

Instationäre Thermische Konvektion als Basis zur Risikoabschätzung für eine Infektion durch virenbelastete Aerosole

Um an jedem Ort eines Raumes eine gute Luftqualität und eine gleichmäßige Reduzierung von Schadstoffen durch die Lüftung des Raumes gewährleisten zu können, ist eine vollständige Durchmischung der Raumluft mittels Raumluftströmung erforderlich. Eine Form der Raumluftströmung, die im Gebäudebereich aufgrund der oftmals im unteren Raumbereich angeordneten Wärmequellen (sowie der sich im Raum befindenden Personen) häufig anzutreffen und zu einer bestimmaren zeitlichen Durchmischung der Raumluft geeignet ist, ist die in Abbildung 1 schematisch dargestellte sog. Instationäre Thermische Konvektion (ITK) [1-6].

Soll oder muss zusätzlich zur Durchmischung der Raumluft eine bestimmte Luftqualität (z.B. CO₂-Konzentration) eingehalten werden, wird in der Regel mit Hilfe einer Raumlufttechnischen Anlage (RLT-Anlage) gesundheitlich zuträgliche und ggf. aufbereitete Außenluft als Zuluft in den Raum gefördert. Diese wird mit der Raumluft vermischt und dann als Abluft aus dem Raum nach draußen gefördert. Dabei wird durch die, über die Luftdurchlässe in den Raum einströmende und ausströmende Luft, eine Raumluftströmung erzeugt, die durch die ITK oftmals überlagert wird.

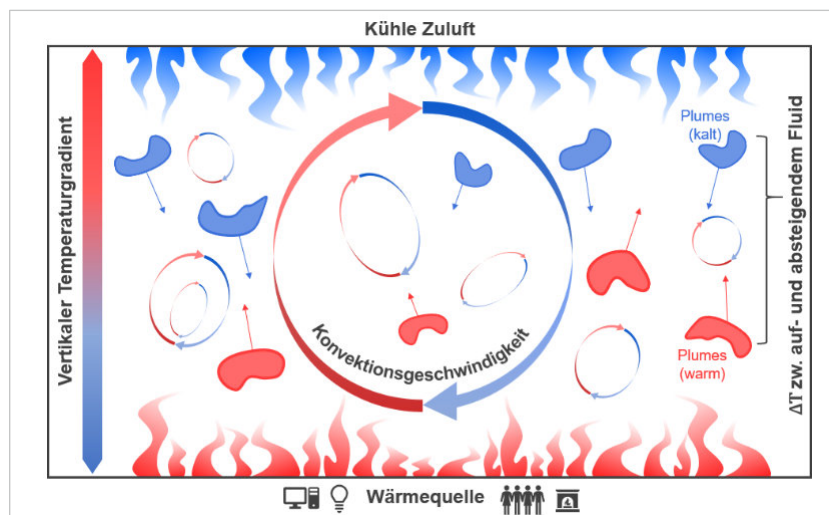


Abb. 1: Schematische Darstellung der Raumluftströmung und Durchmischung der Luft in einem Raum (gemäß dem konvektiven Lorenz-Modell)

Sensibilisierung für Raumlufttechnik

Zur Fortbildung über die Themen Lufthygiene, Raumluftqualität und Strömungsverhalten in Innenräumen, veranstaltete der Deutsche Fachverband für Luft- und Wasserhygiene (DFLW e. V.) Ende September in Potsdam ein Fachsymposium Gebäudetechnik und Hygiene. In diesem wurde die Instationäre Thermische Konvektion (ITK) im Kontext von Raumluftqualität, Raumluftströmungsverhalten sowie virenbelasteter Aerosole in der Coronapandemie in einem Fachbeitrag erläutert und diskutiert.

Zeitgleich zu den Fachvorträgen wurde während des Fachsymposiums im Vortragsraum die Raumluftqualität und das Raumklima messtechnisch analysiert und aufgezeichnet. Der Messmittelaufbau zur Feststellung und Beurteilung des Raumklimas wurde unter der Annahme einer im gesamten Raum vorliegenden Vermischung der Raumluft, an einer Stelle des Vortragsraumes positioniert (siehe Abbildung 2). Die Zulässigkeit dieser Annahme wurde im Rahmen der Messwertdatenauswertung durch die Feststellung der ITK bestätigt. Der Messmittelaufbau war ausgerüstet mit Sensoren zur Bestimmung der Lufttemperatur, relativen Luftfeuchte, operativen Temperatur, Luftgeschwindigkeit sowie der CO₂-Konzentration. Die Aufzeichnung der Messwerte erfolgte im Intervall von 60

Sekunden, um sicherzustellen, dass der Datenspeicher für die gesamte Veranstaltungszeit ausreichend ist und ggf. von der ITK induzierte Veränderungen aufnehmen zu können. Als im unteren Bereich des Vortragsraums und damit für die ITK relevanten Wärmequellen sind vorrangig die teilnehmenden Personen des Symposiums zu nennen. Zusätzlich wurde während des Symposiums eine Teilklimaanlage (TKA) zur Aufrechterhaltung der Raumluftqualität betrieben.

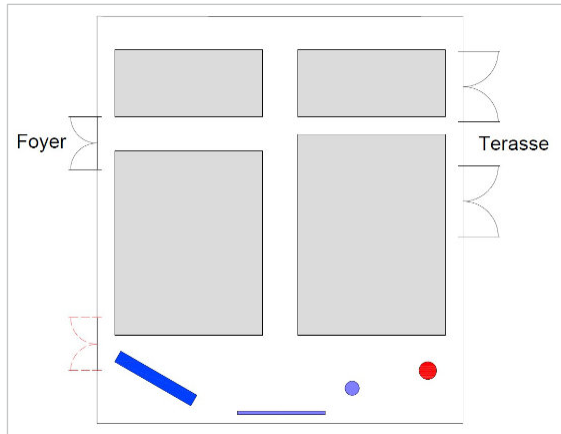


Abb. 2: Schematischer Grundriss des Vortragsraums mit der Position des Messmittelaufbaus (rote Kreisfläche) zur messtechnischen Ermittlung der Raumluftqualität und des Raumklimas

Raumluftqualität in einem leeren Raum

Grundlage für den Nachweis einer ITK im Vortragsraum, ist die messtechnische Erfassung des Raumklimas mit Hilfe der Lufttemperatur, Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit sowie der Raumluftqualität mittels der CO₂-Konzentration.

Abbildung 3 zeigt den Raumluftzustand hinsichtlich Raumluftklima und Raumluftqualität am Morgen des ersten Tages vor dem Start des Symposiums. Es lässt sich gut erkennen, dass die Raumlufttemperatur und die relative Luftfeuchte über den gesamten Messzeitraum nur sehr gering schwanken (oszillieren), und auf einem quasi konstanten Niveau liegen. Bei der Luftgeschwindigkeit sind leichte Schwankungen zu erkennen, die auf den Betrieb der RLT-Anlage zurückzuführen sind.

Die Messung wird im Weiteren als sogenannte Nullmessung (oder auch Bezugsmessung) verwendet und dient zum Vergleich der während der Nutzung des Vortragsraums durchgeführten Messungen der Raumklima- und Raumluftqualitätsdaten (siehe Tabelle 1). Ziel ist es, den potenziellen Einfluss der am Symposium teilnehmenden Personen auf die ITK sowie das Raumklima- und die Raumluftqualität aufzunehmen und zu quantifizieren.

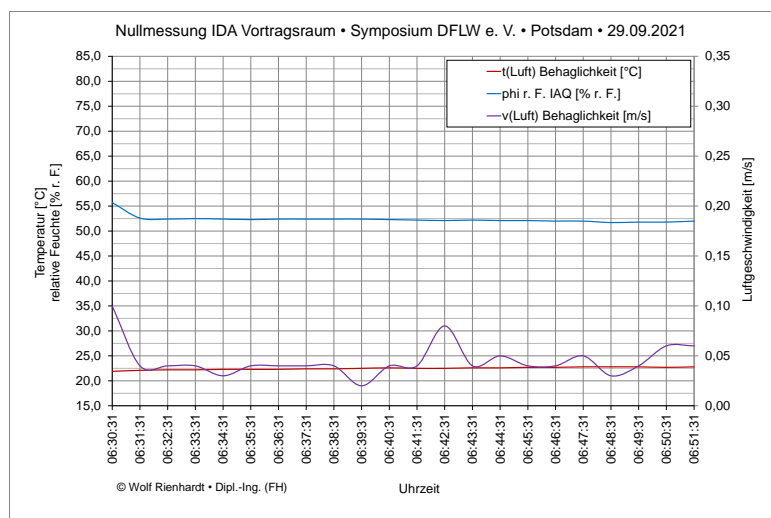


Abb. 3: Zeitlicher Verlauf der Lufttemperatur (rot), der relativen Luftfeuchte (blau) und der Luftgeschwindigkeit im Vortragsraum am Morgen des ersten Tages vor Beginn des Symposiums

Tab. 1: Randbedingungen der durchgeführten Messungen

	Messung 1 (Nullmessung)	Messung 2	Messung 3
Raumgeometrie	(B x H x L) [m] 20,8 x 4,1 x 23,1		
Datum	29.09.2021	29.09.2021	30.09.2021
Uhrzeit	6:30 - 6:50	13:00-17:30	9:00-16:00
Pausen		14:45-15:00	10:15-10:30 12:30-13:30 14:45-15:00
Personen im Raum	0	65 bis 70	65 bis 70 zeitweis ca. 40 ¹⁾
Anzahl der Messstellen	1	1	1
Messgröße	<ul style="list-style-type: none"> • Lufttemperatur • Relative Luftfeuchte • Luftgeschwindigkeit • Operative Temperatur • CO₂ - Konzentration 		
Zuluftaufbereitung durch RLT-Anlage	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanisch durch Filter • Thermodynamisch durch Erwärmen und Kühlen • Luftvolumenstrom sowie Regel- und Steuerung unbekannt 		
¹⁾ Am 30.09.2021 fand in der Zeit von 10:30 Uhr bis 12:30 Uhr eine Parallelveranstaltung in einem anderen Raum statt, sodass im mit Messtechnik ausgestatteten Veranstaltungsraum nur ca. 40 Personen anwesend waren			

Raumluftqualität unter dem Einfluss der Raumnutzung

Wie zu erwarten, zeigen die Abbildungen 4 bis 11 einen eindeutigen Einfluss der sich im Vortragsraum befindenden Personen auf die Raumluftqualität und das Raumluftklima. Ebenso lassen sich die Pausenzeiten an beiden Tagen eindeutig erkennen. Messunsicherheiten durch Messmittelabweichungen wurden dabei nicht berücksichtigt.

Die Abbildung 4 und 5 zeigen den zeitlichen Verlauf der Lufttemperatur am ersten (Abbildung 4) und zweiten Tag des Symposiums. In beiden Abbildungen ist zu Anfang und nach den Pausen jeweils ein Anstieg der Lufttemperatur mit zunehmender Zeit zu erkennen. Dies lässt sich auf die von den Personen (und Geräten) im Raum abgegebene (Körper-)Wärme zurückführen. Die Pausen sind in den Abbildungen durch einen steilen Abfall der Lufttemperatur zu erkennen, der sich durch das Verlassen des Raumes eines Großteils der Personen, vor allem aber auf das Einströmen kälterer Außenluft erklären lässt (über nach außen gehende Fenstertüren sowie eine zum Foyer gehende Eingangstür). Beim Vergleich von Abbildung 4 und 5 zeigt sich, dass die Lufttemperaturen am ersten Tag stärker oszillieren als am zweiten Tag. Grund dafür ist die Tatsache, dass am zweiten Tag vormittags aufgrund eines parallel in einem anderen Vortragsraum stattfindenden Vortrags zeitweise nur 40 Personen und nicht 65 Personen bis 70 Personen (wie am ersten Tag) im Raum waren.

Die lokale Schwankungen der Messgröße, sprich die Oszillation der Lufttemperatur, die im Bereich von durchschnittlich 0,2 K liegt, ist typisch für eine Instationäre Thermische Konvektion (ITK) und beweist deren Vorhandensein im Vortragsraum.

Anhand des Vergleichs der während des Symposiums aufgezeichneten Lufttemperaturen (Abbildung 4 und 5) – diese oszillieren – mit denen aus der Nullmessung (Abbildung 3) – diese sind quasi stationär – lässt sich eine Überlagerung der durch die RLT-Anlage erzeugten Raumluftströmung mit der ITK erkennen. Auch während der Pausen, die durch eine schnelle und starke Änderung der Lufttemperatur charakterisiert sind (bedingt durch das

zusätzliche Lüften des Vortragsraumes über die geöffneten Fenstertüren auf die Terrasse und die Raumtüren in das Foyer), ist das Vorhandensein einer ITK erkennbar. Durch die Überlagerung der ITK mit dem Abkühleffekt sind die Oszillationen in diesem Zeitbereich jedoch geringer und aufgrund des gewählten Aufzeichnungsintervalls von 60 Sekunden weniger gut zu erkennen.

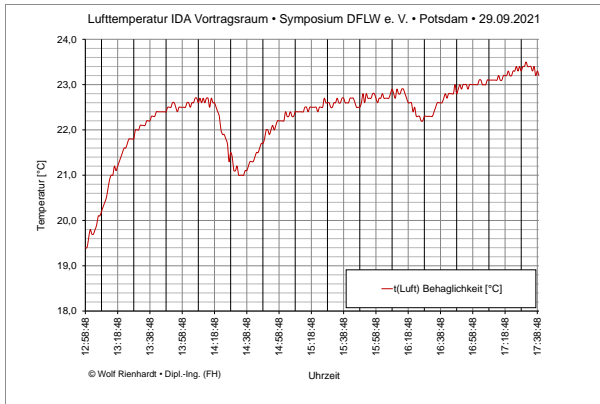


Abb. 4: Zeitlicher Verlauf der Lufttemperatur im Vortragsraum am ersten Vortragstag (29.09.2021)

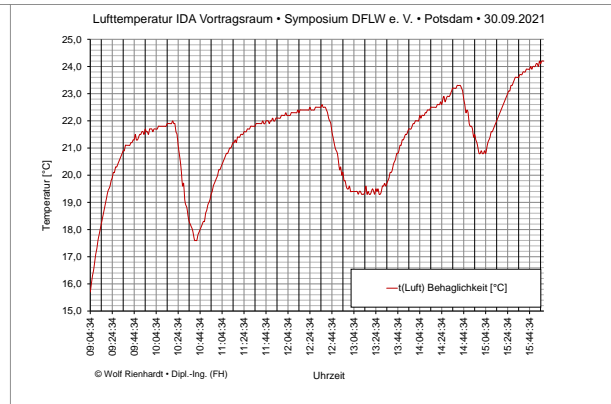


Abb. 5: Zeitlicher Verlauf der Lufttemperatur im Vortragsraum am zweiten Vortragstag (30.09.2021)

Abbildung 6 und 7 zeigen den zeitlichen Verlauf der relativen Luftfeuchte am ersten (Abbildung 6) und zweiten Tag des Symposiums. Die relative Luftfeuchte ist eine Funktion des Luftzustandes, der beschrieben wird durch Lufttemperatur, Feuchtebelastung (absolute Luftfeuchte) und Luftdruck. Ändert sich eine dieser Größen, ändert sich auch die relative Luftfeuchte. Dabei kann im vorliegenden Fall ein Einfluss des Luftdrucks auf die relative Feuchte im Aufzeichnungszeitraum vernachlässigt werden, da dieser, wie Abbildung 8 beispielhaft zeigt, am ersten Messtag (in Potsdam) nahezu konstant war.

Unter der Annahme, dass während der Nutzung des Vortragsraumes beim Symposium keine großen Feuchtequellen vorhanden waren, ist die Änderung der relativen Feuchte im Wesentlichen auf eine Änderung der Lufttemperatur zurückzuführen. Dies zeigt ein Vergleich der Abbildungen 4 und 5 mit den Abbildungen 6 und 7, wobei die lokalen Schwankungen bzw. Oszillationen der relativen Feuchte ebenfalls ein Beweis für das Vorhandensein einer Instationären Thermischen Konvektion (ITK) sind [6].

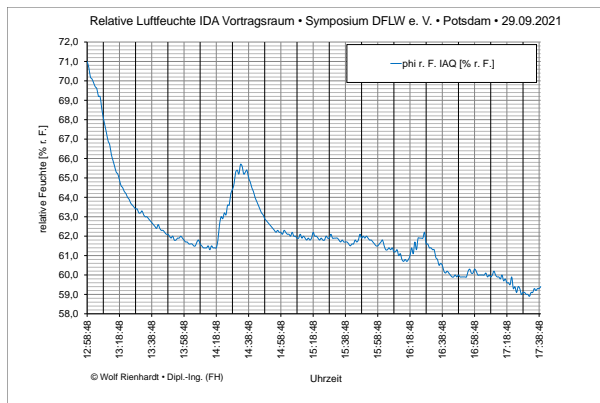


Abb. 6: Zeitlicher Verlauf der relativen Luftfeuchte im Vortragsraum am ersten Vortragstag (29.09.2021)

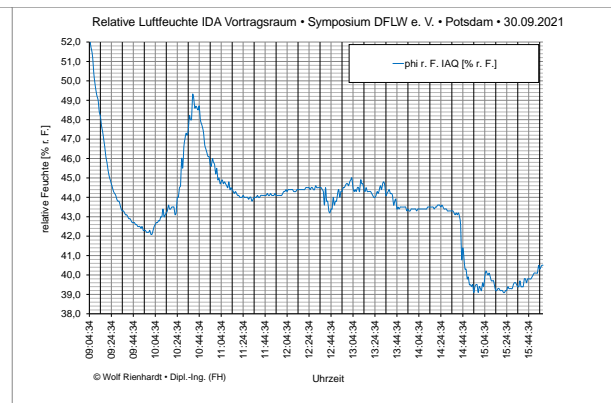


Abb. 7: Zeitlicher Verlauf der relativen Luftfeuchte im Vortragsraum am zweiten Vortragstag (30.09.2021)

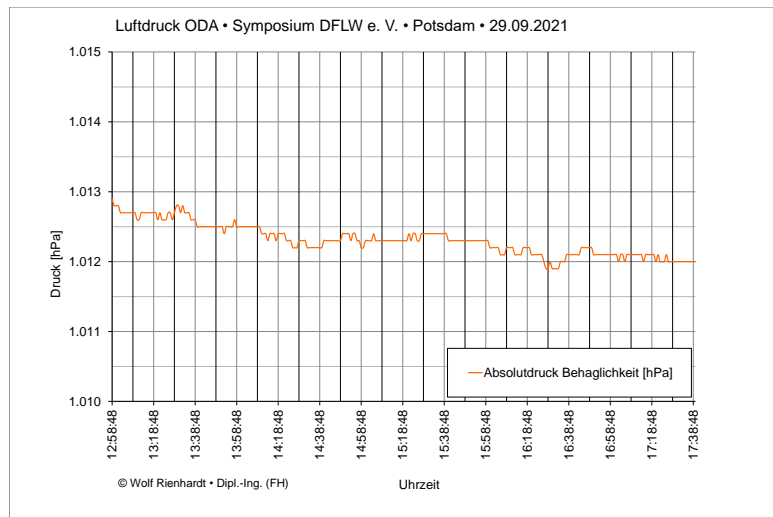


Abb. 8: Zeitlicher Verlauf des Luftdrucks in Potsdam am ersten Vortragstag (29.09.2021)

Abbildung 9 und 10 zeigen den Verlauf der CO₂-Konzentration im Veranstaltungsraum am ersten (Abbildung 9) und zweiten Tag des Symposiums. Der Verlauf an beiden Tagen korreliert mit dem Verlauf der Lufttemperatur. Das lässt sich damit begründen, dass die Teilnehmenden während des Symposiums nicht nur Wärme, sondern auch CO₂ abgeben und dieses daher mit zunehmender Zeit in einem geschlossenen Raum zunimmt. Die Pausen sind durch ein Absinken der CO₂-Konzentration zu erkennen, weil von außen frische Luft einströmt. Die leichten Schwankungen der CO₂-Konzentrationen sind wiederum ein Indikator für den Einfluss der ITK auf die Vermischung der Raumluft und damit ggf. virenbelasteter Aerosole (in der Raumluft), welche beim Ausatmen, Sprechen oder Niesen durch Nase und Mund ausgestoßen werden.

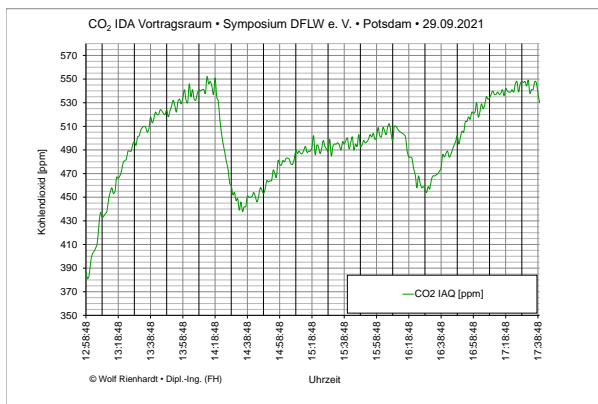


Abb. 9: Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration im Vortragsraum am ersten Tag des Symposiums (29.09.2021)

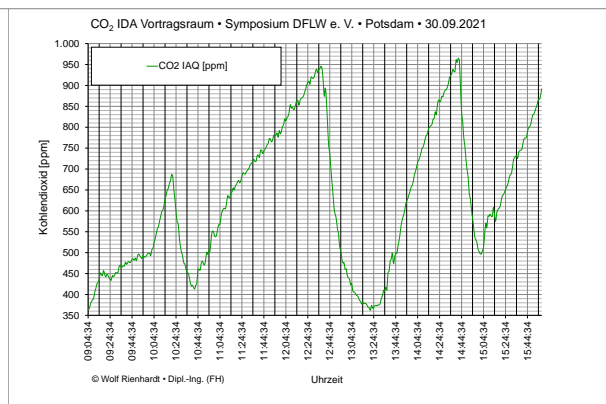


Abb. 10: Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration im Vortragsraum am zweiten Tag des Symposiums (30.09.2021)

Der Verlauf der Raumluftgeschwindigkeit an beiden Tagen des Symposiums ist in Abbildung 11 (erster Tag) und 12 dargestellt. Analog zur Lufttemperatur und relativen Luftfeuchte sind auch im zeitlichen Verlauf der Luftgeschwindigkeit die Pausen eindeutig erkennbar. Gründe sind die, während der Pausen in Richtung der Außenterrasse geöffneten Fenstertüren sowie die in Richtung des Foyers geöffneten Raumtüren (siehe Abbildung 2), die zum Einströmen von kühler Außenluft im unteren Raumbereich und dem Ausströmen von warmer Raumluft im oberen Raumbereich führen. Die im unteren Bereich einströmende kühle Außenluft wird stark erwärmt, steigt mit hoher Auftriebsgeschwindigkeit als sog. Plumes (vgl. Abbildung 1) auf und hat dadurch einen Einfluss auf die Luftgeschwindigkeit.

Die Oszillation der Messwerte der Raumluftgeschwindigkeit ist im Vergleich zur Lufttemperatur, relativen Luftfeuchte und CO₂-Konzentration wesentlich ausgeprägter, nichtsdestotrotz mit Geschwindigkeitsvariationen im Bereich von rund 0,2 m/s relativ klein. Grund sind Turbulenzen, die von den aufsteigenden warmen, dabei zugleich beschleunigten Luftmassen, den oben genannten Plumes, sowie den zeitgleich absinkenden kühlen und dabei verzögerten Luftmassen gemäß dem Lorenz-Modell (vgl. Abbildung 1) verursacht werden und Auslöser der ITK sind.

Dabei stellt das Lorenz-Modell eine Näherung für die sogenannte turbulente Raleigh-Bénard-Konvektion dar, welche in den letzten Jahren sehr ausführlich und mit abgesicherten experimentellen Ergebnissen u. a. an der technischen Universität in Ilmenau für Luft (z. B. durch Luftströmungen im Ilmenauer Fass und 3D-Simulationen) untersucht und bestätigt wurde [5, 7].

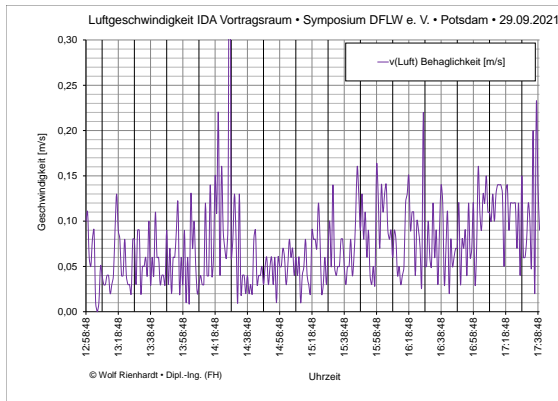


Abb. 11: Zeitlicher Verlauf der Raumluftgeschwindigkeit im Vortragsraum am ersten Tag des Symposiums (29.09.2021)

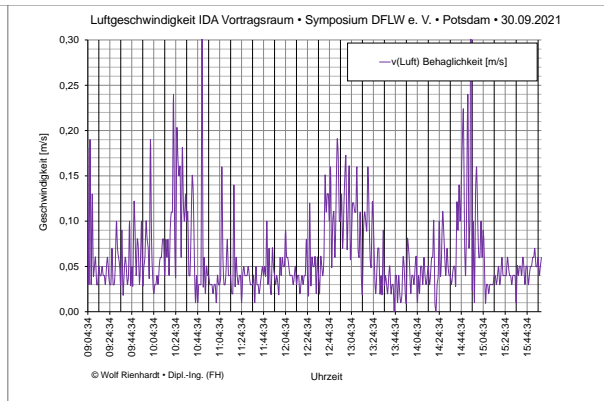


Abb. 12: Zeitlicher Verlauf der Raumluftgeschwindigkeit im Vortragsraum am zweiten Tag des Symposiums (30.09.2021)

Einfluss der ITK auf eine Verbreitung von Aerosolen

Um den Einfluss der von Plumes ausgelösten instationären thermischen Konvektion auf die Verbreitung von Aerosolen im Vortragsraum zu bewerten, wird die Lufttemperatur als relevante Messgröße herangezogen. Grund ist die Tatsache, dass die Temperaturabweichung die primäre Einfluss- und Auftriebsgröße für die Plumes und damit für die ITK ist. Weiterhin ist die Lufttemperatur mit weniger Aufwand messbar als beispielsweise die Luftgeschwindigkeit und die Messungen sind einfacher, robuster und kostengünstiger durchführbar. Sofern im zu bewertenden Raum, wie häufig, keine erheblichen Feuchtequellen vorhanden sind, kann auch die relative Luftfeuchte als Messgröße verwendet werden, da sie, wie oben vorgestellt, eine Funktion der Lufttemperatur sowie der zwei, meist als konstant anzunehmenden Größen, Luftdruck und Feuchtebelastung, ist.

Um einen Zusammenhang zwischen der ITK und der potenziellen Verbreitung virenbelasteter Aerosole (im Vortragsraum) bestimmen zu können, wird in Anlehnung an die Literatur [5] die Periodendauer und die mittlere Vermischungszeit der Aerosole mit Hilfe der aufgezeichneten Messwerte für die Lufttemperatur bestimmt.

Als Datensatz zur Bestimmung der Vermischungszeit, wurde beispielhaft der in Abbildung 13 dargestellte Zeitraum von 14³⁸ Uhr bis 16¹⁸ Uhr (Zeitdauer 80 Minuten) am ersten Tag des Symposiums gewählt. Für diesen Zeitraum wurde die Anzahl der Oszillationen ermittelt, welche zusammen mit der Zeitdauer als Basis für die Bestimmung der mittleren Periodendauer dient.

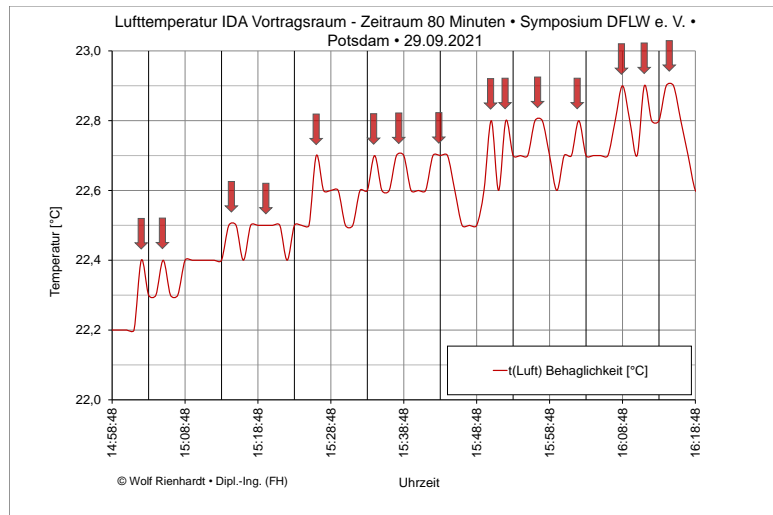


Abb. 13: Bestimmung der mittleren Periodendauer anhand der Oszillationen (Pfeile) der Lufttemperatur im Vortragsraum am 29.09.2021 im Zeitraum 14⁵⁸ Uhr bis 16¹⁸ Uhr als Grundlage für die Ermittlung der Vermischungszeit

Diese ergibt sich mit einer Zeitdauer von 80 Minuten und 15 Oszillationen (in Abbildung 13 als Pfeile dargestellt) zu 5,33 Minuten (Zeitdauer durch Anzahl der Oszillationen = $80/15$). Sie entspricht einer zweifachen Umwälzung der Luft bezogen auf den oberen und unteren Teilraum eines Walzensystems und ist einer Umwälzung der Luft über die Gesamthöhe eines Raums gleichzusetzen (Vermischungszeit in einer Walze). Gemäß der Literatur [1-6] lässt sich anhand der mittleren Periodendauer in Abhängigkeit der Raumgeometrie und der sich abhängig davon ausbildenden Strömungsform die Vermischungszeit der Luft im Raum berechnen.

Für den Vortragsraum, dessen Länge und Breite (Tabelle 1) mehr als 1,5-mal der Raumhöhe betragen (Aspektverhältnis), ist anzunehmen, dass sich mehrere Strömungswalzen ausbilden zwischen denen Aerosole und auch CO₂ hin und her transportiert werden (Abbildung 14).

Für die Walzensysteme, deren mittlere Form sich zeitlich permanent ändert, ergibt sich gemäß der Literatur [5] für die Querausdehnung als Funktion der Raumhöhe ein statistischer Durchschnittswert von 6,15 m (= Aspektverhältnis multipliziert mit der Raumhöhe = $1,5 \times 4,1$ m).

Die Anzahl n der Walzen kann anhand der Raumlänge und dem statistischen Durchschnittswert für die Querausdehnung einer Walze abgeschätzt werden und entspricht der Raumlänge dividiert durch die statistische Querausdehnung ($23,1 \text{ m}/6,15 \text{ m} = 3,76$).

Basierend auf Strömungssimulationen, die mit der Lattice-Boltzmann-Methode und der Annahme eines typischen Vergleichmäßigungsgrad der Zusatzstoffe in der Luft im Vergleich zu einer ideal gemischten Luft für den zweidimensionalen Fall durchgeführt wurden [1], wird für den vorliegenden Fall die Anzahl der Walzen zu $n = 3$ angenommen.

Die Vermischungszeit im Raum von rund 16 Minuten ergibt sich aus der Multiplikation der mittleren Periodendauer mit der Anzahl der Walzen (Vermischungszeit im Raum = $n \times$ mittlere Periodendauer = $3 \times 5,33$ Minuten).

Die Genauigkeit für die Ermittlung der Vermischungszeit im Raum wird mit $2 \leq n \leq 4$ zu 33 % abgeschätzt. Dies bedeutet, dass die Vermischungszeit zwischen etwa 10 bis 22 Minuten liegt.

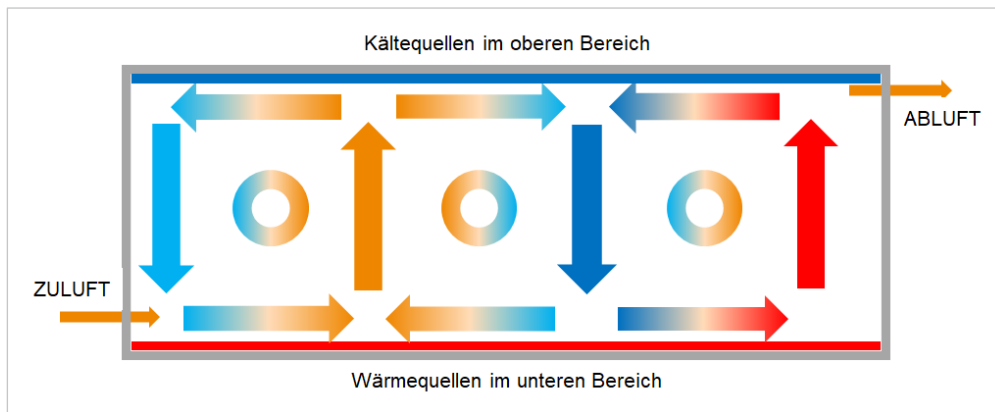


Abb. 14: Schematische Darstellung von Strömungswalzen, die sich bedingt durch eine ITK in einem Raum mit RLT-Anlage ausbilden, dessen Länge und Breite mehr als 1,5-mal der Raumhöhe betragen

Fazit

Anhand der während des zweitägigen Symposiums aufgenommenen Daten konnte das Vorhandensein einer Instationären Thermischen Konvektion (ITK) eindeutig nachgewiesen werden. Sie wird durch Wärmequellen im unteren Teil des Vortragsraums erzeugt, insbesondere durch die Teilnehmenden, und zeigt sich durch die Oszillation der aufgezeichneten Messwerte (Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit und CO₂-Konzentration). Während die ITK qualitativ eindeutig nachweisbar war, konnte eine quantitative Analyse der Amplituden aufgrund der zu geringen Abtastrate (alle 60 s) nicht durchgeführt werden.

Nichtsdestotrotz war anhand der Messwerte eine Vermischungszeit der Luft von etwa 16 Minuten bestimmbar, welche im Vergleich zur Zeitdauer des Symposiums gering ist und damit als ausreichend genau betrachtet werden darf. Damit ist eine statistisch ausreichende Durchmischung des Raums gesichert. Basis der Berechnung bildete die Lufttemperatur, welche sich bei Vorhandensein einer Vermischung als geeignete Größe bei vielen anderen Messkampagnen bewiesen hat (wie im Stadttheater Gießen) und damit auch künftig als Messgröße für eine schnelle Regel- und Steuerung von Raumlufttechnischen Anlagen (RLT-Anlage) mit einem Zeitverhalten im Bereich der Vermischungszeit genutzt werden kann. Für die praktische Anwendung wird aktuell am Institut für Gebäudesystemtechnik und erneuerbare Energie (IGE) an der Technischen Hochschule Mittelhessen (THM) ein Temperaturfühler entwickelt, der die ITK und das Temperatur-Prozesssignal gleichzeitig ermitteln kann.

Infektionsgefahr mit und ohne Masken

Geht es nun darum, für die Teilnehmenden beim Symposium eine Risikoabschätzung für eine Infektion durch virenbelastete Aerosole zur treffen, ergibt sich unter folgenden Annahmen:

- 68 Personen befinden sich im Vortragsraum und sind in gutem Gesundheitszustand,
- davon ist eine Person (mit COVID-19) infiziert,
- alle Personen tragen eine FFP2-Maske,
- die Verpassungsleckage der Masken beträgt 50 %,
- der Mindestabstand der Personen im Raum beträgt 1,5 m,
- die Veranstaltung dauert – ohne Berücksichtigung von Pausen – 4,5 Stunden an und
- die Messwertdaten vom ersten Tag des Fachsymposiums beweisen das Vorhandensein einer ITK, die wesentlich zur Vermischung der Aerosole beiträgt,

ein Ansteckungsrisiko von 1,58 %. Dies bedeutet, dass sich nach ungefähr 63 (ähnlicher) Veranstaltungen eine Person infiziert haben würde.

Tragen die Teilnehmenden unter ansonsten gleichen Bedingungen hingegen keine FFP2-Masken, erhöht sich das Ansteckungsrisiko auf 6,07 %. Demnach wäre bereits nach etwa 16 (ähnlicher) solcher Veranstaltungen (mindestens) eine Person infiziert.

Dabei basieren beide Risikoabschätzungen auf der Alpha-Variante des SARS-CoV-2-Virus und einer PCR-Inzidenz von 100 pro Woche pro 100.000 Einwohner.

Zudem wurde berücksichtigt, dass die Dunkelziffer der PCR-Tests etwa bei drei liegt, sprich dreimal mehr Virusträger bei einer Veranstaltung anwesend sind als durch positive PCR-Tests festgestellt wurden.

Wird das Ansteckungsrisiko anstatt mit der Alpha-Variante, mit der Delta-Variante (von dieser wird derzeit angenommen, dass sie etwa die dreifache Ansteckungsgefahr besitzt) berechnet, reichen beim Tragen einer FFP2-Maske 17 (ähnliche) Veranstaltung, ohne Maske bereits fünf (ähnliche) Veranstaltungen, um ausgehend von einer infizierten Person (mindestens) eine weitere Person zu infizieren.

Dabei muss beachtet werden, dass der Berechnungsalgorithmus für das Ansteckungsrisiko keine in der Realität individuellen Unterschiede, wie Atemfrequenz, Qualität der Atemschutzmasken, Anfälligkeit der Atemwege für die Absorption von Aerosolen oder Gesundheitszustand berücksichtigt. Auch kann das Ergebnis für das Ansteckungsrisiko für die Teilnehmenden am Symposium nicht verallgemeinert werden für solche Veranstaltungen.

Infokästen:

Operative Temperatur

- Entspricht der Empfindungstemperatur und ist ein wesentlicher Faktor zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit für Menschen in Wohn- und Arbeitsräumen.
- Bezeichnet das Zusammenwirken der Lufttemperatur und der mittleren Strahlungstemperatur der Umgebungsflächen.
- Messtechnisch wird die operative Temperatur mit einem sogenannten Globethermometer ermittelt. Dieses besteht häufig aus einer schwarz gefärbten hohlen Metallkugel mit einem Durchmesser von ca. 150 mm und einem Temperatursensor, der in der Kugel positioniert ist.

Instationäre Thermische Konvektion (ITK)

- In Räumen, in denen Wärmequellen im unteren Bereich vorhanden sind, bildet die Rayleigh-Bénard Konvektion turbulente Strukturen aus [6], welche Wärme von den Wärmequellen in der unteren Raumhälfte in die obere Raumhälfte transportieren. Der Vorgang ist als zeitlich veränderliche Konvektionswalzen vorstellbar und wird in der Regel als Instationäre Thermische Konvektion (ITK) bezeichnet.
- Die ITK wurde in verschiedenen wissenschaftlichen Arbeiten per Computersimulation und Veröffentlichung mit Messdaten [1-6] für Luft und andere Medien wie Wasser bei unterschiedlicher Intensität der Wärmequellen untersucht. Als Referenz diente die Rayleighzahl, eine dimensionslose Kennzahl, die den Charakter der Wärmeübertragung beschreibt, wobei ab etwa $Ra \geq 10^8$ eine ITK vorliegt ($10^9 < Ra < 10^{10}$ entspricht in einem thermisch behaglichen Raum in etwa der Temperaturdifferenz zwischen der Körperoberfläche eines Menschen und seiner Umgebung). Weiterhin wurden die Luftwalzen messtechnisch in Schwimmbädern, Vorlesungsräumen, Büroräumen, Wohnräumen und Kirchen festgestellt. Ergebnis war eine von der ITK induzierte, im gesamten Raum eindeutig messtechnisch feststellbare Oszillation aller Größen (wie Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit) sofern sich die Wärmequellen überwiegend in der unteren Raumhälfte befanden.
- Die Untersuchungen zeigten auch, dass die Anregung der Konvektionswalzen durch sog. thermische Plumes (Auftriebsschwaden) erfolgt. Diese führen zu einer beschleunigten Bewegung der Luft nach oben. Nach der Umlenkung der Luft an der Raumdecke erfolgt eine Abbremsung der Strömung. Dadurch kommt es zu zeitlichen Fluktuationen, die sich in überlagerten Oszillationen bei den gemessenen Werten zeigen. Durch Auswertung der oszillierenden Werte kann die Intensität der ITK bestimmt werden.

Aerosol

- Heterogenes Gemisch (Dispersion) aus festen oder flüssigen Schwebeteilchen in einem Gas.
- Schwebeteilchen werden Aerosolpartikel oder Aerosolteilchen genannt und sind meist von unterschiedlicher Größe.
- Dynamisches System, das ständigen Änderungen durch Kondensation von Dämpfen an bereits vorhandenen Partikeln, dem Verdampfen flüssiger Bestandteile an Partikeln und dem Zusammenwachsen (Koagulation) kleiner Teilchen zu großen oder der Abscheidung von Teilchen an umgebenden Gegenständen unterworfen ist.

Oszillation

- Wiederholte zeitliche Schwankung von Zustandsgrößen, wie Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit, CO_2 -Konzentration, wobei die Größe der Schwankungen unterschiedlich sein kann.
- Da die Auftriebsphänomene der IKT durch nichtlineare Effekte (Beschleunigung und Abbremsung) bestimmt sind, ergeben sich nichtlineare Zeitreihen, die aus einem Gemisch unterschiedlicher Frequenzen bestehen. Die kleinsten Frequenzen beschreiben die großskaligen Konvektionswalzen der ITK, auch „large scale circulation“ (siehe Abbildung 1) genannt. Die Periodendauer entspricht der Umdrehungszeit der großen Walzen.
- Auf Basis der größten Frequenzen lassen sich Durchmischungszeiten für Räume bestimmen. Diese beschreiben den in der Klimatechnik benutzten Effekt der lokalen Lüftungseffektivität, welche experimentell z. B. mit Tracergastechniken bestimmt werden kann.

Verpassungsleckage und Filterdurchlass

- Die Gesamtleckage einer FFP-Maske setzt sich zusammen aus dem Filterdurchlass und der Verpassungsleckage.
- Der Filterdurchlass beschreibt die Anzahl der Partikel, die durch das Filtermaterial nicht abgeschieden werden.
- Die Undichtigkeit zwischen dem Maskenrand der FFP-Maske und dem Gesicht des Maskenträgers wird als Verpassungsleckage bezeichnet.
- Experimentelle Untersuchungen mit Probanden zeigten, dass sich die Verpassungsleckage im Durchschnitt zwischen 4 % bis 75 % bewegten [10].

Abbildungsverzeichnis

Abbildung Nr.	Quelle
1	Florian Görig • Technische Hochschule Mittelhessen (THM)
2 bis 13	Wolf Rienhardt • Energiesystemtechnik
14	Prof. Dr. rer. nat. Alfred Karbach • Technische Hochschule Mittelhessen (THM)

Literaturverzeichnis

- [1] M. Gundlach, A. Karbach, F. Görig. Chaotische Raumluftrömung als Folge thermischer Konvektion [chaotic indoor air ow as a result of thermal convection]. GI Gebäudetechnik in Wissenschaft und Praxis. Bd. 127 H.2 (2016)
- [2] A. Karbach, M. Gundlach, F. Görig, et al. Instationäre Phänomene bei thermischer Konvektion und deren Bedeutung für bedarfsorientierte Lüftungskonzepte [Transient phenomena in thermal convection and their importance for demand-oriented ventilation concepts]. HLH Nr. 2 (2015)
- [3] F. Görig. Nichtlineare Zeitreihenanalyse des durch thermische Konvektion hervorgerufenen chaotischen Verhaltens von Raumluftrömen [Nonlinear time series analysis of the chaotic behavior caused by thermal convection in room air currents]. Technische Hochschule Mittelhessen. Masterarbeit (2015)
- [4] J. Masuch. Das Bauer-Optimierungssystem (BAOPT) zur Raumluftrömung in klimatisierten Räumen [The Bauer Optimization System (BAOPT) for indoor air ow in air-conditioned rooms]. HLH Bd. 69. Nr. 7-8 (2018)
- [5] F. Chillà, J. Schumacher. New perspectives in turbulent Rayleigh-Bénard-Convection. The European physical journal. E. Soft matter 35 (2012) 58. doi:10.1140/epje/i2012-12058-1
- [6] F. Görig. Entwicklung eines Konzeptes zur Regelung von Raumluftechnischen Anlagen auf der Basis von Methoden der dynamischen Systeme. Dissertation (noch nicht veröffentlicht)
- [7] A. Pandey, J. D. Scheel, J. Schumacher. Turbulent superstructures in Rayleigh-Bénard convection. Nature Communications. ISSN 2041-1723. ZDB-ID 2553671-0. – [London]: Nature Publishing Group UK. – 9 (2018), art. 2118, 11 pp
- [8] AERRED_MA - Aerosol Reduction by Masks and Air-exchange. Prof. Dr. rer. nat. Alfred Karbach. Programm noch nicht veröffentlicht
- [9] HEADS – Human Emission of Aerosol and Droplet Statistics. Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften – München, Universitätsmedizin Göttingen – Georg-August-Universität Göttingen. <https://aerosol.ds.mpg.de/de>

- [10] L. Schumacher, J. Lange, H. Rotheudt et al. Experimentelle Untersuchung der Leckage und Abscheideleistung von typischen Mund-Nasen-Schutz und Mund-Nasen-Bedeckungen zum Schutz vor luftgetragenen Krankheitserregern. DOI: <https://depositonce.tu-berlin.de/handle/11303/11975>. Version: 16.11.2021

Autoren

Dipl.-Ing. (FH) Wolf Rienhardt,

Energiesystemtechnik,

84364 Bad Birnbach

wrienhardt@t-online.de

Prof. Dr. rer. nat. Alfred Karbach,

Technische Hochschule Mittelhessen (THM)

35390 Gießen

alfred.karbach@me.thm.de

Dipl.-Ing. (FH) Florian Görig M.Sc.

Technische Hochschule Mittelhessen (THM)

35390 Gießen

florian.goerig@me.thm.de