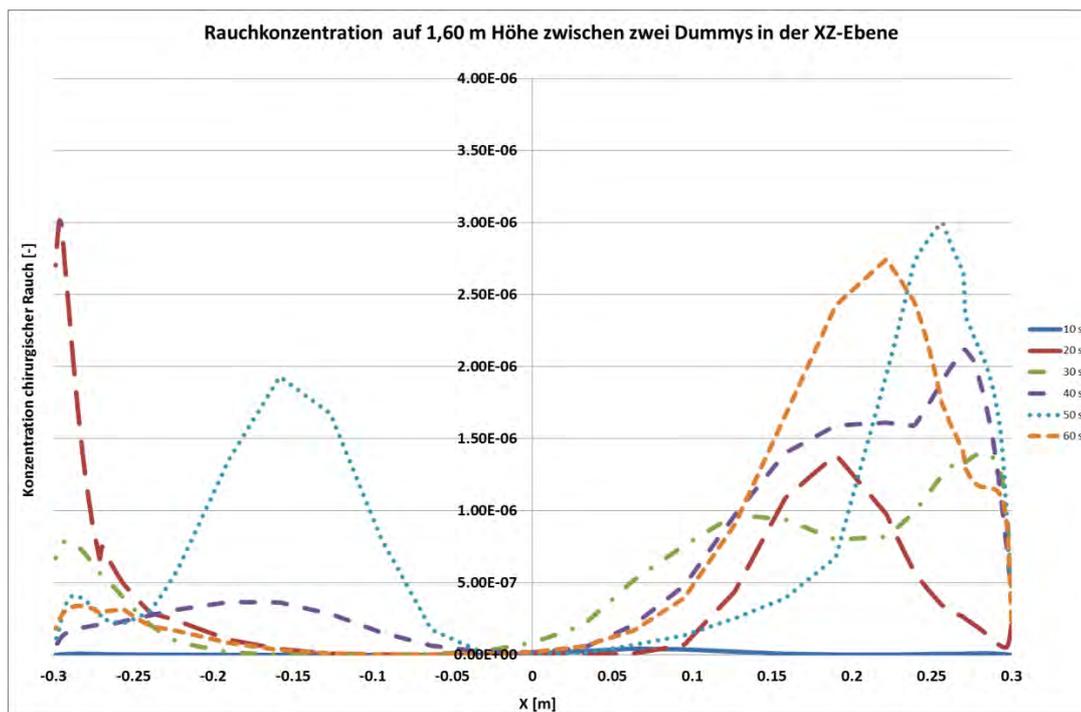


Abbildung 15: Diagramm der Rauchkonzentrationen auf der eingefügten Linie zu verschiedenen Zeitpunkten

In **Abbildung 15** sind sechs Konzentrationen, welche zu sechs verschiedenen Zeitpunkten ausgewertet wurden, aufgezeichnet. Auf der X-Achse ist die Länge der eingefügten Linie abgebildet. Zur Orientierung, bei -0.3 m auf der linken Seite der X-Achse beginnt die Oberfläche des einen Dummys sowie bei $+0.3$ m auf der rechten Seite der X-Achse. Dazwischen ist das Strömungsgebiet, welches von oben vom Differential-Flow durchströmt wird. Bei der Stelle 0 auf der X-Achse ist die OP-Raum- sowie die OP-Tischmitte.

Die Rauchkonzentrationen sind vom aufgezeichneten Zeitpunkt abhängig, weil es sich um eine stark instationäre Strömung handelt, welche sich andauernd ändert. Sieht man von den Spitzenwerten ab, welche bis auf 3×10^{-6} [-] hochgehen, so sind die meisten Rauchkonzentrationen zwischen 5×10^{-7} [-] und $1,5 \times 10^{-6}$ [-]. Weiter wird deutlich, dass die Konzentrationen in Richtung der Dummys ansteigen und in der Mitte eher tiefer ausfallen. Ein entscheidender Grund dafür dürften in dieser Simulation die Dummys und ihre thermische Energieabgabe sein und weniger die strömungsoptimierten OP-Leuchten. Diese stören den Differential-Flow um ein Vielfaches weniger und verringern dadurch die Bildung von Wirbeln und Totgebieten in diesen Regionen. Generell liegen die Rauchkonzentrationswerte um etwa das 10-fache tiefer, was eine Anpassung der Skala in **Abbildung 15** notwendig machte.

3.4.5 Fazit

Durch den Einbau der strömungsoptimierten OP-Leuchten wird eine deutliche Verbesserung bezüglich der Rauchkonzentration im Kopfbereich des OP-Teams erkannt. Der gesundheitsgefährdende Rauch befindet sich nur sehr selten im Kopfbereich des OP-Teams. Über weite Strecken der Simulation befindet sich der Rauch im Raum hinter den Dummys. Die Gefahr besteht jedoch darin, dass durch die Zirkulation des OP-Teams im OP-Raum die Strömung markant verändert wird und der Rauch somit wieder in die Gefahrenzone gebracht wird.

Wie schon in der vorhergehenden Simulation ist die Einstellung bei der Konzentration des anzuzeigenden Rauchgehalts als sehr sensibel gewählt worden. Dadurch wird natürlich eine grosse Menge an Rauchpartikeln angezeigt. Viele dieser angezeigten Partikel haben nur eine sehr geringe Konzentration an chirurgischem Rauch und darum ist die abgebildete Simulation als eine Extremwertabbildung des Phänomens zu verstehen. Zudem gilt es zu beachten, dass die Rauchkonzentration in der gesamten Simulation sehr niedrig ausfällt. Dies hängt aber noch von anderen Parametern ab, welche in dieser Simulation nicht eingebunden wurden, z.B. die Dauer der Rauchentwicklung. In der Simulation wurde über die ganze Zeit konstant Rauch zugeführt. Dies ist in der Praxis sicher nicht der Fall, ermöglichte aber die Extremwertabbildung.

Generell kann gesagt werden, dass die Rauchkonzentration im Bereich der Köpfe des OP-Teams durch den Einbau der strömungsoptimierten OP-Leuchten um das 10-fache verringert werden konnte, was eine doch beträchtliche Verbesserung zu den Standard OP-Leuchten darstellt.

4 Schlussfolgerung

Die durchgeführten Arbeiten haben einige interessante Erkenntnisse hervorgebracht und zugleich einen sehr grossen Forschungsbereich aufgetan. Damit allgemeingültige Aussagen über die Gefährdung des OP-Teams durch den chirurgischen Rauch getroffen werden können, bedarf es einer weiteren interdisziplinären Zusammenarbeit aus den Bereichen und Branchen der Hersteller, Anwender und Forscher. Es gibt zu viele Parameter, Randbedingungen und Konfigurationen welche es noch abzuklären gilt, bevor eine klare und eindeutige Aussage bezüglich der Gefährdung durch chirurgischen Rauch auf das OP-Team gemacht werden kann.

Die in diesem Projekt erarbeiteten Erkenntnisse und Resultate aus den vier Simulationen sind hinreichend genau um erste Aussagen und Tendenzen bezüglich der Rauchausbreitung sowie der Rauchkonzentrationen im OP-Raum, im Speziellen im Kopfbereich des OP-Teams, machen zu können. Es konnten aber bei weitem nicht alle möglichen Randbedingungen und Konfigurationen simuliert werden, welche eine endgültige Aussage über die Sicherheit des OP-Teams erlauben würden. Dafür bräuchte es wie oben bereits erwähnt, weiterführende Arbeiten im Bereich der Untersuchung des chirurgischen Rauchs sowie Expertenaussagen in Bezug auf die Gefährdung des OP-Teams durch die vorherrschenden Rauchkonzentrationen.

Horw, 30. Juni 2012

Seite 90/90

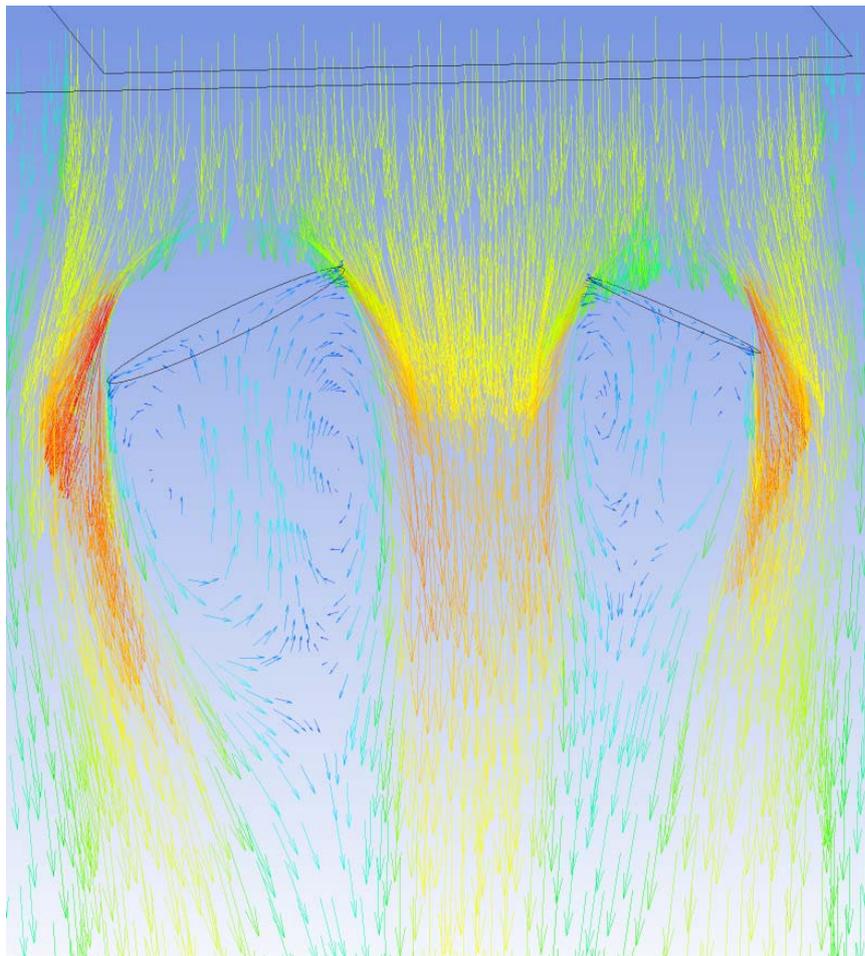
Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II

10.5. Anhang 5: Teilbericht: CFD Strömungssimulationen OP Lampen

Abschlussbericht

Horw, 17. Januar 2012
Seite 1/12

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II – CFD Strömungssimulationen OP Lampen KTI-Projekt 10058.1 PFLS-LS



Impressum

Auftraggeber	Bundesamt für Berufsbildung und Technologie BBT Förderagentur für Innovationen KTI	
Auftragnehmer	Hochschule Luzern Technik & Architektur Zentrum für Integrale Gebäudetechnik ZIG Technikumstrasse 21 CH-6048 Horw	
Verfasser	Prof. Urs-Peter Menti Iwan Plüss Serge Mattli	HSLU T&A HSLU T&A HSLU T&A
Version/Datum	E10. Januar 2012	
SAP-Nr.	1120405	
Dateiname	r_20120509_GIG_II_Bericht_CFD_Strömungssimulationen OP Lampen.docx	

Horw, 17. Januar 2012
Seite 3/3

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II – CFD Strömungssimulationen OP Lampen

-
- KTI-Projekt 10058.1 PFLS-LS
-
- /
-
-
-

Zusammenfassung

Auf die konkrete Fragestellung wie Operationsleuchten das Strömungsgeschwindigkeitsprofil der turbulenzarmen Verdrängungsströmung beeinflussen, soll mittels CFD Simulationen eine Antwort gefunden werden. Die Modellierung für die Simulation wurde vereinfacht um Zeit und Rechenleistung zu sparen.

Grundlegend wurden zwei Leuchtentypen (Tellerleuchten und Zylinderleuchten) untersucht und verglichen. Die Resultate zeigen, dass die Zylinderleuchten das Strömungsprofil weniger ausgeprägt beeinflussen im Vergleich zu den Tellerleuchten. Auch finden nahezu keine unerwünschten Rückströmungen statt, ganz im Gegensatz zu den Tellerleuchten. Zusammenfassend ist die Verdrängungsströmung bei Zylinderleuchten turbulenzarmer als bei Tellerleuchten und deshalb hygienisch als besser zu bewerten.

Zusätzlich wurde noch die Konkrete Fragestellung wiederlegt, dass sich die Strecke der Strömungsbeeinflussung fünfmal dem Durchmesser einer Tellerlampe entspricht. Es gilt hier jedoch anzumerken, dass die grössten Unregelmässigkeiten nach dieser Strecke verschwunden sind.

Horw, 17. Januar 2012
Seite 4/4

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II – CFD Strömungssimulationen OP Lampen

-
- KTI-Projekt 10058.1 PFLS-LS
-
- /
-
-
-

Inhaltsverzeichnis

1. Teilprojekt 4: Anwendung / Weiterentwicklung Planungstool CFD (Luftströmungssimulationen) – Bearbeitung konkreter Fragestellungen mittels CFD- Simulationen	5
1.1. Zielsetzung.....	5
1.2. Methodische Vorgehensweise	5
1.3. Untersuchungsfrage Beeinflussung des Strömungsprofils / Strömungsbildes durch die Operationsleuchten.....	6
1.4. Schlussfolgerung	10
2. Literaturverzeichnis	12
3. Abbildungsverzeichnis	12
4. Tabellenverzeichnis	12

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II – CFD Strömungssimulationen OP Lampen

-
-
-
-
-
-
-

• KTI-Projekt 10058.1 PFLS-LS

1. Teilprojekt 4: Anwendung / Weiterentwicklung Planungstool CFD (Luftströmungssimulationen) – Bearbeitung konkreter Fragestellungen mittels CFD-Simulationen

Die Versorgung des Operationssaals mit sauberer Luft erfolgt gewöhnlich über ein in der Decke installiertes Zuluft-Deckenfeld, um das Eindringen luftgetragener Bakterien in die Wunde zu verhindern. Bei solchen Zuluft-Deckenfeldern handelt es sich um Anlagen mit laminarer Abwärtsströmung. (Turbulenzarme Verdrängungsströmung)¹ Die Operationsleuchten sind üblicherweise zwischen dieser Abwärtsströmungsanlage und dem Patienten auf dem Operationstische angebracht. Sie können daher zu einer deutlichen Störung der Luftströmung in der näheren Umgebung des Operationstisches führen. [1]

Bei der nachfolgenden Untersuchung soll der Unterschied zwischen einer Tellerlampe und einer Zylinderlampe auf die Abwärtsströmung aufgezeigt werden.

1.1. Zielsetzung

Es soll eine Aussage gemacht werden können über die Störung des Strömungsgeschwindigkeitsprofils in der Abwärtsströmung durch die Operationsleuchten.

Folgende konkrete Frage soll zusätzlich noch beantwortet werden:

Trifft die Aussage zu, dass die Strecke der Strömungsbeeinflussung nach den Tellerleuchten fünfmal den Durchmesser der jeweiligen Tellerleuchte beträgt?

1.2. Methodische Vorgehensweise

Für die Untersuchung wird zur Vereinfachung lediglich der Bereich unter dem Zuluft-Deckenfeld modelliert. Hierbei wird die Induktion der angrenzenden Raumluft nicht berücksichtigt. Da es sich um eine isolierte Betrachtung der Operationsleuchten handelt wird kein Operationstisch und kein Boden im Modell berücksichtigt. Damit sich die Strömung ideal verhalten kann ist die Raumhöhe auf 10 Meter angesetzt. Zur Validierung des Modells wird zuerst eine Variante simuliert bei welcher keine störenden Leuchten in der Strömung vorhanden sind. Weiter wurden keine thermischen Einflüsse berücksichtigt.

Die Simulation wird mit dem CFD Programm ANSYS 12.1 durchgeführt. Hierfür wird zuerst der „Luftkanal“ welcher dem Raum unter dem Zuluft-Deckenfeld entspricht geometrisch modelliert. Danach wird für je eine Version mit Tellerlampe und Zylinderlampe erstellt. Diese Modelle werden strukturiert vernetzt² und für die Simulation anschliessend mit den jeweiligen Rahmenbedingungen versehen.

Aus der Ergebnisdatei können dann die Strömungsprofile / Strömungsbilder generiert werden.

¹ Anmerkung des Verfassers

² Die Randzonen und die Trennzone zwischen den beiden unterschiedlich grossen Zuluftgeschwindigkeitsbereichen wurden detaillierter vernetzt um die auftretenden Strömungsphänomene besser berücksichtigen zu können.

Horw, 17. Januar 2012
Seite 6/6

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II – CFD Strömungssimulationen OP Lampen

-
- KTI-Projekt 10058.1 PFLS-LS
-
- /
-
-
-

1.3. Untersuchungsfrage Beeinflussung des Strömungsprofils / Strömungsbildes durch die Operationsleuchten

1.3.1. Vorgehen

Für die Simulation werden die Rahmenbedingungen gemäss Tabelle 1 verwendet.

<p>Geometrie: h: 10 m b₁: 3 m b₂: 2 m</p> <p>Austrittsgeschwindigkeit Zuluft: v₁: 0.4 m/s v₂: 0.2 m/s</p> <p>Temperaturen: Adiabat, Zulufttemperatur bei 25°C</p>	
--	--

Tabelle 1: Rahmenbedingungen I für die Simulation

Die Position der Teller-, respektive Zylinderleuchten wird gemäss der SWKI Richtlinie 99-3 [2] Standardanordnung vorgenommen. Die Angaben zur Standardanordnung und zur Leuchtengeometrie sind unter Tabelle 2 ersichtlich.

Tellerleuchten	Zylinderleuchten	Skizze zur Standardanordnung
Durchmesser: 500 mm und 700 mm	Durchmesser äussere Zylinder: 80 mm Durchmesser innerer Zylinder: 115 mm	

Tabelle 2: Rahmenbedingungen II für die Simulation

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II – CFD Strömungssimulationen OP Lampen

-
- KTI-Projekt 10058.1 PFLS-LS
-
- /
-
-
-

1.3.2. Ergebnis

1.3.2.1. Strömungsbild bei ungehinderter Strömung

Zur Validierung des Modelles wird eine Simulation ohne störende Leuchten durchgeführt. Das Strömungsbild ist in Abbildung 1 ersichtlich. Dabei ist gut ersichtlich, wie sich bei ungehinderter Strömung das Luftgeschwindigkeitsprofil auch nach 10 Metern nicht stark verändert. Der Einfluss der Grenzschichten ist somit gering auf die ungehinderte Strömung, wenn Sie gleichgerichtet verlaufen.

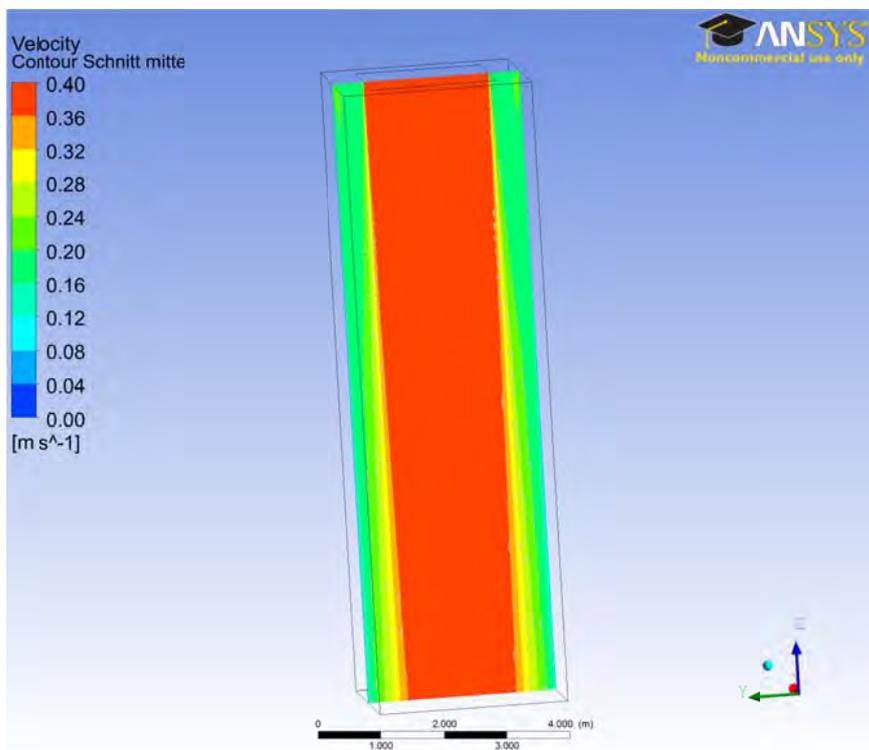


Abbildung 1: Strömungsbild im Schnitt bei ungehinderter Strömung

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II – CFD Strömungssimulationen OP Lampen

-
- KTI-Projekt 10058.1 PFLS-LS
-
- /
-
-
-

1.3.2.2. Strömungsbild mit Tellerleuchten

Werden die beiden Tellerleuchten in die Strömung eingebaut fällt auf, dass die Strömung unterhalb der Leuchten stark beeinflusst wird. Nach ungefähr 5.9m wird das Strömungsprofil wieder regelmässig. (siehe Abbildung 2)

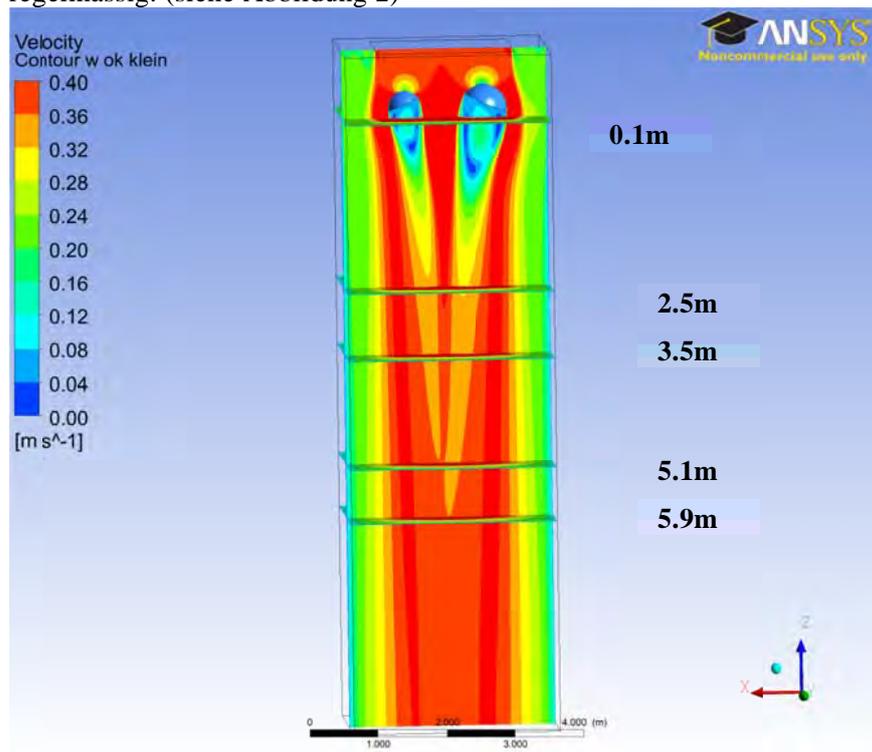


Abbildung 2: Strömungsbild mit den Tellerleuchten

Interessant wird es wenn man die Strömung nur in z-Richtung betrachtet. (siehe Abbildung 3) Dies heisst in die Richtung der Abwärtsströmung. Bei dieser Darstellung kommen positive Luftgeschwindigkeitswerte vor was nichts anderes bedeutet, dass in diesen Bereichen eine Rückströmung auftritt. Die Rückströmungen sind vektoriell in der Abbildung 4 ersichtlich. Rückströmungen können sich negativ auf die Verweilzeit von Bakterien in der Umgebungsluft des Patienten auswirken.

Horw, 17. Januar 2012
Seite 9/9

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II – CFD Strömungssimulationen OP Lampen

-
- KTI-Projekt 10058.1 PFLS-LS
-
- /
-
-
-

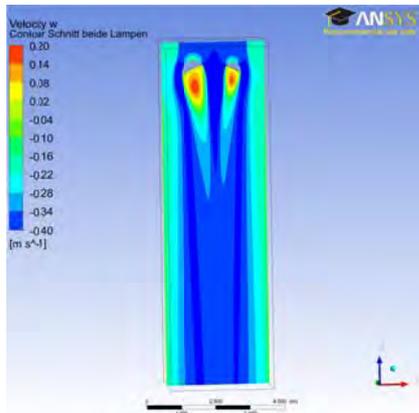


Abbildung 3: Strömungsbild in z-Richtung mit Tellerleuchten

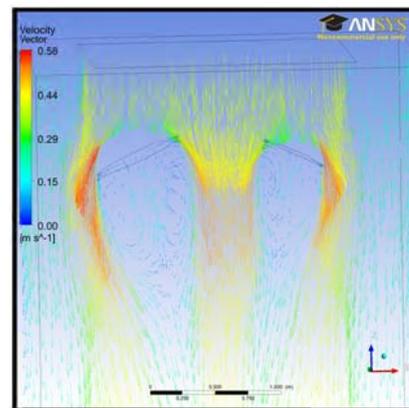


Abbildung 4: Vektorielle Darstellung des Strömungsbildes mit Tellerleuchten

1.3.2.3. Strömungsbild mit Zylinderleuchten

Die Zylinderleuchten beeinflussen das Strömungsgeschwindigkeitsprofil weniger ausgeprägt als die Tellerleuchten. Dies bezogen auf die Fläche unter den Leuchten. Aus Abbildung 5 geht jedoch deutlich hervor, dass das Strömungsprofil sich erst nach 7.3m wieder regelmässig einstellt. Im Vergleich dazu ist dies bei den Tellerleuchten schon nach 5.9m der Fall.

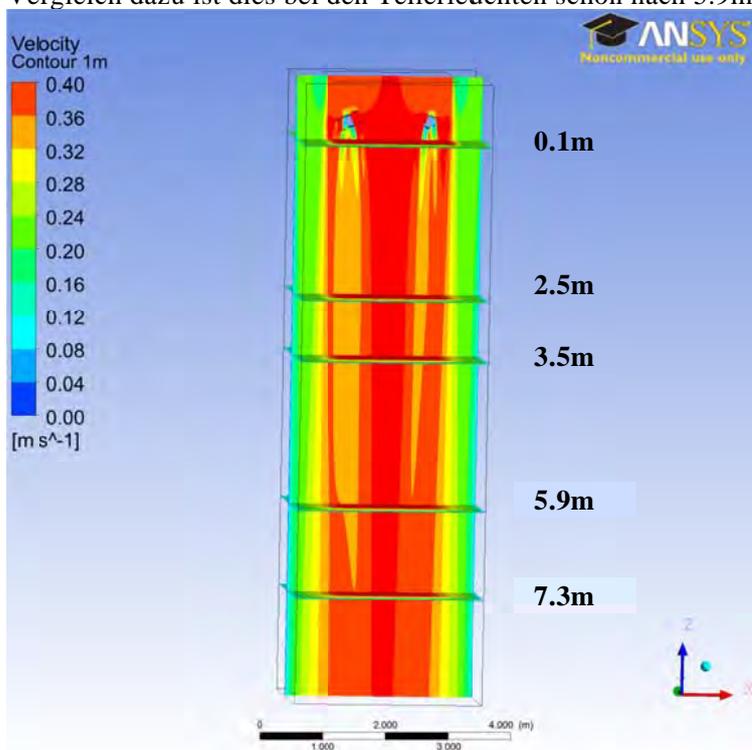


Abbildung 5: Strömungsbild mit den Zylinderleuchten

Horw, 17. Januar 2012
Seite 10/10

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II – CFD Strömungssimulationen OP Lampen

-
- KTI-Projekt 10058.1 PFLS-LS
-
- /
-
-
-

Bei den Zylinderleuchten bilden sich im Vergleich zu den Tellerleuchten nahezu keine Rückströmungen.

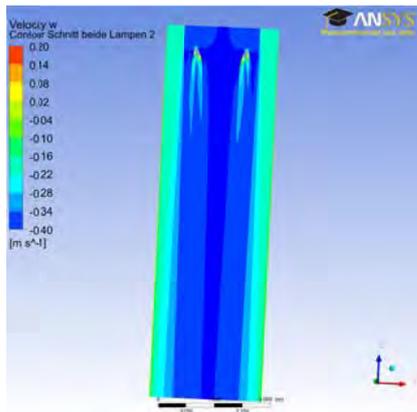


Abbildung 6: Strömungsbild in z-Richtung mit Zylinderleuchten

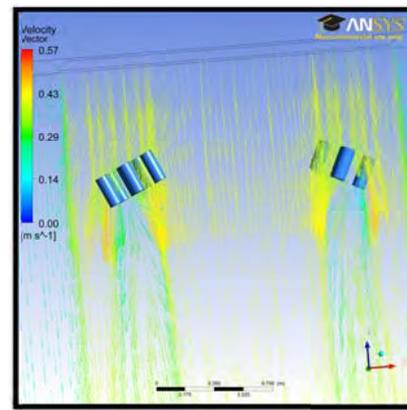


Abbildung 7: Vektorielle Darstellung des Strömungsbildes mit Zylinderleuchten

1.3.2.4. Trifft die Aussage zu, dass die Strecke der Strömungsbeeinflussung nach den Tellerleuchten fünfmal den Durchmesser der jeweiligen Tellerleuchte beträgt?

In der Abbildung 2 ist klar ersichtlich, dass sich das Strömungsbild unter der kleinen Tellerleuchte erst nach 5.1m beruhigt. Diese entspricht in etwa zehnmal dem Durchmesser der kleinen Tellerleuchte.

Bei der grossen Tellerleuchte beruhigt sich das Strömungsprofil nach 5.9m was in diesem Fall ca. dem acht fachen Durchmesser der grossen Tellerlampe entspricht.

Aufgrund obiger Ausführung trifft die Aussage nicht zu, dass sich die Strömungsbeeinflussung bei Tellerleuchten nach einer Strecke von fünfmal dem Durchmesser beruhigt. Es gilt hierzu jedoch zu ergänzen, dass die grössten Unregelmässigkeiten im Strömungsbild durchaus nach einer Strecke von fünfmal dem Leuchten Durchmesser verschwunden sind.

1.4. Schlussfolgerung

Anhand der Simulationsresultate mit den vereinfachten Rahmenbedingungen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Bei den Zylinderleuchten tritt im Vergleich zu den Tellerleuchten fast keine unerwünschte Rückströmung auf.
- Die Zylinderleuchten beeinflussen das Strömungsgeschwindigkeitsprofil weniger ausgeprägt als die Tellerleuchten. Dafür wird das Geschwindigkeitsprofil jedoch bei den Zylinderleuchten länger beeinflusst.
- Die Strömung unter den Zylinderleuchten ist aus obigen Gründen turbulenzarmer als bei den Tellerleuchten. Womit die Zylinderleuchten eine bessere turbulenzarme Verdrängungsströmung gewährleisten.

Horw, 17. Januar 2012
Seite 11/11

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II – CFD Strömungssimulationen OP Lampen

•

• KTI-Projekt 10058.1 PFLS-LS

•

• /

•

•

•

- Die Aussage, dass sich die Strömungsbeeinflussung nach einer Strecke von fünfmal dem Durchmesser der Tellerleuchte beruhigt ist widerlegt. Die grössten Unregelmässigkeiten sind jedoch nach dieser Strecke verschwunden.

Horw, 17. Januar 2012
Seite 12/12

Gebäudetechnik im Gesundheitswesen II – CFD Strömungssimulationen OP Lampen

-
- KTI-Projekt 10058.1 PFLS-LS
-
- /
-
-
-

2. Literaturverzeichnis

- [1] „Influence of the shape of surgical lights on the disturbance of the airflow“, Proceedings of ROOMVENT, 11th International Conference on Air Distribution in Rooms, 24-27 May, Busan , Korea, 8 pages., Zoon, W. A. C., Heijden, M. G. M. v. d., Hensen, J. L. M., & Loomans, M. G. L. C., 2009
- [2] SWKI Richtlinie 99-3, Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage in Spitalbauten (Planung, Bau, Betrieb), Schweizerischer Verein von Wärme- und Klima-Ingenieuren, 2003

3. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Strömungsbild im Schnitt bei ungehinderter Strömung.....	7
Abbildung 2: Strömungsbild mit den Tellerleuchten	8
Abbildung 3: Strömungsbild in z-Richtung mit Tellerleuchten	9
Abbildung 4: Vektorielle Darstellung des Strömungsbildes mit Tellerleuchten.....	9
Abbildung 5: Strömungsbild mit den Zylinderleuchten	9
Abbildung 6: Strömungsbild in z-Richtung mit Zylinderleuchten	10
Abbildung 7: Vektorielle Darstellung des Strömungsbildes mit Zylinderleuchten.....	10

4. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Rahmenbedingungen I für die Simulation.....	6
Tabelle 2: Rahmenbedingungen II für die Simulation	6