

# Entwicklung eines optischen Echtzeit-Messverfahrens für Luftwechselraten in Innenräumen

Rebekka Grüttner<sup>1</sup>, Christian Friebe<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH, 01309 Dresden, Deutschland

## Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden die Ziele und Ergebnisse sowie die Anforderungen und Randbedingungen für ein optisches Messverfahren beschrieben, das derzeit in einem öffentlich geförderten Forschungsprojekt entwickelt wird. Das Verfahren basiert auf der Messung der Helligkeit eines Laserstrahls, der beim Durchgang durch Nebelteilchen abgeschwächt wird, unter Verwendung einfacher Komponenten wie einem Laserpointer und einer Webcam. Der Nebel (z.B. handelsüblicher langzeitstabiler Disco-Nebel) wird gleichmäßig im zu untersuchenden Raum verteilt. Die Konzentration des Nebels wird neben dem natürlichen Zerfall der Partikel, vor allem durch die Klimaanlage mit nebefreier Außenluft reduziert. Der Laserstrahl wird im Raum so positioniert, dass er den Aufenthaltsbereich ausreichend abbildet. Aus der von der Kamera erfassten zeitlichen Helligkeitszunahme kann die Luftwechselrate berechnet werden.

**Keywords:** Luftwechselrate, Luftqualität, optisches Messverfahren, Echtzeitmessung, Raumluft

## Hintergrund

Heutzutage verbringen die Menschen den größten Teil ihrer Zeit in Innenräumen. Für die Gesundheit, das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit ist es notwendig, dass in den bewohnten Räumen gesunde Luft zum Atmen vorhanden ist. Die Luftwechselrate (LWR in 1/h) ist ein wichtiger Parameter zur Beurteilung der Luftqualität. Die Größe der LWR dient als Nachweis für die Eignung der eingesetzten Lüftungsanlagen. Sie gibt Auskunft darüber, wie häufig die Luft in einem Raumbereich real ausgetauscht wird. Die Kenntnis der LWR ermöglicht es Ihnen, die Lüftungsqualität des Raumes zu beurteilen und gegebenenfalls Maßnahmen zur Verbesserung zu ergreifen. Abweichungen der ermittelten LWR von der ausgelegten LWR einer Lüftungs- oder Klimaanlage treten manchmal aus praktischen Gründen auf [1].

Stand der Technik für die Ermittlung von LWR ist die Messung von Tracergaskonzentrationen an einem oder mehreren Punkten im Aufenthaltsbereich. Die Anwendung hat sowohl Vorteile als auch Nachteile. Eines der am häufigsten verwendeten Tracergase ist SF<sub>6</sub> mit einem 24.000-fachen Treibhauspotenzial im Vergleich zu CO<sub>2</sub>. Außerdem erfordern Online-Messungen eine vergleichbar hohe Tracergaskonzentration, während niedrige Konzentrationen nur bei Messverfahren mit Probenahme und Laborauswertung verwendet werden können. Aufgrund des zeitlichen

Abstands zwischen diesen beiden Tätigkeiten bestehen Unsicherheiten über die Qualität der Messung während der Probenahme.

Bei der Durchführung von LWR-Messungen stellte sich die Frage, wie eine Messmethode entwickelt werden kann, die schnell zuverlässige Online-Ergebnisse liefert.

## Aktueller Stand der Technik

Die Messung der LWR erfolgt durch Messung der Konzentration an einer kleinen Anzahl von definierten Punkten innerhalb eines Raumes, z.B. an einem Arbeitsplatz. Es stehen vier verschiedene grundlegende Messverfahren zur Verfügung, Verfahren mit konstanter Konzentration, mit abfallender Konzentration, mit konstanter Injektion und das Pulsverfahren. Nach den Ergebnissen der Messungen und der Auswertung von Weis et al. [2] ist die Methode des konstanten Abklings am genauesten, insbesondere bei der Verwendung von SF<sub>6</sub>. Daher wird dieses Verfahren in einer Vielzahl von Methoden eingesetzt [3-10].

Es gibt verschiedene Arten von Tracern, die für die Messung verwendet werden können. Die gebräuchlichsten und in den Normen am häufigsten verwendeten sind gasförmige Tracer wie SF<sub>6</sub>, CO<sub>2</sub>, He, usw. Temperatursignale wurden von Müller et al. verwendet [11].

## Funktionsprinzip

Die Messung der Luftwechselrate  $N$  beruht auf der Messung des Abklings einer

Stoffkonzentration  $c$  über die Zeit  $t$ , ausgehend von der Konzentration  $c_1$ . Die Abhängigkeit der tatsächlichen Konzentration aufgrund des Luftaustauschs ist in Gleichung (1) angegeben,

$$c(t) = c_1 e^{-N t} \quad (1)$$

was zu der direkten Berechnung nach Gleichung (2) führt

$$N(t) = \frac{1}{t} \ln \frac{c_1}{c(t)} \quad (2)$$

Im Unterschied zu einer direkten Konzentrationsmessung nutzt der vorgeschlagene Aufbau die Abschwächung von Licht beim Strahlendurchgang durch ein Aerosol. Der Zusammenhang zwischen Lichtabsorption beim Durchgang durch eine Lösung und der darin enthaltenen Substanz der Stoffkonzentration  $c$  wird durch das Beer-Lambert-Gesetz gemäß Gleichung (3) beschrieben.

$$A = \log \frac{I_0}{I(t)} = \epsilon_\lambda c d \quad (3)$$

Dabei stellt der Absorptionskoeffizient  $A$  das logarithmische Verhältnis der Lichtintensität bei "sauberen" ( $I_0$ ) und bei "gemessenen" ( $I$ ) Bedingungen dar, die durch den molaren Absorptionskoeffizienten der Substanz  $\epsilon_\lambda$ , die Konzentration  $c$  und die Weglänge  $d$  definiert sind. Unter Berücksichtigung eines konstanten  $\epsilon_\lambda$  und  $d$  kann die zeitabhängige Luftwechselrate mit Hilfe von Gleichung (4) beschrieben werden.

$$N(t) = \frac{1}{t} \ln \frac{\ln \frac{I_0}{I_1}}{\ln \frac{I_0}{I_2}} \quad (4)$$

Aus praktischen Gründen kann die Luftwechselrate durch zwei definierte Zeitpunkte  $t_1$  und  $t_2$  berechnet werden, wobei 1 den ersten und 2 den zweiten Zeitpunkt bezeichnet (Gleichung 5). Somit ist  $c_1$  höher als  $c_2$  und im Gegenzug ist  $I_1$  niedriger als  $I_2$ . Das Ergebnis ist eine mittlere LWR zwischen den beiden Zeitschritten.

$$\bar{N} = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \left( \frac{\ln \frac{I_0}{I_1}}{\ln \frac{I_0}{I_2}} \right) \quad (5)$$

Wie aus diesen Gleichungen hervorgeht, wird die Lichtintensität, die von Aerosolpartikeln absorbiert wird, in einem Raum über eine bestimmte Entfernung und Zeit gemessen (siehe Abb. 1). Aus praktischen Gründen wird ein Laser an einem Punkt positioniert und die Laserintensität an einem anderen Punkt gemessen.

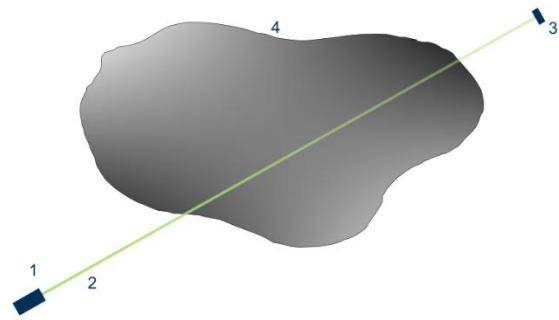


Abb. 1: Funktionsprinzip mit Laser (1), Laserstrahl (2), Detektor (3) und Aerosol-Luft-Gemisch (4)

Der Messvorgang ist in Abb. 2 dargestellt und gliedert sich in vier verschiedene Phasen. Das Diagramm zeigt den vereinfachten Verlauf der Lichtintensität über die Zeit. Phase I stellt die Situation im Ausgangszustand dar. Hier ist das Messsystem positioniert und der Detektor liefert die höchste Strahlungsintensität aufgrund fehlender lichtabsorbierender Partikel im Strahlengang. In Phase II werden die Aerosole in die Luft gegeben, und die Strahlungsintensität wird entsprechend verringert. Phase III ist die Phase der homogenen Vermischung der Aerosole und der anschließenden Stabilisierung der Raumluftströmung. Durch das Einströmen von aerosolfreier Zuluft (ZUL) und das Abführen aerosolbehafteter Abluft (ABL) nimmt die Konzentration der Aerosolpartikel langsam ab und die detektierte Strahlungsintensität steigt in Phase IV an. Aus den beiden gemessenen Strahlungsintensitäten zu den zwei verschiedenen Zeitpunkten, deren zeitlicher Differenz und der vor Aerosolzugabe aufgezeichneten Intensität  $I_0$  lässt sich anschließend die erzielte LWR berechnen (Zweipunktverfahren).

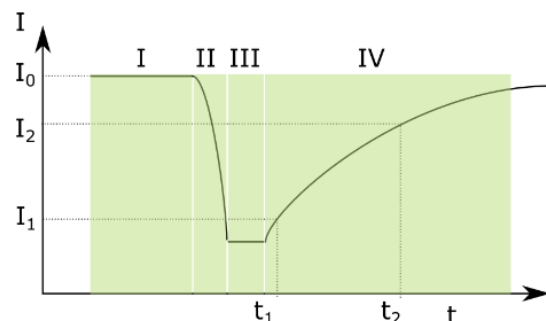


Abb. 2: vier Phasen des Messvorganges: I: Strahlungsintensitätsmessung vor Aerosolzugabe, II: Aerosolzugabe in Raumluft, III: aktives Vermischen des Aerosols, IV: Messung der Zunahme der Strahlungsintensität

## Aufbau

Der Messaufbau umfasst:

- Laser (cw, 1 mW, 532 nm, fokussierbar),
- Webcam (1/6,5" CMOS, 1 MP, fester Fokus),
- Bandpassfilter (532 nm),
- zwei Diffusoren  
(weiß, 25 % Transmission bei 532 nm),
- Nebelgenerator und
- Ventilator

Der Aufbau ist in Abb. 3 dargestellt. Der Detektor besteht aus einem schwarzen Gehäuse mit einem Eingang für den Laserstrahl an einer Seite und der Kamera an der gegenüberliegenden Wand. Ein Bandpassfilter wird verwendet, um den Einfluss der Umgebungsstrahlung zu weitestgehend zu minimieren. Er wird direkt am Eingang des Detektorgehäuses montiert. Zwei im Abstand zueinander verstellbare Diffusoren (Streuscheiben) zwischen Kamera und Bandpassfilter sorgen für eine optimale Helligkeit und gleichmäßig verteilte Laserlichtintensität für die Kamera. Laser und Detektor sind koaxial ausgerichtet.

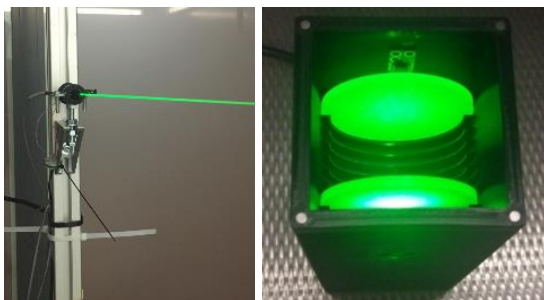


Abb. 3: Laser (links) und Innenaufbau des Detektors (rechts), bestehend aus Bandpassfilter, zwei Diffusoren und dem optischen Sensor

Die Steuerung der Messung und die Berechnungen erfolgen über ein Python-Skript mit einer Bokeh-Web-App als grafische Benutzeroberfläche (GUI). In Abb. 4 ist ein Bild der Benutzeroberfläche dargestellt.

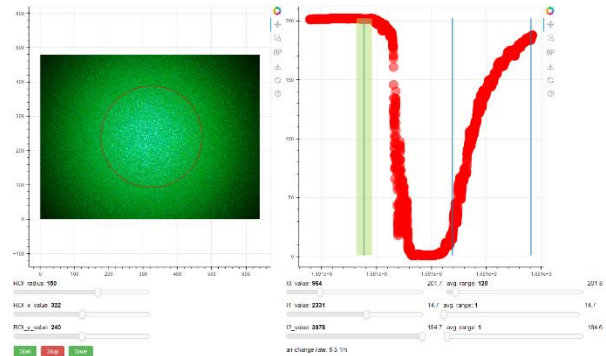


Abb. 4: Grafische Benutzeroberfläche des Messsystems; links: Kamerabild mit Auswahl auszuwertender Pixel (ROI), rechts: online Diagramm des Helligkeitsverlaufes, deren Auswertung

## Validierung des Lasermessverfahrens

Die Validierung der Messung wurde mit zwei verschiedenen Ansätzen durchgeführt, mit numerischen Simulationen (CFD) und mit Messungen nach dem Verfahren mit abfallender Konzentration. In beiden Ansätzen wurde derselbe Raum untersucht und mit einem definierten Volumenstrom von 265 m<sup>3</sup>/h belüftet. Die Luft- und Wandtemperaturen des Raumes betragen 21°C. Der Raum und der Aufbau sind in Abb. 5 dargestellt.

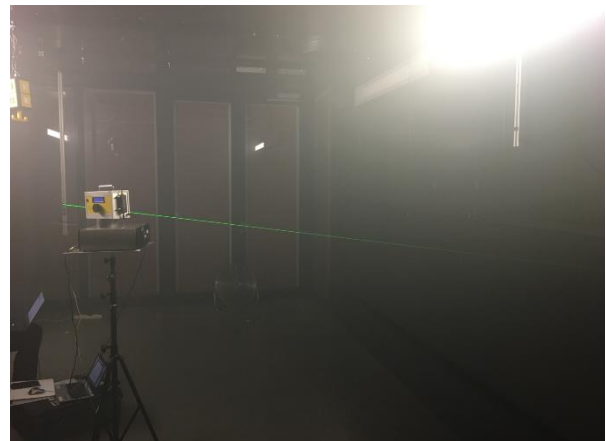


Abb. 5: Raumströmungslabor – Ort der Messungen nach dem Tracergas-abklingverfahren und dem neuen optischen Verfahren

Dieser Raum wurde für die CFD-Berechnungen vereinfacht dargestellt (Abb. 6). Für die Auswertung der Messmethode wurden definierte Punkte, Linien und Ebenen verwendet. Die instationären Berechnungen wurden mit Ansys Fluent durchgeführt. Der zeitliche und örtliche Konzentrationsverlauf der Aerosolpartikel in den realen Messungen wurde in der Simulation durch unterschiedliche

Wasserdampfkonzentrationen in der Zu- und Raumluft dargestellt.

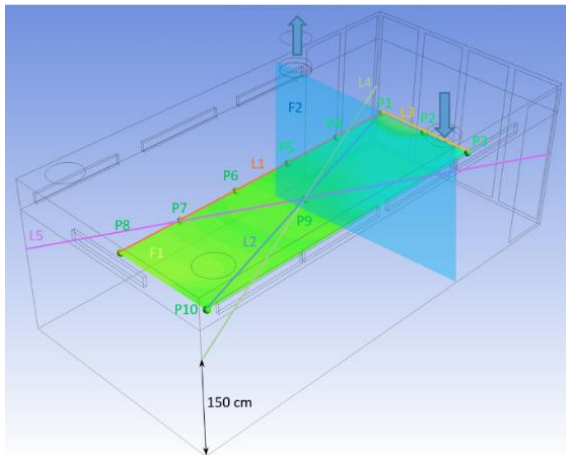


Abb. 6: CFD Nachbildung des Messraumes für instationäre Simulation, mit definierten Mess-/ Auswertungsorten

Die Auswertung des Wasserdampfmasseanteils über die Zeit an den definierten Punkten, Linien und Ebenen ist in Abb. 7 dargestellt. Ausgehend von der gleichen Massenkonzentration ist an allen Auswertepunkten des Raumes eine starke Fluktuation zu beobachten, insbesondere bis 1000 s. Die Mittelung über Linien und Ebenen führt zu glatteren Messabfällen, wobei Ebenen glattere Ergebnisse liefern als Linien. Bei weiteren realen Messungen entspricht die Linie L2 der Sichtlinie des Messgerätes. Der berechnete Konzentrationsverlauf von L2 ergibt eine LWR von 2,9 h<sup>-1</sup>, während die LWR für die Ebene F1 2,4 h<sup>-1</sup> beträgt.

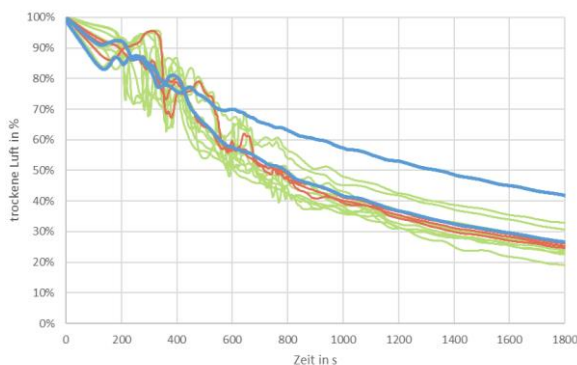


Abb. 7: Simulierte Abklingkurve an definierten Punkten (grün), Linien (rot) und Flächen (blau)

Zudem wurden zur Validierung Tracergaskonzentrationsmessungen gleichzeitig mit optischen Messungen mit dem entwickelten Sensorsystem durchgeführt. Die Ergebnisse aus Simulation, Tracergasverfahren und neuem Verfahren zeigen an

Punkten größere Unterschiede auf als bei gemittelten Werten aus mehreren Punkten oder entlang einer ausgewerteten Linie (Abb. 8). Die ermittelten Luftwechselraten, simuliert und gemessen entlang der Linie L2 weisen eine gute Übereinstimmung auf.

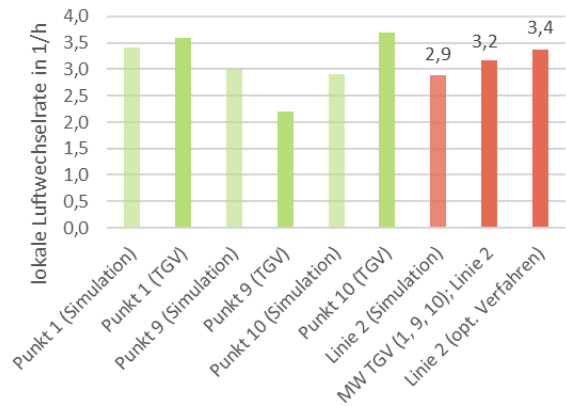


Abb. 8: Vergleich der Luftwechselraten aus Simulation, Tracergasverfahren (TGV) und dem neuen optischen Verfahren

## Ergebnis und Diskussion

Die Auswertungen der Simulation und Messungen zeigen, dass das entwickelte optische Verfahren funktioniert. Die ermittelte Abweichung zum Messverfahren nach Stand der Technik beträgt in einem Fallbeispiel unter definierten konstanten Bedingungen 6 %. Ergebnisse aus punktuellen Probenahmen weisen eine größere Streuung und damit Fehleranfälligkeit bei der Ermittlung der LWR im Raum auf, als dies bei Messung und Auswertung entlang einer Linie der Fall ist. Aus den Untersuchungen ergeben sich mehrere diskussionswürdige Aspekte für die Anwendung unter Realbedingungen. Die wichtigsten Punkte sind:

- Einflüsse des Umgebungslichts
- Stabilität der Lichtquelle
- Positionierungsgenauigkeit und Stoßfestigkeit bei größeren Entfernungen
- Messunsicherheit bei Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen während der Messung

Diese Aspekte werden im weiteren Projektverlauf mit dem Ziel untersucht, ein marktreifes Gerät zu entwickeln, das folgende Ziele erfüllt: einfache Technologie, klimafreundlich, zuverlässig, Online-Messung und leichte Einrichtung und Inbetriebnahme.

Diese Arbeit wurde vom deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert und unterstützt.

## Literaturnachweis

- [1] K. Noh, M.-D Oh: Variation of clean air delivery rate and effective air cleaning ratio of room air cleaning devices. In: Building and Environment vol. 84 (2014)
- [2] N. Weis, C. V. Hutter-Sumowski, A. Meyer, B. Neuweiger,: Qualitätssicherung der Bestimmung der Luftwechselrate in Innenräumen – ein Methodenvergleich (Abschlussbericht) : Bremer Umweltinstitut GmbH i. A. des Umweltbundesamtes, 2019
- [3] ISO 12569: Thermal performance of buildings and materials - Determination of specific airflow rate in buildings - Tracer gas dilution method, 2017
- [4] ASTM E741-23: Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution, 2023
- [5] VDI 4300-7:2001: Indoor-air pollution measurement - Measurement of indoor air change rate
- [6] NT VVS 047: Buildings – ventilating air: Mean age of air, 1985
- [7] NT-Build: Buildings: Rate of ventilation in different parts of a building, 1982
- [8] GB/T 18801-2015: Air cleaner, 2015
- [9] ANSI/AHAM AC-1-2015: Method for Measuring Performance of Portable Household Electric Room Air Cleaners, 2015
- [10] ISO 16000-8: Indoor air -Part 8: Determination of local mean ages of air in buildings for characterizing ventilation conditions, 2007
- [11] D. Müller, M. Zeller: Eine alternative Methode zur Bestimmung der Lüftungseffektivität. HLH-Heizung Lüftung Klima Haustechnik vol. 51, Dusseldorf: VDI Verlag, 1996-1998. (2000), Nr. 11, pp. 30–37
- [12] B. Blocken, T. van Druenen, A. Ricci, L. Kang, T. van Hooff, P. Qin, L. XIA, C. Ruiz, J. H. Arts, et al.: Ventilation and air cleaning to limit aerosol particle concentrations in a gym during the COVID-19 pandemic. In: Building and Environment vol. 193, Elsevier (2021), p. 107659
- [13] Ch. Friebe, R. Krause, R. Heidenreich, R. Grüttner et al.: Test Procedures of Mobile Air Cleaning Devices - First Experiences and Results, 52nd AiCARR International Conference, E3S Web of Conferences 343, 03004, doi: 10.1051/e3sconf/202234303004, 2022
- [14] R. Krause, Ch. Friebe, R. Heidenreich: Application of Mobile Air Cleaning Devices in daily school routines, 52nd AiCARR International Conference, E3S Web of Conferences 343, 03003, doi: 10.1051/e3sconf/202234303003, 2022
- [15] W. Whyte, N. Lenegan, T. Eaton: Ensuring the air supply rate to a cleanroom complies with the EU GMP and ISO 14644-3 recovery rate requirements. Clean Air and Containment Review vol. 26, Euromed Communications (2016), pp. 22–24
- [16] S. Norwood: Handbook of Downstream Processing. In: E .Goldberg, E. (ed.): Blackie Academic & Professional, 1997, p. 530
- [17] Ch. Friebe, R. Grüttner, K. Hackeschmidt: Verfahren und Anordnung zur Bestimmung der Luftwechselrate. Patent DE 10 2020103 273 B3