



Foto: DLR

Luftqualität in Schienenfahrzeugen (LUQAS)

Untersuchungen zur Ausbreitungswahrscheinlichkeit von Aerosolen im Fahrgastraum von Schienenfahrzeugen

Datum: 10.12.2020

Autoren:

DB Systemtechnik GmbH, Kompetenzzentrum
Aerodynamik und Klimatechnik

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Insti-
tut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Abtei-
lung Bodengebundene Fahrzeuge

Inhalt

Zusammenfassung	3
1 Einleitung	4
2 Ergebnisse	4
2.1 Methoden	4
2.2 Einfluss von Abstand, Mund-Nase-Bedeckung und Frischluftzufuhr	4
Allgemeines	4
Abstand zur Aerosolquelle	5
Mund-Nase-Bedeckung	6
Frischluftzufuhr	6
Weitere Ergebnisse der Tracergasmessungen	6
Messungen der Partikelausbreitung	7
Abklingverhalten	8
2.3 Weitere Ergebnisse	8
Abscheideverhalten des Klimasystems	8
Untersuchungen mit CFD	9
2.4 Gültigkeit der Ergebnisse	9
3 Fazit	11
Anhang 1	12
Anhang 2	13

Zusammenfassung

Das Untersuchungsvorhaben „Luftqualität in Schienenfahrzeugen“ (LUQAS) wurde gemeinsam von der Deutschen Bahn AG und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. initiiert.

Gegenstand des Projekts, das zwischen Juli und Oktober 2020 durchgeführt wurde, waren mögliche Ausbreitungswege von Aerosolen und Tröpfchen in den Fahrgasträumen von Schienenfahrzeugen. Die Projektplanung und -bearbeitung erfolgte durch die DB Systemtechnik, Kompetenzzentrum Aerodynamik und Klimatechnik, und durch das DLR-Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Abteilung Bodengebundene Fahrzeuge.

Eine virologische Bewertung möglicher Infektionsrisiken war nicht Teil der Untersuchung.

Die Untersuchungen beinhalteten Strömungs- und Ausbreitungsmessungen in dem stationären Versuchsfahrzeug DIRK (*Demonstrator für Innovationen im Reisendenkomfort und Klimatisierung*). Es handelt sich dabei um einen Mittelwagen eines ICE 2. Ebenfalls wurden Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulationsrechnungen durchgeführt.

Die an dem Versuchsfahrzeug durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Ausbreitung von Aerosolen und Tröpfchen innerhalb des Fahrgastraums vor allem direkt und mit begrenzter Wegstrecke stattfindet. Die Partikel verbreiten sich nicht in großer Konzentration über das Klimasystem und entsprechend auch nicht im ganzen Wagen. Technische Lösungen zur Luftreinigung innerhalb des Klimasystems sind daher nur begrenzt wirksam.

Die Untersuchungen zeigen, dass eine Mund-Nasen-Bedeckung neben der bekannten Abscheidung von Tröpfchen zusätzlich dazu beiträgt, die Ausbreitung von Aerosolen weiter zu begrenzen.

Das Fahrzeug wird bereits mit viel Frischluft versorgt; eine weiter erhöhte Frischluftmenge reduziert die Partikelbelastung nicht signifikant.

Der Wechsel vom Kühlbetrieb im Sommer zum Heizbetrieb im Winter führt in dem Versuchsfahrzeug zu keiner wesentlichen Veränderung der Situation oder deren Bewertung.

Die am Versuchsfahrzeug vorgenommenen spezifischen Untersuchungen sind auf einen Teil der ICE-Flotte sehr gut und auf viele andere Schienenfahrzeuge gut übertragbar. Bei der Übertragung der Erkenntnisse auf nicht untersuchte Fahrzeuge müssen die unterschiedlichen Klimatisierungskonzepte berücksichtigt werden.

1 Einleitung

Das Untersuchungsvorhaben „Luftqualität in Schienenfahrzeugen“ (LUQAS) wurde gemeinsam von der Deutschen Bahn AG und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) initiiert. Gegenstand des Projekts waren mögliche Ausbreitungswege von Aerosolen und Tröpfchen in den Fahrgasträumen von Schienenfahrzeugen.

Anlass für das Projekt war die Corona-Virus-Pandemie. Nach bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnissen erfolgt die hauptsächliche Übertragung des Virus über kleinste Flüssigkeitspartikel, die über die Schleimhäute der Nase, des Mundes und ggf. des Auges aufgenommen werden. Während beim Husten und Niesen größere respiratorische Partikel (Tröpfchen) entstehen, die schnell zu Boden sinken, können sehr kleine Partikel (Aerosole) auch über längere Zeit in der Luft schweben und sich in Räumen verteilen.

Die Projektplanung und -bearbeitung erfolgte durch die DB Systemtechnik (DB ST), Kompetenzzentrum Aerodynamik und Klimatechnik, und das DLR-Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Abteilung Bodengebundene Fahrzeuge. Beteiligt waren der Technikbereich des DB Konzerns sowie die Geschäftsfelder DB Regio und DB Fernverkehr. Die Untersuchungen beinhalteten umfangreiche Strömungs- und Ausbreitungsmessungen in dem (stationären) Versuchsfahrzeug DIRK (einem ICE-2-Wagen). Ebenfalls wurden entsprechende Simulationsrechnungen durchgeführt. Das Projekt fand von Juli bis Oktober 2020 statt.

In dem vorliegenden Bericht werden die erzielten Ergebnisse des Projekts LUQAS vorgestellt mit den Schwerpunkten (i) Einfluss des Abstands der infizierten Person zu anderen Fahrgästen sowie (ii) der Mund-Nasen-Bedeckung und (iii) der Frischluftzufuhr des Klimasystems und einer Abschätzung zur Übertragbarkeit der erzielten Ergebnisse auf andere Fahrzeugtypen und den Winterbetrieb mit eingeschalteter Heizung.

2 Ergebnisse

2.1 Methoden

Die Messungen fanden im stationären Versuchsträger DIRK statt, der dafür in der Klimakammer der DB Systemtechnik in Minden stand, um reproduzierbare Randbedingungen für verschiedene Außentemperaturen sicherzustellen. Staub, Pollen oder Sonneneinstrahlung hätten die Ergebnisse sonst verfälschen können

Es wurden moderne Lasermessverfahren (LDA-PDA und PIV) sowie eine Tracergasmesstechnik mit CO₂ als Tracergas (Spurengas) eingesetzt. Zum anderen wurden weitere konventionelle Messtechniken angewendet.

Neben den Versuchen wurden Simulationen des dreidimensionalen Strömungsfelds (CFD) in einem Segment des DIRK durchgeführt. Für den Vergleich verschiedener Konfigurationen und Randbedingungen wurde ein Basisfall definiert.

2.2 Einfluss von Abstand, Mund-Nase-Bedeckung und Frischluftzufuhr

Allgemeines

Die Messungen mit Tracergas dienen dazu, die Ausbreitung von Aerosolen im Fahrgastraum zu untersuchen. Dabei strömte CO₂ an einem bestimmten Sitzplatz im Fahrgastraum in Kopfhöhe einer sitzenden Person aus.

Die Verteilung im Fahrzeug und auf andere Sitzplätze wurde dann anhand der CO₂-Konzentration an mehreren Orten im Fahrgastraum simultan gemessen. Weil Aerosole der Luftströmung sehr gut folgen, konnte damit die Ausbreitung von Aerosolen nachgebildet werden. Das Sitzlayout und die Messpositionen zeigt Abbildung 1.

Die Messungen stellten eine Worst-case-Betrachtung bei der Ausbreitung von Aerosolen im Fahrgastraum unter Einbindung der Klimaanlage dar. In der Realität stellen sich positive Effekte ein durch die Abscheidung von Partikeln im Klimasystem und durch die MNB sowie durch die Verdampfung von Partikeln.

Bei den Messungen wurde folgender Basisfall angenommen:

- Die Außentemperatur beträgt 28 Grad Celsius.
- Die relative Luftfeuchtigkeit außen liegt bei 45 Prozent.
- Die Klimaanlage kühlt.
- Im vollbesetzten Wagen sitzen 78 Personen, davon eine Person mit einer Infektion.
- Die Person trägt keine Mund-Nase-Bedeckung.
- Die Person sitzt im mittleren Bereich des Wagens im Gruppenbereich mit Tisch und dort auf einem Gangplatz (Platz 63 resp. Platz 24).

Aus den Messungen konnte abgeleitet werden, wie sich verschiedene Randbedingungen bzw. Maßnahmen auf eine Aerosolverteilung im Fahrgastraum auswirken.

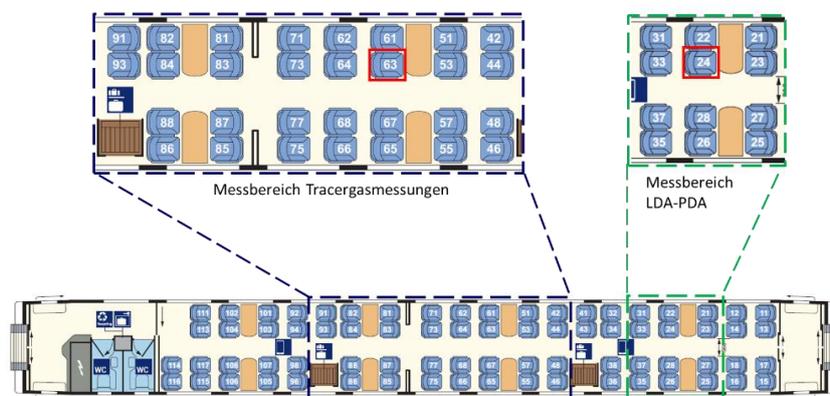


Abbildung 1: Sitzlayout im Versuchsfahrzeug. Das Tracergas CO₂ für die im Folgenden präsentierten Konzentrationsverteilungen wurde auf Sitzplatz 63 zugegeben. Für die LDA-PDA-Messungen wurden die Partikel an Sitzplatz 24 erzeugt.

Abstand zur Aerosolquelle

Aus den Ergebnissen der Tracergasmessungen konnte für die durchgeführten Untersuchungen im Versuchswagen abgeleitet werden, dass erhöhte Aerosolmengen verstärkt in der unmittelbaren Nähe der Tracergasquelle auftreten.

Abbildung 2 zeigt die erhöhte Konzentration des Tracergases auf den Plätzen in der Nähe der Quelle im Basisfall. Angenommen wurde, dass die Person keine Mund-Nase-Bedeckung trägt.

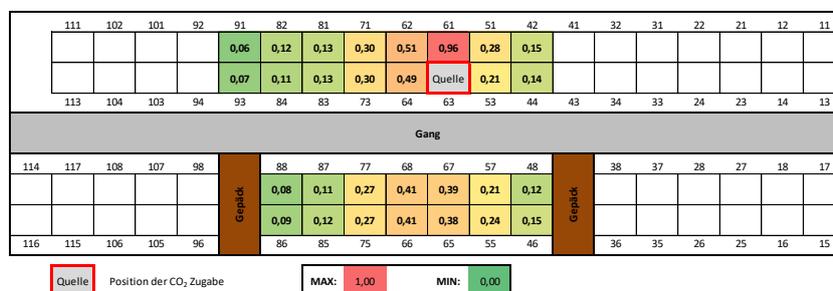


Abbildung 2: Normierte Konzentration des Tracergases im Versuchsfahrzeug. Messung ohne Mund-Nase-Bedeckung im Basisfall. Die Messwerte wurden mit dem Maximalwert an der Quelle normiert. Ein Messwert von 0 entspricht der Hintergrundkonzentration, ein Wert von 1 entspricht dem Messwert an der Quellenposition des Basisfalls ohne MNB.

Im Basisfall nahm die Aerosolkonzentration mit zunehmendem Abstand zur Quelle rasch ab. Bereits nach maximal zwei Sitzreihen sank die normierte CO₂-Konzentration in etwa auf die Hintergrundkonzentration ab.

Mund-Nase-Bedeckung

Vor der Tracergasquelle wurde eine Mund-Nase-Bedeckung (MNB) platziert. Verwendet wurde eine klassische OP-Maske.

Im nahen Umfeld der Quelle veränderte sich die Aerosolverteilung durch eine MNB (vgl. Abbildung 3). Die Werte des Tracergases bei allen Sitznachbarn in der gleichen Querreihe waren niedriger als ohne MNB. Die Werte auf Sitzplätzen gegenüber der Quelle waren etwas niedriger. Gleichzeitig gab es etwas niedrigere oder gleiche Werte auf Sitzplätzen hinter der Quelle. Bei weiter entfernten Sitzplätzen gab es einen geringen oder keinen Einfluss.

Eine MNB verändert das Strömungsverhalten. Die Partikel werden feiner und in geringerer Konzentration als ohne Mund-Nase-Bedeckung verteilt. Die MNB hat zudem eine gewisse Filterwirkung; das zeigen zahlreiche andere Studien.

Eine Mund-Nasen-Bedeckung führte im Versuchsfahrzeug dazu, dass die ohnehin begrenzte Ausbreitung der Partikel weiter eingeschränkt wurde. Die normierte CO₂-Konzentration lag auch in der Nähe der Quelle fast auf der Höhe der Hintergrundkonzentration.

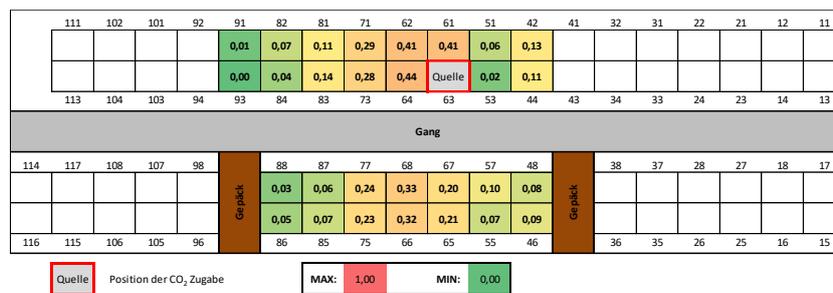


Abbildung 3: Normierte Konzentration des Tracergases im Versuchsfahrzeug. Messung mit Mund-Nase-Bedeckung. Die Messwerte wurden mit dem Maximalwert an der Quelle normiert. Ein Messwert von 0 entspricht der Hintergrundkonzentration, ein Wert von 1 entspricht dem Messwert an der Quellenposition des Basisfalls ohne MNB.

Frischlufzufuhr

Standardmäßig haben Fernverkehrsfahrzeuge eine hohe Luftwechselrate. Das bedeutet, dass das Volumen der einströmenden Luft im Verhältnis zum Volumen des Fahrgastraums relativ hoch ist. In einem ICE wird die Luft nominell alle sieben Minuten ausgetauscht. In dem Versuchswagen wurde nun der Anteil der Frischluft an der in den Fahrgastraum strömenden Luft von 50 Prozent auf 60 Prozent erhöht. Die Zuluftmenge blieb dabei unverändert.

Im Ergebnis bestand in den durchgeführten Untersuchungen im Versuchswagen bei den Nachbarsitzplätzen der Quelle der gleichen Sitzreihe kein signifikanter Einfluss auf die Konzentrationen des Tracergases.

Weitere Ergebnisse der Tracergasmessungen

Des Weiteren kann Folgendes aus den Tracergasmessungen für die durchgeführten Untersuchungen im Versuchsfahrzeug abgeleitet werden:

- Heizen und Lüften hat eine vernachlässigbare Auswirkung auf die Aerosolverteilung gegenüber dem Basisfall (Kühlen).

- Eine Positionierung der Quelle auf verschiedene/unterschiedliche Sitzplätze oder einen Stehplatz im Gang hat auf alle anderen Sitzplätze keinen oder nur einen kaum messbaren Einfluss im Gegensatz zum Basisfall.

Messungen der Partikelausbreitung

Ergänzend zu den Tracergasmessungen wurden LDA-PDA-Messungen durchgeführt, um die Ausbreitung und Verteilung von Aerosolen, bestehend aus künstlichem Speichel, zu untersuchen. Im Unterschied zum Tracergas wurden dabei konkrete Partikel in die Luft eingebracht, die einen Impuls besitzen, an Oberflächen haften bzw. real verdampfen können.

Bei den Messungen wurden Partikel verschiedener Größen mit einem Partikelgenerator und mit einem typischen Ausatmungsimpuls an einem Sitzplatz eingebracht. Die Partikel breiteten sich im Fahrgastraum aus, währenddessen wurde die Häufigkeits- und Größenverteilung der Partikel an einer Messposition (= Sitzplatz eines anderen Fahrgasts) gemessen.

Es zeigte sich in allen untersuchten Fällen, dass an dem am höchsten belasteten Platz ohne Mund-Nase-Bedeckung 0,2% der ausgeatmeten Partikel ankommen.¹ Dieser Platz lag direkt gegenüber des Partikelgenerators (Vierer-Sitzgruppe mit Tisch, rund ein Meter Abstand). An allen anderen gemessenen Sitzplätzen waren die Werte deutlich niedriger. (Abbildung 4)

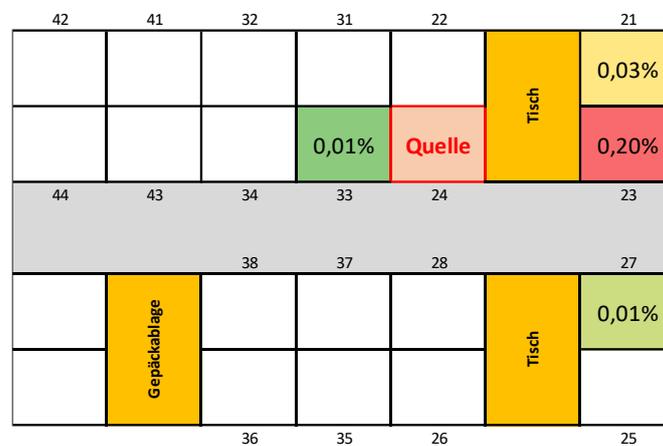


Abbildung 4: Verteilung der gemessenen Partikelströme normiert auf einen atmenden Menschen als Partikelquelle im Basisfall: Atemfläche (Mund): 120mm²; Partikel/min: 6563.

Aus den LDA-PDA-Messungen im Versuchsfahrzeug kann für den Basisfall abgeleitet werden:

- An den Sitzplätzen hinter der Quelle wird die geringste Partikelmenge gemessen.
- Ein der Quelle gegenüberstehender Fahrgast ist mit Abstand am stärksten belastet.
- Die Rückenlehnen der Sitze stellen eine Barriere gegen die Partikelausbreitung dar und verursachen eine Umlenkung Richtung Gang bzw. auf die andere Seite des Fahrgastraums. Es können komplexe Verteilungswege entstehen, wodurch auch Sitzplätze hinter der Quelle belastet werden können.
- Ein Großteil der Partikel verbleibt auf der Gangseite der Quelle.

Außerdem zeigte sich:

- Der durch die thermische Konvektion beim Heizen veränderte Strömungsweg bewirkt eine stärkere Durchmischung. Partikelhemmende Hindernisse werden leichter umströmt.
- Zusätzliche Zufuhr von Frischluft ist ähnlich dem Basisfall mit stärkerer Belastung des Sitzplatzes diagonal gegenüber der Quelle verbunden.

Unterschiede in den Ergebnissen zwischen Tracergasmessungen und Untersuchungen mit dem LDA-PDA resultieren aus dem größeren Impuls der aus dem Partikelgenerator emittierten Partikelverteilung, in

¹ Der direkte Einfluss einer MNB wurde nicht gemessen. Nach aktueller Einschätzung senkt eine MNB die Partikelaufnahme um den Faktor zwei. (siehe <https://www.mpic.de/4747361/risk-calculator>)

der auch größere Partikel enthalten sind, sowie der unterschiedlichen Geometrie der Einbringung. Während das Tracergas aus der Nase eines modellierten Gesichts ausgetragen wurde, stößt der Partikelgenerator die Partikel aber horizontal aus, was eher einer Mundatmung entspricht.

Abklingverhalten

Mit dem LDA-PDA-Messsystem wurden zudem Abklingkurven der Partikelverteilung nach Ausschalten der Quelle aufgenommen und analysiert. Zusammenfassend zeigte sich:

- Nach Deaktivierung des Partikelgenerators fiel die Partikelzahl bereits nach nur 1-2 Minuten auf weniger als 25% des Ausgangswerts, was unabhängig vom Sitzplatz zu sein scheint.
- Nach 5 Minuten sind in allen Fällen (fast) keine Partikel mehr nachweisbar, d.h. 5 Minuten nachdem ein Infizierter den Fahrgastraum verlässt, werden dort keine Aerosole mehr gemessen.

2.3 Weitere Ergebnisse

Abscheideverhalten des Klimasystems

Zur Untersuchung des Abscheideverhaltens des Klimasystems und der Auswirkung verschiedener Filterklassen (G4, M5) wurden Untersuchungen mit einer optischen Partikeldetektion bestehend aus einem PIV-System (gepulster Laser und hoch-sensitive Kamera) durchgeführt.

Dazu wurden Partikel an zwei verschiedenen Positionen in das Umluftsystem eingebracht und anschließend die am Lufteinlass austretenden Partikel gemessen und analysiert. Es fanden Messungen ohne Filter statt sowie mit einem im Gebrauch befindlichen G4-Filter, mit einem neuen G4-Filter und mit einem neuen M5-Filter.

Für die durchgeführten Untersuchungen konnte abgeleitet werden:

- Für Außentemperaturen von 28°C (Kühlen) lieferte der in Gebrauch befindliche G4-Filter die stärkste Abscheidung; die anderen zwei Filter bzw. die Messung ohne Filter zeigten ein ähnliches Abscheidevermögen.
- Für Außentemperaturen von 10°C (Lüften) und von -10°C (Heizen) zeigte der Betrieb mit und ohne Filter jeweils ein ähnliches Abscheidevermögen.
- Als generelle Tendenz ist festzuhalten, dass für reduzierte Außentemperaturen das Abscheidevermögen signifikant steigt. Vermutlich verdampfen bei eingeschalteter Heizung Tröpfchen und Aerosole zusätzlich zum Anhaften im Klimasystem, was zu einer weiteren Reduzierung der Konzentration führen kann.
- Halbwertszeiten nach Ende der Partikelzufuhr quantifizieren das Abscheideverhalten des Klimasystems. Die Halbwertszeiten liegen bei den Untersuchungen mit verschiedenen Filtern, Partikelquellenpositionen und Betriebszuständen der Klimaanlage zwischen 2,6 bis 5,6 Minuten. Dann befindet sich nur noch die Hälfte der Partikel in der Luft.

Ergänzt wurden die Abscheideuntersuchungen mit dem PIV-System durch LDA-PDA-Messungen. Es wurden verschiedene Filterklassen (G4, M5) und Klimazustände (Kühlen, Heizen, Lüften) untersucht. Mit dem LDA-PDA konnten zudem die Partikelgrößen analysiert werden.

Die Interpretation der Ergebnisse basiert auf einer sehr niedrigen Partikelzahl im Messvolumen, die im Fahrgastraum unter der Decke im Luftstrom gemessen wurde. Die vorliegenden Daten lassen keine Empfehlung bezüglich eines Filtertyps zu.

Bei den durchgeführten Untersuchungen zeigte sich, dass die mittlere Größe der Partikel, die aus dem Klimasystem herauskamen, zwischen 0,66 bis 1,54 μm lag. Die Partikel, die aus der Quelle kamen, hatten einen mittleren Durchmesser von 2,80 bis 3,60 μm . Das Klimasystem filtert größere Partikel besser als kleine bzw. die Partikel schrumpfen bzw. verdampfen auf dem Weg durch das Klimasystem.

Untersuchungen mit CFD

Es wurden numerische Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulationen des drei-dimensionalen Strömungsfelds in einem Segment des DIRK durchgeführt. Diese ermöglichten weitergehende Erkenntnisse zur zeitlichen und räumlichen Partikelverteilung im Fahrgastraum.

Es wurden Situationen im Sommer und Winter simuliert und die Aerosolausbreitung für zwei Minuten nach einem Hustenereignis berechnet (siehe Abbildung 5). Zudem wurde die Aerosolausbreitung sowohl für Atmen mit MNB (siehe Abbildung 6) und ohne MNB als auch für Reden für eine Dauer von zwölf Sekunden berechnet.

Abbildung 5 zeigt deutlich, dass beim Husten ohne MNB eine große Menge an Partikeln freigegeben werden und in die Atembereiche der anderen Fahrgäste gelangen. Im Gegensatz dazu ist beim Atmen mit MNB (Abbildung 6) zu erkennen, dass die freigesetzten Partikel eine sehr begrenzte Reichweite haben.

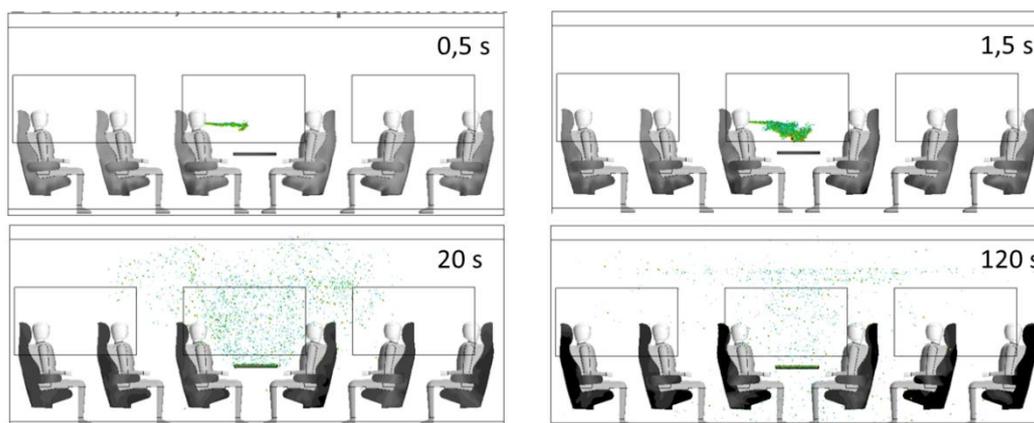


Abbildung 5: Simulierte Partikelverteilung nach Hustenereignis ohne MNB.

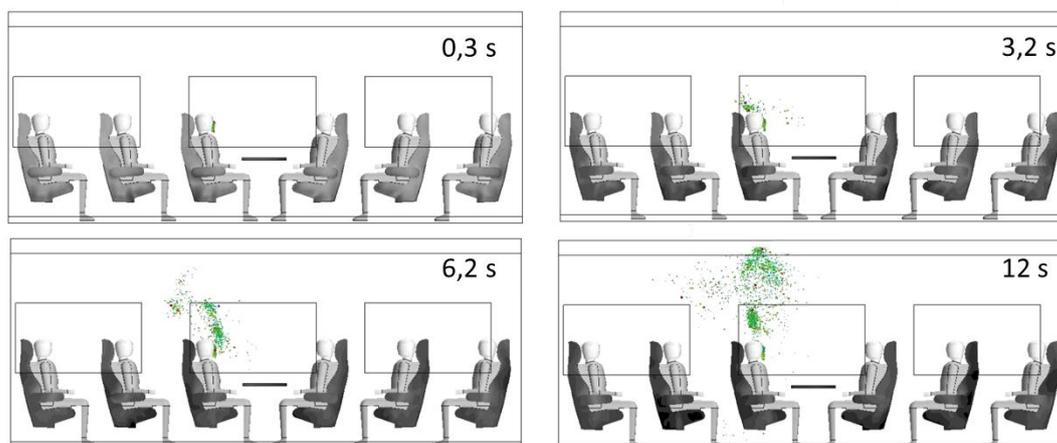


Abbildung 6: Simulierte Partikelverteilung beim Atmen mit MNB.

Die gesamte Aerosolausbreitung hängt eng mit der Luftbewegung im Fahrzeug zusammen. Die Ergebnisse können bei unterschiedlichem Atem- und Redeverhalten (tiefere Atemzüge oder lautes Sprechen) anders aussehen.

2.4 Gültigkeit der Ergebnisse

Zur Übertragbarkeit der Versuchs- und Simulationsergebnisse im stationären Versuchsträger DIRK wurden relevante Einflussgrößen auf die Aerosolausbreitung bestimmt. Auf dieser Grundlage wurden Merkmale der Flotte ermittelt, die die Aerosolausbreitung im Fahrgastraum beeinflussen.

Dadurch war es möglich, Untersuchungsszenarien zu identifizieren, deren Ergebnisse nicht nur auf diesen Wagentyp, sondern auch auf andere Fahrzeuge der DB-Flotte übertragbar sind. Die Ergebnisse sind in die Simulations- und Prüfspezifikation der Versuche eingeflossen.

Für die Übertragbarkeit der Ergebnisse wurde die Repräsentativität des Versuchswagens DIRK in Bezug auf die DB-Flotte hinsichtlich des Klimakonzepts untersucht. Die meisten Fahrzeuge stimmen hinsichtlich des Klimakonzepts gut mit dem Versuchsfahrzeug überein. So wird fast immer von der Decke aus gekühlt; auch wird in allen Fahrzeugen ein normkonformer Frischluftanteil zugeführt. Die ICE1- und ICE2-Flotte sind nahezu oder vollkommen identisch mit dem Versuchsfahrzeug.

3 Fazit

Die Untersuchung der Verteilung und Verbreitung von Partikeln hat gezeigt, dass der indirekte Weg von Tröpfchen und Aerosolen zum Fahrgast durch die Klimaanlage in einem Schienenfahrzeug faktisch keine Rolle spielt: Die Anzahl der Teilchen, die durch die Klimaanlage angesaugt und zu einem Fahrgast wieder verteilt werden, ist wesentlich kleiner als die Anzahl der Partikel, die auf direktem Weg im Fahrgastraum zu einem Fahrgast übertragen werden. Aus den Ergebnissen leitet sich keine Notwendigkeit ab, Maßnahmen mit Bezug auf die Klimaanlage umzusetzen.

Eine Mund-Nase-Bedeckung (MNB) begrenzt den direkten Weg der Partikel ausbreitung und reduziert die Konzentrationsspitzen von Aerosolen und Tröpfchen in unmittelbarer Nähe der Quelle. Sie wirkt sich positiv auf die Aerosolverteilung und -belastung im nahen Umfeld einer Person aus. In den Untersuchungen zeigte sich, dass die Ausbreitung von Aerosolen nur über wenige Sitzreihen hinweg erfolgt. Das Tragen einer MNB wird daher weiterhin dringend empfohlen.

In den durchgeführten Messungen (ohne MNB) betrug der maximale Anteil an Tröpfchen und Aerosolen, die von einem Fahrgast beim Atmen abgegeben und von einem anderen Fahrgast eingeatmet werden, 0,2 Prozent. Auf weiteren Sitzplätzen, an denen Messungen durchgeführt wurden, und bei anderen Messkonfigurationen ist dieser Wert geringer. Durch das Tragen einer MNB wird dieser Wert nochmals verringert. Die Ergebnisse können als Input für eine nachgelagerte virologische/medizinische Bewertung genutzt werden, die nicht Aufgabe des Projekts war.

Hinsichtlich der Bewertung des Einflusses der Aerosole wirken sich die vergleichsweise hohen Frischluft-raten im Schienenfahrzeuginnenraum positiv aus. Eine weitere Erhöhung des Frischluftanteils über die üblichen Luftmengen hinaus scheint im untersuchten Bereich jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Verringerung der Partikellast zu haben.

Gleiches gilt für den Einsatz höherwertiger Filter der Klasse M5 im Vergleich zu der üblicherweise eingesetzten Filterklasse G4.

Ein positiver Beitrag geöffneter Türen zur Reduzierung der Aerosole im Fahrgastraum durch die erwartete zusätzliche Frischluftzufuhr konnte beim Versuchsfahrzeug nicht festgestellt werden. Dabei handelte es sich allerdings um einen Fernverkehrswagen. Für Nahverkehrsfahrzeuge mit einer anderen Zahl, Größe und Anordnung der Türen werden andere Ergebnisse erwartet.

Für den Heizungsbetrieb zeigten die im Versuchswagen erzielten Messungen ähnliche Ergebnisse wie im Basisfall (Kühlbetrieb). Die Tracergasmessungen zeigten, dass keine wesentlichen Unterschiede bei der Verbreitung der Aerosole über mehrere Sitzreihen hinweg festzustellen waren. Die Abscheideraten im Klimasystem stiegen beim Heizbetrieb gegenüber dem Kühlbetrieb an. Bei eingeschalteter Heizung traten am Ende weniger Partikel aus.

Die Messungen zeigten zudem, dass fünf Minuten nachdem der Infizierte den Fahrgastraum verlassen hat, nahezu keine Partikel mehr nachweisbar waren. Die am Versuchswagen DIRK vorgenommenen spezifischen Untersuchungen sind auf die ICE1/2-Flotte sehr gut und auf viele andere Schienenfahrzeuge gut übertragbar. Die Übertragung der Erkenntnisse auf nicht untersuchte Fahrzeuge oder Einflüsse wäre z.B. mittels CFD oder weiterer Messungen denkbar.

Mit den durchgeführten Untersuchungen (theoretische, versuchstechnische und numerische) wurden die Grundlagen für die Bewertung und Klärung weiterer Fragen zur Thematik „Ausbreitung von Viren in Fahrgasträumen von Schienenfahrzeugen“ gelegt.

Anhang 1

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht zu häufig verwendeten Abkürzungen.

Tabelle 1 Übersicht häufig verwendeter Abkürzungen

CFD	Computational Fluid Dynamics
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DB ST	DB Systemtechnik GmbH
DIRK	Demonstrator für Innovationen im Reisendenkomfort und Klimatisierung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
LDA	Laser-Doppler-Anemometrie
LUQAS	Luftqualität in Schienenfahrzeugen
MNB	Mund-Nase Bedeckung
PDA	Phasen-Doppler-Anemometrie
PIV	Particle Image Velocimetry

Anhang 2

Die folgenden Fotos zeigen Impressionen der Messungen und Simulationen im DIRK:



DIRK: Außenansicht



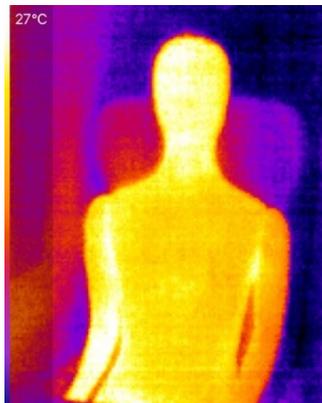
DIRK: Außenansicht



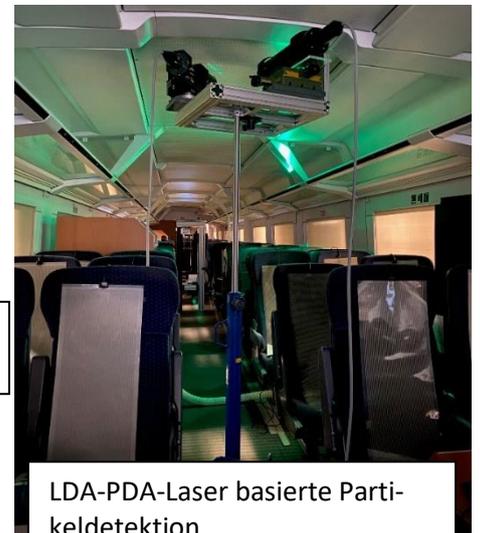
Laser-Rauch-Visualisierungen



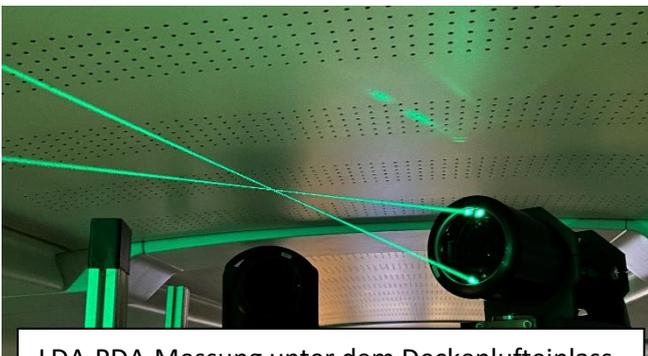
Gesichtsmimik zur Einbringung des Spurengases



Thermografie eines beheizten thermischen Menschmodells



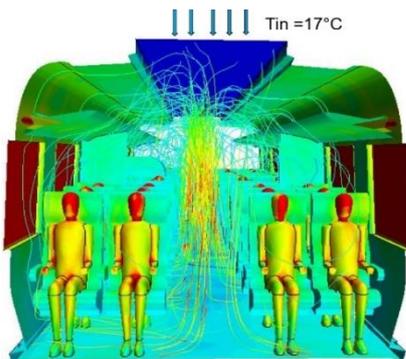
LDA-PDA-Laser basierte Partikeldetektion



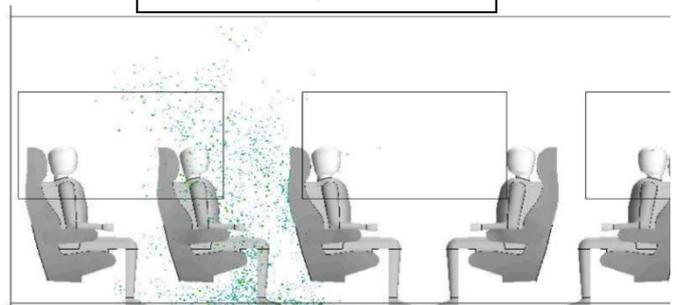
LDA-PDA-Messung unter dem Deckenlufteinlass



Aerosol-Generator für künstlichen Speichel



CFD: Geometrie und Strömungsfeld (Kühlbetrieb)



CFD: Aerosoltröpfchen nach dem Husten (ohne MNB)