

Deutsches Zentrum für  
Schienenverkehrsforschung beim



Eisenbahn-Bundesamt

Berichte  
des Deutschen Zentrums  
für Schienenverkehrsforschung

Bericht 12 (2021)

# Risikoeinschätzung zur Ansteckungsgefahr mit COVID-19 im Schienenpersonen- sowie im Straßenpersonennah- und -fernverkehr

Kurzbericht





Berichte des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung  
Berricht 12 (2021)  
Projektnummer 2020-33-S-1202

# Risikoeinschätzung zur Ansteckungsgefahr mit COVID-19 im Schienenpersonen- sowie im Straßenpersonennah- und -fernverkehr

Kurzbericht

von

Harald Will, Sebastian Stratbücker, Victor Norrefeldt, Andreas Reith  
Abteilung Energieeffizienz und Raumklima / Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart/Holzkirchen

Christian Scherer  
Abteilung Umwelt, Hygiene und Sensorik / Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart/Holzkirchen

# Impressum

## HERAUSGEBER

Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt

August-Bebel-Straße 10  
01219 Dresden

[www.dzsf.bund.de](http://www.dzsf.bund.de)

## DURCHFÜHRUNG DER STUDIE

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart  
Fraunhoferstraße 10  
83626 Valley

## AUTOREN

Harald Will, Christian Scherer, Sebastian Stratbücker, Victor Norrefeldt, Christina Matheis, Andreas Reith, Christoph Schwitalla, Jan de Boer, Daniel Neves Pimenta, Maria Zaglauer, Marcus Hermes, Kristina Holl, Anna-Christina Seitz-Bisenberger, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Jianwei Gu, Tunga Salthammer, Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut, WKI

Joachim Heinrich, Tianyu Zhao, Britta Herbig, Caroline Quartucci, Dennis Nowak, LMU Klinikum, Institut und Poliklinik für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin

Sabrina Schreiner-Gruber, Lilian Göttig, Technische Universität München, TUM

Martin Schön, Michael Eckhardt, Mattias Jansson, André Stiebritz, Alstom S.A., bis Januar 2021 Bombardier Transportation GmbH (BT)

Tobias Hermann, Frank Templin, Stefan Baumgartner, Ben Noethlichs, IFB Institut für Bahntechnik GmbH

## ABSCHLUSS DER STUDIE

März 2021

## BILDNACHWEIS

Alstom (Bombardier) & FhG IBP / Titellinnenseite

## PUBLIKATION ALS PDF

<https://www.dzsf.bund.de/Forschungsergebnisse/Forschungsberichte>

ISSN 2629-7973

[doi: 10.48755/dzsf.21004.02](https://doi.org/10.48755/dzsf.21004.02)

Dresden, Juni 2021

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

# Vorwort des Herausgebers

Das Deutsche Zentrum für Schienenverkehrsforschung (DZSF) beim Eisenbahn-Bundesamt hat im Herbst 2020 die Studie mit dem Titel „Risikoeinschätzung zur Ansteckungsgefahr mit COVID-19 im Schienenpersonen- sowie im Straßenpersonennah- und -fernverkehr“ im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) vergeben. Auftragnehmer ist die Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. (FhG) mit dem Institut für Bauphysik, welches auch die Projektleitung des Konsortiums übernahm. Das Projekt wurde in Zusammenarbeit mit folgenden Unterauftragnehmern bearbeitet:

1. Fraunhofer-Institut für Holzforschung (Wilhelm-Klauditz-Institut – WKI)
2. Institut für Bahntechnik GmbH (IFB)
3. Technische Universität München – Institut für Virologie & Helmholtz Zentrum München (TUM)
4. LMU Klinikum IPASUM – Institut und Poliklinik für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin (LMU)
5. Alstom S.A. (bis Januar 2021 Bombardier Transportation GmbH - BT)

Der Bearbeitungszeitraum betrug sechs Monate (10/2020 – 04/2021) und spiegelt den in diesem Zeitraum verfügbaren Kenntnisstand wieder. Die lufthygienischen Messungen erfolgten während des zweiten coronabedingten Lockdowns, d. h. sie wurden unter den damit verbundenen Auflagen bzw. Schutzmaßnahmen durchgeführt.

Im Rahmen seiner Veröffentlichungspflicht ist das DZSF als Auftraggeber der Studie Herausgeber des vorliegenden Kurzberichts. Die Fraunhofer-Gesellschaft als Auftragnehmer der Studie übernimmt als Autorin des Kurzberichts die inhaltliche Verantwortung. Der Herausgeber weist darauf hin, dass insbesondere bei den Handlungsempfehlungen im Kapitel 4 des Berichts (u. a. Maskenpause und Verlängerung von Standzeiten) zwingend auch den eisenbahnbetrieblichen Aspekten und der jeweils geltenden Rechtslage zum Coronaschutz Rechnung zu tragen ist.

Wir hoffen, dass die Ergebnisse und Handlungsempfehlungen in der Praxis Anwendung finden. Sie sollen einerseits den Verkehrsunternehmen und Infrastrukturunternehmen als Handreichung dienen, andererseits das Vertrauen der Reisenden in den öffentlichen Personenverkehr in Pandemiezeiten festigen.

Dresden im Juni 2021

Der Herausgeber



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort des Herausgebers</b> .....	<b>5</b>
<b>Kurzbeschreibung</b> .....	<b>9</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>11</b>
<b>1 Einordnung</b> .....	<b>13</b>
<b>2 Literaturrecherche</b> .....	<b>15</b>
<b>3 Modellierung und Risikobewertung</b> .....	<b>18</b>
<b>4 Messkonzept, Feldmessungen und Handlungsempfehlungen</b> .....	<b>22</b>
<b>Quellenverzeichnis</b> .....	<b>26</b>



# Kurzbeschreibung

Die vorliegende Studie beleuchtet das Infektions- und Übertragungsrisiko von SARS-CoV-2 im öffentlichen Personennah- und -fernverkehr (ÖV). Hauptausbreitungswege von SARS-CoV-2 werden identifiziert. In der untersuchten Literatur wird gezeigt, dass es in öffentlichen Verkehrsmitteln zur Übertragung des Virus gekommen ist. Bei eigenen in-situ-Messungen in Deutschland konnten keine SARS-CoV-2-Viren in den untersuchten Verkehrsmitteln, Haltestellen und Bahnhöfen nachgewiesen werden.

Es werden Maßnahmen beschrieben, die geeignet sind, das Ansteckungsrisiko im ÖV zu senken. Dies sind unter anderem das Tragen von Masken, das Abstandhalten sowie bei der Klimatisierung von Fahrzeugen die Erhöhung der Frischluftzufuhr, die Reinigung der Umluft durch Filterung, die Vireninaktivierung und die regelmäßige Reinigung von Oberflächen.

Um die typischen Aufenthaltszeiten im jeweiligen Verkehrsmittel oder am Bahnhof/Bahnsteig zu bestimmen, wurden Fahrtenprofile ermittelt und daraus Szenarien für die mögliche Exposition von Fahrgästen infolge eines mit SARS-CoV-2 infizierten Passagiers entwickelt. Mit diesen Eingangsdaten wurden für die wichtigen Typen öffentlicher Verkehrsmittel sowie beispielhaft für Bahnsteige an ober- und unterirdischen Bahnhöfen raumklimatische Modelle erstellt, welche die Ausbreitung der Emission virushaltiger Aerosolpartikel ausgehend von einem mit SARS-CoV-2 infizierten Verkehrsteilnehmer simulieren. Hierbei wird der Aufenthaltsbereich in der Nähe der infizierten Person von weiter entfernten Aufenthaltsbereichen unterschieden.

Als wirksamste Maßnahmen zur Minimierung der Exposition von Fahrgästen und Personal erweisen sich, belegt durch die Modellierung, das konsequente Tragen einer gut sitzenden FFP2-Maske und der Verzicht auf lautes Sprechen. So ist beim lauten Sprechen die emittierte Aerosolmenge 25- bis 50-fach höher als beim normalen Atmen ohne Sprechen. Die FFP2-Maske filtert im Schnitt 90 % der Keime sowohl beim Ausatmen (Fremdschutz) als auch beim Einatmen (Eigenschutz). Medizinische Masken bzw. Alltagsmasken hingegen reduzieren die Keimanzahl lediglich um 50 % bei der Abgabe und um 30 % bei der Aufnahme [1].

Sofern in Fahrzeugen und Bahnhöfen lediglich medizinische Gesichtsmasken vorgeschrieben sind, können zusätzlich die Erhöhung der Frischluftzufuhr und die Umluftreinigung die Exposition im Fahrzeuginnenraum reduzieren. Die Höhe der Reduktion hängt dabei von der jeweiligen Luftmenge ab. Die Exposition auf Bahnhöfen ist dagegen bei konsequenter Wahrung des Mindestabstandes (>1,5 m) von untergeordneter Rolle.

Um die raumklimatischen Simulationsmodelle zu kalibrieren und zur Bewertung des aktuellen Geschehens wurden im Zeitraum von November 2020 bis Januar 2021 Kohlendioxid-Konzentrationsverläufe gemessen sowie Wisch- und Luftkeimproben an Bahnhöfen und in den untersuchten Verkehrsmitteln genommen. Diese ergaben keine Funde von SARS-CoV-2 und nur geringe Mengen von überall aufzufindenden Humanen Adenoviren (HAdV), was die Effektivität der bereits umgesetzten Maßnahmen – Maskentragen, Verbesserung der persönlichen Hygiene und regelmäßiges Desinfizieren – untermauert.

Die Luftqualität in Innenräumen wird in der Regel durch die Konzentration von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) überwacht. Die bei den Messungen erfassten Kohlendioxid-Konzentrationen in den Fahrzeugen lagen überwiegend unterhalb der von der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden empfohlenen Konzentration von 1.000 ppm [2]. Die Höhe und der Verlauf der Aerosolkonzentration im Inneren der beprobten Verkehrsmittel belegen die Effektivität der Lüftung der beprobten Verkehrsmittel. Die Partikeldynamik war dabei vor allem durch die Bewegung der Fahrgäste getrieben und nicht durch die Atmung.

Des Weiteren wurde sich im Projekt mit der psychologischen Wirkung von Maßnahmen befasst. Es wird beschrieben, wie sich die Umsetzung der beiden Hauptmaßnahmen, das konsequente Tragen von FFP2-Masken in Innenräumen einerseits und die Einhaltung von möglichst großen Abständen beim Zustieg und Abgang andererseits, erfolgreich implementieren lässt.

Zentrale Erkenntnis ist dabei, dass es wesentlich effektiver ist, mit wenigen schlüssigen Handlungsempfehlungen, die Sinn und Zweck der Maßnahmen gut erläutern, die Einsicht und Motivation der Fahrgäste zu fördern, anstatt lediglich Ge- und Verbote zu erlassen.

# Abstract

This study highlights the risk of infection and transmission of SARS-CoV-2 in local and long-distance public transport. Main routes of spread of SARS-CoV-2 are identified. Literature shows that transmission of the virus has occurred in public transport. Own in-site measurements conducted in German public transportation means, stops and stations did not confirm the presence of the SARS-CoV-2 virus during these occasions.

Mitigation measures suitable for reducing the risk of infection in public transport are evaluated, such as wearing of face masks, keeping distance, increasing the supply of fresh air and cleaning of recirculating air by filtering or virus inactivation and regular cleaning of surfaces.

Typical route profiles as well as times of stay in the public transportation means and at stations are determined and scenarios are derived to evaluate the possible exposition of passengers due to a SARS-CoV-2 infected passenger. With these input data, indoor climate models are created for the most important means of public transport and for exemplary stations, which simulate the spread of the virus containing aerosols emitted by a passenger infected with SARS-CoV-2. The area near the infected person is distinguished from more distant occupied areas.

Simulations show that consistent wearing of a well-fitting FFP2 (N95) mask and refraining from loud talking are the most effective measures for minimizing passenger and staff exposure. Loud speaking leads to a 25 to 50 times higher emission than breathing. FFP2 (N95) masks filter in average 90 % of the virus load both during exhalation and inhalation and thus are a suited mean for one's own and others' protection. Surgical or community masks only reduce the emitted viral load by 50 % and the inhaled quantity by 30 % [1]. In a situation where only surgical masks are mandatory, increasing the supply of fresh air and purification of recirculating air reduces the exposure inside the vehicle. The magnitude of this reduction depends on the respective flow rates of clean air. Exposure at stations is of secondary importance if the minimum distance (1.5 m) is consistently maintained.

To validate the simulations and assess the current situation, Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) concentration profiles were measured in the period from November 2020 to January 2021, and wipe and airborne germ sam-ples were taken at train stations and in the means of transport investigated. These revealed no findings of SARS-CoV-2 and only low levels of human adenovirus (HAdV), which can be found everywhere, underpinning the effectiveness of the measures already implemented – wearing masks, improving per-sonal hygiene and regular disinfection.

CO<sub>2</sub> is a commonly used marker for indoor air quality. CO<sub>2</sub> measurements were predominantly below the concentration threshold of 1,000 ppm recommended by the Ad-hoc Working Group on Indoor Guideline Values of the Indoor Air Hygiene Commission of the German Federal Environment Agency and the Supreme Federal State's Health Authorities [2]. Measurements of aerosols were performed inside transport means with high temporal resolution (1s) and proved the effective reduction of particles of relevant size for airborne SARS-CoV-2 transmission. The particle dynamics were mainly driven by the movement of the passengers and not by breathing.

Furthermore, it is depicted how the main measures to reduce the risk of SARS-CoV-2 transmission in public transport, wearing FFP2 masks and keeping distance, can be successfully implemented from a psychological point of view. Here, it proves to be most effective to enhance the understanding and motivation of passengers by well explained and coherent guidance rather than to only rely on the incentive to avoid punishment in case of non-conformity.



# 1 Einordnung

Das Deutsche Zentrum für Schienenverkehrsforschung (DZSF) beim Eisenbahn-Bundesamt hat im Oktober 2020 die Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. vor dem Hintergrund der globalen Corona-Pandemie beauftragt, die vorliegende Studie „Risikoeinschätzung zur Ansteckungsgefahr mit COVID-19 im Schienenpersonen- sowie im Straßenpersonennah- und -fernverkehr“ zu erstellen.

Wichtiger Teil der vom deutschen Gesetzgeber verfügbaren Maßnahmen zur Pandemiekontrolle ist die Reduktion von Kontakten. Dazu wurde auch die Mobilität der Bevölkerung stark reduziert. In der Folge des verfügbaren Lockdowns nahm die Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel sehr stark ab.

Die risikoadäquate vermehrte Nutzung des ÖV und damit einhergehend eine Steigerung/ Normalisierung der Fahrgastzahlen im ÖV kann nur gelingen, wenn die Fahrgäste Vertrauen in den hygienisch sicheren Betrieb haben. Einen wichtigen Beitrag für die sichere Nutzung der Verkehrsmittel des öffentlichen Schienen- und Straßenpersonenverkehrs liefert die Identifizierung und Bewertung der möglichen Ausbreitungsmechanismen von SARS-CoV-2 und ihres spezifischen Gefahrenpotentials.

Ziel dieser Studie ist es, der Öffentlichkeit und den politischen Entscheidern eine fundierte Einschätzung zum Ansteckungs- und Ausbreitungsrisiko im ÖV zu ermöglichen, welche anhand repräsentativ ausgewählter Expositionsszenarien ausgearbeitet wird. Dazu werden die situations- und verhaltensabhängigen Infektionsrisiken beurteilt und zielführende Maßnahmen zu deren Reduktion abgeleitet. Im Fokus stehen dabei die Aufnahme und Verbreitung von Viren durch die Luft sowie über Oberflächenkontakte. Der Untersuchungsrahmen umfasst ein breites Spektrum an möglichen Expositionsorten im ÖV: den Schienenpersonennahverkehr mit verschiedenen Fahrzeugtypen, den Schienenpersonenfernverkehr mit der ICE-Flotte, den Straßenpersonennahverkehr mit Stadtbussen sowie den Straßenpersonenfernverkehr mit Fernbussen und eine begrenzte Anzahl typischer Bahnhöfe bzw. Haltestellen und Bahnsteige.

Um die Zielsetzung während der anhaltenden Pandemie erfüllen zu können, wurden die Untersuchungen der Fraunhofer-Gesellschaft unter Federführung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP von einem interdisziplinär aufgestellten Team aus Wissenschaft und Wirtschaft durchgeführt und inhaltlich in drei Arbeitspakete gegliedert, die sich in der Struktur dieses Kurzberichts wiederfinden:

Kapitel 2: Literaturrecherche (AP 1)

Kapitel 3: Modellierung und Risikobewertung (AP 2)

Kapitel 4: Messkonzept, Feldmessungen und Handlungsempfehlungen (AP 3)

Im ersten Teil des Berichts werden mittels einer breit durchgeführten internationalen Literaturrecherche die verfügbaren Informationen zu möglichen Verbreitungsquellen/-medien und Einflussgrößen einer Ansteckung im ÖV ermittelt und einer ersten Risikoeinstufung unterzogen. Ergänzend werden Daten- bzw. Informationslücken identifiziert und weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt.

Im zweiten Teil werden exemplarische Szenarien für eine Ausbreitung von SARS-CoV-2 im ÖV modelliert und die maßgeblichen Einflussfaktoren identifiziert. Auf der Grundlage von Simulationen und Szenarien wird eine vergleichende Gefahren- und Risikoeinstufung durchgeführt.

Der dritte Teil umfasst die Entwicklung und Ableitung von Minderungs- bzw. Schutzmaßnahmen sowie die Beschreibung eines Messkonzepts mit im realen Betrieb in unterschiedlichen Verkehrsmitteln durchgeführten orientierenden Messungen von mikrobiologischen und physikalischen Parametern, die der Validierung und Kalibrierung der modellierten Szenarien dienen.

Die Ergebnisse aller drei Arbeitspakete bilden das Fundament zur Ausarbeitung von kurz- und mittelfristigen Handlungsempfehlungen für den öffentlichen Nah- und Fernverkehr. Diese dienen der Entwicklung valider Präventions- und Schutzmaßnahmen sowie der Optimierung von betrieblichen, technischen und organisatorischen Abläufen.

Durch die Studienergebnisse können Maßnahmen identifiziert und abgeleitet werden, um die hygienische Sicherheit im ÖV zu optimieren.

## 2 Literaturrecherche

Durch eine umfangreiche internationale Literatur- und Datenanalyse wurde das bestehende Wissen zu den pandemiespezifischen Risiken im öffentlichen Nah- und Fernverkehr ermittelt. Dazu wurden die relevanten, bis Ende 2020 veröffentlichten Studien mit Bezug zu den Forschungsfragen ausgewertet und themenspezifisch gruppiert.

Für eine Risikoeinschätzung in Bezug auf die COVID-19-Pandemie galt es zu klären, wo Ansteckungs- und Ausbreitungsgefahren im Schienenpersonen- sowie im Straßenpersonennah- und -fernverkehr bestehen, wie und auf welchen Wegen sich SARS-CoV-2 verbreiten kann und welche Einflussfaktoren hierbei eine Rolle spielen.

Basierend auf den erhobenen Daten und der Auswertung der Literatur erfolgt eine erste Gefahreneinstufung sowie eine Ableitung möglicher und vereinzelt bereits umgesetzter technischer und betrieblicher Schutzmaßnahmen. Zusätzlich werden statistische Daten wie Fahrgastaufkommen, Streckenprofile und Fahrzeugauslastungsgrade im öffentlichen Verkehr betrachtet. Die Recherche umfasst auch Studien zum Verhalten einer großen Anzahl von Reisenden sowie zur Lenkung großer Menschenströme an Bahnhöfen (Crowd Management). Flankierend zur Bestimmung von Schutzmaßnahmen, welche das Infektionsrisiko für Fahrgäste minimieren sollen, werden existierende Normen und Regelwerke ausgewertet, damit diese bei den abschließenden Empfehlungen für Maßnahmen im ÖV Berücksichtigung finden können.

Grundsätzlich gilt für alle Bereiche des ÖV die Annahme, dass die Übertragung von SARS-CoV-2 auf drei Wegen stattfindet:

- **direkt**, im engen Kontakt mit einer infektiösen Person;
- **indirekt** (Schmierinfektion), indem virusbelastete Tröpfchen von einer infektiösen Person abgegeben werden und sich zunächst in der näheren Umgebung auf Oberflächen absetzen, von wo Viruspartikel von Dritten aufgenommen werden;
- durch **aerosolisierte** Virenpartikel, die sich über die Luft übertragen. Diese, sich durch die Exhalation einer infektiösen Person in Innenräumen bildenden Bio-Aerosole können über längere Zeit in der Luft schweben und auf diese Weise größere Distanzen überwinden und so auch weiter entfernt andere Personen anstecken.

Das infektiöse Potential der Virenpartikel hängt in allen drei genannten Fällen von einer Reihe von äußeren Bedingungen ab. Unter Laborbedingungen können SARS-CoV-2-Viren bis zu 16 Stunden in Aerosolen [3], 9 Stunden auf der Haut [4] und 28 Tage [5] auf alltagsähnlichen Oberflächen infektiös bleiben. Bei entsprechend für Viren günstigen Raumtemperaturen und Luftfeuchten kann SARS-CoV-2 auch in öffentlichen Bereichen über viele Stunden auf Oberflächen und in der Luft, in Aerosolen gebunden, infektiös bleiben. Nach Auswertung einer Vielzahl aktueller Studien lässt sich feststellen, dass es auch für SARS-CoV-2 bestimmte Raumluftbedingungen gibt, bei denen die Übertragungsraten reduziert sind. Dies sind zum einen Lufttemperaturen oberhalb von 22 °C, zum anderen sollte die relative Luftfeuchte von 40 % möglichst nicht unterschritten werden, da bei niedriger Raumluftfeuchte wiederum die Anfälligkeit für virale Atemwegsinfektionen beim Menschen erhöht ist.

Weiterhin gibt es Hinweise auf die natürliche Inaktivierung von SARS-CoV-2 durch Sonnenlicht, jedoch ist der Effekt durch die UV-Sperrung der Verglasung in Innenräumen stark herabgesetzt, weshalb in diesen Bereichen zusätzliche Hygienemaßnahmen umgesetzt werden sollten, wie z. B. die Reinigung von Oberflächen und ausreichende Raumlüftung.

Die Inaktivierung von Viren, die sich auf Oberflächen abgelagert haben, ist eine wichtige Hygienemaßnahme. Die Reinigung der Flächen kann sowohl mit chemischen Mitteln erfolgen als auch mit UV-C-Strahlung. Generell ist die Methode mittels UV-Strahlung chemikalienfrei. Da die UV-Strahlung für den Menschen jedoch schädlich ist, sind entsprechend zusätzliche Schutzmaßnahmen vorzusehen. UV-Inaktivierung lässt sich prinzipiell betriebssicher und wirkungsvoll in raumlufttechnische Systeme im ÖV integrieren. Bestehende Klima- und Lüftungsanlagen könnten zu diesem Zweck nachgerüstet werden. Bezüglich der UV-Desinfektion von Oberflächen ist ein differenzierteres Bild zu zeichnen: Die Reinigung von Sitzbereichen kann nur in leeren Zügen oder Bussen erfolgen und ist aktuell noch sehr aufwendig, da die Reinigungsprozeduren unter hohem personellem Aufwand mit entsprechenden Schutzausrüstungen erfolgen müssen. Jedoch könnten kompakte UV-LED-Lösungen beispielsweise für die automatisierte Bestrahlung von Bedien- und Tastenfeldern, Griffen und Bedienknöpfen eingesetzt werden, um insbesondere sehr häufig berührte Oberflächen zu desinfizieren. Ein Stichwort für künftige Konzepte ist hier das »Hygienic Design« für Strukturen und Oberflächen.

Die allgemeine Lüftungsempfehlung zur Reduzierung von SARS-CoV-2-Infektionsrisiken lautet, die Rezirkulation der Raumluft zu vermeiden, d. h. Anlagen möglichst nicht im Umluftbetrieb zu fahren und den Frischluftanteil nach Möglichkeit zu erhöhen. Die meisten Umluftsysteme sind zwar mit Luftfiltern ausgestattet, diese sind aber in der Regel gegen Viren nicht ausreichend wirksam. Moderne, an Pandemiekriterien angepasste Luftreinigungsgeräte sind dagegen in der Lage, im Umluftbetrieb die Konzentration an infektiösen Aerosolen in Räumen durch Filterung bzw. Deaktivierung der Partikel zu reduzieren. Schwebstofffilter (z. B. HEPA-Filter) können ebenfalls Aerosole wirksam zurückhalten, die potentiell infektiöses SARS-CoV-2 mitführen. Die derzeitigen Systeme in Fahrzeugen des ÖV sind jedoch nicht dafür ausgelegt, mit diesen Filtern zu arbeiten, da sie aufgrund des erhöhten Druckverlustes den notwendigen Luftstrom nicht erzeugen können. Eine Aufrüstung der Belüftungssysteme zum Einsatz von HEPA-Filtern würde nicht nur eine technische Umrüstung bedeuten, sondern diese Maßnahme würde sich auch auf den Komfort der ÖV-Nutzer auswirken (erhöhter Lärmpegel, verändertes Raumklima, reduzierte Luftmengen).

Die ausgewerteten Literaturstellen zeigen, dass während der COVID-19-Pandemie eine potentielle Übertragung durch aerosolgebundene Viren im asiatischen Raum auch im ÖV ein Ansteckungsrisiko besteht. In bestimmten Situationen kann eine Übertragung durch aerosolgebundene Viren stattfinden. Wie in allen anderen Bereichen des privaten und öffentlichen Lebens gilt im ÖV die respiratorische Aufnahme von Virenpartikeln als ein Hauptübertragungsweg. Zur Abschätzung des Infektionsrisikos durch den Luftübertragungsweg wäre eine genaue Kenntnis über die Rahmenbedingungen während eines Infektionsfalles im ÖV nötig. Derartige Beobachtungsdaten existieren jedoch zum Abschluss der Literaturanalyse lediglich in begrenzter Anzahl anhand retrospektiver Studien, welche das Ausbruchsgeschehen in chinesischen Fernverkehrszügen und in Reisebussen untersucht haben. Diese Studien geben Hinweise darauf, dass die Dauer der Exposition, die Nähe zu infektiösen Personen in einem geschlossenen Raum sowie die Belüftungssituation Einfluss auf das Infektionsrisiko haben. Über den Gebrauch und die Art von Schutzmasken, die von Passagieren und Begleitern in den Reisemitteln genutzt wurden, kann nur gemutmaßt werden. Jedoch zeigen die Daten ein relativ hohes Ansteckungsrisiko, wenn sich eine infizierte Person im selben Waggon oder Bus befand. Dieses Infektionsrisiko war dabei nicht beschränkt auf jene Mitreisenden, die in unmittelbarer Nähe zu dem infizierten Mitreisenden saßen, sondern es erhöhte sich auch bei Passagieren, die einige Sitzreihen entfernt waren. Diese Datenlage spricht ebenfalls für eine Übertragung durch virenbelastete Aerosole, die sich in der Atemluft anreichern und im Raum verteilen.

Auf Grundlage der ausgewerteten Studien, in denen die Identifikation der Personen und die Nachverfolgung der Infektionsketten möglich war, kann jedoch festgestellt werden, dass Passagiere, die denselben Platz benutzt haben wie ein dort zuvor sitzender nachweislich infektiöser Fahrgast, kein erhöhtes Infektionsrisiko aufweisen. Diese Beobachtung lässt darauf schließen, dass die Übertragung durch keimbelastete Oberflächen zumindest im Zugverkehr einen geringen Beitrag zum Infektionsgeschehen hat. Das

Infektionsrisiko durch kontaminierte Oberflächen sowie in Außenbereichen des ÖV scheint deshalb untergeordnet, ist jedoch nicht auszuschließen. Da der Kontakt mit kontaminierten Oberflächen auch mit dem direkten Kontakt zu infizierten Personen verbunden sein kann, ist die Unterscheidung zur Tröpfcheninfektion schwierig.

Es wird angenommen, dass die Nutzung von öffentlichen Verkehrsmitteln bisher zum gesamten Infektionsgeschehen in Deutschland nur einen geringeren Beitrag lieferte, verglichen mit anderen Infektionsorten wie dem häuslichen Umfeld oder dem Pflegebereich. Jedoch ist das Infektionsgeschehen im ÖV aufgrund der schwierigen Kontaktverfolgung nur unzureichend zu ermitteln, so dass davon ausgegangen werden muss, dass viele Übertragungen im ÖV nicht erfasst werden. Festzustellen ist, dass infektiöse Reisende zur Verbreitung der COVID-19-Infektionen beitragen. Die vorliegenden evidenzbasierten Daten sind allerdings nicht geeignet, das Erkrankungsrisiko aufgrund von Reisen mit Bahn, Bus oder aufgrund der Nutzung des ÖV zu bestimmen.

Wie in anderen Lebensbereichen gelten die folgenden Schutzmaßnahmen auch für den ÖV als geeignet, das Infektionsrisiko zu senken: Das korrekte Tragen von geeigneten Gesichtsmasken (am besten FFP2), Handhygiene, Hust- und Niesetikette, Einhaltung von Abstandsregeln sowie ausreichende Frischluftzufuhr im Inneren von Verkehrsmitteln und geschlossenen Räumen.

Im Rahmen der Literaturstudie wurden auch Wissenslücken und weiterer Informationsbedarf identifiziert. Insbesondere für Deutschland und Europa fehlen belastbare Beobachtungsstudien und systematische Maßnahmenevaluationen. Wichtig wäre eine Quantifizierung des pandemierelevanten Verhaltens im Bereich des öffentlichen Nahverkehrs, Studien zur Verhaltensänderungen im Pandemieverlauf sowie zur Evaluation geeigneter Maßnahmen zur Förderung und dauerhaften Aufrechterhaltung des gewünschten Verhaltens.

Regelkonformes Verhalten sollte umfassend gefördert und die Nutzer des ÖV zur Einhaltung motiviert werden. Da das Tragen von Masken durch fehlerhafte Anwendung auch in den Verkehrsmitteln des ÖV seine Schutzwirkung verliert, sollte eine gezielte und intensivierete Wissensvermittlung zur Maskenanwendung angestrebt werden. Insbesondere in besonders sensiblen, hochfrequentierten Bereichen des ÖV ist die Umsetzung wirksamer Kontrollen ggf. erforderlich.

Die Literaturrecherche zeigt, dass Maßnahmen der ÖV-Betreiber zur Fahrgastlenkung an Stationen insbesondere ein Anbringen von Markierungen zur Unterstützung des Abstandhaltens beinhalten. Nicht zuletzt sollten zur Erfassung und Förderung des Abstandhaltens und der Vermeidung von Menschenansammlungen auch weitere technische Lösungsansätze zum Crowd Management untersucht werden. Erste Lösungen auf Basis lernender Algorithmen zum Echtzeit-Tracking von Reisenden und zur Einhaltung des Abstands existieren bereits vereinzelt im Erprobungsmodus. Aus psychologischer Sicht besteht die Gefahr bei Lenkungsmaßnahmen des Fahrgaststroms, dass aufgrund von Überforderung die Aufmerksamkeit auf diese Lenkung zur Unaufmerksamkeit in anderen Bereichen wie dem Maskentragen führt.

Die Ergebnisse der Literatúrauswertung zeigen, dass es in Bereichen des öffentlichen Verkehrs vor allem dort zu einem potentiell erhöhten Infektionsrisiko kommt, wo ausreichend große Abstände nicht gewährleistet sind und Fahrgäste sich über längere Zeit in geschlossenen Räumen aufhalten. Die Datengrundlagen für den öffentlichen Personenverkehr in Deutschland sind jedoch nicht ausreichend, um eine evidenzbasierte Gefahreinstufung vorzunehmen. Aus diesem Grund fließen die gewonnenen Erkenntnisse, die statistischen Datenerhebungen und eine qualitative Analyse der Risikofaktoren in die Modellierung von repräsentativen Szenarien ein, die in den folgenden Untersuchungen umgesetzt und ausgewertet werden. Diese Szenarien können vergleichend gegenübergestellt werden, um eine relative Risikobewertung vorzunehmen.

### 3 Modellierung und Risikobewertung

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Modellierung und Risikobewertung beschrieben. Hier werden eine Reihe von repräsentativen Szenarien entwickelt und mittels eines Ausbreitungsmodells für aerosolgetragene Viren simuliert. Anhand der Simulation mittels zonaler Strömungsmodelle [6] lassen sich die unterschiedlichen Verkehrsmittel und die dabei spezifisch auftretenden Belüftungssituationen in ausreichendem Detaillierungsgrad hinsichtlich potentieller Gefahrenquellen und Ansteckungsrisiken untersuchen.

Dabei wird ein mit SARS-CoV-2 infizierter Fahrgast jeweils in den betrachteten Verkehrsmitteln Fernverkehrszug, Regionalverkehrszug, S- und U-Bahn, Fernreisebus, Stadtbus, Straßenbahn und am Bahnhof platziert.

Durch die Modellierung werden zum einen unterschiedliche Aktivitäten, die ein infektiöser Fahrgast (Emittent) ausführt – einfaches Atmen, normal lautes Sprechen und lautes Sprechen – und die dadurch verursachten Quellstärken bewertet. Zum anderen werden die getroffenen Schutzmaßnahmen (Maske, Umluftfilterung, Frischluftbetrieb) bewertet. Mittels der Berechnungen können Szenarien ermittelt werden, wo es im Verkehrsmittel oder Bahnhof/Haltestelle zu einer hohen bzw. niedrigen Exposition der mitreisenden Fahrgäste kommt. Mit den Simulationen werden so die Voraussetzungen geschaffen, Risiken relativ zueinander zu quantifizieren sowie Maßnahmen zur Risikoreduktion entsprechend ihrer Wirksamkeit zu bewerten und daraus Handlungsempfehlungen abzuleiten.

Anhand einer Datenerhebung werden relevante Zug-, Bus-, Straßenbahn- und Bahnhofstypen für den Fern-, Regional-, S-Bahn-, U-Bahn- und Stadtverkehr identifiziert und im Simulationsmodell abgebildet. Ferner werden Bahnhöfe und Haltestellen ober- und unterirdisch betrachtet. Die Simulationen beschreiben zum einen die Situation in den öffentlichen Verkehrsmitteln vor bzw. zu Anfang der Pandemie, als noch keine verpflichtenden Masken-, Abstands- oder sonstige Verhaltensempfehlungen ausgesprochen waren. Sie bilden zudem auch mögliche Expositionsumfänge ab, wenn im weiteren Verlauf der Pandemie die Maskenpflicht wieder aufgehoben werden sollte. Die Ergebnisse der Untersuchungen finden sich z. B. in Simulationsfällen wie „Sprechen – ohne Maske“ wieder. Zum anderen wurden Simulationen durchgeführt, welche die Exposition bei der korrekten Verwendung einer medizinischen Maske oder eines Mund-Nasen-Schutzes (MNS) beschreiben. Im Verlauf der Untersuchung wurde die Simulationsstrategie den politischen Entscheidungen folgend um Maßnahmen zur Eindämmung der Pandemie ergänzt, indem z. B. Simulationsfälle mit stärker filternden FFP2-Masken zusätzlich aufgenommen wurden. Die Exposition der anderen Fahrgäste wird dabei in Milli-Quanta, einer fiktiven Dosisgröße [7-9], erfasst. Hierbei ist die Annahme, dass eine höhere Exposition auch mit einem höheren Ansteckungsrisiko einhergeht, wodurch Szenarien vergleichend gegenübergestellt werden können.

Eine Zusammenstellung ausgewählter Simulationsfälle ist in Abbildung 1 für den Fall „Atmen ohne Maske“, in Abbildung 2 für den Fall „Sprechen mit MNS“ und in Abbildung 3 für den Fall „Laut Sprechen mit FFP2-Maske“ dargestellt. In den Abbildungen werden Simulationsfälle mit einer Frischluftmenge entsprechend Herstellerangaben (nach Fahrzeugauslegung) sowie die rückgerechnete Frischluftmenge aus der in situ Kohlendioxid-Messung dargestellt. Ursächlich für die höhere errechnete Exposition bei gemessenen Fällen könnte ein Teillastbetrieb der Lüftung infolge geringerer Belegung sein. In diesem Teillastbetrieb ergibt sich zwar eine rechnerisch höhere Exposition der anderen Fahrgäste, es ist allerdings davon auszugehen, dass die Wahrscheinlichkeit der Anwesenheit eines infizierten Passagiers bei niedriger Belegung ebenfalls geringer ist. Da die Aufenthaltswahrscheinlichkeit für mit SARS CoV-2 infizierte Passagiere, die unwissentlich und unentdeckt in den Verkehrsmitteln mitreisen, nicht ermittelbar und deshalb unbekannt ist, kann keine Aussage dazu getroffen werden.

Die Simulationen zeigen, dass das Ansteckungsrisiko am effizientesten reduziert wird, wenn auf lautes Sprechen verzichtet und eine FFP2-Maske korrekt getragen wird. Diese beiden Maßnahmen zusammen ermöglichen die wirksamste Reduktion der Exposition im öffentlichen Verkehr sowohl im Nahbereich des im Verkehrsmittel sitzenden Infizierten als auch weiter von ihm entfernt. Sofern lediglich das Tragen eines MNS behördlicherseits vorgegeben wird, sind weitere technische Maßnahmen wie eine Umluftfilterung oder eine erhöhte Frischluftzufuhr geeignet, um den Schutz der Fahrgäste zu erhöhen.

Verglichen mit dem Risiko im Inneren der Verkehrsmittel ist die durch die Modellierung ermittelte Virenbelastung auf den Bahnsteigen der untersuchten Bahnhöfe als untergeordnet anzusehen. Insbesondere an oberirdischen Bahnsteigen und unter der Voraussetzung, dass der empfohlene Mindestabstand von 1,5 m sicher eingehalten werden kann, ist das Tragen eines MNS oder einer FFP2-Maske zeitweise verzichtbar. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die aktuelle Rechtslage dies nicht gestattet.

### Simulationsfall "Atmen ohne Maske"

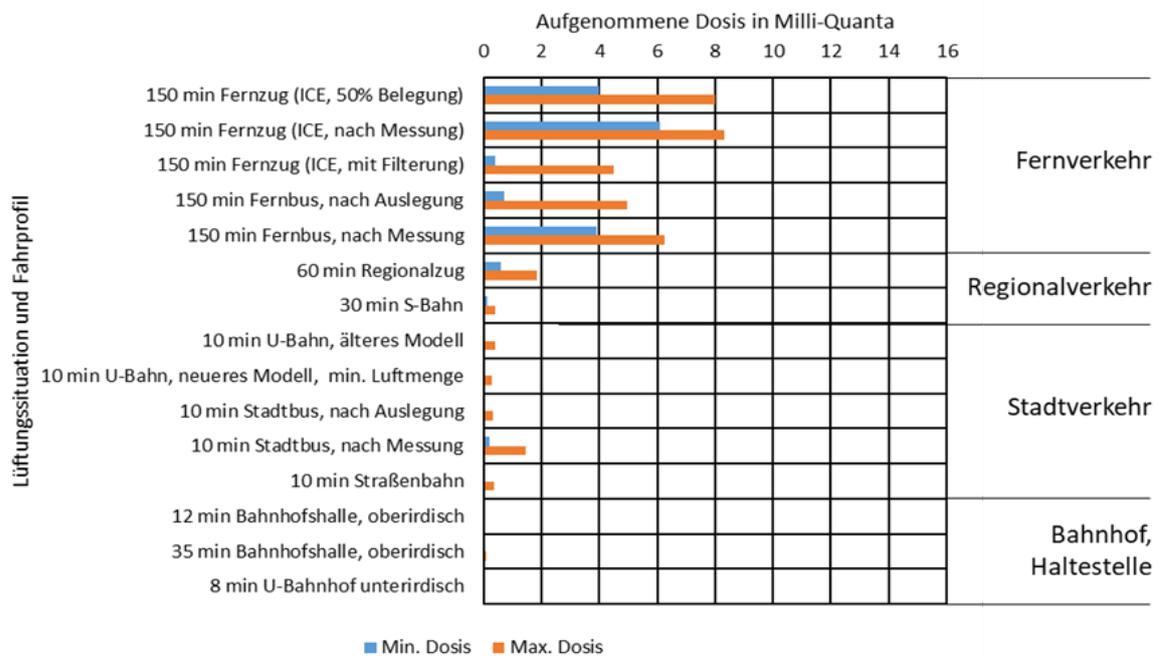


Abbildung 1: Aufgenommene Dosis in Milli-Quanta bei ausgewählten Szenarien für den Fall "Atmen ohne Maske".  
 Erläuterung zur Legende: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nah am Emittenten.

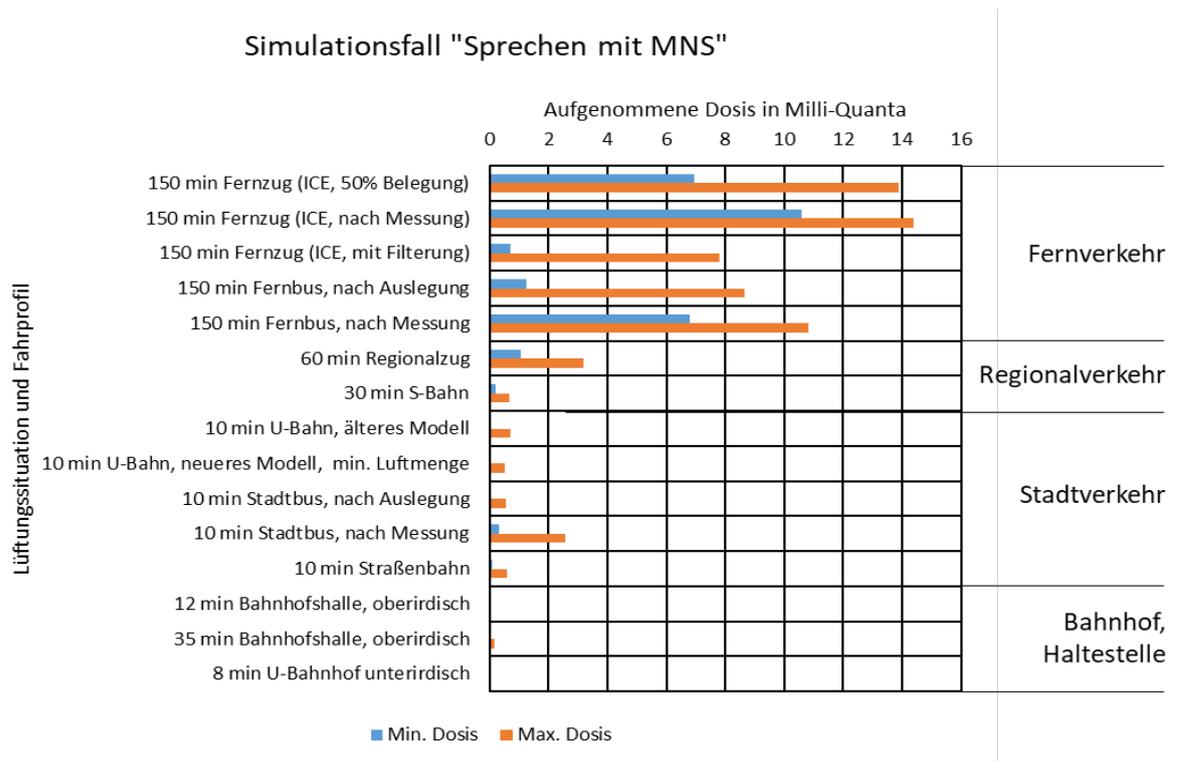


Abbildung 2: Aufgenommene Dosis in Milli-Quanta bei ausgewählten Szenarien für den Fall "Sprechen mit MNS". Erläuterung zur Legende: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nahe am Emittenten.

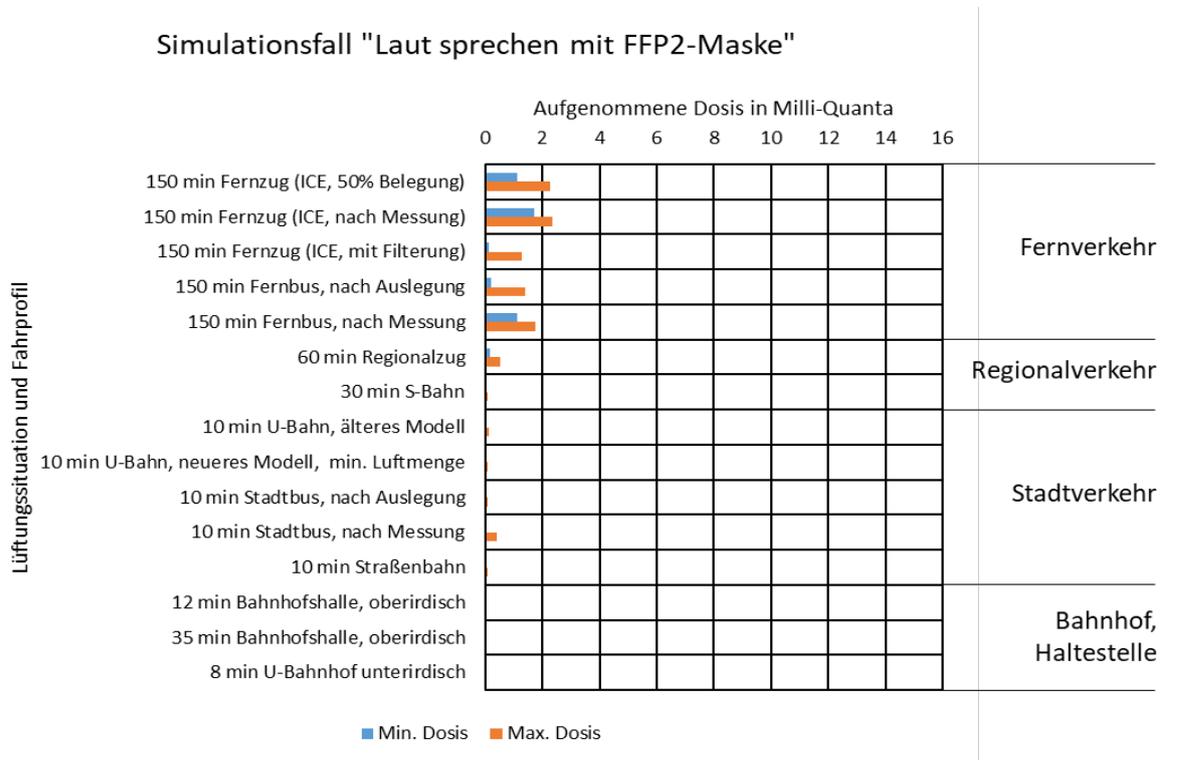


Abbildung 3: Aufgenommene Dosis in Milli-Quanta bei ausgewählten Szenarien für den Fall "Laut Sprechen mit FFP2-Maske". Erläuterung zur Legende: Min./Max. Dosis beschreibt die minimale/maximale Exposition weiter entfernt/nahe am Emittenten.

Eine Analyse des Platzbedarfs für die Einhaltung der Abstandsregeln hat gezeigt, dass diese in der Regel in den Verkehrsmitteln nicht eingehalten werden können. Daher sollte die Maskenpflicht im Inneren der Verkehrsmittel zum Schutz vor Übertragung durch Tröpfchen unbedingt bestehen bleiben.

Das RKI kommt mit seiner Handreichung „ControlCOVID: Strategie und Handreichung zur Entwicklung von Stufenkonzepten bis Frühjahr 2021“ ([10]) mit Stand vom 18.02.2021 zu dem Schluss, dass das individuelle Infektionsrisiko im Nahverkehr höher ist als im Fernverkehr. Die Simulationsergebnisse der vorliegenden Studie hingegen zeigen, dass im Fernverkehr eine höhere Exposition und damit ein höheres theoretisches Infektionsrisiko besteht. Einerseits ist die im Fernverkehrsmittel verbrachte Zeit länger und damit die kumulierte Exposition höher als für eine Person im Nahverkehr. Dennoch besteht im Nahverkehr aufgrund der höheren Anzahl an Personenkontakten eine erhöhte Wahrscheinlichkeit gegenüber dem Fernverkehr, infizierten Personen zu begegnen sowie einer potenziell höheren Personendichte. Ob die Risikofaktoren Aufenthaltsdauer (Fernverkehr) oder Anzahl der Kontakte (Nahverkehr) schwerer wiegen, kann auf Basis der vorhandenen und publizierten Daten nicht abschließend quantifiziert werden.

Für die Umsetzung der wichtigsten Maßnahmen – Maske tragen, leise sprechen, Abstand halten – werden Vorschläge aufgezeigt, wie die Compliance (dt.: Das Befolgen von Regeln) durch psychologische Maßnahmen erhöht werden kann, wie das Herausstellen der als Eigenschutz verstandenen Wirkung der Maßnahmen sowie regelmäßige Erinnerungen, z. B. durch Piktogramme.

## 4 Messkonzept, Feldmessungen und Handlungsempfehlungen

Die durchgeführten exemplarischen Untersuchungen umfassen die Erstellung eines Messkonzepts für eine stichprobenartige Untersuchung von Innenraumluft in 12 Fahrzeugen und auf 3 Bahnhöfen sowie von Oberflächen in 12 Fahrzeugen (40 Oberflächen) und auf 7 Bahnhöfen (13 Oberflächen) hinsichtlich einer Kontamination mit SARS-CoV-2 und ubiquitär vorkommenden Humanen Adenoviren (HAdV), die Gewinnung von Realdaten (Kohlendioxid-Konzentrationen ( $\text{CO}_2$ )) im Betrieb für die Validierung der Simulation sowie Untersuchungen zur Innenraumluftthygiene, Aerosoldynamik und Lüftungseffizienz in Fahrzeugen des öffentlichen Personenverkehrs. Die experimentellen Untersuchungen dieser Studie wurden überwiegend unter Lockdown-Bedingungen durchgeführt. Der Lockdown ging mit einer stark verringerten Belegung der Fahrzeuge und stationären Einrichtungen einher. Im Untersuchungszeitraum galt für alle Einrichtungen und Fahrzeuge des öffentlichen Personenverkehrs die Pflicht zum Tragen einer Mund-Nasen-Bedeckung bzw. von medizinischen Masken; in Bayern gilt seit dem 18.01.2021 die Pflicht zum Tragen einer FFP2-Maske im öffentlichen Personennahverkehr.

Das entwickelte Messkonzept verfolgt mehrere Ziele. Für die Validierung des bei der Modellierung erstellten zonalen Modells müssen Messdaten in unterschiedlichen Fahrzeugtypen erhoben werden. Zur Validierung werden hier die Kohlendioxid-Konzentration und die geschätzte Belegungsdichte als geeignete Parameter angesehen, denn der Kohlendioxid-Gehalt in der Luft stellt ein gutes Maß für die Anzahl und die Aktivität von Personen in einem Innenraum dar und lässt gleichzeitig Aussagen über die Lüftungseffizienz zu. Die zeitlichen Verläufe der Kohlendioxid-Konzentrationen werden mit direktanzeigenden Messgeräten erfasst. Da die Übertragung von SARS-CoV-2 auch über Aerosolpartikel stattfinden kann, ist das Verhalten von Aerosolpartikel- und Kohlendioxid-Konzentration gemeinsam zu betrachten. Insbesondere gilt es, Erkenntnisse über die Dynamik von Aerosolpartikeln in Fahrzeugen des öffentlichen Personenverkehrs zu gewinnen.

Die Kohlendioxid- und Aerosolpartikelkonzentrationen können ein tatsächliches Infektionsrisiko mit SARS-CoV-2 in Einrichtungen des öffentlichen Personenverkehrs nicht vollständig abbilden. Nur mit einer Beprobung der Innenraumluft und von Oberflächen lässt sich ein Überblick über die tatsächliche Kontamination mit SARS-CoV-2 in den Einrichtungen des öffentlichen Personenverkehrs gewinnen. Bislang liegen zwei Studien zur Kontamination von öffentlichen Verkehrsmitteln aus dem Frühjahr/Sommer 2020 vor. Für die Beprobung werden deshalb Fahrzeuge des schienen- und straßengebundenen öffentlichen Personenverkehrs ausgewählt, welche die unterschiedlichen Verkehrsarten Fern-, Regional-, Nah- und innerstädtischer Verkehr repräsentieren. Bei der Auswahl der Fahrzeuge wurde berücksichtigt, dass diese Typen nicht nur regional eingesetzt werden, sondern deutschlandweit zum Einsatz kommen und dass für die Validierung der Simulation möglichst auf Konstruktionsdaten der Fahrzeughersteller bzw. Angaben der Betreiber zurückgegriffen werden kann. Die Beprobung hinsichtlich der Kohlendioxid-Konzentrationen und der Aerosoldynamik erfolgte im Großraum Braunschweig/Hannover in verschiedenen Fahrzeugtypen des Nah- und Regionalverkehrs.

In den Fahrzeugen und Bahnhöfen wurden Luftkeimsammlungen durchgeführt und von häufig berührten oder mit der Ausatemluft potentiell virenbelasteten Oberflächen Wischproben genommen. Die Proben sind mittels molekularbiologischer Analytik nicht nur auf SARS-CoV-2, sondern auch auf humane Adenoviren (HAdV) geprüft worden. HAdV sind üblicherweise weit verbreitete humanpathogene Viren, sie dienen als Kontrolle für den Erfolg der Probenahme.

Die Beprobung auf eine mögliche Virenkontamination erfolgte in zwei ICE-Zügen der Deutschen Bahn AG (ICE 3 und ICE 4), zwei Triebzügen der Werdenfelsbahn im Regionalverkehr (Talent 2), zwei

S-Bahnen der S-Bahn München (ET-423), zwei U-Bahnen (A-Wagen und C2-Wagen) der Münchner Verkehrsgesellschaft (MVG), einer Straßenbahn (S1 Variobahn) der MVG, einem Fernreisebus (VDL FHD-2) von Flixbus und zwei Stadtbussen (Solobus MAN Lions City, Gelenkbus Mercedes Benz Citaro) der MVG.

Ebenfalls beprobt wurden drei unterschiedliche Bahnhöfe:

- München Hauptbahnhof als Beispiel für einen oberirdischen überdachten Bahnhof,
- S-Bahn-Station München Hbf. als Beispiel für einen unterirdischen Bahnhof mit einem Zentralbahnsteig, zwei Gleisen und zwei Außenbahnsteigen und die
- U-Bahn-Station München Odeonsplatz als Beispiel für einen unterirdischen Bahnhof mit Zentralbahnsteig und zwei außenliegenden Gleisen.

Ergänzt wurde die mikrobiologische Probenahme durch die Aufzeichnung von Klimaparametern (relative Feuchte und Lufttemperatur) sowie der Kohlendioxid- und Aerosolpartikel-Konzentration.

Die Kohlendioxid-Konzentrationen lagen in den Fahrzeugen überwiegend im hygienisch unauffälligen Bereich kleiner 1.000 ppm. Mit Ausnahme des Fernreisebusses kamen nur kurzzeitige Überschreitungen des hygienisch unauffälligen Bereichs vor. Im Fernreisebus auf der Fahrt von München nach Lindau lag die maximale Kohlendioxid-Konzentration bei 1.355 ppm und damit im hygienisch auffälligen Bereich. In Gebäuden werden Kohlendioxid-Konzentrationen zwischen 1.000 ppm und 1.400 ppm als Indikatoren für eine mäßige Innenraumluftqualität angesehen. Es ist anzunehmen, dass sie durch Einstellung der Klimaanlage im Bus oder durch Eingriffe des Fahrers bedingt waren. Von den Fahrzeugfamilien ICE 3 und ICE 4 ist bekannt, dass diese über eine bedarfsgeführte Lüftung verfügen und diese auf einen Maximalwert von ca. 1.580 ppm einregeln. Die Belegung in den Wagen, in denen die Probenahmen durchgeführt wurden, war aber mit max. 20 Personen so gering, dass die Lüftung nur im Grundlastbetrieb lief. Die Kohlendioxid-Konzentration blieb angesichts der geringen Auslastung unter 1.000 ppm. Lediglich bei den Tunnelfahrten und dem erfolgten Schließen der Tunnelklappen stieg die Konzentration auf über 1.200 ppm an.

Die Kohlendioxid-Konzentrationen in den Bahnhöfen lagen zwischen der Kohlendioxid-Konzentration von ca. 410 ppm in der Außenluft und 587 ppm in unterirdischen Bahnhöfen.

Die Luft- und Wischproben wurden mittels RT-qPCR (quantitative Echtzeit-Polymerase-Kettenreaktion) auf SARS-CoV-2 und HAdV untersucht. Bei Proben mit einem positiven PCR-Befund wurde nachfolgend die Vermehrungsfähigkeit der Viren untersucht. Die Ergebnisse der molekularbiologischen Untersuchungen stellen sich wie folgt dar:

- In keiner der Luft- und Wischproben konnte SARS-CoV-2 nachgewiesen werden.
- Sowohl in der Innenraumluft von Fahrzeugen und Bahnhöfen als auch in den Wischproben konnte Genom von häufig vorkommenden HAdV in geringer Menge nachgewiesen werden.
- Die HAdV waren zu einem geringen Teil noch vermehrungsfähig.

Die Ergebnisse der molekularbiologischen Untersuchungen können wie folgt interpretiert werden:

- Aufgrund der geringen Auslastung des öffentlichen Personenverkehrs war die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine infizierte Person im Fahrzeug befindet, sehr gering.
- In den Fahrzeugen waren zum Zeitpunkt der Probenahmen vermutlich keine infizierten Personen unterwegs.
- Die obligatorischen Schutzmaßnahmen, insbesondere die Pflicht zum Tragen einer FFP2-Maske, wirken und führen zu einer deutlichen Verringerung an virushaltigen Aerosolpartikeln in der Luft.

- Ggf. eingeleitete Hygienemaßnahmen der Betreiber wie z. B. häufigere Reinigung von Oberflächen in Fahrzeugen und stationären Einrichtungen zeigen eine Reduzierung der Virenlast.

Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass zum Zeitpunkt der Untersuchung an den Orten, an denen die Probenahmen erfolgten, das Risiko einer SARS-CoV-2-Infektion bei Einhaltung der Schutz- und Hygienemaßnahmen im öffentlichen Personenverkehr nicht gegeben war.

Untersuchungen zu Innenraumlufthygiene, Aerosoldynamik und Lüftungseffizienz fanden im Großraum Braunschweig und Hannover statt. Die Untersuchungen zur Innenraumlufthygiene und zur Aerosoldynamik in verschiedenen Fahrzeugen (Stadtbus, Regiobus, Straßenbahn, Stadtbahn, Regionalbahn) konnten zeigen, dass die aus hygienischen Gründen von der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden (jetzt Ausschuss für Innenraumrichtwerte AIR) empfohlene Maximalkonzentration von weniger als 1.000 ppm im Durchschnitt eingehalten werden konnte. Auch wenn die Schwelle kurzfristig überschritten wurde, lagen die Werte immer noch deutlich unterhalb von 2.000 ppm; ab 2.000 ppm wird eine Kohlendioxid-Konzentration als hygienisch inakzeptabel eingestuft [2].

Die Partikelkonzentration variierte im Wesentlichen mit der Bewegung der Passagiere (Ein- und Aussteigen) und mit der Anwesenheit externer Quellen (z. B. Eintrag durch geöffnete Türen und Raucherbereiche auf Bahnsteigen, Baustellen). Die Partikelkonzentrationen in den Fahrgastbereichen waren nicht durch die Atmung der Passagiere bedingt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Lüftungssysteme in den untersuchten Fahrzeugen effizient arbeiten. Exhalierendes Kohlendioxid und Partikel werden innerhalb kurzer Zeit aus der Raumluft entfernt. Analog mindert dies auch die Konzentration von Bioaerosolen, also z. B. SARS-CoV-2, in den Fahrgastbereichen. Bei gleichzeitiger Einhaltung der Hygieneregeln (Abstand, Maskentragen, Desinfektion) ist daher unter diesen Lüftungsbedingungen nicht von einem erhöhten Infektionsrisiko beim öffentlichen Personentransport gegenüber anderen Innenraumsituationen mit ähnlichen Kohlendioxid-Gehalten auszugehen. Es wird generell empfohlen, unter den gegenwärtigen Bedingungen in den Fahrzeugen vorhandene Lüftungssysteme mit hohem Frischluftanteil zu betreiben, um das Ansteckungsrisiko weiter zu senken.

Die zu ergreifenden Maßnahmen müssen geeignet sein, Infektionen im Nahbereich kleiner 1,5 m, Infektionen durch Aerosolpartikel und ggf. Infektionen durch die Berührung kontaminierter Oberflächen zu verhindern. Zu den Maßnahmen, die Infektionen im Nahbereich verhindern können, zählen vergrößerte Sitzabstände in geschlossenen oder schlecht durchlüfteten Wartebereichen und die Vermeidung einer Pulkbildung durch die Verteilung der Passagiere beim Zu- und Aussteigen auf die gesamte Zuglänge.

Für die Reisenden ist nicht erkennbar, ob sich eine infizierte Person unter den Fahrgästen befindet. Deshalb kann derzeit im öffentlichen Personenverkehr auf persönliche Schutzmaßnahmen nicht verzichtet werden. Infektionen durch virushaltige Aerosole in den Fahrzeugen können durch das Tragen gutschützender FFP2-Masken in Verbindung mit einer verringerten Lautstärke bei der Kommunikation weitgehend vermieden werden. Diese Maßnahme ist den rein technischen Lösungen überlegen. Technische Maßnahmen wie die Filterung oder die Behandlung (z. B. durch UV-C-Bestrahlung) des Umluftanteils zur Inaktivierung von Viren reduzieren das Infektionsrisiko insbesondere für die Passagiere, die in einem größeren Abstand von der infizierten Person sitzen.

Da das Tragen von FFP2-Masken auf Dauer belastend sein kann, empfiehlt es sich, den Passagieren im Fernverkehr an Haltepunkten mit einer längeren Aufenthaltsdauer Maskenpausen auf dem Bahnsteig zu ermöglichen, sofern der Mindestabstand von 1,5 m eingehalten werden kann. Diese Maskenpausen

könnten über das Zuginformationssystem oder die DB-Navigator-App signalisiert werden. Werden Maskenpausen angeboten, so muss die Wahrung des Mindestabstands auf den Bahnsteigen sichergestellt werden. Die Umsetzung wäre ähnlich der früher genutzten „Raucherpause“ auf dem Bahnsteig.

Die Entfernung oder Inaktivierung von virushaltigen Tröpfchen auf Oberflächen wird durch kurze Reinigungsintervalle und eine gründliche Reinigung der gesamten (Bedien-)Flächen erreicht. Die Maßnahmen werden von den Betreibern inzwischen umgesetzt. Die Verwendung antiviraler Oberflächen oder Oberflächenbeschichtungen stellt eine längerfristige Perspektive dar, um ein Infektionsrisiko durch den Kontakt mit kontaminierten Flächen zu verringern. Derzeit sind solche Materialien nicht verfügbar.

Von organisatorischer Seite könnten längere Standzeiten an den Haltepunkten hilfreich sein. Dies kann dazu beitragen, die Personenansammlungen vor den Türen zu entzerren. Im Bereich von Umsteigebahnhöfen fahren Züge häufig fast zeitgleich ein und aus, um den Passagieren einen Linienwechsel ohne Zeitverlust zu ermöglichen. Dies ist charakteristisch für einen integralen Taktverkehr, wie er im Rahmen des Deutschlandtakts propagiert wird. Diese Situation führt zwangsläufig zu einer Ansammlung vieler Menschen auf dem Bahnsteig und, sofern vorhanden, auf den zu- und abführenden Fahrtreppen. Die Einhaltung eines pandemiebedingten Mindestabstands ist unter diesen speziellen Bedingungen besonders schwierig. Ein Zeitversatz von wenigen Minuten könnte die Situation zumindest an den am stärksten frequentierten Zu- und Abgängen zwar einerseits entschärfen. Andererseits sind derartige neue Randbedingungen bisher im komplexen Prozess der Fahrplanung vermutlich nur schwer zu berücksichtigen. Um die prinzipielle Umsetzbarkeit und auch die tatsächliche Wirksamkeit dieser Maßnahme abschätzen zu können, sind aber weiterführende Abschätzungen und Untersuchungen nötig.

Es werden weiterhin Lösungen benötigt, die dazu beitragen, das Infektionsrisiko in den Einrichtungen und Fahrzeugen des öffentlichen Personenverkehrs zu minimieren. Neben technischen und organisatorischen Maßnahmen zur Vermeidung einer Pulkbildung und zur Lenkung der Passagierströme sollten die Wirksamkeit und die Dauerhaftigkeit antiviral wirkender Oberflächen oder von Oberflächenbeschichtungen untersucht werden. Ein Baustein der technischen und organisatorischen Maßnahmen kann die Ergänzung von Zuginformationssystemen (in und an den Wagen, am Bahnsteig und per App) um Anzeigen zur Auslastung in den einzelnen Wagen sein.

Inwieweit auf Oberflächen abgesetzte, ggf. virushaltige Aerosolpartikel wieder in die Luft gelangen können (Resuspendierung) und ob die in diesen aufgewirbelten Partikeln befindlichen Viren noch vermehrungsfähig sind, sollte im Rahmen eines grundlagenorientierten Forschungsvorhabens untersucht werden.

Das wichtigste Element aller Maßnahmen zur Risikominimierung bleibt das menschliche Verhalten. Die Motivation der Passagiere, sich selbst und andere vor einer möglichen Ansteckung zu schützen, muss aufrechterhalten werden. Unterstützend wirken hierfür die Vermittlung der Selbst-Wirksamkeit und eine positive Rückkopplung (Belohnung, Lob) bei regelkonformem Verhalten. Maßnahmen, die pandemieadäquates Verhalten fördern, erleichtern oder unterstützen, tragen auch nach über einem Jahr Pandemie dazu bei, die notwendigen Maßnahmen zum Fremd- und Eigenschutz einzuhalten.

## Quellenverzeichnis

- [1] **Davies, A.,** Thompson, K.-A., Giri, K., Kafatos, G. et al. (2013): *Testing the efficacy of homemade masks: would they protect in an influenza pandemic?* In: Disaster medicine and public health preparedness **7**(4), S. 413–418. doi:[10.1017/dmp.2013.43](https://doi.org/10.1017/dmp.2013.43).
- [2] (2008): *Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumluftthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden.* In: Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz **51**(11), S. 1358–1369. doi:[10.1007/s00103-008-0707-2](https://doi.org/10.1007/s00103-008-0707-2).
- [3] **Fears, A.C.,** Klimstra, W.B., Duprex, P., Hartman, A. et al., (2020): *Persistence of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 in Aerosol Suspensions.* In: Emerging infectious diseases **26**(9), S. 2168–2171. doi:[10.3201/eid2609.201806](https://doi.org/10.3201/eid2609.201806).
- [4] **Hirose, R.,** Ikegaya, H., Naito, Y., Watanabe, N. et al., (2020): *Survival of SARS-CoV-2 and influenza virus on the human skin: Importance of hand hygiene in COVID-19.* In: Clinical Infectious Disease. doi:[10.1093/cid/ciaa1517](https://doi.org/10.1093/cid/ciaa1517).
- [5] **Riddell, S.,** Goldie, S., Hill, A., Eagles, D. et al., (2020): *The effect of temperature on persistence of SARS-CoV-2 on common surfaces.* In: Virol J **17**(1), S. 145. doi:[10.1186/s12985-020-01418-7](https://doi.org/10.1186/s12985-020-01418-7).
- [6] **Norrefeldt, V.,** Grün, G., and Sedlbauer, K., (2012): *VEPZO – Velocity propagating zonal model for the estimation of the airflow pattern and temperature distribution in a confined space.* In: Building and Environment **48**, S. 83–194. doi:[10.1016/j.buildenv.2011.09.007](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.09.007).
- [7] **Buonanno, G.,** Morawska, L., and Stabile, L., (2020): *Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: Prospective and retrospective applications.* In: Environment International **145**, S. 106–112. doi:[10.1016/j.envint.2020.106112](https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106112).
- [8] **Buonanno, G.,** Stabile, L., and Morawska, L., (2020): *Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment.* In: Environment International **141**. doi:[10.1016/j.envint.2020.105794](https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105794).
- [9] **Jimenez, J.L.,** (2020): *SARS-CoV-2 aerosol transmission estimator.* Dept. of Chem. and CIRES, Univ. of Colorado-Boulder. [Online], [Zugriff am: 2021-02-26], Verfügbar unter: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/16K1OQkLD4BjgBdO8ePj6ytf-RpPMU6aXFg3PrIQBbQ/edit#gid=519189277>.
- [10] **Robert Koch-Institut:** *ControlCOVID - Strategie und Handreichung zur Entwicklung von Stufenkonzepten bis Frühjahr 2021.* [Online], [Zugriff am: 2021-02-24], Verfügbar unter: [https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges\\_Coronavirus/Downloads/Stufenplan.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Downloads/Stufenplan.pdf?__blob=publicationFile).