

Vortrag gehalten am 7. Mai 2024 anlässlich der Fachtagung „Innenraumluft 2024 – Messen, Bewerten und Gesundes Wohnen“, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

# Wirksamkeit der Entfernung von luftgetragenen Kontaminationen

## Ein Vergleich zwischen Quell- und Mischlüftung

Claudia Kopic  
Hermann-Rietschel-Institut, TU Berlin

Der Einsatz von Quelllüftung (QL) anstelle von Mischlüftung (ML) erhöht die lokale Lüftungswirksamkeit (LLW), was sowohl den Infektionsschutz verbessert als auch den Energieverbrauch reduziert. Der Beitrag erläutert die am Hermann-Rietschel-Institut (HRI) der Technischen Universität (TU) Berlin durchgeführten Experimente und deren Ergebnisse.

### Abstract

Die Erhöhung des Zuluftvolumenstroms zur Verdünnung von Kontaminationen in der Innenraumluft hat sich als effektive Methode zur Verbesserung des Infektionsschutzes gegen luftgetragene Erreger erwiesen. Allerdings geht diese Erhöhung mit einem höheren Energieverbrauch einher. Im Vergleich zur Mischlüftung (ML) hat sich die Quelllüftung (QL) als die Strömungsform mit einer besseren lokalen Lüftungswirksamkeit herausgestellt. Am Hermann-Rietschel-Institut wurden hierzu Experimente in einem Prüfstand mit beiden Strömungsformen und mit einem horizontalen Hindernis durchgeführt, um die Lüftungswirksamkeit sowohl in der Inhalationszone als auch an anderen definierten Stellen im Raum zu bestimmen. Die Ergebnisse zeigten insbesondere in der Inhalationszone eine klare Überlegenheit der QL gegenüber der ML. Dies belegt, dass durch den Wechsel von ML zu QL entweder Energie eingespart oder der Infektionsschutz verbessert werden kann.

### Einleitung

Die Verbesserung des Innenraumklimas, der Raumlufthygiene und des Infektionsschutzes hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Im Rahmen der COVID-19-Pandemie haben internationale und nationale Organisationen sowie Behörden Richtlinien veröffentlicht, um das Infektionsrisiko durch den luftgetragenen Erreger SARS-CoV-2 zu minimieren [1-4]. Diese Richtlinien sind auch auf andere luftgetragene Erreger anwendbar. Eine Erhöhung der Außenluftzufuhr führt zur Verdünnung der Kontaminationskonzentration einschließlich Krankheitserregern und CO<sub>2</sub> in der Raumluft [2, 4]. Gleichzeitig beeinflusst diese Erhöhung den Energieverbrauch, der für die Bereitstellung der erforderlichen Luftmengen notwendig ist.

Maschinelle Lüftungssysteme können verschiedene Strömungsformen erzeugen. Die Mischlüftung (ML) ist die am häufigsten eingesetzte Methode. Die Schadstoffbeseitigung erfolgt hierbei durch das Verdünnungsprinzip.

Im Gegensatz dazu wird bei der Quelläftung (QL) die Zuluft bodennah mit einem geringen Impuls (maximal 0,25 Meter pro Sekunde) und einer geringen Untertemperatur von etwa zwei Kelvin in den Raum geleitet. Dies führt zur Bildung eines Frischluftsees, dessen Höhe vom Außenluftvolumenstrom abhängt. Durch thermischen Auftrieb wird die saubere Luft an Wärmequellen nach oben befördert [5], luftgetragene Kontaminationen werden in den Deckenbereich verdrängt und dort abgesogen.

Die hier präsentierten Versuche zielen darauf ab, die widersprüchlichen Ergebnisse der vorherigen Studien zu überprüfen. Zudem wurden viele der Experimente nur mit einem festen Volumenstrom durchgeführt, der nicht variiert wurde. Daher wird in dieser Untersuchung ein Transmissionsereignis mit zwei Personen simuliert, wobei eine Person als infizierte lokale Emissionsquelle fungiert. Die LLW wird sowohl in der Inhalationszone als auch an anderen Punkten im Raum ermittelt. Der Volumenstrom wird dabei zwischen 36 und 50 Kubikmetern pro Stunde und Person variiert.

### **Lüftungswirksamkeit**

Die Lüftungswirksamkeit ist ein Maß dafür, wie effektiv ein Lüftungssystem Schadstoffe aus der Raumluft entfernt. Bei der ML liegt dieser Wert zwischen 0,8 und 1, während er bei der QL je nach Studie oder Richtlinie zwischen 1,2 und 5 angegeben wird [6-10]. Die tatsächliche Lüftungswirksamkeit variiert je nach Randbedingungen und den betrachteten Raumbereichen. Zur Bestimmung der Lüftungswirksamkeit an einem bestimmten Punkt wird die lokale Lüftungswirksamkeit (LLW) verwendet, die das Verhältnis der Schadstoffkonzentration in der Abluft zur lokalen Schadstoffkonzentration an einem Punkt im Raum darstellt.

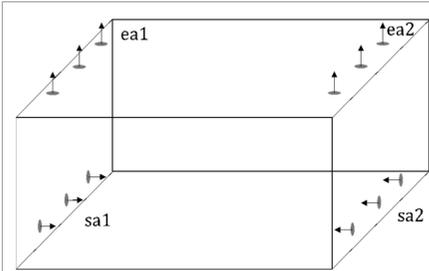
In verschiedenen Studien wurde die LLW der beiden Strömungsformen in der Atemzone untersucht. Einige dieser Studien zeigen, dass die QL der ML überlegen ist [10, 9, 11-13], insbesondere aufgrund des positiven Einflusses der thermischen Auftriebsfahne, die durch die Wärmeabgabe des Menschen entsteht. Andere Studien hingegen weisen darauf hin, dass die Schichtung der Raumluft negative Auswirkungen auf die LLW in der Inhalationszone haben kann [14-16].

### **Versuche, Aufbau und Durchführung**

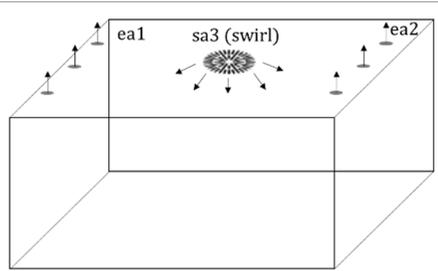
Im Raumströmungslabor am Hermann-Rietschel-Institut der Technischen Universität Berlin wurde ein Besprechungsszenario mit zwei Personen in einem Raum durchgeführt.

Das Raumströmungslabor hat die Abmessungen von 5,2 Metern in der Länge, 4,4 Metern in der Breite und 2,9 Metern in der Höhe. Es kann über eine Klimaanlage sowohl mit Mischlüftung als auch mit Quelläftung belüftet werden. Die Abbildungen 1 und 2 veranschaulichen die Lufteinlässe und -auslässe für beide Lüftungsfälle.

Bei der Quelllüftung wird die Zuluft über sechs weit geöffnete Tellerventile (sa1 und sa2) in Bodennähe in den Raum geleitet. Bei der Mischlüftung erfolgt die Zuluftzufuhr über einen an der Decke angebrachten Drall-Durchlass (sa3 (swirl)).

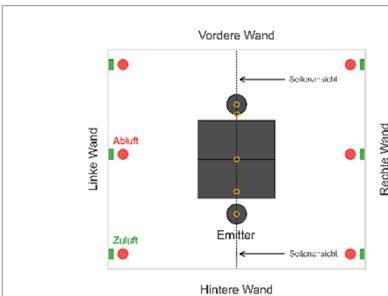


**Abb. 1:**  
**Zu- und Abluftdurchlässe des Labors, QL.**  
 sa: supply air (Zuluft), ea: exhaust air (Abluft)  
 Quelle: HRI

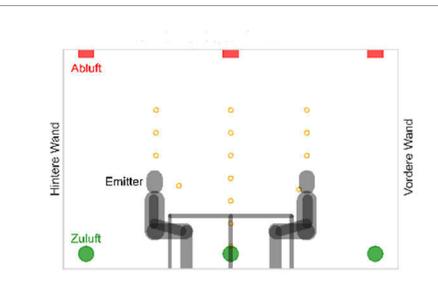


**Abb. 2:**  
**Zu- und Abluftdurchlässe des Labors, ML.**  
 sa: supply air (Zuluft), ea: exhaust air (Abluft)  
 Quelle: HRI

In den durchgeführten Versuchen wurden zwei beheizbare Personendummies im Raum platziert, wobei ein Mindestabstand von 1,5 Metern zwischen ihnen eingehalten wurde. Einer der Dummies diente während der Experimente als Emissionsquelle. Vor seinem Mund-Nasen-Bereich wurde eine siebenprozentige Kochsalzlösung (NaCl) durch einen Aerosolgenerator vom Typ ATM 225 der Firma Topas vernebelt. In einigen Messungen wurde zudem ein horizontales Strömungshindernis in Form von zwei Tischen zwischen den beiden Dummies positioniert. Die Dummies hatten jeweils einen Abstand von einem Zentimeter zu den Tischen. Abbildung 3 und 4 zeigen den Messaufbau.



**Abb. 3:**  
**Messaufbau inkl. Tisch. Draufsicht.**  
 Orange Kreise: Messpunkte  
 Zu-, Abluft- und Messstellenposition.  
 Quelle: HRI



**Abb. 4:**  
**Messaufbau inkl. Tisch. Seitenansicht.**  
 Orange Kreise: Messpunkte  
 Zu-, Abluft- und Messstellenposition.  
 Quelle: HRI

Die Partikelkonzentration wurde an insgesamt 17 Messpunkten nacheinander mit einem optischen Partikelzähler vom Typ Solair 3100E und einem Messstellenumschalter vom Typ UM-II Manifold der Firma Lighthouse in fünf verschiedenen Partikelgrößen, die zwischen 0,3 Mikrometer und fünf Mikrometer lagen, erfasst. Jede Einzelmessung an einem Messpunkt dauerte 20 Sekunden.

Neben den 15 Messpunkten, die an drei Messbäumen installiert waren (siehe Abbildung 4), gab es jeweils einen Messpunkt am Gesamt-Zuluftreinlass und am Gesamt-Abluftauslass. Die Messpunkte am mittleren Messbaum waren in Höhen von 0,3 Metern bis 2,1 Metern in Abständen von 30 Zentimetern angeordnet.

Über den Dummies wurden Messpunkte in den Höhen von 1,5 Metern, 1,8 Metern und 2,1 Metern platziert.

Darüber hinaus wurde in der Inhalationszone des nicht-emittierenden Dummies in einem Abstand von einem Zentimeter zum Mund-Nasen-Bereich sowie 20 Zentimeter vor dem emittierenden Dummy auf einer Höhe von 1,05 Metern gemessen.

### Messvarianten und Randbedingungen

In den Experimenten wurde die LLW sowohl in der gesamten betrachteten Zone als auch in der Inhalationszone unter verschiedenen Volumenströmen untersucht. Dabei wurden Szenarien mit und ohne horizontale Hindernisse (Tische) berücksichtigt. Eine Übersicht der Messvarianten ist in Tabelle 1 zu finden.

Variante	Strömungsform	Volumenstrom pro Person [m <sup>3</sup> /(h Person)]	Gesamt Volumenstrom [m <sup>3</sup> /h]	Besonderheiten
1	QL	50	100	mit Tisch
2	QL	50	100	ohne Tisch
3	QL	36	72	mit Tisch
4	QL	36	72	ohne Tisch
5	ML	50	100	mit Tisch
6	ML	50	100	ohne Tisch
7	ML	36	72	mit Tisch
8	ML	36	72	ohne Tisch

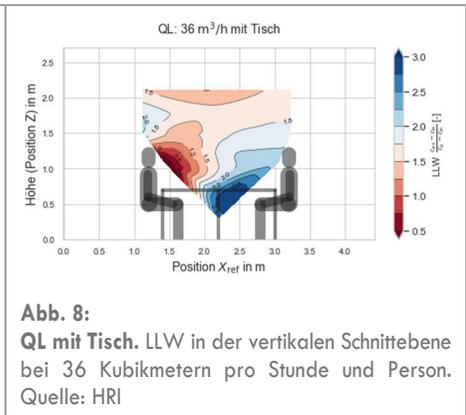
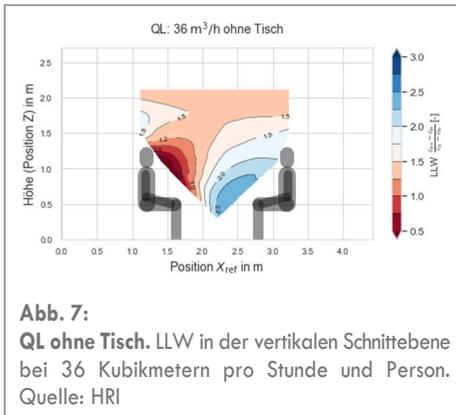
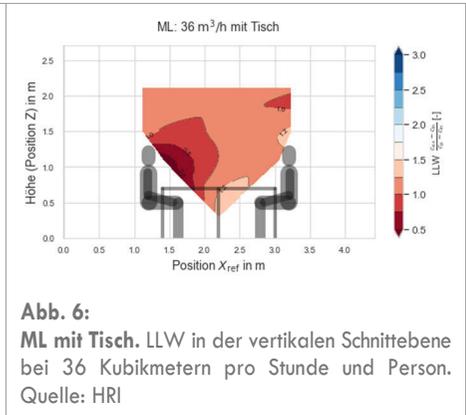
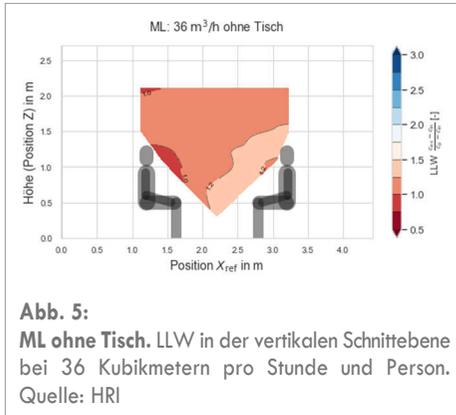
**Tabelle 1: Messvarianten der durchgeführten Experimente.**

Quelle: HRI

Insgesamt wurden acht unterschiedliche Varianten getestet, wobei jede Variante mindestens zwei Wiederholungsmessungen umfasste. Während aller Messungen betrug die Raumlufttemperatur im Strömungslabor konstant 21 Grad Celsius, während die Zulufttemperatur auf 19 Grad Celsius festgelegt wurde.

## Versuchsergebnisse

Um die LLW an den verschiedenen Messpunkten im Labor zu bestimmen, wurden die Messwerte der Wiederholungsmessungen für jede Variante gemittelt. In den Abbildungen 5 bis 8 wird die LLW der Messvarianten mit einem personenbezogenen Volumenstrom von 36 Kubikmetern pro Stunde und Person als Konturplot in der vertikalen Schnittebene zwischen den beiden Dummies dargestellt.



Die Ergebnisse zeigen, dass die LLW bei der Mischlüftung (ML) Werte zwischen 0,5 und 1,2 erreicht, während die Quelllüftung (QL) Werte zwischen 0,5 und 2,8 aufweist. Bei beiden Lüftungsarten ist der Einfluss des Tisches auf die LLW erkennbar. Die Kontaminationsbelastung ist u.a. im unmittelbaren Bereich des Emitters erhöht. Besonders im Nahbereich des nicht-emittierenden Dummies, insbesondere in der Inhalationszone, unterhalb des Tisches und oberhalb des Emitters, zeigt die QL einen positiven Einfluss auf die LLW.

## Diskussion der Ergebnisse

Aerosolpartikel, die mit Erregern beladen sind, haben typischerweise eine Größe von 0,25 bis fünf Mikrometern [17–19]. NaCl dient als Surrogat, da es nach dem Vernebeln eine vergleichbare Partikelgrößenverteilung aufweist, was es zu einem geeigneten Ersatz für Ausatemluft in den experimentellen Tests macht. In zukünftigen Experimenten sollte darauf geachtet werden, dass das Aerosol erwärmt wird, um den Temperaturgradienten zwischen der Ausatemluft und der Raumluft zu simulieren.

In den Untersuchungen, bei denen ein Tisch als Strömungshindernis verwendet wurde, wurden die Dummies stets sehr nah am Tisch positioniert, ohne die Abstände zu variieren. In weiteren Studien könnte untersucht werden, ob sich die LLW in der Inhalationszone verändert, wenn der Abstand zum Tisch vergrößert wird. Strömungshindernisse wie der hier betrachtete Tisch, an dem Personen sitzen, haben nur einen geringen Einfluss auf die LLW bei Quelllüftung (QL). Bei Mischlüftung (ML) zeigt sich hingegen eine negative Auswirkung auf den unmittelbaren Bereich des Emitters, da der Tisch anscheinend die Vermischung der Kontamination im Nahbereich des Emitters mit sauberer Raumluft verringert. Dennoch ist die Kontaminationsbelastung im Nahbereich des Emitters in den Mischlüftungsszenarien ohne Tisch niedriger als bei den Quelllüftungsfällen. Eine erhöhte Belastung im Nahbereich des Emitters bei Quelllüftungssystemen wurde auch in anderen Studien festgestellt [20, 1].

Die Einhaltung von Mindestabständen ist daher nicht nur wegen größerer Tröpfchen, sondern auch hinsichtlich der Verbreitung von Aerosolen von Bedeutung, insbesondere bei Quelllüftungssystemen. Bei Abständen von mehr als einem Meter zum Emitter zeigt das Quellluftsystem in den untersuchten Fällen eine deutlich höhere LLW als die Mischlüftung (ML).

## Fazit

In jeder Messvariante weist QL eine bessere LLW als ML auf. Thermische Auftriebsfahnen, die von Menschen erzeugt werden, haben einen positiven Einfluss auf die LLW in der Inhalationszone. Um den gleichen Infektionsschutz zu gewährleisten, kann der Volumenstrom bei QL geringer sein als bei ML, was ein Potenzial zur Energieeinsparung durch die erhöhte LLW bietet. Gleichzeitig kann es jedoch vorteilhaft sein, die gesundheitlichen Vorteile für die Raumnutzenden zu erhalten, indem auf eine Reduktion des Volumenstroms verzichtet wird. Daher muss stets neu bewertet werden, welcher Nutzen priorisiert werden soll, da sowohl der Infektionsschutz als auch die Energieeinsparungen bei der Nutzung von QL gesteigert werden können.

## Förderung

Die Untersuchungen fanden im Rahmen des Projekts „MinInfekt – Notwendige Luftmengen zur effektiven und energieeffizienten Minderung des Infektionsrisikos durch Aerosole“ statt, gefördert durch das 7. Energieforschungsprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWK).

## Literatur

1. World Health Organization (2021) Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240021280>. Accessed 04 Feb 2024
2. COVID-19 Task Force of REHVA's technology and research Committee (2021) REHVA COVID-19 Guidance: Version 4.1. [https://www.rehva.eu/fileadmin/user\\_upload/REHVA\\_COVID-19\\_guidance\\_document\\_V4.1\\_15042021.pdf](https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID-19_guidance_document_V4.1_15042021.pdf). Accessed 02 Feb 2024
3. ASHRAE (2022) ASHRAE Standard 62.1-2022: Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standards-62-1-62-2>. Accessed 06 Feb 2024
4. Umweltbundesamt (2008) Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumlufte. Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden (Health evaluation of carbon dioxide in indoor air). Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitschutz 51:1358– 1369. <https://doi.org/10.1007/s00103-008-0707-2>
5. Bhagat RK, Davies Wykes MS, Dalziel SB et al. (2020) Effects of ventilation on the indoor spread of COVID-19. J Fluid Mech 903:F1. <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.720>
6. VDI (2009) VDI 3804:2009-03 Airconditioning - office Buildings: VDI Ventilation Code of Practice. <https://www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-3804/114729638>. Accessed 06 Feb 2024
7. Hagström K, Mundt E, Nielsen PV et al. (2002) REHVA Guidebook No 1: Displacement ventilation in non-industrial premises
8. Albers K-J (ed) (2022) Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik: Einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte: Band 1 + 2, 81. Auflage. ITM InnoTech Medien GmbH, Kleinaitingen
9. Liu S, Koupriyanov M, Paskaruk D et al. (2022) Investigation of airborne particle exposure in an office with mixing and displacement ventilation. Sustain Cities Soc 79:103718. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103718>
10. H. Rietschel (2008) Raumlufte- und Raumkühltechnik: 16. völlig überarb. u. erw. Aufl. in Raumklimattechnik/ Hermann Rietschel. Hrsg. von Horst Esdorn. Springer, Berlin Heidelberg
11. Berlanga FA, Adana MR de, Olmedo I et al. (2018) Experimental evaluation of thermal comfort, ventilation performance indices and exposure to airborne contaminant in an airborne infection isolation room equipped with a displacement air distribution system. Energy and Buildings 158:209– 221. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.100>

12. Brohus H, Nielsen PV (1996) Personal Exposure in Displacement Ventilated Rooms. *Indoor Air* 6:157–167.  
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1996.t01-1-00003.x>
13. R.B. holmberg, L. Eliasson, K. Folkesson, O. Strindehag, Fläkt Klimaprodukter Ab (1990) Inhalation-zone air quality provided by displacement ventilation: Roomvent '90, no. 1990.  
[https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase\\_4253.pdf](https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_4253.pdf).  
Accessed 06 Feb 2024
14. aerosol: Review and prospect. *Building and Environment* 243:110679.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110679>
15. Schumann L, Lange J, Cetin YE et al. (2023) Experimental analysis of airborne contaminant distribution in an operating room with different ventilation schemes. *Building and Environment* 244:110783.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110783>
16. M. Sandberg and M. Mattsson (1992) The effect of moving heat sources upon the stratification in rooms ventilated by displacement ventilation: in Proc. of the 3rd International Conference on Air Distribution in Rooms
17. Mürbe D, Kriegel M, Lange J et al. (2021) Aerosol emission in professional singing of classical music. *Sci Rep* 11:14861.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-93281-x>
18. Alsved M, Matamis A, Bohlin R et al. (2020) Exhaled respiratory particles during singing and talking. *Aerosol Science and Technology* 54:1245–1248.  
<https://doi.org/10.1080/02786826.2020.1812502>
19. Asadi S, Wexler AS, Cappa CD et al. (2020) Effect of voicing and articulation manner on aerosol particle emission during human speech. *PLoS One* 15:e0227699.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227699>
20. Chen H, Janbakhsh S, Larsson U et al. (2015) Numerical investigation of ventilation performance of different air supply devices in an office environment. *Building and Environment* 90:37–50.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.021>

## Autoren

Claudia Kopic, Ruben Makris, Lukas Schumann, Martin Kriegel; Hermann-Rietschel-Institut, Technische Universität Berlin; kontakt@hri.tu-berlin.de

## Quelle

Elektronischer Tagungsband. <https://www.umweltbundesamt.de/irl2024-a17>

## Copyright © 2024

Gesundheitstechnische Gesellschaft (GG) – Technisch-wissenschaftliche Vereinigung