

Peter Royl und Jianjun Xiao

Abbau von Aerosolen in einem Wohnhaus mit Frischluftheizung

Untersuchungen zur Effizienz komplexer Lüftungssysteme

Die Beheizung und gleichzeitige Belüftung von Wohngebäuden zeichnen Frischluftheizungen mit Warmluftquellen und Wärmrückgewinnung aus der Abluft aus. Der kontinuierliche Luftaustausch wird zusätzlich hohen hygienischen Anforderungen gerecht, das zeigen Untersuchungen zum Abbau von Bioaerosolen in diesen Heiz- und Lüftungssystemen mit dem im Institut für Thermische Energietechnik und Sicherheit (ITES) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) entwickelten Fluid Mechanik Programm GASFLOW.

Eine Frischluftheizung mit Warmluftquellen und Wärmrückgewinnung aus der Abluft ermöglicht die Beheizung und gleichzeitig die Belüftung von Wohngebäuden durch einen kontinuierlichen Luftaustausch, der hohe hygienische Anforderungen erfüllt. Im Fluid Mechanik Programm GASFLOW des des Karlsruher Instituts für Technologie KIT [1] wurde ein dreidimensionales Modell eines allseitig abgeschlossenen Fertighauses (Luftvolumen 600m^3) mit Fenstern, Innenwänden und Türöffnungen erstellt [2]. Das Modell ist kartesisch und umfasst 17 000 Rechenzellen und 40 000 Wände und wird von außen mit kaltem Wind gekühlt (Abb. 1).

Für zwei Rechenfälle A und B mit zwei Raten von Warmluftquellen mit stündlichem und halbstündlichem

KERNAUSSAGEN

- Frischluftheizungen können mit gezielter Anordnung der Quellen und Senken Bioaerosole aus belasteten Räumen gut entfernen und die Wärme gleichmäßig im Haus verteilen.
- 3-D-Analysen mit dem CFD Programm GASFLOW sind gut geeignet, für die Auslegung von Frischluftheizungen und zum Nachweis der Wirksamkeit des Aerosolabbaus.

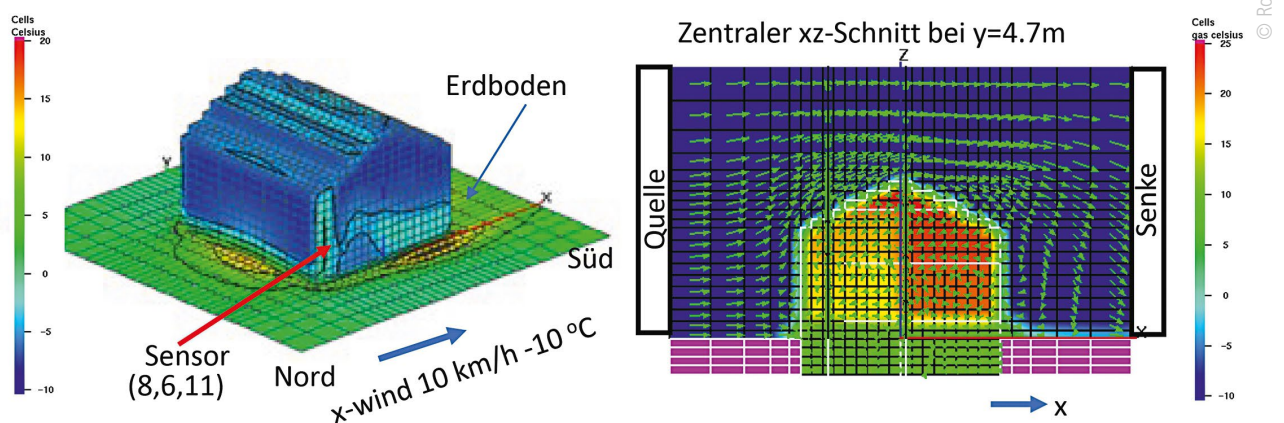


Abb. 1: Modellhaus mit Außentemperatur, Strömungsgeschwindigkeiten und Gastemperaturen im zentralen Schnitt 4 000 Sekunden nach Aktivieren des kalten Windes. Außenkühlung durch Flächenquelle und -senke an Rändern des Rechnetzes. Ausgangspunkt bei 0 Sekunden sind homogene Zustände mit 25°C im Innen- und Außenfeld. (Fall A)

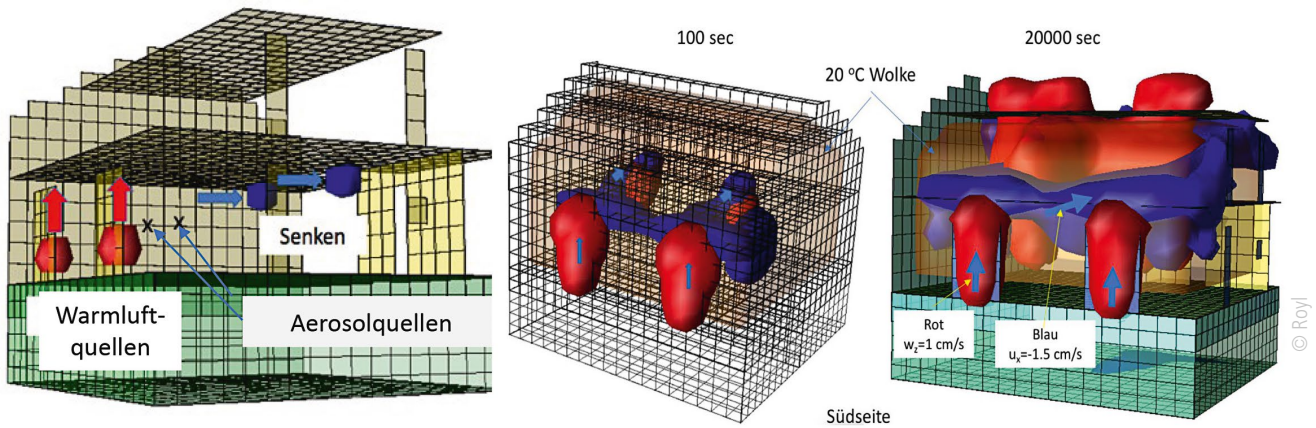


Abb. 2: Heizung und Lüftung eines dichten und von außen gekühlten Hauses mit zwei Warmluftquellen im Wohn- und Esszimmer und zwei Senken in der Küche und im WC. Eingetragen sind die Lagen der beiden Aerosolquellen und zwei Momentaufnahmen der Strömungen zwischen den Quellen und Senken. (Fall A)

Luftaustausch (600 bzw. 1200 m³/h) und zwei Senken im Haus (Druckrandbedingung) wird die transient erforderliche Quelltemperatur zur Beibehaltung einer über Erd- und Dachgeschoss volumengemittelten Temperatur von 25 °C ab Beginn der Außenkühlung berechnet (Abb. 2).

Die Rechnung bezieht die Verteilung und den Abbau von Bioaerosolen ein, die an zwei Punkten im Wohn- und Esszimmer freigesetzt werden (Abb. 3).

Die Aerosolfreisetzung beginnt elf Stunden nach Beginn der Außenkühlung bei ausgebildeten thermischen Bedingungen. Wegen der vom Programm her begrenzten Anzahl an Simulationspartikeln (für diese Simulationen wurden jeweils 2 x 100000 verwendet) wird die Aerosolfreisetzung beendet, wenn die Abbaurrate der Aerosole an den Senken ein Gleichgewicht mit deren Quellrate erreicht hat. Dieser Gleichgewichtszustand wird mit dem stündlichen Luftaustausch im Fall A später als im Fall B mit dem halbstündlichen Austausch erreicht.

Jede Quelle emittiert 195 Aerosole pro Sekunde und simuliert die mittlere Aerosolrate bei ständigem Sprechen

(Abb. 4). Der angenommene mittlere Durchmesser der Bioaerosole beträgt 5 µm.

Die Simulationen verwenden das k-ε Turbulenzmodell und beschreiben die Partikelausbreitung in der turbulenten Strömung zwischen Quellen und Senken unter Verwendung der örtlichen Turbulenzparameter (turbulente kinetische Energie und Dissipation). Die Simulationen erstrecken sich über eine Problemzeit von 60000 Sekunden und beschreiben den Auf- und Abbau der Aerosolwolken mit Aerosolquellzeiten von 15000 Sekunden im Fall A und 5000 Sekunden im Fall B.

Bei den Rechnungen repräsentiert jedes Simulationspartikel 29 Aerosole, die um die jeweils berechnete Partikelposition diffundieren und sich mit einem Wolkenmodell ausbreiten. Mittlere Aerosoldichten aller diffundierten Aerosole werden für jeden Punkt im Haus berechnet. Aerosoldepositionen an den Wänden werden nicht simuliert.

Das GASFLOW-Aerosolmodell wurde für diese Simulationen mit der aktuellen Version des Programms anhand verschiedener Testprobleme mit analytischen Lösungen von Zhanjie Xu [4] neu verifiziert [5].

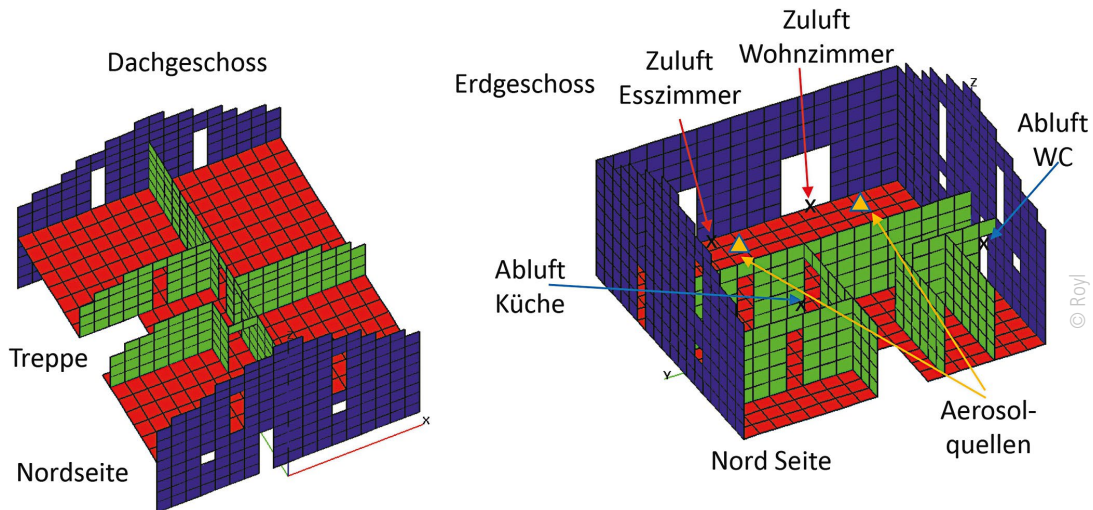
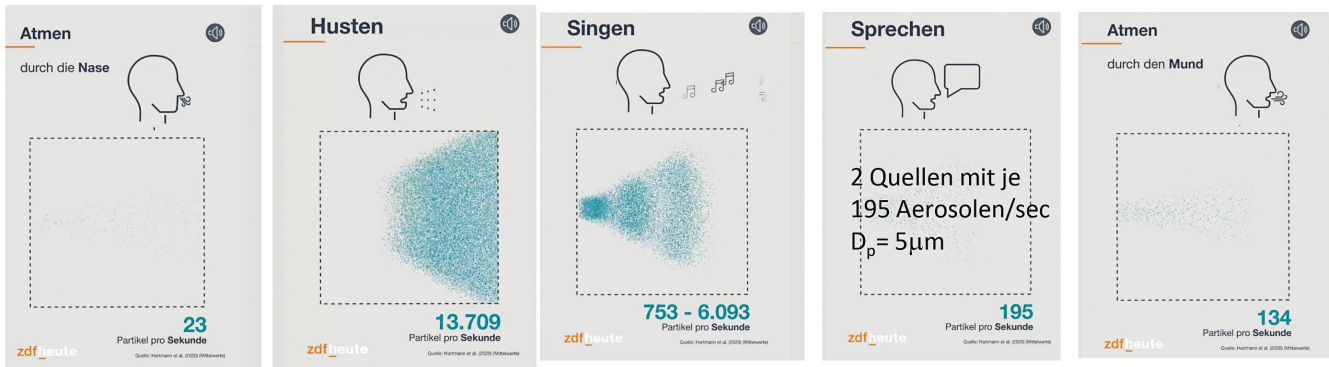


Abb. 3: 3-D-Darstellung der Innenräume im EG und DG mit Lage der Quellen und Senken



© ZDFheute.de

Abb. 4: Bioaerosolraten [3] verschiedener Aktivitäten

Thermohydraulik der Frischluftheizung bei verschiedenen Quellraten

GASFLOW beschreibt die dreidimensionale Strömung im Außen- und Innenfeld und die Kommunikation zwischen den Quellen und Senken in verschiedenen Räumen im Haus mit der überlagerten Konvektion durch den mit der Außenkühlung aufgebauten Wärmeverlust an den Innenseiten der Außenwände und Fenster. Das Programm passt die Enthalpie der beiden gleich starken Warmluftquellen zu jedem Zeitpunkt so an, dass sie die auf die Innenseiten der Außenwände und Fenster von der Luft übertragenen Enthalpien und die an den Luftsenken abgeführten Enthalpien kompensiert, um eine mittlere Wohnraumtemperatur von 25 °C zu erhalten. In der Energiebilanz wird die Enthalpie der Abluft zur Vorwärmung der kalten Frischluft verwendet.

Die Temperaturen (linker Graph) in Abb. 5 beginnen beim Zeitpunkt 0 mit Anfangswerten von 25 °C. Die von der Raumluft durch turbulenten Wärmeaustausch über-

tragenen Enthalpien auf die Innenseiten der Außenwände und Fenster (rote Kurve im rechten Graph) steigen durch die Außenkühlung aufgrund der Wärmeverluste an den Fenstern rasch an. Durch die mit Steinwolle gedämmten Außenwände dringt die Außenkühlung aber nur langsam. Erst nach 5000 Sekunden erhöht sich die Enthalpie stärker, die in die Innenseiten der Außenwände geht. Sie baut sich langsam auf.

Am Ende der Simulation bei 60000 Sekunden entspricht die außen abgeführte Wärmeleistung der von den Innenseiten der Außenwände gehenden Heizleistung von 3,8 kW. Bis dahin hat sich ein quasistationäres Temperaturprofil in den Außenwänden mit ausgebildeten Enthalpien von der Raumluft an die Innenseiten der Außenwände und Fenster aufgebaut.

Die berechnete zeitliche Entwicklung der Quelltemperatur zeigen die roten Graphen, durchgezogen für den stündlichen und gestrichelt für den halbstündlichen Luftaustausch. Die grünen Graphen zeigen die Temperaturen an der Senke in der Küche, die näher an den Quellen liegt mit

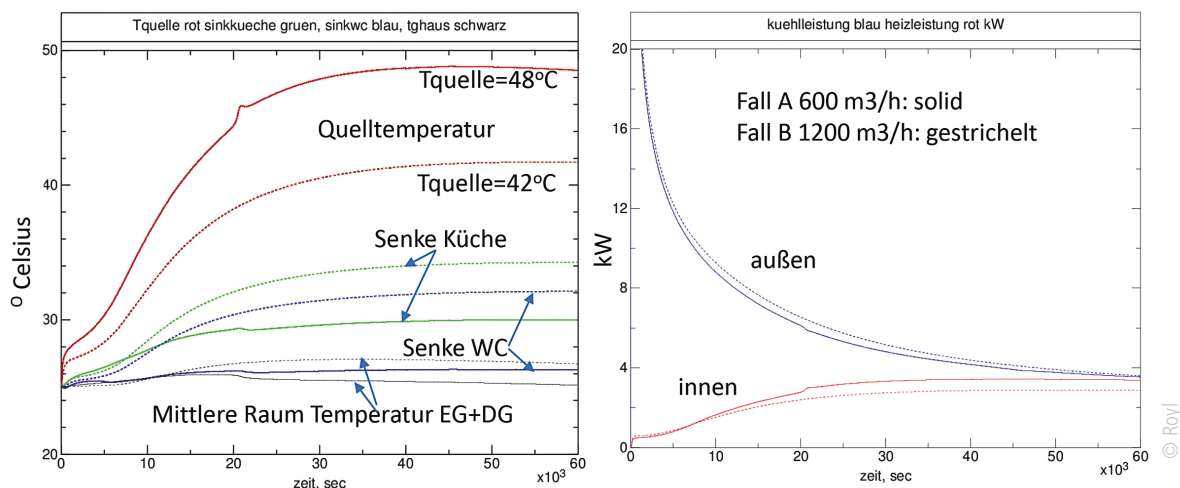


Abb. 5: Quell- und Senkentemperaturen und gemittelte Wohnraumtemperatur bei stündlichem und halbstündlichem Luftaustausch und Leistungen auf den Innen- und Außenseiten der Außenwände und Fenster. Zur Bilanzierung sind die negativen Flüsse an den Außenseiten der Außenwände positiv aufgetragen.

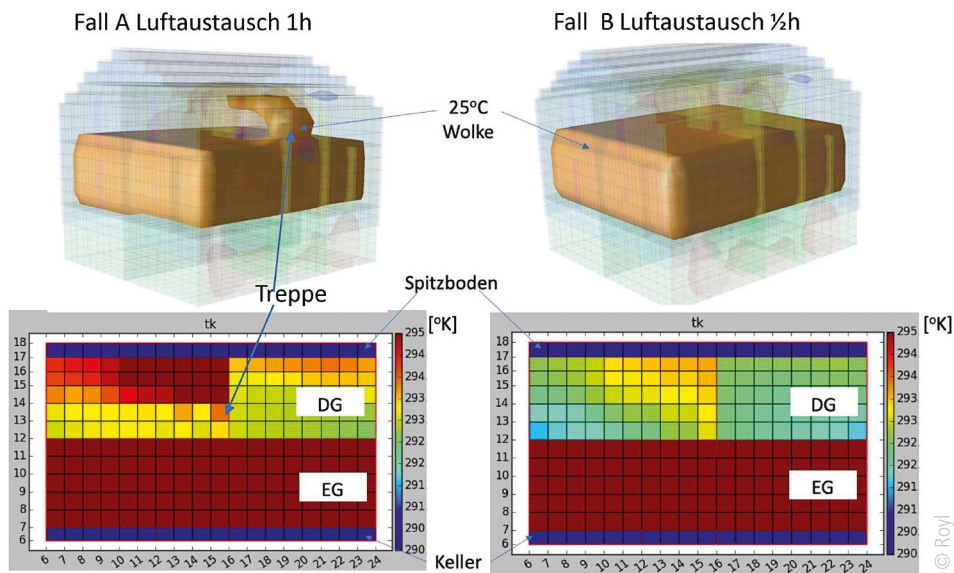


Abb. 6: Warmluftwolke im Haus nach 35000 Sekunden; darunter Temperaturfeld im zentralen Längsschnitt durch den Hausgiebel

höheren Temperaturen als die blauen für die Senke im WC, die aufgrund der Schikane durch die Türöffnungen weniger Kontakt zu den Quellen hat. Bei stündlichem Luftaustausch ist langfristig eine Quelltemperatur von 48°C erforderlich, um den Enthalpieverlust an den Innenseiten der Außenwände und Fenster sowie an den Senken zu kompensieren, also eine Erhöhung von 23 Grad gegenüber dem Anfangszustand mit 25°C.

Mit der doppelten Frischluftrate beim halbstündlichen Luftaustausch verringert sich die erforderliche Quelltemperatur auf 42°C. Mit der höheren Luftrate wird die erforderliche Heizleistung auch mit niedrigeren Quelltemperaturen erreicht. Diese Verringerung ist wegen einer anderen Luftverteilung im Haus nicht proportional zum erhöhten Durchsatz.

Die schwarzen Graphen zeigen die volumengewichtete Temperatur im Wohnbereich (Erd- und Dachgeschoss). Die gemittelte Temperatur im Fall A liegt am Ende um den Zielwert von 25°C. Im Fall B ist sie mit 27°C etwas höher. Die höhere Einspeise- und Absaugrate beim halbstündlichen

Luftaustausch verringert den Luftaustausch durch die Stratifikation im Treppenhaus. Mehr Enthalpie verbleibt im Erdgeschoss und weniger kommt ins Dachgeschoss. Im Mittel ergibt sich die etwas höhere Temperatur im Fall B durch das höhere Volumen des Erdgeschosses.

Mit den höheren Quellraten im Fall B wird die Temperaturverteilung im Haus heterogener (Abb. 6). Bei der gewählten Anordnung der Quellen und Senken ändert sich also die Wärmeverteilung durch die Quellraten der Frischluftheizung. Durch die niedrigeren Temperaturen im Dachgeschoss zeigt der Fall B auch etwas niedrigere Wärmeübertragungsraten von der Luft an die Innenseiten der Außenwände und Fenster (rote Kurve im rechten Graph von Abb. 5).

Aerosol Verteilung bei verschiedenen Raten der Frischluftheizung

Die beiden Aerosolquellen wurden in einer Höhe von 1,5m mittig im Wohn- und Esszimmer des Erdgeschosses angeordnet. Abb. 7 zeigt ihre Lage sowie die Ausbreitung der

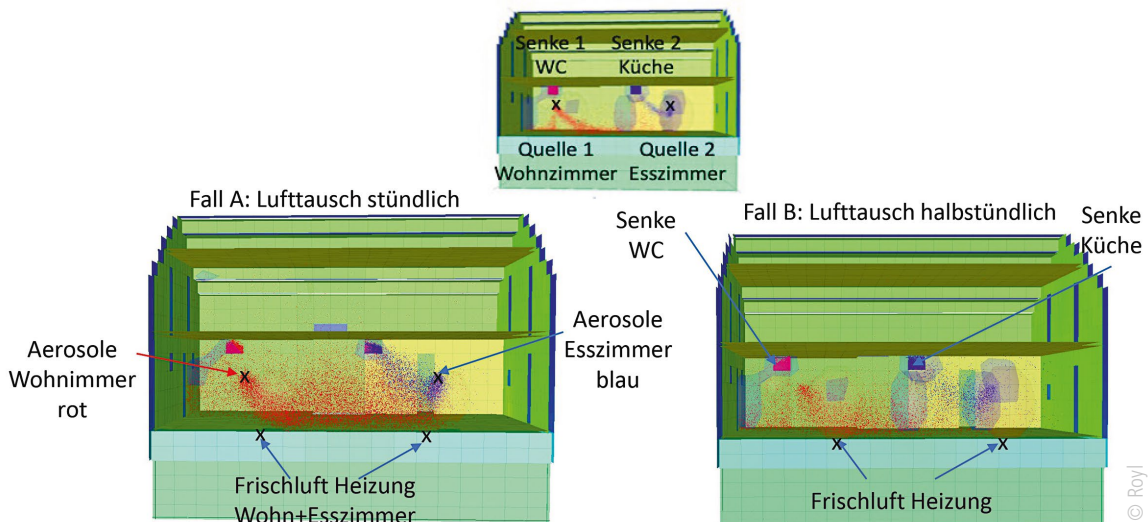


Abb. 7: Lage der Aerosolquellen und Aerosolausbreitung im Wohn- und Esszimmer im Fall A und B von der Südseite her gesehen

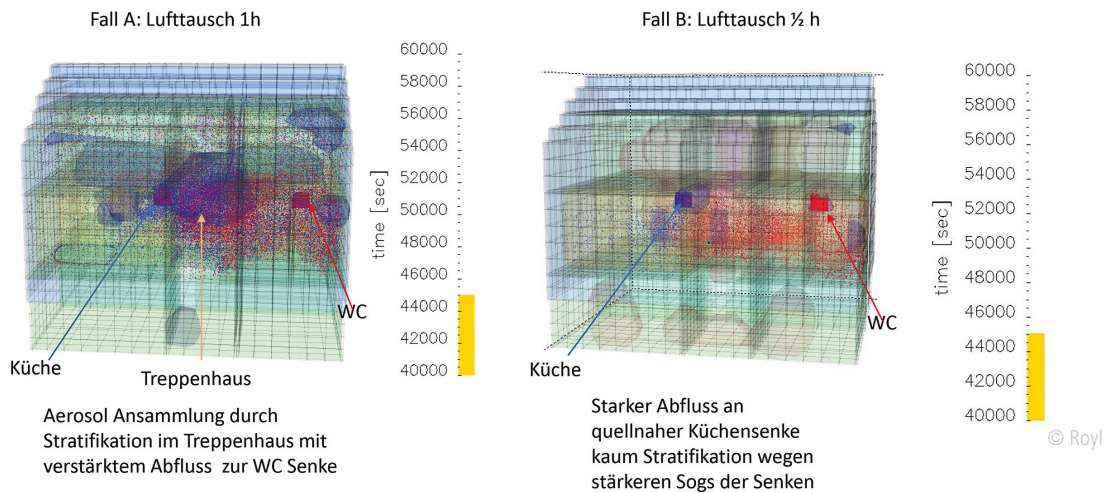


Abb. 8: Aerosolausbreitung nach 45 000 Sekunden von der Nordseite her gesehen

roten und blauen Aerosole aus dem Wohn- und Esszimmer auf dem Weg von den Quellen zu den Senken im WC und in der Küche. Als Blickrichtung wurde die durch Weglassen der Außenwände unverstellte Südseite gewählt.

Im Fall A mit stündlichem Luftaustausch sammeln sich mehr Aerosole im Wohn- und Esszimmer an. Mit dem doppelten Luftaustausch im Fall B kommt es zu einer rascheren Absaugung und verringerten Ansammlungsichte. Es dringen keine Aerosole in das Dachgeschoss vor. Auf der Nordseite kommt es im Fall A durch die geringere Absaugrate zu einer stärkeren Stratifikation der Warmluft und beim Luftaustausch mit dem Dachgeschoss zu Aerosolansammlungen im nach oben hin offenen Treppenhaus (Abb. 8). Aerosole werden dabei über das ganze Dachgeschoss verteilt.

Die Aerosolfreisetzung beginnt nach 40 000 Sekunden. Die roten und schwarzen Graphen in Abb. 9 zeigen die Anzahl der Aerosole aus allen Quellen, die an den Senken im WC und in der Küche ankommen. Der rosa Graph addiert sie zu der Zahl der an den Senken aufgesogenen Aerosole. Der grüne Graph, die Quelle, zeigt die Anzahl der insgesamt

freigesetzten Aerosole aus dem Wohn- und Esszimmer. Im Fall A dauert es fast 1 000 Sekunden, bis die ersten Aerosole an den Senken ankommen. Im Fall B mit dem halbstündlichen Luftaustausch ist diese Vorlaufzeit nur kurz. Die Aerosolquellen werden im Fall A bei 55 000 Sekunden und im Fall B bei 45 000 Sekunden abgeschaltet. Schon mit weniger als 5 000 Sekunden Quelldauer nähern sich die Abbauraten der Aerosole der Quellrate. Nur im Fall A entwickelt sich die Abbaurate langsamer. Im Fall A verbleiben auch nach der Abschaltung der Quelle bei weitergehender Lüftung noch einige Aerosole im Haus, im Fall B ist die Luft schon lange vor Ende der Rechnung bei 60 000 Sekunden wieder aerosolfrei.

Durch die Stratifikation im Treppenhaus im Fall A kommen mehr Aerosole zur Senke im WC, die näher an der Treppe liegt. Im Fall B mit der hohen Lüftungsrate gibt es fast einen Kurzschluss, der die Aerosole aus dem Wohn- und Esszimmer auf kürzerem Weg direkt zu den Senken bringt. Die quellnähere Senke in der Küche saugt dann mehr Aerosole auf, als die weiter entfernte Senke im WC.

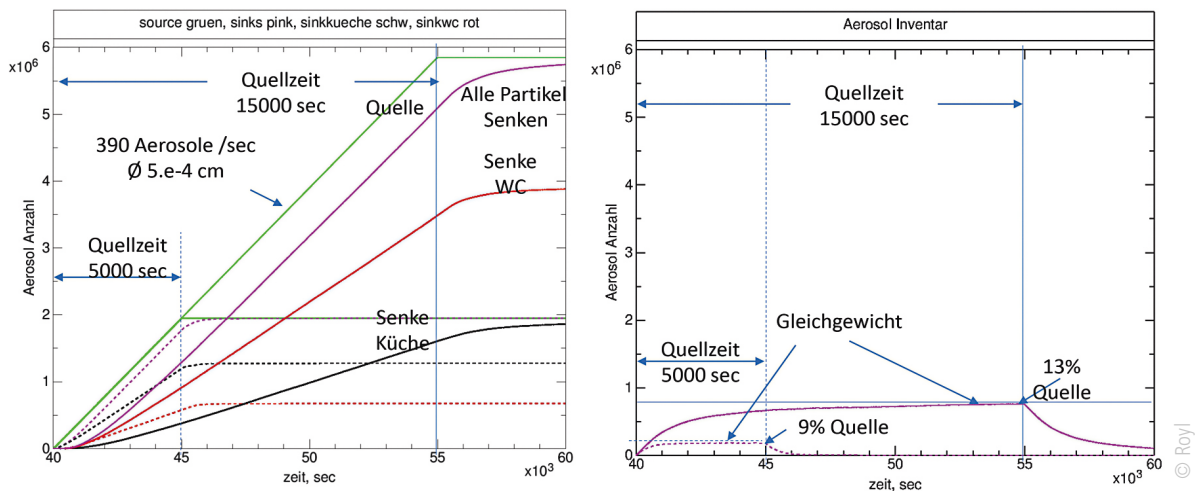


Abb. 9: Aerosolbilanz und -gleichgewicht im Fall A und B (gestrichelt)

Die zeitliche Entwicklung des Aerosolinventars im Haus ergibt sich aus der Differenz zwischen den eingespeisten und den an den Senken aufgesogenen Aerosolen. Die berechneten Inventare sind im rechten Graph für die beiden Fälle dargestellt. Im Fall A liegt der Gleichgewichtswert bei etwa 8 Mio. Aerosolen, gemittelt über das Volumen von Erd- und Dachgeschoss von 382 m^3 sind das $21\,000\text{ Aerosole/m}^3$. Im Fall B mit der mehr direkten Absaugung im Erdgeschoss, liegt das Gleichgewicht bei 0,2 Mio. Aerosolen. Alle bleiben im Erdgeschoss. Mit dem Erdgeschossvolumen von 206 m^3 kommt man im Gleichgewicht auf $1\,000\text{ Aerosole/m}^3$.

Mit dem stündlichen Luftaustausch im Fall A verteilt die Frischluft Heizung viele Aerosole im Haus, ehe sie sie ausspült. Die im Treppenhaus stratifizierende Warmluft, die das Dachgeschoss stärker beheizt, nimmt dabei viele Aerosole mit. Mit dem halbstündlichen Luftaustausch im Fall B sammelt sich mehr Enthalpie im Erdgeschoss. Das Dachgeschoss erhält weniger Wärme, dafür kommen aber auch keine Aerosole ins Dachgeschoss.

Schlussfolgerungen

Bei zielgerichteter Auslegung schwemmt die Frischluftheizung auch längerfristig Aerosole aus, die in belasteten Räumen freigesetzt werden. Die Anordnung der Luftquellen und Senken sowie die Rate des Luftaustauschs sind entscheidende Parameter. Bei einem globalen Wärmetransport mit der Frischluftheizung über viele Räume hinweg werden auch Aerosole über das Haus verteilt. Eine Anordnung der Luftquellen und Senken um die möglichen Orte der Aerosolfreisetzung herum, erhöht die Effizienz des Aerosolabbaus. Zu beachten ist dabei, dass auch die Wärme der Frischluftheizung gut verteilt wird. Der GASFLOW-Code beschreibt die Umverteilung und den Abbau von Aerosolen, die an beliebiger Stelle im Haus freigesetzt werden können, mit den Strömungen zwischen Luftquellen und Senken unter Einbeziehung von lokaler Konvektion durch Kühl- und Heizeffekte an den Wänden. Die Effizienz auch sehr komplexer Lüftungssysteme auch im Hinblick auf den Aerosolabbau lässt sich damit gut aufzeigen.

Referenzen

- [1] Xiao, Jianjun: <http://www.gasflow-mpi.com/en/index.php>
- [2] Royl, Peter; Jordan, T.: Dreidimensionale Analyse der Heizung und Lüftung eines Wohngebäudes durch Frischluft mit dem Fluid Mechanik Programm GASFLOW. NAFEMS Virtual DACH Conference 13.-14. Oktober 2020 URL: <https://drive.google.com/file/d/1a6D0Pdk8JzIASX3XFy4wvfbDXzDUYgaq/view?usp=sharing> (Stand: 26.01.2022)
- [3] Hartmann, Anne; Lange, Julia; Rotheudt, Hansjörg; Kriegel, Martin: Emissionsrate und Partikelgröße von Bioaerosolen beim Atmen, Sprechen und Husten. URL: <https://depositonce.tu-berlin.de/handle/11303/11451> (Stand: 26.01.2022)
- [4] Xu, Zhanjie; Travis, J.R.; Breitung, Wolfgang: Benchmarking validations for dust mobilization models of GASFLOW code. EFDA reference: TW5-TSS-SEA 3.5 D4, report FZKA 7423. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2008
- [5] Royl, Peter: Aerosol Verification GASFLOW version 3.6. URL: <https://drive.google.com/file/d/1POYzjxz6il0c8e93AVP1fQivm4uejGgj/view?usp=sharing> (Stand: 26.01.2022)

DIE AUTOREN

Dr.-Ing. Peter Royl
peter.royl@partner.kit.edu

Leiter Entwicklung und Validierung des CFD Codes GASFLOW am Institut für Thermische Energietechnik und Sicherheit (ITES) des KIT (jetzt im Ruhestand)

Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Thermische Energietechnik und Sicherheit (ITES)
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Dr. Jianjun Xiao
jianjun.xiao@kit.edu

Verantwortlich für Entwicklung, Anwendung und Vertrieb des parallelisierten Codes GASFLOW-MPI
www.gasflow-mpi.com